



Quelle énergie pour la Bretagne ?

L'éolien

Yves Mervin

Cercle Pierre Landais

Association pour le développement local et régional

Institutions et politiques publiques

Site internet : united-citizens.eu (en cours de redéveloppement)

Contact : adlr56@free.fr



L'Union est fondée sur les valeurs de respect de la dignité humaine, de liberté, de démocratie, d'égalité, de l'État de droit, ainsi que de respect des droits de l'homme, y compris des droits des personnes appartenant à des minorités. Ces valeurs sont communes aux États membres dans une société caractérisée par le pluralisme, la non-discrimination, la tolérance, la justice, la solidarité et l'égalité entre les femmes et les hommes.

Article 2 du traité de l'Union européenne (valeurs de l'Union)

Illustration de couverture ¹

¹ IAEA (<https://www.iaea.org/sites/default/files/uranium-1140x640.jpg>)

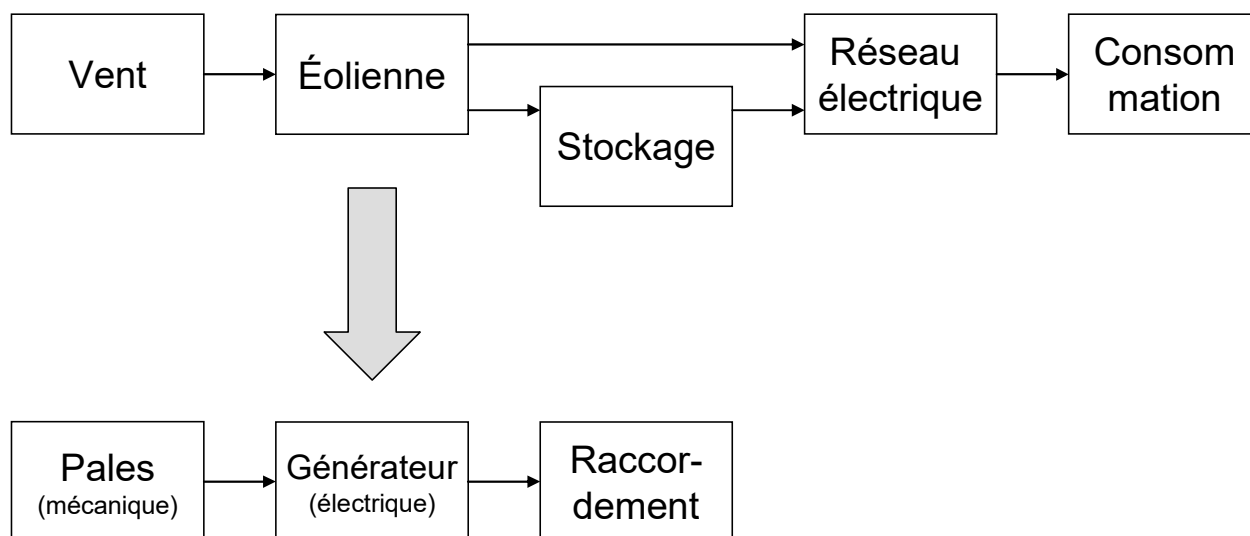
Sommaire

Sommaire	3
Présentation	4
Le vent.....	5
L'éolienne	19
Les parcs éoliens	39
L'industrie	53
Le territoire.....	55
Le logement.....	57
La finance	58
La sécurité	61
La santé	62
Le travail et l'emploi	63
L'environnement	64
La biodiversité.....	69
L'agriculture.....	77
La pêche	78
La défense	79
Le droit et la réglementation	82
La justice	83
Annexes A – L'éolien alternatif.....	84
Sommaire long	92

Présentation

Ce document traite du potentiel de l'énergie éolienne en Bretagne pour les décennies à venir.

Le vent, soit le déplacement d'une masse d'air à une vitesse plus moins grande et dans une direction donnée est porteur d'énergie cinétique qui peut être utilisée directement comme moyen de propulsion sur un navire à voile ou un char à voile. L'énergie cinétique du vent est aussi transformée traditionnellement en énergie mécanique dans un moulin à vent (pour la fabrication de farine par broyage des céréales...), pour puiser de l'eau dans un puits dans une noria... L'utilisation principale actuelle de l'énergie éolienne consiste aujourd'hui à produire de l'électricité par une éolienne couplée à un générateur électrique.



La filière éolienne et les principaux composant de l'éolienne

Le vent

Le vent est l'énergie primaire de l'énergie éolienne. Le vent est très variable en vitesse et en direction : à un endroit donné, une carte du vent ou rose des vents mettent en évidence les directions de vents dominants selon sa vitesse horizontale, la composante verticale étant le plus souvent de moindre importance et

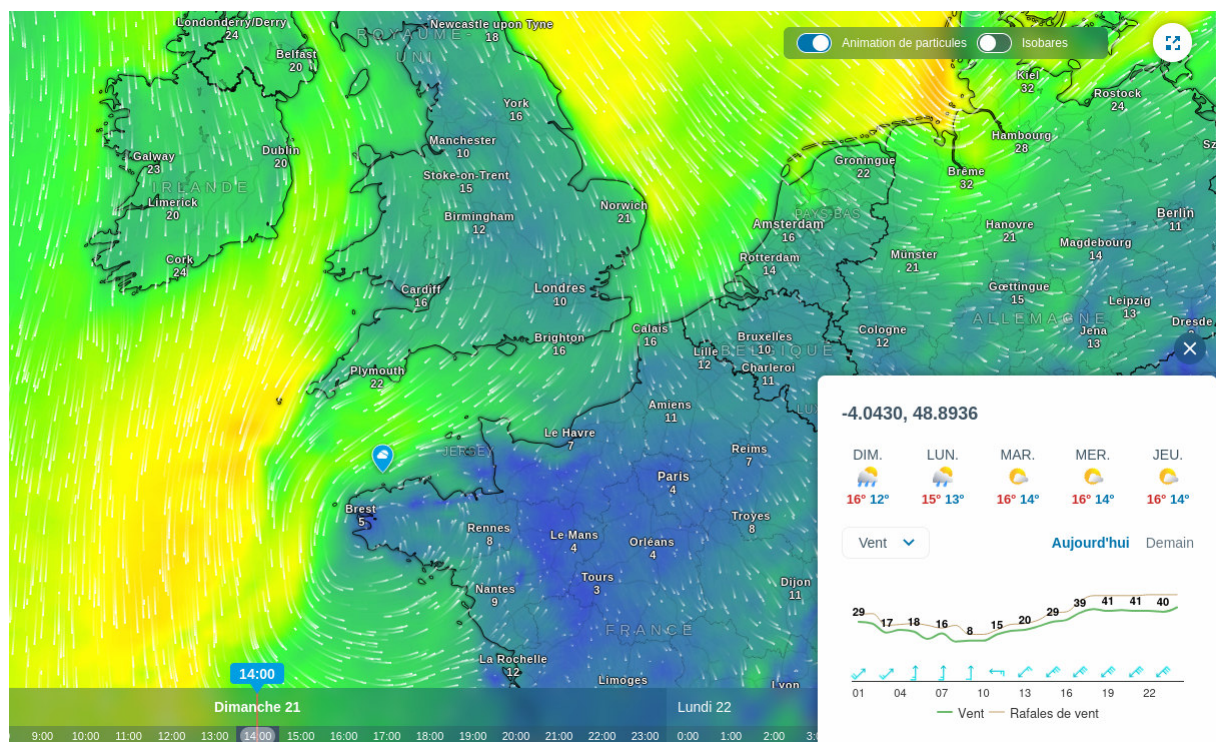
Le vecteur vent

Le vent est un déplacement de masse d'air tridimensionnel qui peut se représenter par un champ volumétrique de vecteurs vitesses, soit une structure d'autant plus complexe à représenter qu'elle est aussi extrêmement variable avec le temps. Du fait de son interaction avec le sol, le vecteur vent présente toutefois une composante horizontale principale variable en direction avec des dominantes dans certaines directions en fonction des saisons, du variation diurne-nocturnes... L'intensité du vents ou sa vitesse varie ensuite selon des lois plus ou moins exactes en fonction de la hauteur.

Ses représentations simplifiées les plus usuelles sont donc des représentations planes horizontales à un endroit donné du territoire, des roses des vents, et des variations en hauteur à partir du sol.

Le vent en temps réel

Il existe de nombreux sites météorologiques qui produisent des cartes de vents en direction et intensité et même des prévisions. Dans la mesure où la Bretagne et l'Irlande seront connectée à partir de 2026 par l'Interceltic connector (<https://www.celticinterconnector.eu/>) il est possible de constater les différences et les ressemblances entre les deux régions.



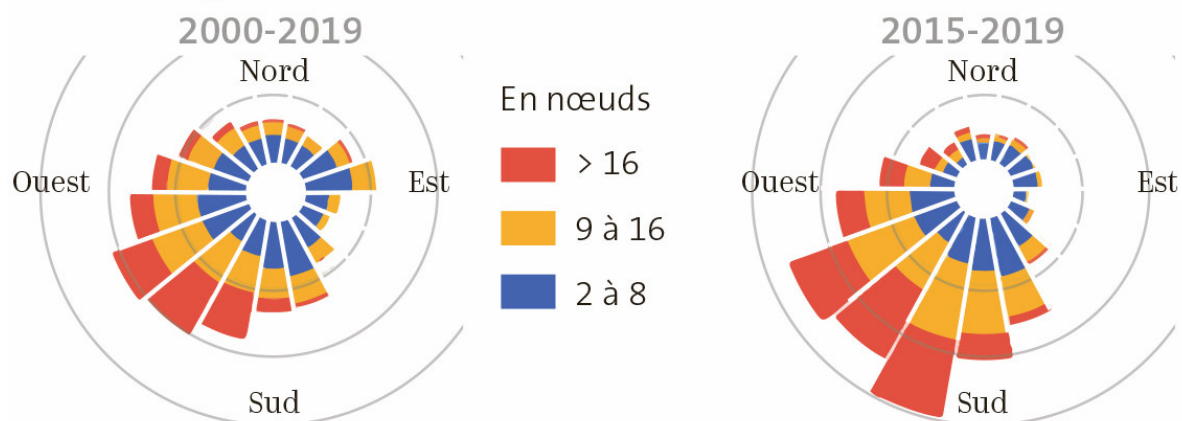
Tameteo.com (<https://www.tameteo.com/cartes-meteorologiques/viento-europ.html>)

Un site de vent mondial : <https://earth.nullschool.net/fr/>

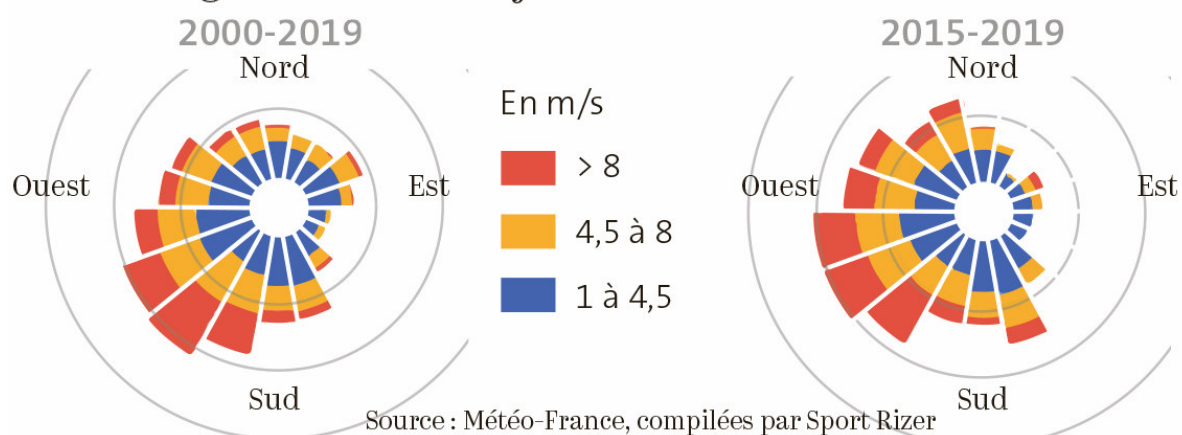
La rose des vents

-> rose des vents illustration

Climatologie des vents en décembre à Brest



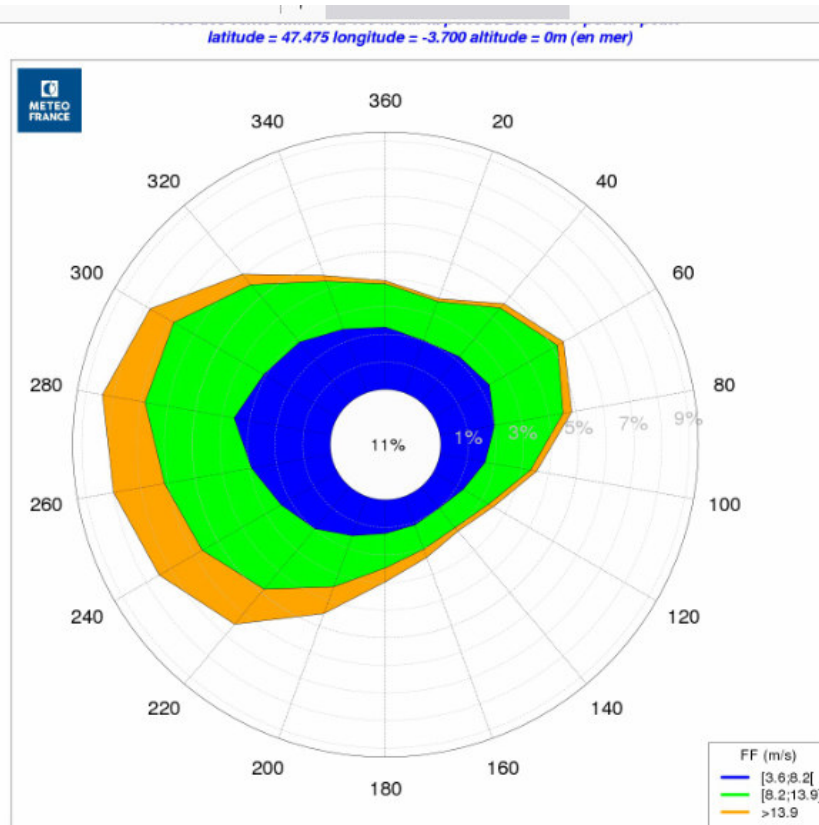
Climatologie des vents en janvier à Brest



Source : Météo-France, compilées par Sport Rizer

<https://cdn-apps.letelegramme.fr/files/dataspot/2020/02/Vents-dominants-Brest-aeroport-2020-02-17.jpg>

Sur de grandes étendues, des cartes de vents moyens établissent à une altitude donnée sur des durées d'observation supérieures à la saisonnalité annuelle. Il est donc possible de déterminer la quantité d'énergie annuelle moyenne qu'une éolienne pourra intercepter à un endroit donné pendant l'année qui vient et pendant sa durée de service.



Edité le 03/03/2020 à 10:35 par METEO-FRANCE DIRSE, 2 Bd Château Double, 13098 AIX-EN-PROVENCE Cédex 2

<https://www.eoliennesenmer.fr/facades-maritimes-en-france/facade-nord-atlantique-manche-ouest/projet-en-bretagne-sud/participation-du-public/vent>

L'altitude

La basse altitude

La rose des vents que l'on voit souvent est une représentation en 2D horizontale (direction + intensité), mais ne tient pas compte de la hauteur. Or, le profil vertical du vent est un facteur essentiel en météorologie, en climatologie, et surtout dans le dimensionnement des éoliennes.

Plus on monte, plus le vent est fort... mais pas de manière linéaire. Il existe effectivement des lois générales qui décrivent comment le vent varie avec la hauteur. Voici les principales.

1. Loi du logarithme (proche du sol)

Pour des altitudes basses (jusqu'à ~100 m), le vent augmente généralement avec la hauteur selon une loi logarithmique :

$$v(z) = v_{\text{ref}} \times (\ln(z / z_0) / \ln(z_{\text{ref}} / z_0))$$

Avec :

- $v(z)$: vitesse du vent à la hauteur z
- v_{ref} : vitesse à une hauteur de référence (souvent 10 m)

- z_0 : rugosité du sol, qui dépend du type de terrain :
 - Mer : $\sim 0,0002$ m
 - Prairie : $\sim 0,03$ m
 - Ville : $\sim 0,8$ à 2 m

Plus la rugosité est élevée, plus le vent met de temps à « s'accélérer » avec l'altitude.

2. Loi de puissance (souvent utilisée dans l'éolien)

Forme simplifiée, pratique, et très utilisée pour l'énergie éolienne :

$$v(z) = v_{\text{ref}} \times (z / z_{\text{ref}})^\alpha$$

où α est l'exposant de Hellmann, typiquement entre 0,1 (mer) et 0,4 (ville dense).

- Valeur standard : 0,14 (terrain plat rural)
- Plus α est grand \rightarrow plus l'augmentation du vent avec la hauteur est rapide

Exemple : si $v_{\text{ref}} = 5$ m/s à 10 m, avec $\alpha = 0,14$, alors à 100 m :

$$v(100) = 5 \times (100/10)^{0,14} \approx 5 \times 1,38 = 6,9 \text{ m/s}$$

\rightarrow Presque +40 % d'augmentation en vitesse \rightarrow soit +150 % de puissance, car :

$$\text{Puissance} \propto v^3$$

3. Données réelles : profil vertical mesuré

Des lidars ou mâts instrumentés mesurent le profil vertical du vent jusqu'à 200–300 m. En général, la variabilité du vent avec la hauteur est plus forte :

- En terrain complexe ou urbain,
- En nuit stable, quand les basses couches sont peu mélangées.

En revanche, les jours de grand soleil, la convection mélange davantage l'air, rendant le vent plus uniforme avec la hauteur.

4. Applications : pourquoi c'est crucial

a) Éoliennes

Les nouvelles éoliennes atteignent 150 m de hauteur d'axe, où les vents sont :

- Plus réguliers,
- Moins turbulents,
- Plus rapides \rightarrow rentabilité accrue

b) Urbanisme

Les effets de couloir (entre immeubles) ou les vents catabatiques (descente froide la nuit) dépendent fortement du profil vertical.

c) Pollution

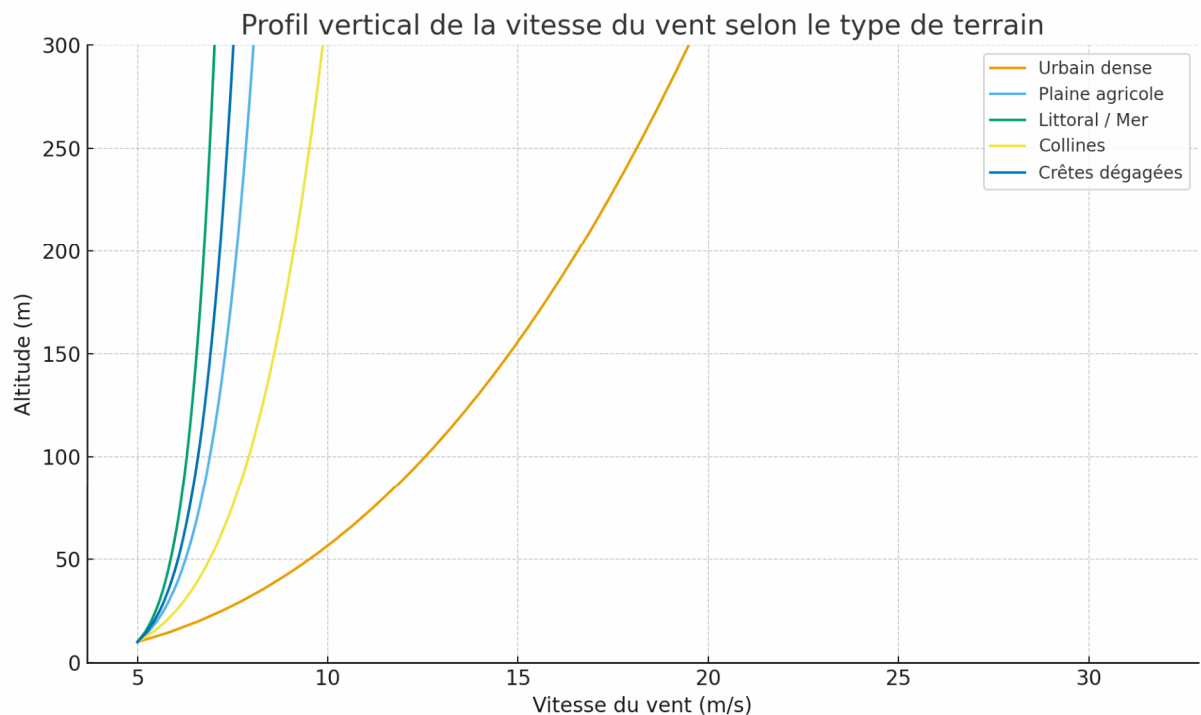
La hauteur de la couche limite atmosphérique détermine le volume d'air de dilution des polluants.

En résumé

- le vent augmente généralement avec la hauteur, mais de façon non linéaire, selon des lois logarithmiques ou puissanciennes.

- Les effets dépendent fortement du type de sol, du moment de la journée, et des conditions atmosphériques.
- Pour les projets techniques (éolien, ventilation, pollution), on utilise souvent des modèles numériques de profil vertical ou des mesures sur site (lidar, mâât).

De façon très schématique :



Ce graphique montre l'évolution de la vitesse du vent en fonction de l'altitude pour différents types de terrains :

- Urbain dense : croissance lente, due à la forte rugosité.
- Plaine agricole : croissance modérée.
- Littoral / Mer : vent plus fort dès les basses altitudes.
- Collines : influence du relief, croissance plus rapide.
- Crêtes dégagées : profil similaire au littoral, mais légèrement plus turbulent.

Ce graphique illustre bien pourquoi les crêtes, littoraux et zones dégagées sont privilégiées pour l'éolien.

La haute altitude

La loi du vent avec la hauteur (logarithmique ou puissance) ne s'applique pas indéfiniment en altitude. Elle est valable seulement dans la basse atmosphère, c'est-à-dire dans la couche limite atmosphérique.

1. Jusqu'où va la loi ?

La couche limite atmosphérique (CLA) est la zone de l'atmosphère influencée directement par la surface terrestre (relief, végétation, rugosité, température du sol, etc.). Elle s'étend généralement :

Heure de la journée	Hauteur typique de la CLA
Nuit (stable)	100–300 m
Journée (instable)	800–2 000 m

La loi de puissance ou logarithmique n'est donc valable que jusqu'à 200–300 m la nuit, ou 1000 m le jour dans de bonnes conditions.

2. Au-dessus de la couche limite : changement de régime

Au-delà de cette couche (vers 800–1 000 m et plus), le vent :

- Est moins influencé par le sol,
- Suit des profils plus lisses, moins dépendants du relief,
- Devient plus rapide, plus stable (moins de turbulence),
- Et est souvent dirigé différemment : il suit plutôt la direction du vent géostrophique (équilibre entre pression et force de Coriolis).

À ces altitudes, le vent peut atteindre des vitesses soutenues et régulières, par exemple :

- 8 à 12 m/s à 800–1 500 m dans certaines régions tempérées,
- Et bien plus dans les courants-jets d'altitude (> 5 000 m, mais inutilisables sauf par ballons ou avions).

3. Pourquoi c'est important : vers l'éolien de haute altitude

Cette idée inspire plusieurs technologies en développement en particulier des Kite power / éoliennes volantes, capables de capter le vent à 300–1 000 m, * Exemples : Makani Power (Google), Kitepower, Ampyx, L'objectif est de capter un vent plus fort et plus constant que dans la couche basse. À 800 m, on peut obtenir un vent :

- Plus constant (moins de baisse de production),
- ~50 à 100 % plus fort qu'à 100 m → donc jusqu'à 3 à 8 fois plus d'énergie.

4. Pas de loi unique au-delà

Au-dessus de 300–500 m, on ne parle plus de la loi de puissance ou log :

- On utilise des modèles atmosphériques complets (type WRF, MERRA, ERA5),
- Ou des profils mesurés par radiosondages, ballons, lidars Doppler, etc.

Ce qui est sûr : le vent est souvent plus fort et stable vers 800 m, mais la loi simple du sol ne s'applique plus : le régime aérologique est différent.

En résumé

Hauteur	Modèle applicable	Régime du vent
0 – 100 m	Logarithmique ou puissance	Fortement influencé par le sol
100 – 300 m	Loi puissance possible, approximatif	Début de la couche libre
300 – 1 000 m	Lois locales inadaptées	Vent plus fort, plus régulier
> 1 000 m	Vent géostrophique, jets	Très stable, non exploité aujourd'hui

La variabilité

La variabilité temporelle du vent est une dimension fondamentale de l'analyse du vent, notamment pour la production d'énergie éolienne intermittente, la modélisation climatique et la sécurité aérienne. Elle peut être caractérisée mathématiquement, visualisée graphiquement, et traitée statistiquement de plusieurs manières. Voici les principales approches.

1. Courbe temporelle : séries chronologiques

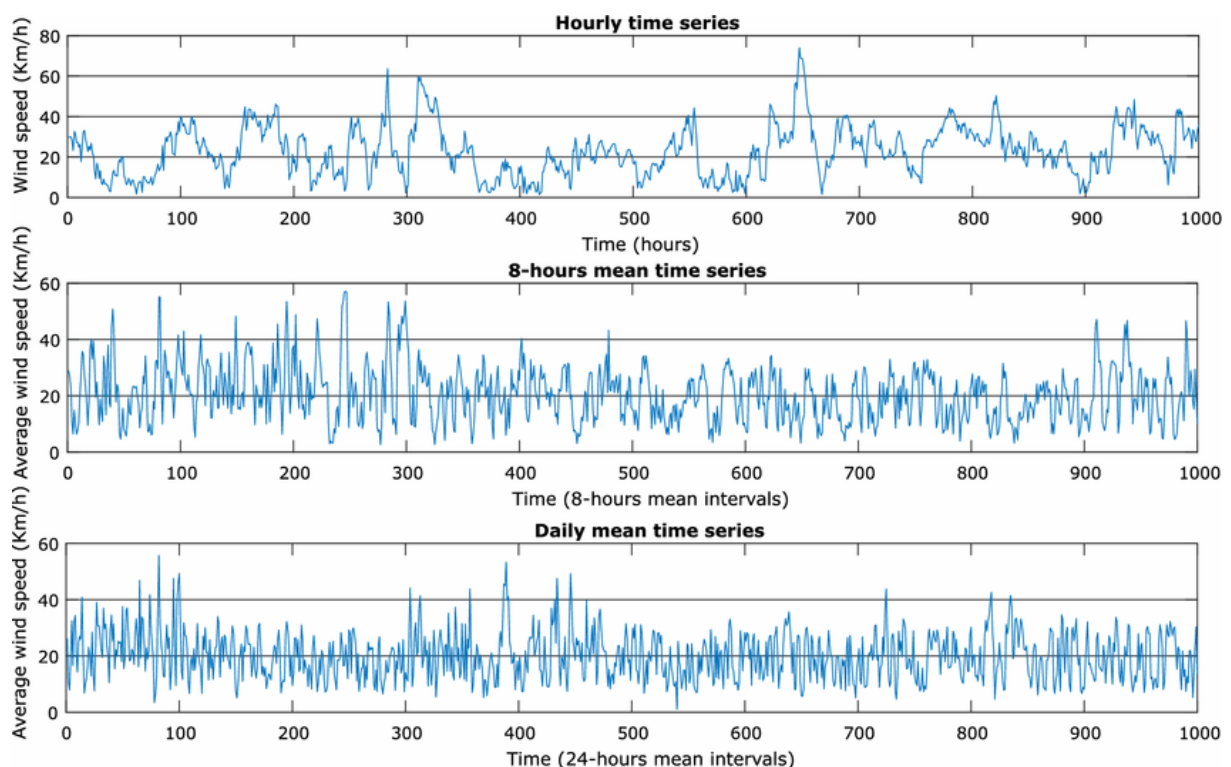
Les données typiques sont :

- Mesures de vent à 1, 10, 30 minutes, parfois à la seconde.
- Valeurs : vitesse du vent, parfois direction.

Graphique : une courbe simple $v(t)$ donne déjà beaucoup d'informations :

- Variabilité diurne (jour/nuit),
- Rafales,
- Calmes,
- Saisonnalité.

Exemple² :



D'après : *A permutation entropy-based EMD-ANN forecasting ensemble approach for wind speed prediction* (https://www.researchgate.net/figure/Hourly-wind-speed-time-series-top-8-h-mean-time-series-middle-and-24-h-mean-time_fig2_342609343)

2. Transformée de Fourier (FFT) : spectre de fréquences

Permet de transformer le signal temporel $v(t)$ en composantes fréquentielles :

$$V(f)=F[v(t)]$$

Cela révèle :

Bande de fréquence	Signification
Très basse (0.001 Hz)	Cycles saisonniers ou météorologiques
Moyenne (0.01–0.1 Hz)	Oscillations journalières, thermiques
Haute (>1 Hz)	Rafales, turbulence

² https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Wind_speed_time_series.png

Utilisé pour :

- Modèles éoliens réalistes,
- Prévion par intelligence artificielle,
- Optimisation des batteries ou backup.

3. Direction du vent : variation angulaire

a) À direction fixe (ex. nord)

On peut projeter $v(t)$ uniquement dans cette direction et analyser l'évolution.

b) En « tournant » : vent vectoriel

On traite la vitesse vectorielle du vent :

$$\mathbf{v}^{\rightarrow}(t) = (\mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)) \text{ ou } (\mathbf{v}(t), \theta(t))$$

- Rafales tournantes, tourbillons : analysables par spectre directionnel.
- Utilisé pour les modèles de charge sur les pales, ou bruit aérodynamique.

4. Statistiques temporelles

Pour des données longues :

- Moyennes par heure, jour, mois, année
- Écart-type, kurtosis, autocorrélation
- Modèles : ARIMA, GARCH, ou modèles de Markov

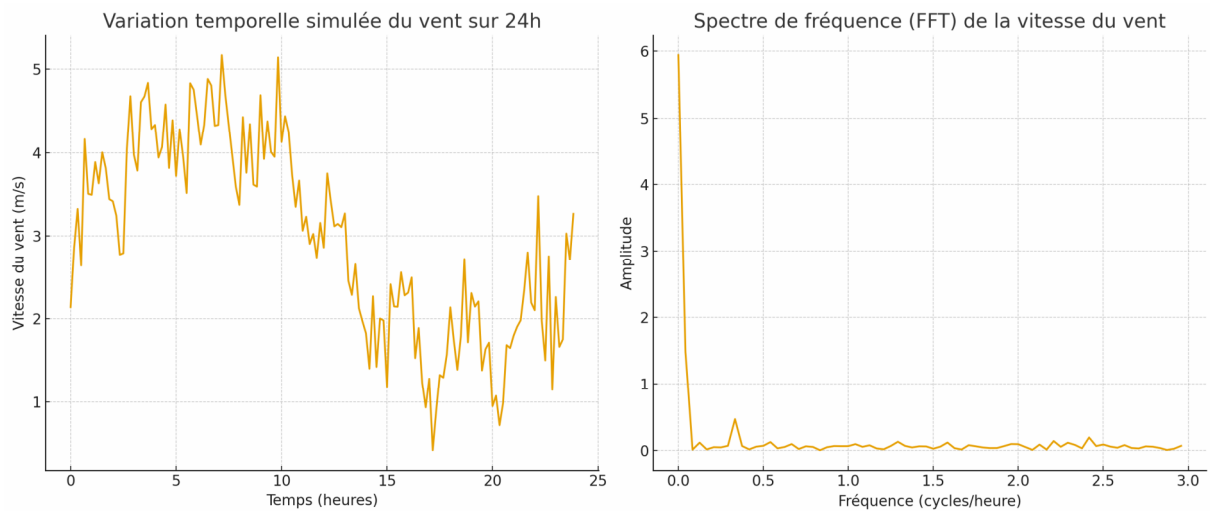
5. Visualisations complémentaires

- Spectrogramme : spectre de fréquences en fonction du temps.
- Windrose dynamique : histogramme directionnel animé.
- Diagrammes phase-fréquence (ex. Hilbert).

En résumé

Outil	Ce qu'il révèle
Courbe temporelle $v(t)$	Variations à court et long terme
FFT / Spectre	Cycles dominants, rafales, turbulence
Direction vectorielle	Rotation, cisaillements, comportement 3D
Statistiques / ARIMA	Prévion, modélisation de la variabilité

Représentation graphique :



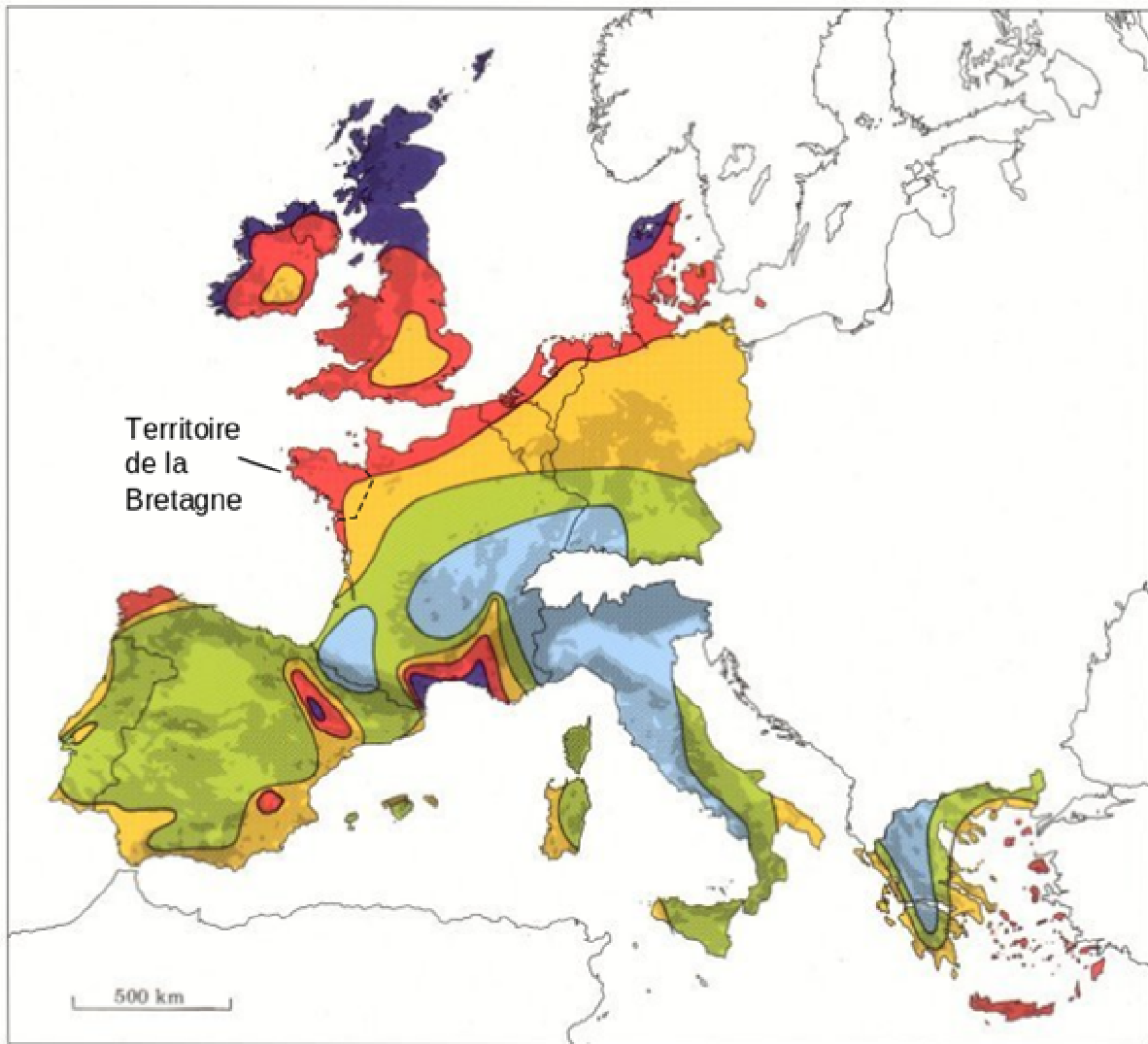
Courbe temporelle (à gauche) : une simulation de la vitesse du vent sur 24 heures, incluant un cycle jour/nuit, des rafales périodiques et du bruit aléatoire.

Spectre de Fourier (à droite) : il met en évidence les fréquences dominantes, notamment : un pic à 1 cycle/24 h (cycle diurne), un autre vers 1 cycle/3 h (rafales régulières) et du bruit réparti sur d'autres fréquences.

Les statistiques du vent

Ces statistiques de vent ci-dessous distinguent les terrains abrités (sheltered terrain), plaine ouverte (open plain), sur le littoral (at a sea coast), mer ouverte (open sea) et en collines et crêtes (hills and ridges).

Elles donnent la vitesse du vent pour l'altitude de 50 m : on peut en déduire par les lois logarithmiques ou puissancielles de vitesses de vent jusque 300 m. Ainsi que la densité de puissance superficielle.

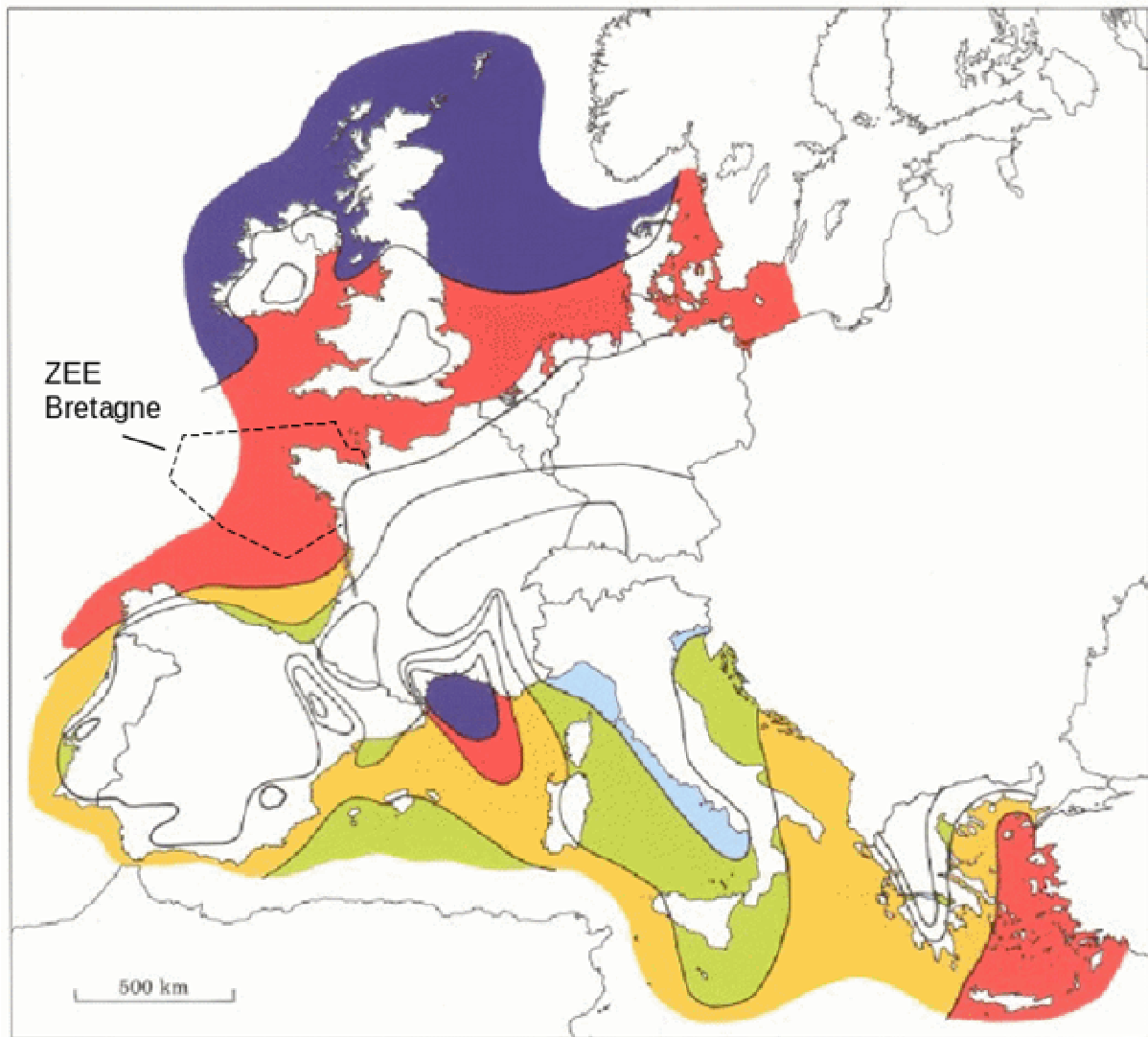


Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
Dark Blue	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Yellow	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Light Green	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Figure 1 - Carte des vents terrestres moyens en Europe

La Bretagne bénéficie d'un potentiel de vent plutôt favorable sur son territoire. L'Irlande, l'Ecosse et le Danemark bénéficient toutefois de vents significativement plus favorables : de 400 à plus de 700 W/m² selon la colorisation de la carte ci-dessus. Il sera prudent de ne pas transposer les performances de ces pays à la Bretagne !

Les statistiques de vent ci-dessous établissent la vitesse moyenne du vent (m/s) et la densité surfacique (W/m²) à différentes hauteurs : 10, 25, 50, 100 et 200 m en pleine mer à au moins 10 km de la côte.



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights										
	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
Dark Purple	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Orange	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Yellow	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Figure 2 - Carte des vents marins moyens en Europe³

La Bretagne bénéficie d'un potentiel de vent plutôt favorable dans sa zone exclusive économique, mais comme pour les vents terrestres, assez significativement moins que l'Irlande, et l'Ecosse et le Danemark.

³ A partir de cette carte, on peut faire un calcul sommaire de la quantité d'énergie annuelle potentiellement récupérable sur le territoire breton et sa zone exclusive économique : $900 W/m^2 \times 250000 km^2 \times 365 \times 24 \text{ heures} =$ soit environ 16 millions de fois l'énergie annuelle consommée par la Bretagne (115 TWh) ! Une énergie considérable : il ne reste plus qu'à construire l'éolienne capable de récupérer cette énergie...

La durabilité

Le vent est-il durable ? Ce n'est pas sûr. Le niveau de vent tendrait à faiblir sur le long terme au-dessus des surfaces terrestres ce qui s'observe en Europe du nord et en Amérique du nord. Les prévisions du GIEC abondent dans ce sens. **De l'ordre de 5 à 10 sur trois décennies**... ce qui n'est pas anodin et ce qui est d'ores et déjà perceptible sur le niveau de production d'énergie éolienne nettement en baisse en 2021⁴. Le choix de la filière éolienne doit donc d'abord considérer la prévision de disponibilité de cette énergie primaire.

1. Le vent devient-il plus durable, ou s'accroît-il avec le réchauffement ? Le vent n'augmente pas de manière systématique. Au contraire, des tendances globales montrent plutôt une diminution générale (voire une stagnation) de la vitesse du vent, notamment dans les zones terrestres :

Le phénomène de « global terrestrial stilling » indique une baisse des vents près de la surface (-0,14 m/s par décennie, soit 5 à 15 % en 50 ans), principalement dans les zones de latitudes moyennes. Cette tendance serait due à un mélange de modifications de la circulation atmosphérique et à une rugosité croissante du sol (urbanisation, végétation...) ([Wikipédia][1]).

Des recherches plus récentes confirment une atténuation estivale du vent (jusqu'à -15 %) dans les latitudes moyennes, liée au réchauffement continental ([arXiv][2]).

Aux échelles globales, certains scénarios climatiques prévoient une baisse de la vitesse moyenne du vent de l'ordre de 10 % d'ici 2100, avec un impact plus marqué dans l'hémisphère nord ([Swiss Re][3], [WIRED][4]).

2. Paradoxes et exceptions

Étude régionale au Moyen-Orient : alors que les vents de surface pourraient s'intensifier (jusqu'à +0,7 m/s), ceux à 150 m (hauteur d'éoliennes) sont projetés en baisse jusqu'à -1,0 m/s, compromettant la production éolienne malgré une atmosphère plus active ([Phys.org][5], [BFHU][6]).

Mer du Nord (Europe du Nord) : entre 1995–2014 et 2031–2050, la vitesse moyenne du vent pourrait légèrement diminuer (<-7 %) en été, tout en restant stable annuellement ([wes.copernicus.org][7]).

Étude GLOBAL : certains modèles indiquent un potentiel éolien offshore accru (jusqu'à +26 % en Europe) à horizon 2100, selon le scénario de réchauffement, mais ces projections restent incertaines ([Le Guardian][8]).

3. Des phénomènes d'anomalie saisonnière : les « wind droughts »

Le changement climatique pourrait allonger les périodes de vents faibles, appelées « sécheresse éolienne » :

- Une étude récente estime que ces périodes pourraient être 15 % plus longues d'ici la fin du siècle en zones tempérées de l'hémisphère nord ([PréventionWeb][9]).
- Durant les vagues de chaleur, la disponibilité du vent chute fortement (-30 à -50 %), jusqu'à -60 % des terres affectées actuellement, voire plus ([Nature][10]).

⁴ Rapport *Vents faibles* du programme satellitaire Copernicus l'Union européenne.

4. Durabilité et perspective

- Considérer le paysage global : les modèles ne suggèrent pas que le réchauffement génère un « vent durable ». Il est même plus probable que le potentiel éolien soit affecté négativement dans de nombreuses régions.
- Nécessité d'anticiper les risques climatiques : pour les projets, il devient crucial d'inclure dans les modèles les tendances climatiques futures, les sécheresses éoliennes, les seasons shifts, etc.

En résumé

Dimension	Observation / Tendence
Vitesse moyenne du vent	Tendance à la baisse dans les zones terrestres
Hauteur de turbine (jet moyen)	Baisse malgré une hausse souvent en surface
Variabilité temporelle	Sécheresses éoliennes plus fréquentes et longues
Zones géographiques / océans	Exceptions possibles offshore ou hautes latitudes
Climat global	Pas de « vent durable » généralisé par réchauffement

Voir également les données de Copernicus ou du rapport ESOTC sur ces aspects⁵.

Sources :

[1]: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_terrestrial_stilling "Global terrestrial stilling"

[2]: <https://arxiv.org/abs/2405.20302> "Amplified Summer Wind Stilling and Land Warming Compound Energy Risks in Northern Midlatitudes"

[3]: <https://www.swissre.com/institute/research/topics-and-risk-dialogues/climate-and-natural-catastrophe-risk/climate-change-wind-power.html> "Climate Change and Wind Power: The Winds of Change"

[4]: <https://www.wired.com/story/climate-change-could-take-the-air-out-of-wind-farms> "Climate Change Could Take the Air Out of Wind Farms"

[5]: <https://phys.org/news/2025-05-climate-slashes-power-potential.html> "Climate change slashes wind power potential, new ..."

[6]: <https://www.bfhu.org/2025/05/24/climate-change-slashes-wind-power-potential/> "Climate Change Slashes Wind Power Potential, New ..."

[7]: <https://wes.copernicus.org/articles/7/2373/2022/> "Current and future wind energy resources in the North Sea ..."

[8]: <https://www.theguardian.com/news/article/2024/sep/05/global-heating-could-raise-potential-for-offshore-wind-power-study-says> "Global heating could raise potential for offshore wind power, study says"

[9]: <https://www.preventionweb.net/news/climate-change-could-make-droughts-wind-power-15-longer-study-says> "Climate change could make 'droughts' for wind power 15% ..."

[10]: <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02239-8> "Escalating wind power shortages during heatwaves"

⁵ Le Guardian (<https://www.theguardian.com/news/article/2024/sep/05/global-heating-could-raise-potential-for-offshore-wind-power-study-says>), WIRED (<https://www.wired.com/story/climate-change-could-take-the-air-out-of-wind-farms>)

En dépit des incertitudes climatiques et du potentiel de diminution des vents moyens en certains endroits, le développement de l'éolien, et particulièrement offshore, demeure une priorité stratégique à moyen et long terme pour l'Union européenne.

L'éolienne

Les architectures

Les éoliennes transforment le vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. Les éoliennes terrestres sont installées sur un mât fixe et relèvent de deux types principaux :

- les éoliennes à axe horizontal ((HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine) montées sur un mât fixe avec un stator orientable afin de se retrouver face au vent. Sur le stator est monté un rotor que le vent fait tourner : l'axe de ce rotor est horizontal, d'où le nom de cette première catégorie d'éoliennes. Le rotor se caractérise ensuite par la forme et le nombre de pales, un nombre impair, trois pour les grandes éoliennes). Les pales sont ensuite orientables ou non selon leur axe de montage sur le rotor, perpendiculaire à ce rotor.
- les éoliennes à axe vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine), ou à rotor à axe vertical, qui n'ont pas besoin de s'orienter face au vent. Les types courants sont les éoliennes à voile tournante ou à formes de pales élaborées, Fulton, hélicoïdale, Darrieus et Savonius. Elles sont plus simples que les éoliennes à axe horizontal mais présentent des performances moindres que les précédentes.

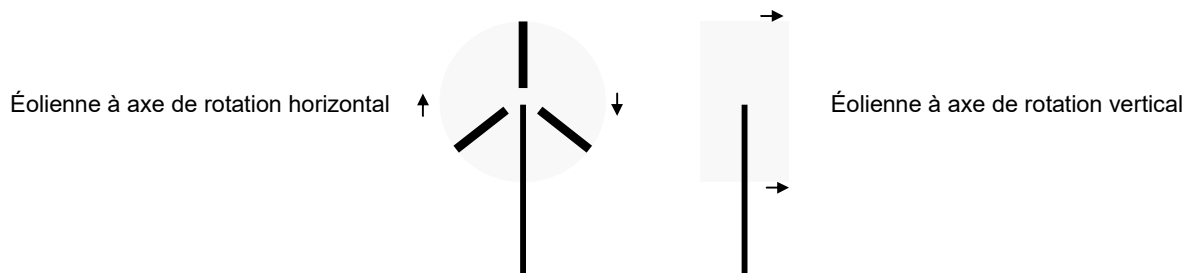


Figure 3 – Concepts mécaniques (à aire de balayage équivalente)

Tableau comparatif des architectures d'éoliennes

Critère	Éolienne à axe horizontal (HAWT)	Éolienne à axe vertical (VAWT)
Orientation par rapport au vent	Doit être orientée face au vent (système de yaw)	Capte le vent quelle que soit sa direction
Efficacité (rendement)	Élevée (35–50 % du Betz, selon le modèle et le site)	Moyenne à faible (15–35 % du Betz)
Taille et puissance typiques	De quelques kW à >20 MW	Surtout <1 MW, rarement plus
Démarrage par vent faible	Bon comportement (surtout si multipliée)	Plus difficile, surtout pour les Darrieus
Complexité mécanique	Plus complexe (orientation, multiplicateur, pales longues)	Plus simple (axe fixe, pas d'orientation nécessaire)
Maintenance	En tête de mât, en hauteur	Au pied de l'axe, plus accessible
Sensibilité aux turbulences	Sensible, nécessite des zones bien dégagées	Moins sensible, adaptée aux milieux perturbés (urbains)
Esthétique / intégration urbaine	Peu adaptée (taille, bruit, espace)	Plus intégrable (formes diverses, tailles réduites)
Niveau sonore	Modéré à élevé selon la taille	Souvent plus silencieuse
Usure et fatigue des matériaux	Maîtrisée, bien modélisée	Problèmes de fatigue sur les axes verticaux, notamment pour les Darrieus
Utilisation typique	Fermes éoliennes terrestres ou offshore	Zones urbaines, hybrides, toitures, pylônes
Coût par kW installé	Meilleur pour des puissances >1	Moins compétitif, mais potentiel

	MW	pour production locale
Niveau de maturité technologique	Très élevé (standard industriel mondial)	Moins mature, encore en phase de niche ou d'expérimentation

Les éoliennes sans pales en vibration sont aussi une autre approche architecturale mentionnée pour mémoire.

Type	Diamètre du rotor	Puissance	Utilisation
<i>Unité</i>	<i>m</i>	<i>kW</i>	
Grandes	35 - 125	350 - 5000	Production d'électricité pour le réseau
Moyennes	12 - 35	36 - 350	Entreprises, exploitation agricole
Petites	2 - 12	1 - 36	Particuliers...
Micro	0,5 - 2	0,1 - 1	

Figure 4 - Catégories d'éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes maritimes

L'éolien planté

Les éoliennes maritimes sont en première approche des éoliennes terrestres dont le mât est planté sur le sous-sol maritime (le plateau continental) de façon à dépasser la surface de l'eau. Les éoliennes plantées sont installées en monopile (mât prolongé jusqu'au sous-sol marin), en « jacket » (des structures métalliques en treillis posées au fonds de la mer), des socles en béton armé posant sur le fonds de la mer et stabilisé par leur poids... L'éolien planté présente des hauteurs de mât plus importantes qu'en terrestre et donc des efforts mécaniques plus contraignants. Il peut être installé à des profondeurs de mer faibles, mais pas en haute mer à des profondeurs importantes.

L'éolien maritime planté diffère de l'éolien terrestre par le fait que le mât de l'éolienne est planté dans le sous-sol marin plutôt que dans le sol terrestre. Ce qui allonge le mât et amplifie les efforts mécaniques sur ce mât. L'éolien maritime planté bénéficie de vent plus favorables qu'en terre, mais son aire d'implantation est limitée à un fonds d'environ 50 mètres sur le plateau continental.

L'éolien flottant

L'éolien maritime flottant recherche au large des fonds plus importants que pour l'éolien planté. Le mât de l'éolienne est alors rendu flottant avec un câble qui assure à la fois l'ancrage de l'éolienne sur le fonds de la mer et la transmission du courant électrique à la terre avec une distance accrue.

Afin de repousser ces limites, l'éolienne est installée sur un corps flottant à la surface de l'eau, un flotteur, soit l'éolien flottant. Le flotteur oscille en fonction de l'état de la mer, ce qui représente une première difficulté pour s'orienter face au vent et ce qui accroît les efforts mécaniques sur la structure. Ancré au fonds de la mer par un câble mécanique et électrique, le flotteur dérive autour de sa position d'ancrage, ce qui accroît les contraintes d'implantation. La conception, la fabrication et la tenue de câble dans la durée représente encore aujourd'hui un point dur technologique restant à démonter. L'éloignement de l'éolien maritime allonge aussi les raccordements au réseau électrique.

L'éolien planté est largement développé aujourd'hui, l'éolien flottant reste à un stade expérimental et cette technologie n'est pas encore démontrée dans la durée.

L'éolien flottant est mentionné pour mémoire dans la mesure où, malgré des projets et des démonstrateurs, la faisabilité technique n'est pas acquise et encore moins la faisabilité économique.

Le fonctionnement

La conversion du vent en énergie mécanique

Les éoliennes jouent un rôle de filtre inertiel qui en font un système vibratoire soumis à la fatigue.

1. Inertie du rotor et lissage

Le rotor (pales + moyeu) est une masse tournante importante (plusieurs centaines de tonnes pour les grandes turbines). Cette inertie agit comme un volant d'inertie, ce qui lisse la variabilité du vent à très court terme (secondes → minutes) et réduit les fluctuations transmises à la génératrice et au réseau. Mais elle ne supprime pas la variabilité à plus long terme (rafales, cycles diurnes, fronts météo).

2. Vibrations et fatigue

Les éoliennes sont soumises à plusieurs sources de vibrations :

1. Aérodynamiques : turbulences du vent, cisaillement vertical (vent plus fort en haut qu'en bas), effets de sillage, passage des pales devant le mât (effet de masque → vibration périodique).

2. Mécaniques : déséquilibres de masse dans le rotor, jeux dans les engrenages, vibrations de torsion dans l'arbre et le multiplicateur (si présent).

3. Structurales : modes propres de flexion des pales, du mât, de la nacelle, risque d'amplification résonante si une fréquence excitatrice (ex. rafale répétée, harmoniques de rotation) coïncide avec un mode propre.

3. Comment minimise-t-on ces vibrations ? les constructeurs intègrent une analyse vibratoire et de fatigue dès la conception :

- Évitement des résonances : les fréquences naturelles (flexion du mât, des pales) sont choisies de manière à ne pas coïncider avec la fréquence de passage des pales (1P, 3P...), les harmoniques du multiplicateur ou de la génératrice.
- Contrôle actif du pas (pitch control) : ajuste en temps réel l'angle de la pale pour réduire la charge aérodynamique et éviter les pics de couple.
- Amortisseurs passifs et actifs : dampers dans les pales et le mât pour absorber l'énergie vibratoire. Dans les mâts offshore, on installe parfois des Tuned Mass Dampers (masses accordées) comme dans les gratte-ciels.
- Surveillance en temps réel : capteurs d'accélération, jauges de contrainte, lidar de prévision du vent permettent d'anticiper les rafales et d'adapter le contrôle.
- Matériaux composites optimisés : les pales sont conçues en sandwich (fibre de verre/carbone + résine), ce qui donne rigidité + absorption partielle des vibrations.

4. Dimensionnement en fatigue

Les éoliennes sont conçues pour 20–25 ans de durée de vie. Les normes (IEC 61400) imposent des calculs de fatigue pour millions de cycles de charge (similaires à l'aéronautique). Le dimensionnement prend en compte les spectres de vent (IEC classe I, II, III) et les turbulences locales.

Toute la structure est donc dimensionnée pour minimiser les vibrations et éviter la résonance, mais elle reste soumise à une fatigue inévitable. C'est pourquoi l'éolien implique une maintenance conditionnelle (monitoring permanent) plutôt qu'une simple maintenance calendaire.

La conversion mécanique électrique

Une éolienne capte l'énergie mécanique du vent via un rotor, qui génère un couple (ou moment de force) transmis à une génératrice. Ce couple est ensuite converti en électricité alternative (AC), synchronisée au réseau.

Deux grands schémas existent selon le mode de transmission entre le rotor et la génératrice :

1. Avec multiplicateur de vitesse (« gearbox »)

- Le rotor tourne lentement (10–20 tr/min).
- Un multiplicateur mécanique (boîte de vitesses) augmente la vitesse (~1500 tr/min pour une génératrice synchrone).
- La génératrice (souvent asynchrone double alimentation ou synchrone) produit du courant alternatif.

Caractéristiques :

Avantages	Inconvénients
Génératrice plus compacte, standardisée	Multiplicateur sujet à usure, pannes
Rendement global correct (90–95 %)	Maintenance lourde (lubrification, vibrations)
Compatible avec réseau à fréquence fixe	Complexité mécanique accrue

2. Entraînement direct (« direct drive »)

- Le rotor est connecté directement à la génératrice, sans multiplicateur.
- Utilise une génératrice à aimants permanents (PMG) tournant à basse vitesse.
- Nécessite une électronique de puissance (convertisseur AC-DC-AC) pour s'adapter à la fréquence du réseau.

Caractéristiques :

Avantages	Inconvénients
Moins de pièces mobiles → maintenance réduite	Génératrice beaucoup plus grosse et lourde
Moins de pertes mécaniques	Nécessite des aimants coûteux (terres rares)
Bon rendement à faible vitesse	Complexité électronique (convertisseur)

3. Synchronisation au réseau

L'électricité produite doit être synchronisée en fréquence (50 Hz en Europe), en tension, en phase avec le réseau. Cette synchronisation est gérée :

- Soit naturellement par des génératrices synchrones (si la vitesse est constante),

- Soit par un convertisseur électronique (full-scale power converter) : redressement AC → DC (pour lisser), inversion DC → AC avec synchronisation réseau.

Modules typiques :

- Power converter (entièrement contrôlable, pleine puissance),
- Transformateur élévateur (400–690 V → 20–33 kV pour transport),
- Système de contrôle pour la régulation du courant, du facteur de puissance, du couple moteur.

En résumé :

Configuration	Transmission	Synchronisation	Rendement global	Maintenance	Utilisation
Avec multiplicateur	mécanique	souvent directe	bonne	modérée à élevée	éolien terrestre mature
Entraînement direct	aucune	électronique	très bonne	faible	offshore, éolien >5 MW

Les équations

Une éolienne à axe horizontal orientable est caractérisée par un ensemble d'équations physiques fondamentales qui permettent de quantifier la puissance disponible, la puissance extraite, et les rendements⁶.

Les principales équations caractérisant une éolienne à axe horizontal orientable :

L'énergie cinétique du vent

L'éolienne transforme l'énergie du vent, soit l'énergie cinétique de l'air déplacé, en énergie mécanique, puis en énergie électrique. L'énergie cinétique du vent, soit l'énergie primaire éolienne, s'exprime par :

$$E = 1/2 \times m \times v^2$$

avec :

- v : vitesse du vent (m/s)
- m : masse d'un volume V d'air dont la masse volumique ρ vaut en moyenne 1,2 Kg / m³ (mètres cube). Cette masse volumique varie en fonction de la température et surtout de l'humidité.

Les éoliennes les plus courantes sont constituées d'un rotor fixé sur un mât fixe (stator). Le rotor est lui-même constituée d'un nombre impair de pales de même forme et donc de même surface et de même longueur.

La puissance du vent disponible

La puissance captée par l'éolienne s'exprime par l'équation :

$$P = 1/2 \times \rho \times S \times v^3$$

avec :

- P : Puissance (W)
- S : surface balayée (avec une longueur de pale r, la surface balayée vaut : $S = 2 \cdot \pi \cdot r^2$)

⁶ H. Nifenecker, *Physique des éoliennes*, Sauvons le climat, (<https://www.sauvonsleclimat.org>), [physique.pdf].

avec $P_i = 3,1416\dots$)

- v : vitesse du vent (m/s)
- ρ : masse volumique de l'air, $1,2 \text{ Kg} / \text{m}^3$ (mètres cube)

Selon cette équation, la puissance captée par l'éolienne est donc proportionnelle :

- au carré de la longueur de la pale : si le rayon ou le diamètre double, la puissance est multipliée par 4,
- au cube de la vitesse du vent : si la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8.

En pratique, la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée :

- pour les faibles vitesses de vent: l'éolienne nécessite une vitesse minimale de vent pour se mettre en rotation (de l'ordre de 3 m/s ou 10 km/h),
- pour les grandes vitesses de vent, pour des questions de sécurité, l'éolienne est tout simplement arrêtée (à partir de 90 km/h le plus souvent).

La puissance de l'éolienne dépend d'abord de la vitesse du vent qui dépend elle-même de l'endroit où est implantée l'éolienne. La puissance ne dépend pas de la direction du vent, dans la mesure où l'éolienne s'oriente dans cette direction du vent. La densité de la masse d'air en mouvement varie aussi avec la météorologie et en particulier avec la température (à même vitesse de vent, sa puissance est moindre a

Après les caractéristiques du vent, la puissance de l'éolienne dépend de ses caractéristiques mécaniques : du diamètre du rotor, du nombre et des formes de pales, du rendement mécanique de l'axe du rotor à l'axe du générateur avec un engrenage éventuel pour réduire la vitesse de rotation en entrée du générateur électrique. La limite de Betz traduit le fait que le vent traverse l'éolienne avec une vitesse résiduelle non nulle : la part d'énergie captée ne pourra physiquement être supérieure à $16/27$ (59 %), soit la limite de Betz et toutes les pertes de rendement précédentes aggravent cette limite.

La puissance utile en sortie de l'éolienne dépend enfin du rendement électrique du générateur. Le transport de l'électricité produite jusqu'au réseau de distribution peut aussi être significatif selon la distance et les caractéristiques du raccordement.

La limite de Betz

Soit la puissance maximale extractible)

$$P_{\text{Betz}} = C_{\text{Betz}} \times P_{\text{vent}} = (16 / 27) \times P_{\text{vent}} \approx 0,593 \times P_{\text{vent}}$$

Le coefficient de Betz $C_{\text{Betz}} \approx 0,593$ est la limite théorique supérieure de l'énergie qu'une éolienne peut extraire d'un flux de vent, en considérant un écoulement stationnaire sans frottements.

La puissance réelle

Soit la puissance réelle extraite par l'éolienne :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p \times 1/2 \times \rho \times A \times V^3$$

C_p : coefficient de puissance réel (fonction du type d'éolienne, de la vitesse du vent, de l'angle des pales, etc.). Typiquement : $C_p \approx 0,4$ à $0,5$ pour les meilleures machines.

Le nombre de tip speed ratio

Ou le nombre de tip speed ratio, soit λ le ratio de vitesse en bout de pale

$$\lambda = \omega \times R / V$$

Avec :

- ω : vitesse angulaire du rotor (rad/s)
- R : rayon du rotor
- V : vitesse du vent

Ce ratio détermine le profil optimal de pale et le régime de fonctionnement.

Le couple mécanique

Soit le couple mécanique généré sur l'arbre

$$C = P_{\text{éolienne}} / \omega$$

Sert à dimensionner la transmission (ou l'entraînement direct).

Le coefficient de performance aérodynamique

Le coefficient de performance aérodynamique (C_p) en fonction de λ et de β

$$C_p(\lambda, \beta) = \text{fonction empirique}$$

avec :

- β : angle de calage des pales (pitch)
- Fonction obtenue par modélisation aérodynamique, ou données du constructeur

L'énergie produite

L'énergie produite sur une période donnée, soit l'intégration de la puissance réelle sur une durée T :

$$E = \int_{[0, T]} P_{\text{éolienne}}(t) \cdot dt$$

En pratique : on utilise les histogrammes de fréquence de vitesse de vent (loi de Weibull)

D'autres paramètres complémentaires

Paramètre	Formule ou définition
Facteur de charge (ou facteur de capacité)	$FC = E_{\text{prod}} / (P_{\text{nominale}} \times T)$
Hauteur équivalente du vent	$V(z) = V(z_0) \times (z/z_0)^\alpha, \alpha \in [0,1-0,3]$ selon le relief
Loi de Weibull (distribution du vent)	$f(V) = (k/A) \times (V/A)^{k-1} \times e^{-(V/A)^k}$, avec k (forme) et A (échelle)
Densité de puissance surfacique	$P_{\text{éolienne}} / \text{surface au sol du parc}$

La hauteur et la puissance

La course à la puissance, à la hauteur et à la taille des pales améliore la rentabilité au MWh. Pourquoi ?

a) Plus de vent en hauteur : la vitesse du vent augmente avec l'altitude (loi de puissance) :

$$V(h) = V_0 \times (h/h_0)^\alpha$$

Le vent plus fort et plus régulier permet une production plus stable et un facteur de charge plus élevé (souvent > 40 % au lieu de 25–30 % pour les anciens parcs terrestres).

b) Plus grandes pales = plus grande surface balayée. La puissance éolienne disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré du rayon du rotor :

$$P = (1/2) \times \rho \times \pi \times R^2 \times V^3$$

Donc doubler le rayon permet de quadrupler la surface captée → plus de vent intercepté → plus d'énergie produite pour une seule fondation.

c) Économies d'échelle

Une éolienne plus puissante coûte plus cher à l'unité, mais elle produit beaucoup plus. Les coûts de fondation, raccordement, entretien sont moindres au MWh produit. Ce qui entraîne une baisse du LCOE (coût actualisé du MWh).

L'évolution

L'évolution des éoliennes actuelles se caractérisent par la croissance en hauteur et en longueur des pales, à la recherche de vents plus puissants et plus réguliers (moins irréguliers) en même temps que la réduction des coûts.

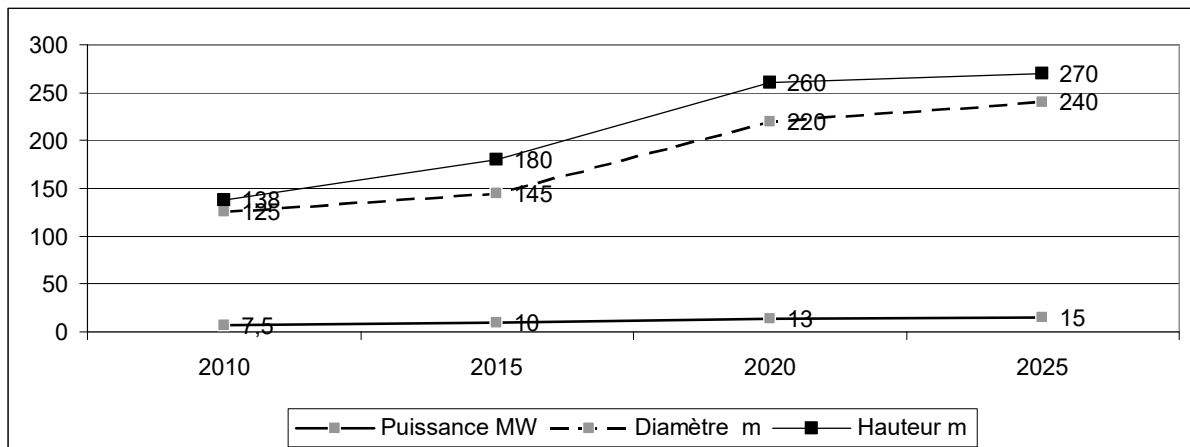


Figure 5 – Evolution des paramètres de s éoliennes

La tendance est nettement à l'augmentation de la hauteur et du diamètre dans la mesure où l'augmentation de ces dimensions réduit le LCOE. jusqu'où ? Pas plus que les arbres, les éoliennes ne croîtront pas jusqu'au ciel. En pratique, des limites apparaissent :

- Contraintes structurelles (oscillations, matériaux)
- Logistique de transport et montage
- Acceptabilité sociale et visuelle, surtout en terrestre
- Rendement marginal décroissant à très haute altitude (profil de vent qui sature)

Le rapport diamètre sur hauteur (D/H)

La question du rapport entre le diamètre du rotor (D) et la hauteur du moyeu (H) des éoliennes (souvent noté (D/H) est centrale dans la conception des machines modernes. Ce ratio n'est ni constant ni arbitraire : il dépend d'un compromis entre performances aérodynamiques, stabilité structurelle, coûts, et conditions locales de vent.

Valeurs typiques du ratio D/H :

Type d'éolienne	Hauteur du moyeu (H)	Diamètre du rotor (D)	Ratio D/H
Terrestre ancienne (années 2000)	80 m	80 m	~1
Terrestre moderne	120 m	130–150 m	~1,1 à 1,3
Terrestre très grande (dernière génération)	150 m	170–180 m	~1,1 à 1,2
Offshore actuelle	120–130 m	160–220 m	~1,4 à 1,7
Offshore future (20 MW)	150–180 m	240–280 m	~1,5 à 1,8

Évolution et tendances : la tendance générale du ratio D/H est en augmentation, surtout en offshore. Cela signifie que le diamètre du rotor augmente plus vite que la hauteur du moyeu.

Pourquoi ?

- Plus grand rotor = plus grande surface balayée = plus d'énergie captée.
- En offshore, moins de contraintes de sol et d'espace, on peut se permettre des pales plus longues.
- En augmentant D plus que H, on augmente le facteur de capacité (plus d'heures équivalentes par an), ce qui améliore le LCOE.

Le compromis technologique :

- Trop long par rapport à la hauteur → efforts mécaniques importants sur la tour, surtout en cas de rafales horizontales ou turbulence.
- Trop court → on sous-utilise la hauteur du mât, donc moins d'énergie produite pour un coût élevé.

Le ratio (D/H) n'est pas constant, il augmente avec la puissance et surtout dans l'éolien offshore. On tend vers des rotors très larges montés sur des mâts relativement moins hauts pour maximiser la production tout en maîtrisant les coûts et les charges mécaniques.

Il y a la hauteur maximale et la hauteur optimale (voir la discussion en annexe)

Le cycle de vie

Conception et planification (durée : 1 à 5 ans) :

- Études de vent et de site : analyses météorologiques sur plusieurs années.
- Choix technologique : type d'éolienne (terrestre, offshore, puissance, hauteur...).
- Études d'impact : environnement, paysage, biodiversité, acoustique.
- Acceptation locale : concertation, autorisations administratives, permis.
- Planification financière : modélisation économique et sécurisation des financements.

Fabrication et transport (durée : quelques mois à un an) :

- Fabrication des composants :
 - Pales : matériaux composites (résines, fibres de verre ou carbone).
 - Nacelle : génératrice, multiplicateur, système de contrôle.
 - Mât : acier, parfois béton.
- Production du socle : béton armé, ancrage au sol.
- Transport : acheminement vers le site (souvent complexe pour les grandes éoliennes).

Impact : consommation énergétique importante, émissions associées à la production des matériaux (acier, béton, résines).

Exploitation et maintenance

- Durée de fonctionnement : 20 à 25 ans.

- Production d'électricité : renouvelable, sans émission directe de CO₂.
- Maintenance préventive et corrective :
 - Graissage, vérification des pièces mécaniques, remplacement de composants (freins, électronique...).
 - Surveillance à distance (télégestion, capteurs).
- Bilan énergétique : une éolienne rembourse l'énergie nécessaire à sa construction en 6 mois à 1 an.
- Impact environnemental faible durant cette phase.

Démantèlement, recyclage et valorisation (durée : quelques mois) :

- Démontage de l'éolienne (pales, nacelle, mât).
- Recyclage :
 - Acier du mât : recyclable à plus de 90 %.
 - Béton du socle : partiellement valorisable, souvent laissé en place.
 - Composites des pales : difficilement recyclables, mais filières en développement (pyrolyse, co-incinération, valorisation chimique).
- Remise en état du site ou repowering (remplacement par une nouvelle éolienne plus performante).
- Enjeux : gestion des déchets, empreinte résiduelle.

La durée de vie

Installée par principe à l'extérieur, l'éolienne est exposée aux vents (sa raison d'être !), aux intempéries (soleil, humidité, pluies, orages, variations de température, gel et givre...). Le vent, dont la variabilité très caractéristique se traduit par l'intermittence, ce qui ne ressemble en rien en un chargement continu comme en soufflerie, est un facteur de vieillissement principal de la structure qui amplifie ces chargement (désaxage du générateur par rapport à l'axe de l'éolienne, écart d'alignement avec la direction du vent dominant...). Plus les éoliennes s'élèvent en hauteur afin de capter des vents plus intenses, plus les efforts ou chargements mécaniques de l'environnement naturel s'accroissent dans des proportions comparables.

Les éoliennes maritimes plantées sont d'autant plus sollicitées que le mat est planté profondément. Elles sont sujettes à un phénomène encore assez peu connu appelé riging qui s'exerce dans le sillage de la houle.

La durée d'une vie d'une éolienne tient à la fatigue de la structure mécanique, soit le nombre de cycles et l'amplitude des déformations qu'elle subit : elle doit être déconstruite avant qu'elle ne s'écroule.

L'éolienne est une structure mécanique limitée en capacité de production (du fait de la nature temporellement intermittente du vent et de sa variabilité en direction qui fait que l'effort du vent n'est jamais parfaitement alignée) dont la durée de vie est assez courte (à cause du vent). La fatigue mécanique affecte toutes les parties de l'éolienne, y compris la base enterrée qui peut être considérée comme non réutilisable : lors du remplacement d'une éolienne à sa fin de vie, un nouvel emplacement doit être trouvé et dans le long terme, le sol d'un parc éolien est susceptible d'être entièrement grevé de pastilles de sol définitivement non utilisable.

L'instrumentalisation, soit la pose de capteurs de déformation aux endroits significatifs, et la surveillance périodique permettent de surveiller ce vieillissement et de mieux maîtriser la durée de service effective.

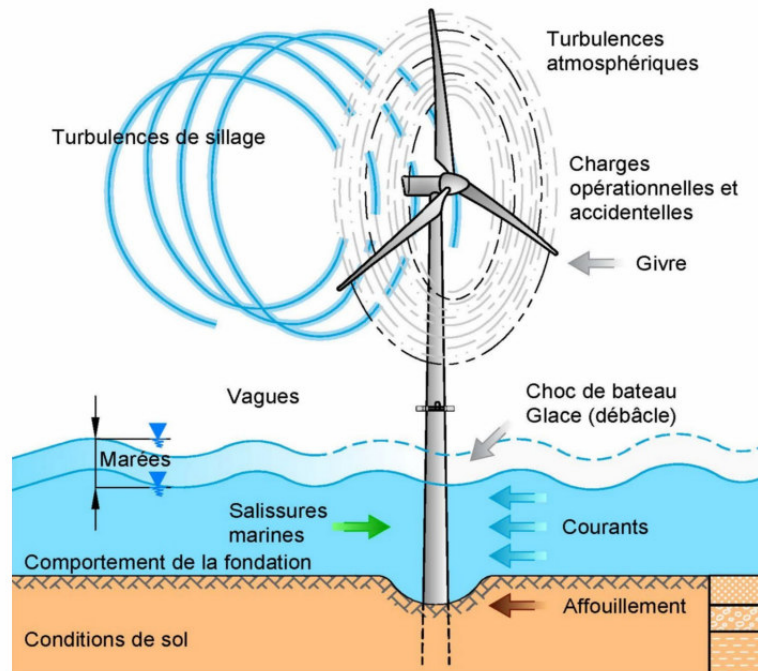


Figure 6 – Efforts mécaniques appliqués sur la structure mécanique de l'éolienne.⁷

Le vent est généralement considéré comme une énergie durable, ce qui désormais sujet à caution et n'est plus garanti. Une éolienne a une durée de vie limitée, plutôt courte, de l'ordre de deux décennies et demie.

Ne confondons pas le vent et l'éolienne

Grandes variations de températures, eau salée, vent, ultraviolets élevés -> matériaux

La croissance continue des dimensions et de la puissance des éoliennes atteint probablement ses limites : un tiers des éoliennes d'un grand constructeur allemand deuxième fabricant mondial (Siemens Gamesa) subit de graves défaillances techniques (comportement vibratoire inhabituel, détérioration des pales, vieillissement prématur...).

Le démantèlement

Le démantèlement d'une éolienne qui termine son cycle de vie est un aspect majeur dans le choix de la filière éolienne : dans la mesure où les parcs éoliens sont récents et que les plus anciens arrivent en fin de vie, cette question devient plus concrète. Le cas particulier des pales est un point sensible de la question.

La nécessité du démantèlement

Une éolienne doit être démantelée pour plusieurs raisons techniques, économiques, réglementaires ou environnementales. Voici les principales :

⁷ ?

1. Fin de vie technique : une éolienne est conçue pour fonctionner 20 à 25 ans. Au-delà, ses composants s'usent :

- Usure mécanique (multiplicateur, génératrice).
- Fatigue des matériaux (pales, mât).
- Obsolescence des systèmes de contrôle.

Les coûts de maintenance augmentent fortement. Elle devient moins fiable, avec risque accru de panne ou d'accident.

2. Perte de rentabilité économique par une baisse progressive de la production (efficacité aérodynamique réduite). En parallèle :

- Fin des subventions ou tarifs d'achat garantis.
- Coût de l'énergie renouvelable devenu plus compétitif ailleurs.

Il devient plus rentable de démonter l'éolienne que de continuer à l'exploiter.

3. Repowering (remplacement par une éolienne plus performante). Sur un même site, on peut :

- Remplacer plusieurs anciennes éoliennes par une seule, plus puissante.
- Réduire le nombre de mâts tout en augmentant la production.

Soit un gain environnemental et énergétique. Le site reste déjà équipé (accès, raccordements, autorisations...).

4. Obligations réglementaires : en France et dans l'UE, la législation impose le démantèlement à la fin de la durée d'exploitation :

- Restauration du site.
- Retrait total ou partiel du socle en béton (selon la profondeur).
- Recyclage ou valorisation des composants.

Un dépôt de garantie est généralement exigé dès l'installation pour couvrir ces coûts.

5. Motifs environnementaux ou sociaux. Cas exceptionnels :

- Conflit local : rejet social d'un parc (bruit, paysage, biodiversité...).
- Implantation dans une zone protégée ou fragilisée (erreur d'évaluation initiale).
- Effondrement ou incident structurel → démantèlement préventif.

En résumé

Motif	Description	Fréquence
Fin de vie technique	Usure, pannes	Très courant
Non-rentabilité	Plus de maintenance que de production	Fréquent
Repowering	Remplacement par du neuf	En croissance
Obligation légale	Respect du permis, garanties	Systematique
Conflit local	Acceptabilité, erreur d'implantation	Rare

Les pales

L'entreposage



Cimetière de pales aux Etats-Unis

<https://energynow.ca/wp-content/uploads/2021/09/Wind-Turbine-Landfill-1200x810-1.jpg>

La question des pales d'éoliennes entreposées « en attendant une solution » est aujourd'hui l'un des angles morts de la transition énergétique. Voici un état des lieux réaliste et sans complaisance.

Pales d'éoliennes entreposées : une « solution provisoire » devenue durable ?

1. Entreposage temporaire... qui dure

Lorsqu'une éolienne est démantelée, les pales, trop longues, rigides et non recyclables facilement, sont :

- Stockées à plat sur le sol, dans des terrains industriels.
- Parfois découpées et empilées, mais cela reste logistique, non une solution de recyclage.

Cet entreposage est présenté comme temporaire, dans l'attente :

- D'un procédé industriel de recyclage rentable.
- D'une seconde vie (réemploi, valorisation...).

Problème : ces solutions tardent ou restent marginales, et les volumes augmentent.

2. Croissance du stock mondial de pales usagées

- Chaque année, des milliers de pales atteignent leur fin de vie.

- Selon l’IRENA, plus de 40 millions de tonnes de déchets de pales pourraient s’accumuler d’ici 2050 si rien n’est fait.
- Entreposage massif déjà constaté dans certains pays (États-Unis, Espagne, Canada...).

3. Risques associés à un stockage prolongé

a. Dégradation passive

- Exposées aux UV, à la pluie, au gel → microfissures, libération de particules.
- Fragmentation possible → génération de microplastiques.

b. Risque d’incendie

Les résines composites sont combustibles. Un incendie (accidentel ou malveillance) pourrait :

- Dégager des fumées toxiques (cyanures, acides...).
- Être difficile à éteindre.

c. Occupation d’espace

Très volumineuses (40 à 60 m de long), elles encombrant des terrains entiers, souvent improvisés, parfois proches d’habitations ou de zones naturelles.

d. Perte de matière première

Les matériaux stockés deviennent inutilisables s’ils se détériorent trop longtemps. Cela compromet la valorisation ultérieure (recyclage ou co-incinération).

4. Une impasse ?

Si aucune filière industrielle viable n’émerge :

- Le risque est que le stockage provisoire devienne permanent, comme cela a été le cas dans d’autres domaines (décharges de pneus, déchets plastiques...).
- Cela créerait une pollution de long terme sans danger immédiat, mais sans solution réaliste.

Que faire ?

- Imposer des obligations de traitement ou de filière à tout nouveau parc éolien.
- Favoriser les pales 100 % recyclables dès leur conception (projets en cours chez Siemens, Vestas, etc.).
- Développer des normes de stockage, des incitations au recyclage, voire une taxe sur l’inaction.

En résumé

- Stocker les pales « en attendant une solution » revient à transférer le problème aux générations futures.
- Sans cadre réglementaire ni progrès technique rapide, on risque de reconstituer des « cimetières de pales », symboles embarrassants d’une transition mal pensée sur le long terme.

L'enfouissement dans l'océan ?

C'est une boutade pertinente, car elle soulève un vrai sujet : la tentation de se débarrasser des déchets loin des regards, une tentation qui a souvent existé... et parfois été mise en œuvre, y compris pour des déchets bien plus dangereux.

Enfouir les pales d'éoliennes dans l'océan : une fausse bonne idée

1. Un vieux réflexe humain

Jeter les déchets en mer a longtemps été considéré comme une solution « facile » : déchets ménagers, boues de station d'épuration, munitions, voire déchets nucléaires (jusqu'aux années 1980). C'était « loin des yeux », dilué, invisible. Mais cela a généré des catastrophes écologiques.

2. Ce que dit le droit international

- Convention de Londres (1972) et Protocole de 1996 : interdiction du rejet de déchets industriels en mer, sauf rares exceptions (boues inertes, roches...).
- Une pale d'éolienne ne serait ni autorisée, ni éthiquement acceptable.
- L'Union européenne et l'ONU encadrent strictement les déchets marins, même accidentels (cf. filets fantômes, plastiques...).

Enfouir volontairement des pales dans l'océan serait illégal, et probablement classé comme infraction environnementale grave.

3. Impact écologique potentiel

- Libération de microfibres et microplastiques dans les écosystèmes marins.
- Ingestion par le plancton, les poissons, les oiseaux marins → contamination de toute la chaîne alimentaire.
- Accumulation sur le fond marin, irréversible.

En clair : cela reviendrait à transformer les océans en décharges plastiques géantes, au mépris total des enjeux planétaires.

Conclusion ironique mais lucide : non, on ne peut pas les enterrer dans l'océan — sauf à renier les fondements même de la transition écologique qu'elles symbolisent. Si l'éolienne incarne la transition énergétique, ses déchets doivent incarner une transition écologique complète, jusqu'à leur recyclage.

Les pales et la biodiversité

Passons maintenant à votre question sur les pales d'éoliennes enterrées.

Désintégration d'une pale d'éolienne : y a-t-il pollution ou danger ?

1. Nature des matériaux

Les pales d'éolienne sont composées de :

- Fibres de verre ou fibres de carbone (inertes, non toxiques).
- Résines thermodurcissables (époxy, polyester, vinylester), issues de la pétrochimie.
- Parfois, des additifs (stabilisants, retardateurs de flamme, pigments...).

Ces matériaux sont très résistants à la dégradation, mais pas totalement inertes à long terme.

2. Dégradation et pollution potentielle

Pas de pollution massive à court terme : contrairement aux déchets industriels ou chimiques, les pales n'émettent pas de substances toxiques immédiates.

À très long terme, certaines résines peuvent se fragmenter sous l'effet de l'humidité, des changements de température ou des micro-organismes :

- Formation possible de microplastiques et de composés organiques dégradés (faible quantité, mais persistants).
- Migration éventuelle de polluants organiques vers le sol ou les nappes phréatiques si mal confinés.

Risque accru si le site d'enfouissement est mal choisi (zone humide, sol perméable, proche d'aquifères).

3. Impact sur la biodiversité

Enterrées profondément, les pales sont hors de portée de la faune → faible impact direct.

En surface ou en décharge mal gérée :

- Risque de microplastiques à long terme dans les sols.
- Possibles contaminations lentes de chaînes trophiques si les matériaux se dégradent (mais très hypothétique à ce jour).

En résumé

Aspect	Pale d'éolienne	Déchet nucléaire (avec transmutation)
Toxicité	Très faible	Élevée à moyenne selon traitement
Dégradation	Très lente, fragments inertes	Pas de dégradation naturelle, confinement requis
Pollution potentielle	Microplastiques, résines	Radiations, contamination grave si fuite
Durée de nuisance	Millénaires (passive)	Quelques siècles (active, mais gérable)
Biodiversité	Risques très faibles	Risques très élevés sans confinement

Conclusion : une pale d'éolienne ne constitue pas un danger significatif pour la biodiversité, tant qu'elle est correctement enterrée ou stockée. Mais elle ne se dégrade pas et finit par contribuer à la pollution plastique de très long terme, invisible mais persistante.

À l'inverse, avec les technologies avancées du nucléaire (RNR + transmutation), la durée de toxicité des déchets devient comparable ou même inférieure à celle des matériaux composites non recyclés issus de l'industrie éolienne.

Le recyclage

En pratique, les pales d'éoliennes en fin de vie posent un vrai défi, et plusieurs solutions coexistent, pas toujours satisfaisantes.

1. Pourquoi sont-elles difficiles à recycler ?

- Les pales sont faites de matériaux composites (fibres de verre ou de carbone + résines), choisis pour leur légèreté, solidité et résistance.
- Mais ces matériaux sont thermodurcissables (ils ne fondent pas), ce qui rend le recyclage complexe et énergivore.

2. Solutions en pratique aujourd'hui

a. Réutilisation / Seconde vie (peu courant) : certaines pales sont réutilisées dans des projets artistiques, architecturaux, ou comme mobiliers urbains. Mais c'est marginal : très faible part (<1 %).

b. Recyclage partiel ou expérimental

- Broyage mécanique pour en faire des matériaux de remplissage dans le bâtiment (cimenteries, béton...).
- Co-incinération : brûlées dans des fours à très haute température (cimenteries), les résines servent de combustible, les fibres comme charge minérale.
- Pyrolyse / solvolysse : procédés chimiques encore coûteux et peu répandus.

Limites : coûts élevés, technologie non mature, filières encore locales et limitées.

c. Stockage longue durée / mise en décharge

- En Europe, la mise en décharge des matériaux composites est de plus en plus réglementée (interdite dans certains pays, comme l'Allemagne).
- Ailleurs, ou temporairement, les pales sont parfois simplement entreposées, voire enterrées dans des zones dédiées. Cela a été documenté aux États-Unis, au Canada, ou en Espagne. Pales entassées dans des fosses, sans valorisation prévue, parfois recouvertes de terre.

Réalité : plusieurs milliers de pales sont actuellement stockées dans l'attente d'une filière viable.

Sort	Description	Part estimée
Réutilisation créative	Mobilier, architecture	< 1 %
Recyclage en cimenterie	Incinération / charge minérale	20–30 % (en croissance)
Recyclage chimique	Pyrolyse, solvolysse (R&D)	marginal
Stockage / décharge	Entrepôts, fosses	encore courant

Conclusion : la question du recyclage de matériau en matériaux composites (composé verre-résine, fibre de carbone) n'est pas l'apanage du secteur éolien : il y a en particulier le nautisme qui utilise aussi significativement ces matériaux. Mais c'est un secteur potentiellement le plus important et paradoxalement présenté comme écologique.

Différentes recherches sont menées pour trouver une réponse à cette question. L'institut Jules Verne à Nantes conduit un projet ZEBRA sur le sujet : Selon l'ADEME (<https://www.info-eolien.fr/le-recyclage-des-eoliennes/>) :

Le projet ZEBRA (Zero waste Blade ReseArch Recherche sur les pales zéro déchet), piloté par l'IRT Jules Verne, rassemble également acteurs industriels et centres de recherche dans le but d'aboutir à la création de pales d'éoliennes en thermoplastique, dans une approche d'éco-conception. L'objectif : mettre sur le marché des pales d'éoliennes 100 % recyclables d'ici trois ans.

Si 90 % de la masse de l'éolienne peut être considérée comme recyclable, les 10 % restant sont loin d'être négligeables. Pour le moment, la pale « 100 % recyclable » reste à définir.

Sources :

<https://www.engie-green.fr/wp-content/uploads/2023/03/fiche-Demantelement-BD.pdf>

<https://www.info-eolien.fr/le-recyclage-des-eoliennes/>

Zebra : <https://www.irt-jules-verne.fr/actualites/lancement-du-projet-zebra-premiere-pale-eolienne-100-recyclable/>

https://irt-jules-verne.fr/wp-content/uploads/06_IRT-JULES-VERNE_CP-ZEBRA_FR_vfinale.pdf

<https://hal.science/hal-03859923/document>

Les socles

Un socle de béton n'est pas inusable. Il subit bel et bien des efforts mécaniques répétés, des variations thermiques, et parfois des altérations chimiques sur 20 à 30 ans.

Le vieillissement des socles

Pourquoi un socle vieillit (et peut devenir inapte) ?

1. Efforts mécaniques et fatigue

L'éolienne génère des efforts cycliques :

- Tractions, compressions, cisaillements.
- Sollicitations dues au vent, à la rotation du rotor, aux arrêts d'urgence, etc.

Ce sont des millions de cycles transmis au béton et surtout aux armatures en acier. Résultat : possible fatigue des aciers, microfissures du béton. Le béton vieillit mécaniquement, comme un pont ou un viaduc.

2. Vibrations et résonance : le socle subit des vibrations à basse fréquence (rotation) et haute fréquence (engrenages, turbulences). Si la fréquence naturelle du socle/mât est mal adaptée, des phénomènes de résonance peuvent survenir → amplification des contraintes.

3. Variations de température et cycles gel/dégel

En climat continental ou nordique, les variations saisonnières provoquent :

- Dilatation / contraction du béton.
- Pénétration d'eau → cycles de gel/dégel → fissuration.
- Oxydation possible des armatures si le béton perd son alcalinité (carbonatation).

4. Vieillissement chimique (carbonatation, sulfates) : le béton réagit lentement avec le CO₂ de l'air → carbonatation → baisse du pH → corrosion des armatures. Présence éventuelle de sulfates ou d'autres contaminants dans le sol → dégradation interne.

Bilan structurel après 20–30 ans : une nécessité. Avant d'envisager la réutilisation, on procède à un diagnostic structurel : essais non destructifs (ultrasons, scléromètre), carottages, vérification de l'état des aciers, étude dynamique (fréquences propres du socle).

Il est parfois nécessaire de renforcer la fondation (ajout de béton, ancrages), refuser sa réutilisation, même si elle semble "solide".

En résumé

Élément	Effets du vieillissement
Béton	Fissuration, carbonatation, fatigue
Acier	Corrosion, fatigue structurelle
Liaison mât-socle	Jeu, usure des ancrages
Fonctionnement	Résonance, affaiblissement dynamique

Un socle d'éolienne n'est pas éternel. Sa réutilisation n'est possible que s'il passe un contrôle strict, et parfois, il est plus sûr et plus économique de le reconstruire.

La réutilisation des socles



Figure 7 - La face enterrée de l'éolienne⁸

La réutilisation des socles (fondations) lors d'un repowering dépend de plusieurs facteurs techniques, économiques et réglementaires. Peut-on réutiliser les socles lors d'un repowering ?

1. Techniquement, c'est possible... mais pas toujours. Réutilisation possible si :

- La nouvelle turbine a une puissance et un poids similaires ou légèrement supérieurs à l'ancienne.
- Le socle initial a été surdimensionné lors de la construction.
- Les fondations sont en bon état, sans fissure ou corrosion.
- Le raccordement électrique et la structure du site sont compatibles.

Exemple : passer d'une éolienne de 2 MW à 3 MW peut parfois se faire en conservant le socle, avec adaptation du système d'ancrage.

Réutilisation impossible si :

- La nouvelle éolienne est plus grande, plus lourde, avec des charges dynamiques très différentes.
- Le diamètre du mât change : les fondations doivent être recalculées.

⁸ Parc éolien de Miné-Kervir en Scaër, d'après *Des opposants aux projets éoliens industriels* (<https://scaerunelonguehistoire.blogspot.com/2022/08//des-opposants-aux-projets-eoliens.html>).

- Le béton a atteint sa limite de durée de vie (carbonatation, corrosion des armatures).
- La réglementation a évolué, imposant de nouvelles normes sismiques ou environnementales.

2. Types de fondations concernées

Type de parc	Type de fondation	Réutilisation possible ?
Terrestre	Bloc béton armé (massif)	Oui, si structure compatible
	Fondation sur pieux	Plus difficile à réutiliser
Offshore (monopieu)	Pieu enfoncé en mer	Rarement réutilisable
Offshore (gravitaire)	Socle posé sur le fond marin	Parfois réutilisable, mais complexe

3. Réutiliser, combien ça coûte (ou économise) ? Réutiliser le socle peut réduire les coûts de génie civil de 30 à 50 %. Mais il faut :

- Faire un diagnostic structurel (~10–30 k€).
- Adapter ou renforcer la fondation.
- Adapter le système de fixation du nouveau mât.

Le coût total du repowering reste élevé, mais la réutilisation du socle permet : un gain de temps, moins d'impact environnemental (pas de terrassement profond), moins de nuisances locales.

4. Réglementation et garanties

En Europe, le réemploi d'un socle doit être certifié par un bureau d'ingénierie agréé. Il doit répondre à la norme Eurocode en vigueur. Certains pays exigent une nouvelle autorisation environnementale, même en cas de réutilisation.

Conclusion : un socle d'éolienne peut parfois être réutilisé lors d'un repowering, à condition qu'il soit structurellement adapté, certifié et compatible avec la nouvelle machine. Mais ce n'est ni automatique, ni toujours avantageux. Chaque cas est analysé individuellement selon les caractéristiques techniques du projet.

La responsabilité de l'opérateur ou du propriétaire du terrain

Les métaux des éoliennes (acier, cuivre...) sont recyclables. Le béton est normalement extrait des fondations et réutilisé en matériau pour le génie civil. Formellement, l'opérateur du parc éolien est tenu de démanteler les fondations, mais certains contrats avec les propriétaires des terrains leur transfèrent cette responsabilité. Les opérateurs ne sont pas tenus de provisionner les coûts de démantèlement, largement supérieurs au seul dépôt de garantie (50 000 €)⁹.

Note : des fuites d'huile entraîne des pollutions des sols (sujet à traiter).

⁹ Le coût de démantèlement d'une éolienne de 3 MW par une entreprise agréée ISO 14 001 pour cette opération varie entre 450 000 et 900 000 € hors taxes, non compris la destruction du socle en béton. L'opération nécessite une grue de 700 tonnes, deux grues de 50 tonnes et une presse cisaille et mobilise une équipe de 5 personnes pendant un mois. Sa durée finale dépend des conditions météorologiques. Le prix de revente des matériaux récupérables est de l'ordre de 60 000 € au bénéfice de l'entreprise de démolition. Pour un parc entier, ce tarif est dégressif. www.energieverite.com
 Démantèlement des éoliennes terrestres en France : contraintes et perspectives, 2020

Les parcs éoliens

Les parcs terrestres

Un parc éolien est une parcelle de territoire où est installé un ensemble d'éoliennes reliées à un même poste de raccordement électrique au réseau de distribution électrique.

Ces éoliennes sont disposées à des distances suffisantes les une des autres de façon à ce que ces éoliennes, généralement de même caractéristiques (taille, puissance...) ne se gênent pas entre elles, de sorte qu'une éolienne se trouvant à l'arrière d'une autre selon la direction du vent, soit suffisamment distante l'une de l'autre pour que le flux de vent se soit reconstitué à l'arrière de l'éolienne en amont.

Dans la pratique, les distances entre éoliennes situées dans un plan perpendiculaire au vent dominant sont de l'ordre de 3 à 5 diamètres d'éolienne. Les distances entre plans sont plutôt de l'ordre de 3 à 9 diamètres.

<https://www.youtube.com/watch?v=XXRAZI-ZCJU> socle éolienne !

Le parc éolien terrestre breton

En 2023, la Bretagne est couverte d'environ 300 parcs éoliens terrestres représentant 1050 éoliennes, une puissance globale de 1466 MW et une production annuelle de 2410 GWh, soit x % de l'énergie électrique consommée en Bretagne et x % de l'énergie totale consommée en Bretagne.

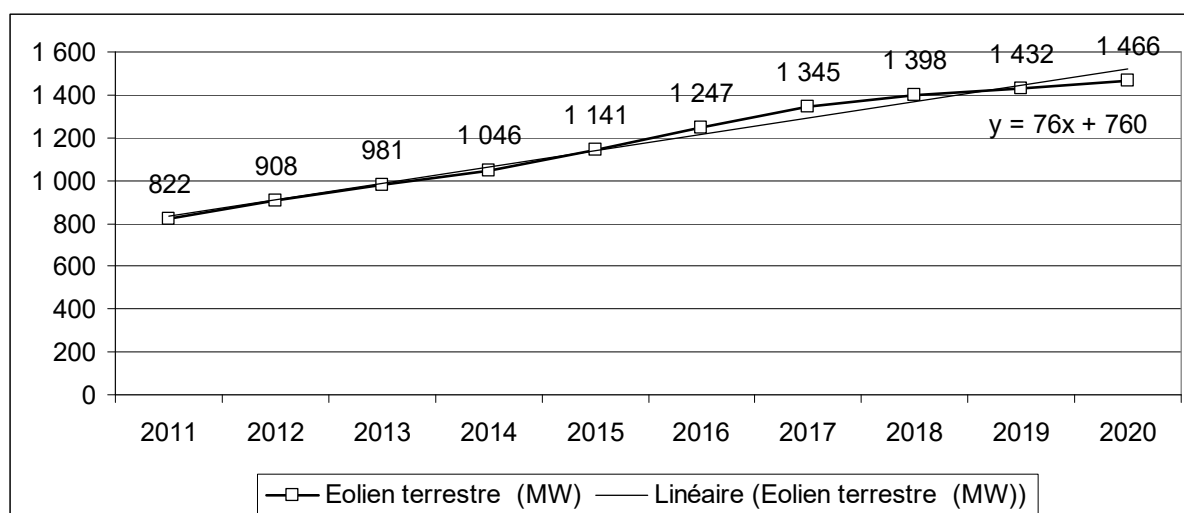


Figure 8 – Puissance installée de l'éolien (en MW)

L'éolien progresse au rythme respectif de 76 MW par an.

Les installations éoliennes en Bretagne produisent :

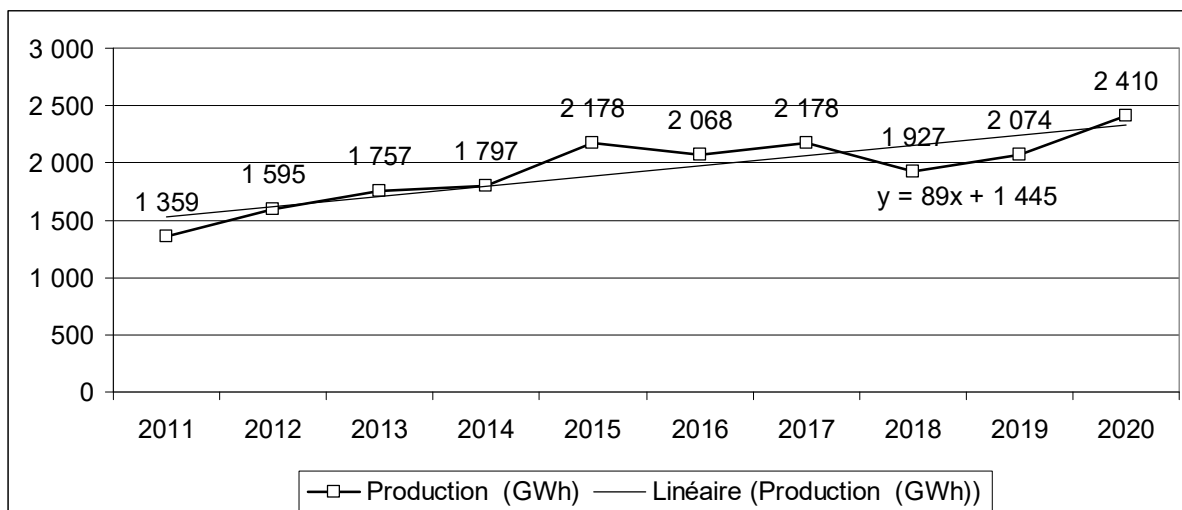


Figure 9 – Production de l'éolien en Bretagne (en GWh)

Selon la tendance actuelle, la production d'énergie éolienne en Bretagne atteindra 4100 GWh en 2050, soit 3,6% de la production de référence nette de 115 000 GWh.

Les parcs maritimes

Les parcs plantés

Un parc maritime est aujourd'hui en exploitation au large de Saint-Nazaire, un autre en construction dans la baie de Saint-Brieuc et deux projets ont cours au large de Lorient, un pour éoliennes plantées et l'autre pour éolienne flottante.

Paramètres	Unité	Saint-Nazaire	Saint-Brieuc	Lorient
Opérateur		EDF Renouvelables	Ailes marines	
Puissance installée	MW	480	496	750
Nombre d'éoliennes		80	62	
Puissance d'une éolienne	MW	6	8	
Production annuelle	GWh	1 735	1 920	?
Production sur l'ensemble du cycle de vie	GWh	43 775	?	?
Production annuelle en "habitants"	"habitants"			700 000
Facteur de charge déduit	%	41 %	44 %	?
Taux de retour énergétique	mois			14
Surface du parc	km ²	78	80	150
Durée nominale d'exploitation du parc	année	25	25	25
Coûts prévisionnels	Md€	2	2	

Tableau 1 – Synthèse des parcs éolien marins en cours ou en projet en Bretagne

Selon le dossier du maître d'ouvrage, le parc éolien de Saint-Brieuc produirait une quantité d'énergie de 1920 GWh pour une puissance installée de 496 Mégawatt (MW), ce qui correspond à un facteur de charge de $365 \text{ jours/an} \times 24 \text{ heures / jour} \times 496 \text{ MW} / 1920 \text{ GWh} = 41 \%$. Ce facteur de charge annoncé par le maître d'ouvrage correspond à un facteur de charge observé en Grande-Bretagne alors qu'il sera moindre en Bretagne (de l'ordre de 33 %).

Un projet de parc éolien marin flottant au large de Groix et de Belle-Île est en cours d'attribution avec deux zones de 250 MW et un suivant de 500 MW avec raccord mutualisé à la terre, 60 éoliennes au total. Superficie dédiée d'environ 50 km² et un budget hors raccordement au réseau de transport d'électricité situé entre 600 et 700 M€ et révisé à 7500 MW. Environ 1,6 milliards d'euros de subvention à l'exploitation sur 20 ans...

Les parcs flottants

Un projet préalable de ferme pilote dite EOLFI avec 3 turbines de 9,5 MW et 100 GWh de production annuelle a été abandonné sans toutefois remettre en cause le projet des deux parcs éoliens flottants.

Comparativement aux sites écossais où le facteur de charge est de l'ordre de 40%, le site breton est défavorisé.

Parc éolien marin et observation de la nature (<https://www.reperes-evolutiondumonde.fr/parc-eolien-marin-et-observation-de-la-nature>)

La densité surfacique du parc éolien

La densité surfacique de puissance diminue avec l'augmentation de la taille et de l'espacement. Une idée contre-intuitive mais démontrée dans les faits. Pourquoi la densité surfacique diminue ?

a) Espacement nécessaire plus grand : pour éviter les effets de sillage, les éoliennes plus grandes doivent être plus espacées. Résultat : moins d'éoliennes par km².

b) Moins de machines, mais plus puissantes. La puissance installée par unité de surface diminue, même si la production par machine augmente. En chiffres :

- Ancien parc : 10 éoliennes de 1,5 MW sur 1 km² → 15 MW/km².
- Nouveau parc : 4 éoliennes de 6 MW plus espacées → 24 MW installés, mais répartis sur 2–3 km² → 8 à 12 MW/km².

Études confirmant cela :

- Denholm et Hand (2009), NREL : densité surfacique diminue avec le développement de l'éolien moderne.
- Smil (2020) : le vent a une faible densité énergétique, et même optimisé, l'éolien terrestre plafonne autour de 1–2 W/m² en production effective (moyenne).

En résumé

Aspect	Évolution avec hauteur/pale/power
Production par éolienne	↑ Augmente
Rentabilité au MWh	↑ Meilleure (baisse du LCOE)
Densité surfacique de puissance	↓ Diminue (moins d'éoliennes/km ²)
Optimisation globale	Nécessite plus d'espace mais produit mieux

Oui, l'augmentation de la taille, de la puissance et de la hauteur améliore la rentabilité au MWh. Mais non, cela ne permet pas d'augmenter la puissance surfacique, car l'espacement croît plus vite que la production.

Voici les références et liens internet pour approfondir :

1. Étude de Denholm & Hand (2009) – NREL : « Land-Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United States ». Décrit les espacements typiques (~5D × 10D) entraînant des densités de puissance de 5–8 MW/km², et une moyenne réelle de ≈3 MW/km² avec un intervalle de 1–11 MW/km² ([arxiv.org][1], [docs.nrel.gov][2]).

2. Rapport NREL 2023 – "Estimating National-Scale Wind Potential Using Spatially Explicit Turbine Layout Optimization" : Confirme que la densité médiane reste $\approx 2,9 \text{ MW/km}^2$ aux États-Unis, malgré l'usage de turbines plus grandes ([docs.nrel.gov][3]). Mise en évidence des compromis entre taille, espacements, et densité.

3. Wikipedia – "Wind turbine spacing" . Recommande des espacement de 6–10 fois le diamètre du rotor, et jusqu'à $15 \times D$ pour les grands parcs ([en.wikipedia.org][4]). Basé sur des travaux de Meneveau & Meyers (2010) et simulations avancées.

4. Surface power density – Wikipedia. Table comparative des densités surfaciques typiques :

- Vent : $\sim 1,84 \text{ W/m}^2$
- Solaire : $\sim 6,6 \text{ W/m}^2$
- Nucléaire : $\sim 240 \text{ W/m}^2$ ([en.wikipedia.org][4], [docs.nrel.gov][3], [arxiv.org][1], [en.wikipedia.org][5]).

Référence l'ouvrage de Vaclav Smil ("Power Density"), qui explore ces ordres de grandeur.

5. Article arXiv (2021) – "Explaining the decline of US wind output power density". Analyse les évolutions entre 2001 et 2021 :

- La productivité par surface (puissance / rotor area) a diminué.
- Les turbines sont devenues plus grandes et plus hautes, mais la densité surfacique a décliné ([en.wikipedia.org][5], [arxiv.org][6]).

Synthèse

Source	Élément clé
Denholm & Hand (2009)	Densité moyenne $\approx 3 \text{ MW/km}^2$ malgré recommandations plus élevées
NREL 2023	Confirmation récente : $\sim 2,9 \text{ MW/km}^2$
Wikipedia & Meneveau/Meyers	Espacement nécessaire : 6–15 \times diamètre
Wikipedia density	Vent = $\sim 1,8 \text{ W/m}^2$, solaire = $\sim 6,6 \text{ W/m}^2$, nucléaire = $\sim 240 \text{ W/m}^2$
Regner et al. (2021)	Puissance surfacique en baisse malgré turbines plus performantes

[1]: <https://arxiv.org/abs/1909.13780> "A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions"

[2]: <https://docs.nrel.gov/docs/fy09osti/45834.pdf> "[PDF] Land-Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United ..."

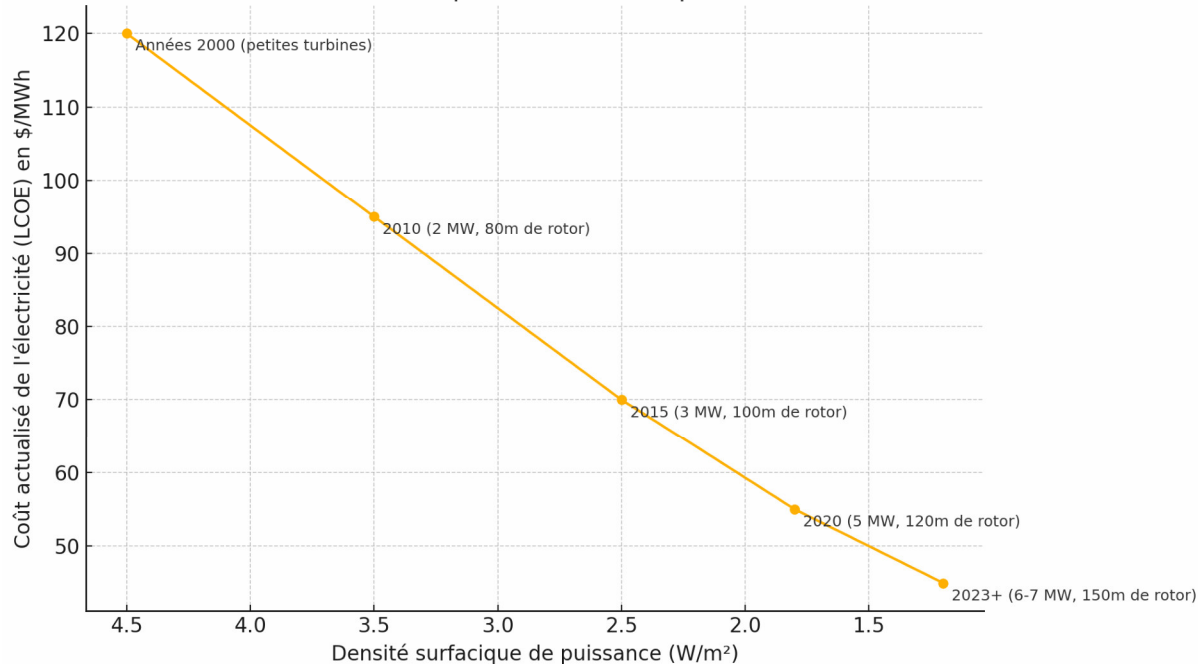
[3]: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/85075.pdf?> "[PDF] Estimating National-Scale Wind Potential Using Spatially Explicit ..."

[4]: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine "Wind turbine"

[5]: https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_power_density "Surface power density"

[6]: <https://arxiv.org/abs/2107.14699> "Explaining the decline of US wind output power density"

Évolution de la densité surfacique vs LCOE des parcs éoliens (2000–2023)



Voici un graphique illustrant la relation inverse entre la densité surfacique de puissance (en W/m²) et le coût actualisé de l'électricité (LCOE) en \$/MWh, sur la base des tendances issues des études citées. On observe clairement que :

- À mesure que les turbines gagnent en taille et en hauteur, la densité surfacique diminue.
- Mais le coût du MWh produit baisse, grâce à une meilleure efficacité individuelle et des économies d'échelle.

Le potentiel surfacique éolien varie est de l'ordre de 10 MW/km², soit une production annuelle de l'ordre de 20 GW.h/an/km² ¹⁰.

Les facteurs de charge

Des courbes précédentes de puissance installée et des quantités d'énergie produite, les facteurs de charge suivant peuvent être déduit :

¹⁰ Selon Jean-Marc Jancovici, la densité surfacique de puissance dans un champ d'éoliennes situé dans une zone favorable est de l'ordre de 10 MW par km², quelque soit la taille des éoliennes concernées (cela varie de 7 à 12 MW par km², donc 10 est valable pour un calcul en ordre de grandeur) <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/pourrait-on-alimenter-la-france-en-electricite-uniqueent-avec-de-leolien/>)

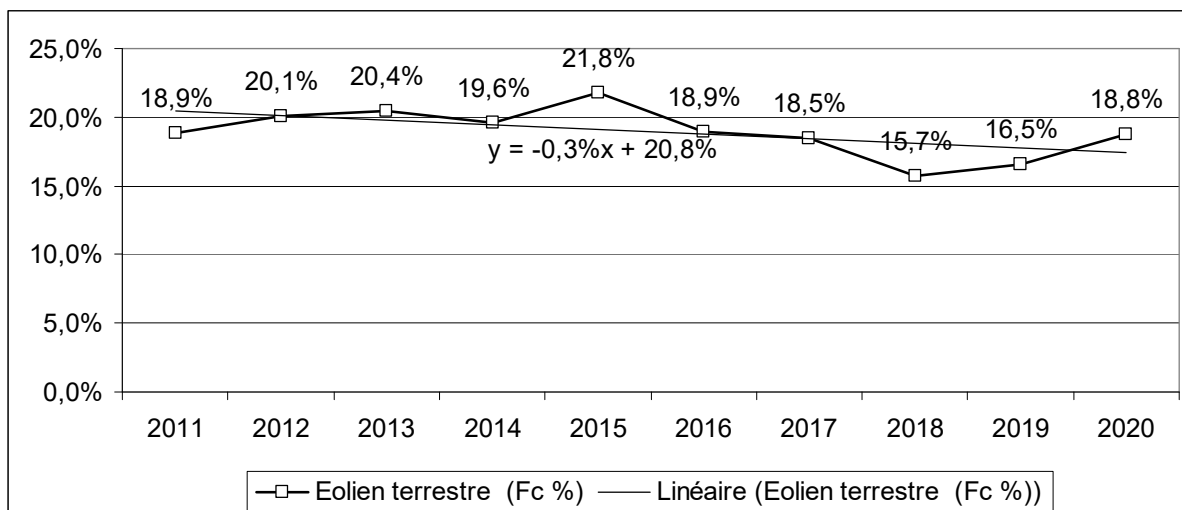


Figure 10 – Evolution des facteurs de charge pour l'éolien terrestre en Bretagne

Le facteur de charge de l'éolien montre une faible érosion (0,3%, 3 % en une décennie), ce qui peut être lié au vieillissement des installations au cours du temps. La valeur moyenne de 20% est une valeur constatée, assez différentes

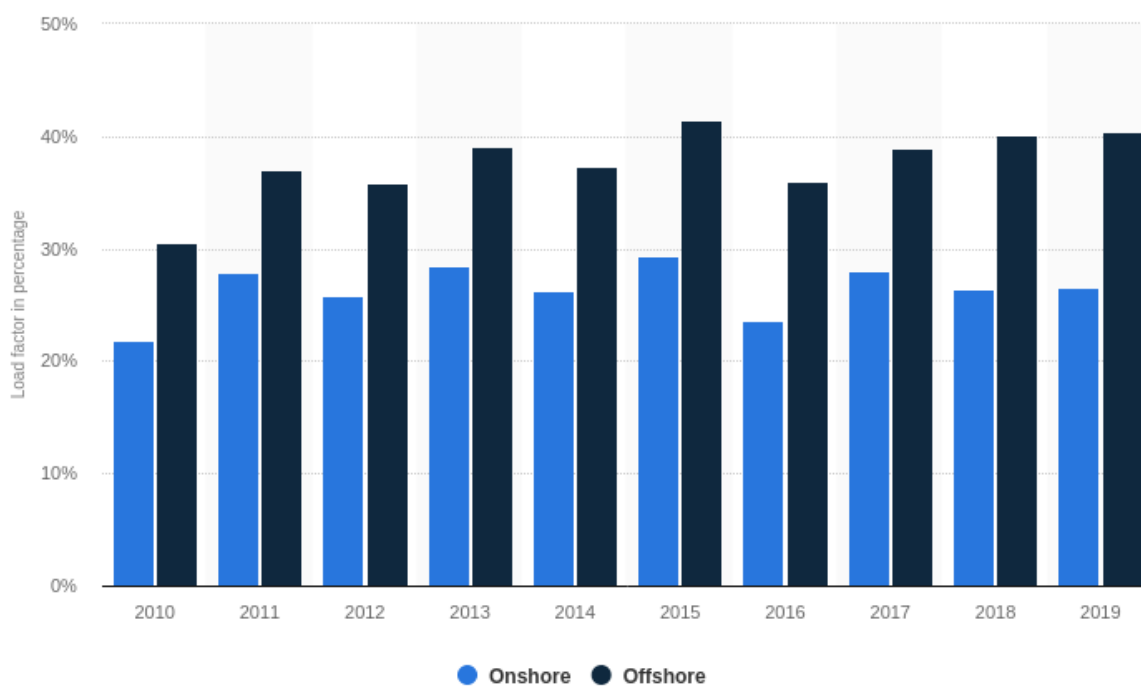


Figure 11 - Les facteurs de charge éoliens terrestre et marins en Grande-Bretagne¹¹

¹¹ <https://www.statista.com/statistics/555654/wind-electricity-load-factor-uk/>

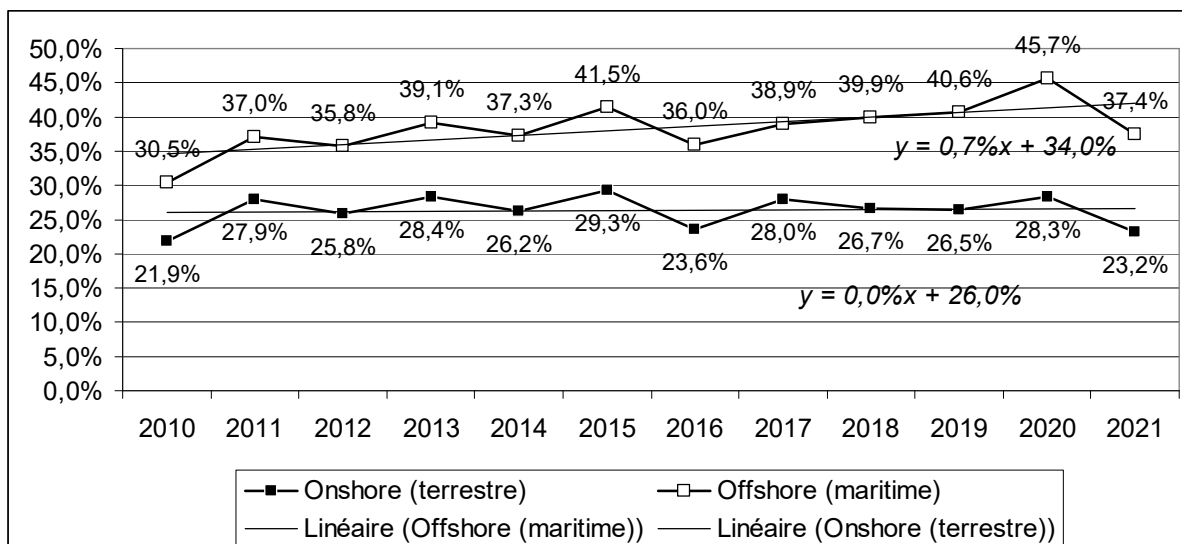


Figure 12 – Evolution des facteurs de charge de l'éolien en Grande-Bretagne¹²

La Grande-Bretagne disposant d'un potentiel éolien supérieur à la Bretagne¹³, tant terrestre que maritime, le facteur de charge est donc supérieur (26% à comparer à 21 %). Le facteur de charge de l'éolien terrestre est aussi stabilisé en Grande-Bretagne alors qu'il régresse en légèrement en Bretagne (ce qui pourrait être dû à une plus forte progression, environ 7 fois plus). Le facteur de charge de l'éolien maritime sera aussi moindre en Bretagne qu'en Grande-Bretagne, de l'ordre de 33 %, pas supérieur à 40% comme annoncé dans les « débats publics » sur les projets de parcs éoliens marins.

De ces observations peut être établie la synthèse suivante :

Facteurs de charges de l'éolien	Terrestre ancienne génération	Terrestre nouvelle génération	Maritime Planté	Maritime flottant
Grande-Bretagne	33 %		40 %	
Bretagne selon statistiques	20 %			
Saint-Nazaire			41 %	
Saint-Brieuc			44 %	
Rapport ADEME	28 %	36 %	49 %	52 %
Retenu	20 %		33 %	

Tableau 2 – Dispersion du facteur de charge pour l'éolien

Vers un éolien intermédiaire

Il est possible d'envisager une voie intermédiaire entre l'éolien industriel moderne (haute technologie, forte puissance, matériaux complexes) et le moulin à vent traditionnel (bois, pierre, mécanique simple, usage local). Cette voie intermédiaire correspond à une filière éolienne « low-tech évoluée », potentiellement autonome, reproductible et résiliente, avec un TRA matériel et énergétique plus élevé.

Caractéristiques d'un éolien intermédiaire (post-industriel / néo-artisanal)

Critère	Éolien industriel actuel	Éolien intermédiaire	Moulin à vent traditionnel
Hauteur du mât	80–160 m	20–40 m	10–20 m
Matériaux du mât	Acier, béton	Bois lamellé, acier léger	Pierre, bois

¹² Source : Statista (<https://www.statista.com/wind-electricity-load-factor-uk>)

¹³ Voir p. XXX.

Pales	Composite, fibres synthétiques	Bois, fibres naturelles	Bois massif, toiles
Générateur	Aimants rares ou à excitation	Aimants ferrite, générateur simple	Transmission mécanique ou meule
Production électrique	2–20 MW	1–50 kW	0 kW (énergie mécanique directe)
Usage	Injection réseau	Autoconsommation locale	Meunerie, pompage, sciage
Recyclabilité	Faible	Bonne	Très bonne
Maintenance	Haute technicité	Accessible, locale	Locale, artisanale
Durée de vie	20–25 ans	25–40 ans	50–100 ans
Technologie	Haute (numérique, hydraulique)	Moyenne (électromécanique simple)	Très faible (mécanique)

Objectifs de ce modèle intermédiaire

- Autonomie régionale de production, d'installation et d'entretien.
- Simplicité des matériaux : disponibles localement ou facilement recyclables.
- Énergie produite suffisante pour des usages directs (pompage, ventilation, chauffage léger, recharge batteries).
- Intégration dans un réseau low-tech ou microgrid plutôt qu'un grand réseau piloté centralement.
- Durabilité sur 1000 ans envisageable : pièces remplaçables, ressources gérables, résidus faibles.

Exemples ou pistes existantes

- Low-Tech Lab et ses projets de petite éolienne à pales en bois, générateur sans terres rares.
- Projet Éoliennes en Open Source : conception avec des pièces recyclées, auto-construction.
- Éoliennes Piggott (type Savonius ou multi-pales) adaptées aux vents faibles.
- Anciennes éoliennes de ferme (États-Unis, XIXe–XXe siècle) pour pompage ou batterie.

Avantages de l'éolien intermédiaire

- Très bon TRA matériel et énergétique à long terme.
- Très peu de déchets non recyclables.
- Compatible avec des systèmes sobres ou dégradés.
- Potentiel d'essaimage local et d'adaptation.

Limites

- Puissance unitaire très faible → nécessite multiplication des unités.
- Production variable et limitée → doit être intégrée dans une logique de sobriété assumée.
- Pas adapté aux hauts besoins industriels centralisés.

En synthèse : un éolien « intermédiaire » représente un compromis entre complexité technologique et résilience, adapté à une société sobre, plus locale, et qui n'aspire plus à croître en permanence, mais à durer.

La station de raccordement

La station de raccordement au réseau, souvent appelée poste électrique de livraison ou poste de transformation, est un maillon crucial mais peu médiatisé de la chaîne de production éolienne. Sans elle, aucune électricité ne peut être injectée dans le réseau public.

Qu'est-ce qu'une station de raccordement au réseau ?

C'est une infrastructure électrique intermédiaire qui assure la transition entre le parc éolien (en général en moyenne tension) et le réseau public (en haute ou très haute tension).

Fonctions principales

Fonction	Description
Transformation de tension	Élévation de la tension (ex. : de 33 kV à 225 kV) pour limiter les pertes sur longue distance.
Contrôle de puissance	Régule l'injection de puissance, la tension et la fréquence pour respecter les normes du réseau.
Protection et sécurité	Détection de surtensions, courts-circuits, disjoncteurs haute tension, relais de protection.
Commutation	Permet de connecter/déconnecter une partie du parc, par exemple en cas de maintenance ou incident.
Mesures et télécommunication	Supervision à distance (SCADA), comptage de l'électricité injectée, synchronisation réseau.

Deux types de stations selon l'emplacement

Type	Caractéristiques
Station onshore (terrestre)	Poste en béton ou acier, souvent situé à proximité immédiate du parc éolien.
Station offshore (en mer)	Poste électrique marin (plateforme) ou flottant, coûteux, parfois avec conversion en courant continu (HVDC).

Ordre de grandeur des coûts

- Pour un parc éolien terrestre de 50 MW, la station représente 5–10 % du coût total du projet.
- Pour l'offshore, cela peut monter à 15–25 %, surtout en cas de conversion HVDC ou de longue distance.

Points techniques sensibles

- Qualité du signal injecté : onduleurs + poste doivent garantir la stabilité fréquentielle, la réduction des harmoniques, le facteur de puissance > 0,9.
- Compensation capacitive ou inductive : nécessaire selon le profil de charge, surtout en cas de lignes longues.
- Intégration paysagère ou environnementale : bruit des transformateurs, clôtures, végétalisation, effets électromagnétiques.
- Sécurité face aux surtensions (ex. : foudre sur éolienne), dispositifs de décharge à la terre.

Cas offshore : la montée en complexité

Pour les grands parcs offshore (>300 MW), on parle parfois de sous-stations électriques offshore, voire de hubs énergétiques (ex. Mer du Nord) où plusieurs parcs convergent. Ces plateformes peuvent intégrer :

- Conversion AC/DC (HVDC),
- Transformateurs de puissance (100 à 300 MVA),
- Refroidissement actif,
- Systèmes autonomes d'alimentation et de secours,
- Hélistation pour maintenance.

Le raccordement au réseau

Afin d'évaluer la capacité intrinsèque de l'énergie éolienne à assurer la consommation électrique d'un territoire (nous prendrons l'exemple de la Bretagne), nous postulons que la puissance moyenne fournie par ce parc éolien sera approximativement ajustée à la puissance de consommation moyenne :

$$P_{em} = P_c$$

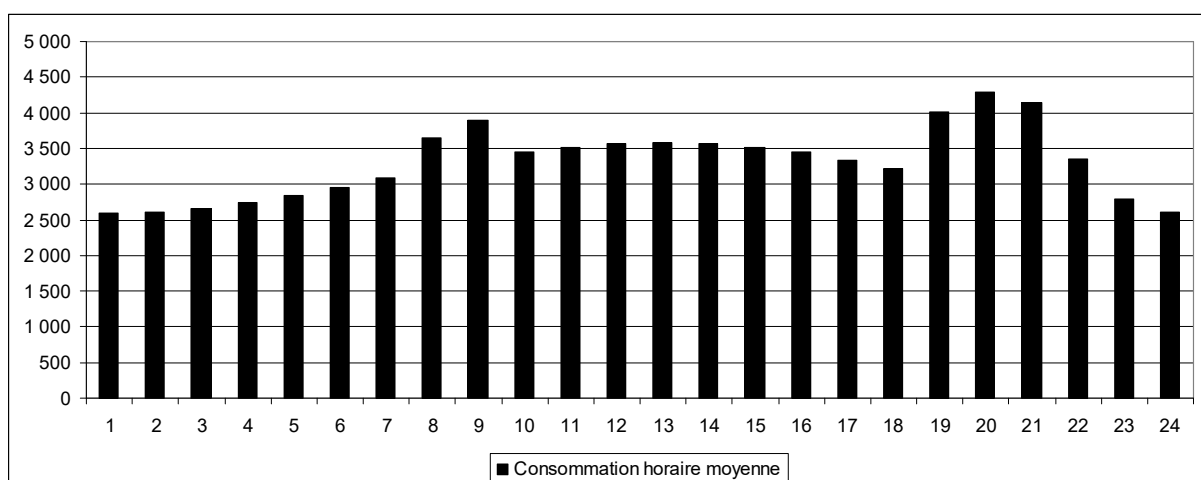
Avec :

- P_{em} : puissance moyenne produite par le parc éolien.
- P_c : puissance moyenne de consommation du territoire

Dans le cas de la Bretagne qui consomme pour l'année de référence 2020, 29 000 GWh, la puissance de consommation moyenne P_c vaudra :

$$P_c \text{ (en GW)} = E_c / (365 * 24) = 3 \text{ 300 MW}$$

Cette puissance moyenne est modulée journalièrement avec des pointes de consommation au matin et surtout en soirée avec des consommations plus lissées en journée et pendant la nuit. Cette consommation présente aussi des variations saisonnières avec une plus grande consommation en hiver.



La puissance maximale consommée sera supérieure à cette puissance moyenne d'un facteur de forme $f_{mm} = P_{e_max} / P_e$. Ce coefficient pourrait être mis sous la forme :

$$F_{mm} = f_{mj} \times f_{ms}$$

Ce coefficient fmm (qui pourrait être affiné par des analyse statistiques pourrait prendre des valeurs de 130 à 140 %.

Si la puissance moyenne fournie par le parc éolien est égale à la puissance moyenne de consommation, cela signifie que la puissance installée du parc tient compte du facteur de charge tel que :

$$P_{em} = f_c \times P_c$$

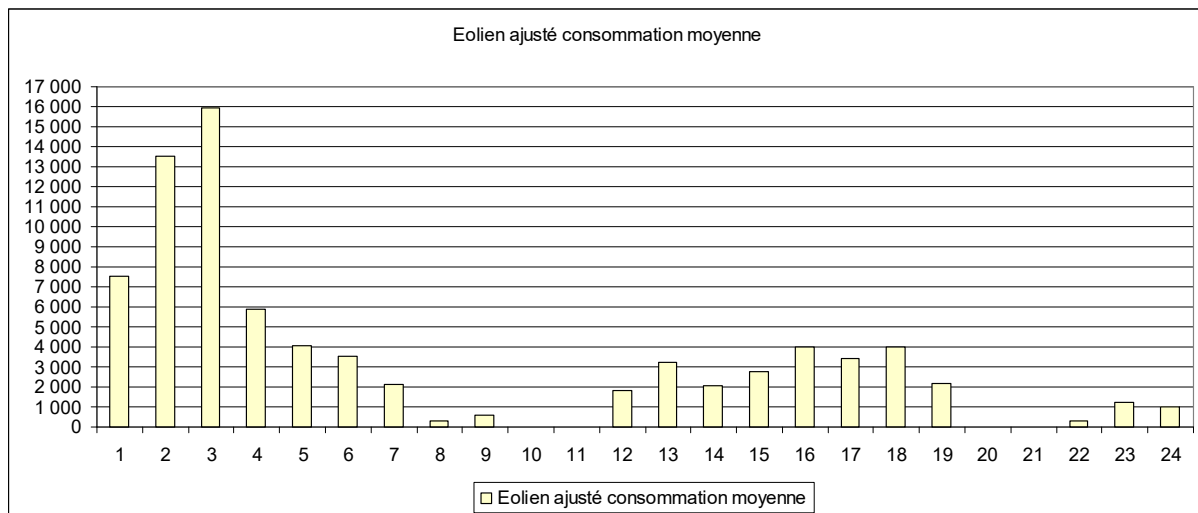
Avec :

- f_c : facteur de charge

La puissance installée du parc éolien P_{pe} se détermine alors par :

$$P_{pe} = P_c / f_c$$

En raison du caractère intermittent du vent, la puissance éolienne instantanée $P_{ei}(t)$ varie dans le temps et ne coïncide pas nécessairement avec la demande instantanée $P_c(t)$. A titre d'illustration, avec un parc accordée à la puissance de consommation moyenne en Bretagne.



Dans cette illustration, on distingue des périodes où le parc produit presque à puissance maximale pendant quelques heures, des périodes où il ne produit presque pas et des périodes où il produit à peu près à la puissance de consommation. Pour autant, la puissance moyenne au cours de cette journée prise en exemple correspond à celle de la consommation moyenne (3 300 MW). L'exemple est choisi de façon à représenter aussi un facteur de charge de 20 % ($P_{em} = 3\,311$ MW, soit 20% de la puissance installée de 16 553 MW. Le facteur de charge de 20 % est celui constaté en moyenne pour l'éolien terrestre en Bretagne : voir Les facteurs de charge p. 43).

L'effet de l'intermittence s'observe par la désynchronisation entre les deux courbes. Deux cas se présentent à un moment donné de la journée ou pur une tranche horaire :

Cas 1 – Sous-production

$$P_{ei}(t) < P_c(t)$$

La production éolienne ne suffit pas à couvrir la consommation instantanée. Il faut alors compléter par d'autres sources (centrales pilotables, imports, stockage...). Si aucune solution n'est disponible, cela entraîne une restriction de la consommation, ou une priorisation des consommateurs (hôpitaux, industries critiques...).

Cas 2 – Surproduction

$$P_{ei}(t) > P_c(t)$$

L'électricité excédentaire ne peut pas toujours être absorbée par le réseau et les consommateurs. Ce surplus constitue une électricité fatale :

- Il peut être stocké (batteries, STEP, hydrogène...),
- Ou bien perdu si aucune solution de stockage ou de redistribution n'est disponible.

Modélisation simplifiée. Soit à un instant donné :

$$P_e = P_{ei} + P_{ef}$$

Avec :

- P_{ei} : puissance effectivement injectée dans le réseau,
- P_{ef} : puissance fatale, non utilisée ou perdue.

La sous-production nécessaire à compléter pour satisfaire la demande est :

$$P_{sp} = P_c - P_{ei}$$

Ratios caractéristiques. On définit les ratios suivants :

- Taux d'injection :

$$r_{ei} = P_{ei} / P_e$$

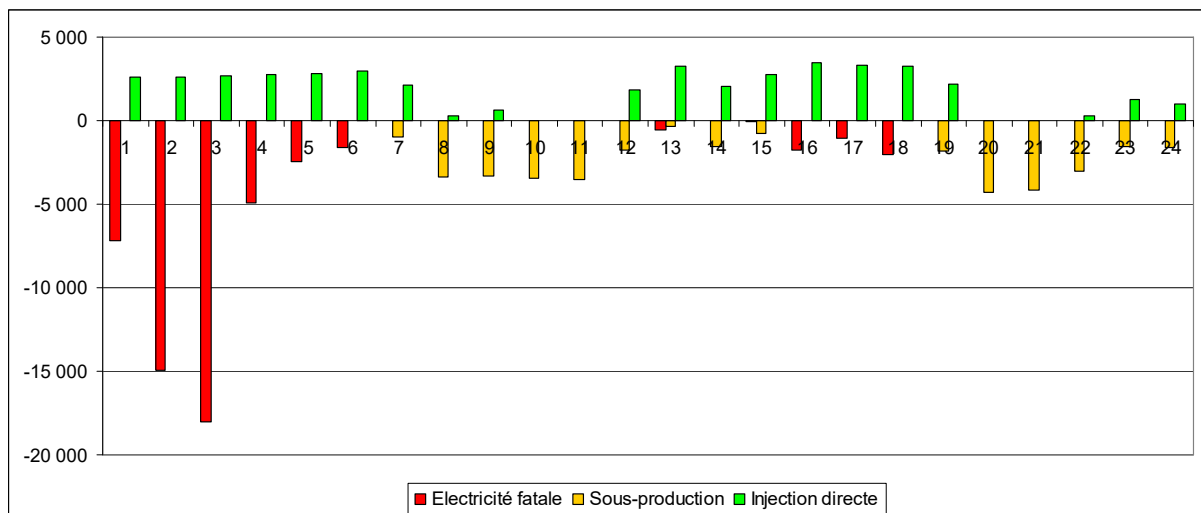
- Taux de perte fatale :

$$r_f = P_{ef} / P_e$$

- Taux de sous-production (équivalent à R_f) :

$$r_{sp} = P_{sp} / P_e = r_f$$

Ces indicateurs permettent d'évaluer l'efficacité du raccordement éolien et la capacité du système électrique à absorber ou compenser l'intermittence.



On observe dans la journée prise en exemple que l'énergie injectée dans le réseau représente $r_{ei} = 55\%$ de l'énergie totale produite dans la journée, ce paramètre étant très variable d'une journée à l'autre (ce qui conduit à un facteur de charge utile de seulement 11% pour cette journée). Ce taux d'injection peut tomber très bas et même s'annuler en particulier en hiver lors de longues périodes anticycloniques avec quasi-absence de vent. Pendant ces périodes, même les consommateurs prioritaires peuvent être privés d'énergie.

Le surdimensionnement.

On peut envisager un surdimensionnement du parc pour limiter la sous-production. Par exemple, avec :

$$P_e = 2 \times P_c$$

Le coefficient de sous-production va sérieusement diminuer, sans pour autant garantir la fourniture de l'énergie attendue par les consommateurs, avec des interruptions résiduelles et sans résoudre significativement l'absence de vents dans les conditions anticycloniques en hiver. Et cette amélioration insuffisante se fera au prix d'un surdimensionnement important avec un accroissement tout aussi significatif de la puissance fatale.

Le sous-dimensionnement

Considérons maintenant un parc éolien sous-dimensionné, par exemple :

$$P_e = P_c / 2$$

Ce qui suppose que l'autre moitié de la puissance consommée est assurée par un autre moyen énergétique. Le coefficient d'énergie fatale diminue, mais le coefficient de sous-production augmente au détriment éventuel des consommateurs prioritaires, sans garantir la fourniture complète d'énergie en conditions extrêmes.

Si l'autre dispositif peut être associé (en particulier s'il est pilotable) au parc éolien, alors ce dispositif peut « effacer » les périodes de sous-production de l'éolien (baisse externe de r_{sp}) sans pour autant effacer l'énergie fatale.

Si l'autre dispositif est un moyen de stockage, alors il pourra :

- Stocker l'énergie fatale,
- Restituer l'énergie en cas de sous-production.

Dimensionnement avec stockage

En général, si l'on tient compte du rendement r_s du stockage, la puissance moyenne installée du parc pour équilibrer la consommation et compenser les pertes peut s'écrire approximativement :

$$P_e = P_c / (r_i + r_s \times r_f)$$

Sans oublier :

$$P_{pe} = P_e / f_c$$

Où r_i et r_f sont respectivement le taux d'injection directe et le taux de perte fatale et r_s , le rendement du système de stockage. Cette expression formalise la synergie entre éolien et stockage.

Par exemple, si 55 % est injecté ($r_i = 0,55$), 45 % est perdu ($r_f = 0,45$). Avec un rendement du stockage de 70 % ($r_s = 0,70$), alors :

$$P_e = P_c / (0,55 + 0,70 \times 0,45) \approx P_c / 0,865 \Rightarrow P_e \approx 1,16 \times P_c$$

Conclusion : un parc éolien ne peut être adapté à la consommation, au moins selon les usages actuels qui conduit à ajuster la production à la consommation, sans que cette consommation ne s'ajuste, même partiellement, à la production. Ces habitudes pourraient, ou devraient, évoluer vers une flexibilisation de la demande, mais cela reste aujourd'hui marginal. Mais l'éolien devrait néanmoins traiter en parallèle au moins deux questions critiques :

- L'absence totale de production pendant des longues durées (jours ou même semaine),

- La déstabilisation du réseau électrique par l'insertion d'énergie intermittente (selon les approches technologiques actuelles de conception)

Dans ce contexte, tout développement significatif de l'éolien doit impérativement intégrer, en parallèle, des réponses à deux défis critiques :

- L'absence prolongée de vent, pouvant durer plusieurs jours, voire plusieurs semaines, en période anticyclonique hivernale, conduisant à une quasi-inexistence de production sur de vastes zones.
- La déstabilisation du réseau électrique par l'injection d'énergie intermittente, notamment :
 - variations rapides de puissance (effet « ramp rate »),
 - faibles capacités d'inertie,
 - difficultés de synchronisation en tension/fréquence,
 - surcharge locale ou congestions.

Ces contraintes doivent être traitées en amont dans la planification énergétique, par des moyens technologiques (stockage, pilotabilité résiduelle, interconnexions), réglementaires (marchés de capacité, effacement), ou comportementaux (modulation de la demande, tarification dynamique).

Noter que ces considérations ont été menées pour la seule production d'électricité, sans tenir compte de la consommation de produits pétrolier et de gaz naturel dont la substitution pourra utiliser plus ou moins facilement l'énergie fatale (ce qui sera examiné dans le document sur le mix énergétique).

L'industrie

Les fabricants d'éoliennes

Il n'y a pas de fabricants d'éoliennes en Bretagne ou même en France (sauf quelques petites éoliennes).

Les opérateurs de parcs éoliens

En Bretagne comme ailleurs en France, les opérateurs de grands parcs éoliens sont le plus souvent des filiales dédiées de grands groupes énergétiques, en majorité européens (par exemple Iberdrola, EDF Renouvelables, wpd, etc.). Ces filiales sont généralement créées spécifiquement pour répondre à des appels d'offres publics portant sur la construction, l'exploitation et la maintenance d'un parc donné.

Une fois le projet attribué, la filiale devient l'entité opérationnelle de référence. Toutefois, il n'est pas rare que cette structure soit revendue à un autre opérateur ou à un fonds d'investissement spécialisé, une fois les premières étapes du projet réalisées (construction, mise en service). Cela permet au développeur initial de se désengager de l'exploitation à long terme — notamment de la gestion de fin de vie (démantèlement, repowering), qui reste juridiquement à la charge de la structure exploitante mais plus difficilement traçable si elle change de mains.

À côté de ces grands acteurs, on trouve aussi des opérateurs locaux, en particulier pour des parcs terrestres de moindre envergure. Il peut s'agir de :

- Sociétés d'économie mixte (SEM) associant collectivités territoriales et capitaux privés,
- Coopératives citoyennes ou associations de particuliers, mobilisant des financements participatifs pour la production d'énergie locale (approches parfois qualifiées « citoyennes » ou encore « éco-citoyenne »).

Ces structures de taille plus modeste peuvent contribuer à une meilleure acceptabilité sociale du projet, en particulier en milieu rural ou littoral, en associant les habitants aux retombées économiques.

L'industrie en Bretagne

Une association Bretagne Ocean Power (un cluster ?) réunit 178 entreprises bretonnes (<https://bretagneoceanpower.fr>) positionnées sur les énergies marines en général et éolienne en particulier. Cette association met en avant des sites et des infrastructures, et diverses compétences utilisables dans la mise en œuvre de projets éolien. Avec recherches de partenariat avec l'éolien marin écossais.

La Bretagne ne dispose pas de fabricants d'éoliennes, elle a surtout des sites à proposer à cette filière énergétique. De ce fait, cette activité ne génère que peu d'emplois sur place et, tant pour l'installation que pour la maintenance, les emplois sont des emplois d'experts extérieurs ou de travailleurs détachés y compris pour la maintenance (venant de l'Europe de l'est par exemple).

Quand bien même des entreprises bretonnes ont des compétences dans les grandes structures mécaniques, l'énergie et les matériaux, la course des éoliennes à la taille et à la puissance disqualifie en pratique tout nouvel entrant sur le secteur. Les éoliennes marines flottantes donnent lieu à des prototypes sur des sites expérimentaux en Bretagne. Le secteur est

cependant investi par de grandes entreprises internationales et la production de série et l'exploitation opérationnelle pourra représenter un gap trop important pour des entreprises bretonnes. Exception avec le prototype d'éolienne flottante Floatgen construit à Saint-Nazaire.

Une stratégie de développement de l'industrie éolienne en Bretagne pourrait consister à privilégier des éoliennes de taille et de puissance petites ou moyennes, pour les particuliers et pour les petites et moyennes entreprises. Avec des éoliennes à axe vertical plutôt qu'horizontal par exemple, plus facile à intégrer dans les contextes urbains.

Voir par exemple l'entreprise Diwatt (<https://www.diwatt.fr>) installée à Goven, l'entreprise Bretagne éolienne (<https://www.bretagne-eolienne.fr>) installée à Pontivy et ses éoliennes nheowind...

Le territoire

Le site

Pour l'éolien, on distingue au moins trois manières de quantifier l'impact territorial :

- la surface artificialisée d'implantation d'une éolienne et son impact direct au sol : la semelle et l'aire de débattement du rotor lorsqu'il s'oriente face au vent (un diamètre au sol de diamètre le diamètre du rotor), ainsi que l'aire de grutage , une zone permanente de stationnement, un chemin d'accès stabilisé, un passage de câbles électriques de raccordement enterré jusqu'au poste de raccordement du parc,
- la surface du parc éolien avec ses éoliennes, la station de raccordement au réseau électrique préexistant, le raccordement au réseau électrique terrestre plutôt distant étant donné le lieu d'implantation du parc à l'écart des constructions,
- la surface de territoire impacté par les nuisances (visuelles, sonores, électromagnétique...).

Dans un parc éolien, les éoliennes n'occupent donc qu'assez faiblement l'espace requis, mais suffisamment que pour représenter l'activité principale du site. Le site est régulièrement fréquenté du fait de la maintenance des éoliennes.

Le site est déboisé et n'est plus compatible de la forêt. L'agriculture n'y occupe plus place résiduelle et le site peut être considérée comme partiellement rendu à la biodiversité.

Lorsqu'un parc d'éoliennes est mis à niveau avec des éoliennes de taille plus importante, l'espacement entre éolienne est à augmenter à l'avenant, de sorte que les anciennes positions ne sont plus réutilisables.

La fondation de l'éolienne requiert environ 600 tonnes de béton pour une puissance de 2 MW et 800 tonnes pour une puissance de 3 MW, sur environ deux mètres d'épaisseur selon la nature du sol (argileux, très meubles...) et un diamètre de l'ordre de 30 mètres.

Lors du démantèlement, l'exploitant du parc est tenu réglementairement de détruire et enlever le socle, « sauf si le bilan environnemental est défavorable », ce qui laisse place à interprétation et laisse donc en héritage aux générations futures des galettes « durables » de béton armée .

Dans la mesure où il a subi les efforts mécaniques et les vibrations de l'éolienne en place, le socle n'est pas réutilisable pour une autre éolienne, a fortiori de plus grande puissance et hauteur.

Les places les plus propices (en quantité de vent, altitude, éloignement des habitations et zones urbaines...) sont prises et il deviendra de plus en plus difficile de définir de nouveaux parcs.

Le paysage et le patrimoine



Figure 13 - Les éoliennes du parc éolien de Saint-Nazaire

Les éoliennes vues depuis Belle-Île, pointe d'Arzic à 31 km de distance de la côte (photo réelle, source : Les gardiens du large). Beaucoup plus visibles que sur les documents fournis lors du débat public où ces éoliennes sont à peine visibles. Ces éoliennes sont moins visibles par temps de pluie.

Les parcs éoliens terrestres sont la cause de nombreuses atteintes aux sites naturels et au patrimoine historique, telle est aussi le cas en Bretagne. Le tracé du raccordement à la terre d'une futur parc éolien maritime au large de Belle-Île-en-mer et Groix est susceptible de passer par les champs de mégalithes de Carnac !¹⁴ La décision n'est pas encore prise, mais le risque est réel.

¹⁴ L'association Paysages de mégalithes qui porte la candidature de l'inscription du site au patrimoine de l'UNESCO lance l'alerte en novembre 2022.

Le logement

Bien qu'installé à distance des agglomérations, des habitations et des installations agricoles, un parc éolien génère des nuisances telles que les logements se situant à proximité sont désertés et perdent de leur valeur immobilière. La crise du logement actuelle en est davantage aggravée.

La finance

Les coûts

Les projections de coûts (LCOE) des énergies renouvelables en général (dont l'éolien) sur les décennies à venir sont pour la plupart des courbes plus ou moins amorties (exponentiellement) à partir des coûts actuels constatés, eux-mêmes assez dispersés. Il est peu probable que ce coût devienne nul ou seulement négligeable, car il y a toujours un capital à amortir et des accidents (hausse du coût du cuivre ou autre matériaux par exemple) ne peut que contredire l'exponentielle amortie.

Coûts	Année	Min	Moyen	Max	Monnaie
Fraunhofer	2021	40	65	85	EUR/MWh
Danish Energy Agency	2015		60		EUR/MWh
Greenpeace	2020		58		EUR/MWh
Powerfuels	2020		23		EUR/MWh
ADEME (nouvelle génération)	2016	57	68	79	EUR/MWh
OCDE		40	50	60	USD/MWh
Lazard	2020		33		USD/MWh
IRENA			39		USD/MWh
Retenu			60		EUR/MWh

Tableau 3 – Emplois avancés dans les débats publics (source : EDF-EN et ENGIE)¹⁵

Avec la mise en œuvre de ces innovations, les coûts complets de production (LCoE) en 2030 pourraient atteindre 47€/MWh à terre, de 54 à 73€/MWh en mer posé et de 62 à 102 €/MWh en flottant.

		EOLIEN		
TYPE	Périmètre / terme	FRANCE 2019		
	Puissance (MW)	2 - 3,6		
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES				
HYPOTHÈSES	Facteur de charge (%)	25 - 30		
	Durée de fonctionnement (années)	25		
	Taux d'actualisation (%)	4		
COÛTS				
HYPOTHÈSES	Investissement initial (€/kW)	1 400 - 1 620		
	Exploitation (€/kW/an)	45 - 50		
COÛT DE PRODUCTION (€/MWH)				
RÉSULTATS	LCOE	50 - 71		
	DÉCOMPOSITION DU LCOE			
	Coût CAPEX	34 - 48		
	Coût OPEX	17 - 23		
	LCOE avec taux 3 %	47 - 66		
LCOE avec taux 5 %	54 - 76			

¹⁵ Vincent Guénard, *L'éolien en mer*, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) [170609-ademe-l-eolien-en-mer-article-pour-le-cesm.pdf]

Figure 14 – LCOE de l'éolien terrestre (ADEME 2019)¹⁶

Année de mise en service	2030	2050
Durée de vie (années)	25 - 30	25 - 30
Taux actualisation (%)	5	3
Facteur de charge (%)	45 - 48	
CAPEX €/kWc	2010 - 3100	2080 - 2650
OPEX fixe/an (% CAPEX)	2 - 2,6	1,5 - 2
LCOE €/MWh	56 - 88	35 - 54
LCOE €/MWh avec taux 4 % en 2030 et 2 % en 2050	52 - 81	32 - 49
LCOE €/MWh avec taux 6 % en 2030 et 4 % en 2050	60 - 92	37 - 59

Figure 15 – LCOE de l'éolien maritime posé : perspectives pour 2030 et 2050 (ADEME 2019)

Facteur de charge de 45 à 48 % particulièrement optimiste, supérieur à l'Ecosse (33%).

Les subventions

Dans la mesure où il bénéficie d'un prix d'achat garanti par un opérateur public, l'éolien est subventionné de façon à lui garantir la rentabilité aux opérateurs à qui il reste de faire des calculs de rentabilité et d'actualisation du capital. La sélection d'un opérateur au moment d'un appel d'offre ne se porte donc pas sur sa rentabilité financière.

Le prix garanti est le plus élevé dans l'éolien maritime que en particulier pour l'éolien flottant (240 € / Mwh). La justification tient à ce que des premiers parcs « lancent » la technologie et une filière se développe ainsi. Cette approche n'a pas conduit à une filière éolienne en France et encore moins en Bretagne, hormis pour des installateurs en sous-traitance.

Les parcs danois sont souvent présentés comme ayant la rentabilité aujourd'hui. Le Danemark a introduit dès les années 1980 un tarif d'achat garanti (feed-in tariff) pour les éoliennes, afin d'assurer aux producteurs un revenu stable et encourager l'investissement. Ce mécanisme assurait que les producteurs d'énergie renouvelable soient payés à un prix fixe (ou majoré) pour l'électricité injectée dans le réseau, indépendamment du prix du marché. Dans le passé, les éoliennes nouvellement construites bénéficiaient de 10 ans de tarif fixe avant d'être intégrées au marché.

La loi danoise de Promotion des Énergies Renouvelables de 2009 (Promotion of Renewable Energy Act) prévoit une prime de rachat (« feed-in premium ») pour l'éolien, qui complète le prix de marché, dans certaines conditions.

Depuis 1999, le Danemark recherche un modèle plus orienté marché et a commencé à réduire les tarifs fixes et à basculer vers des mécanismes de marché (certificats, prime variable, obligations de capacité) pour les nouvelles installations.

¹⁶ ADEME, *Coûts renouvelables en France*, 2016 (https://presse.ademe.fr/coûts_energies_renouvelables_en_france_edition2016v1.pdf)

Le Danemark utilise aujourd'hui des contrats à deux volets (CfD – Contracts for Difference) dans ses appels d'offres offshore, fournissant une « régulation de revenus » (complément ou retenue) au-delà ou en dessous du prix de référence.

La sécurité

L'aérogénérateur expérimental d'Ouessant a perdu le 12 novembre 1980 une pale puis s'est effondré, sous l'effet d'une trop forte fatigue de sa structure et la corrosion. Cette période exploratoire a permis de renforcer les dispositifs, mais d'autres accidents se produisent comme la chute d'une pale de 6 tonnes d'une éolienne le 27 juin 2020 à Plémet.

La santé

Le « syndrome de l'éolien » (Wind Turbine Syndrome - WTS), mis en avant par la pédiatre américaine Nina Pierpont, en 2009 regroupe différents symptômes potentiellement liés à la proximité d'éolienne : maux de tête, perturbations du sommeil, stress, acouphènes, sensations de pression anormale dans les oreilles, vertiges, migraines, pression dans la poitrine, pression dans les oreilles, déprime, stress, fatigue, irritabilité, tachycardie... Ces symptômes seraient liés aux sons et aux infrasons, audibles ou inaudibles, générés par une éolienne. Ces symptômes seraient aussi ressentis par les animaux : le bétail, les chiens, les chevaux... seraient stressés et feraient preuve d'agressivité.

Les enquêtes menées par différents organismes officiels de santé¹⁷ mettent au plus en évidence une corrélation entre les symptômes, mais pas de liens directs entre les causes présumées et les symptômes déclarés.

L'OMS recommande de réduire les niveaux de bruit moyen des éoliennes, au-dessous de 45 décibels (dB). En France, la cour d'appel de Toulouse a reconnu la réalité d'un « syndrome éolien » en 2021.

¹⁷ <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-et-risque-pour-sante/radiation/sources-rayonnements-quotidien/bruit-eoliennes/introduction-bruit-sante-environnement-milieu-travail.html>

Le travail et l'emploi

Les projets de parcs éoliens marins donnent lieu à des annonces de créations d'emplois, transitoires lors de la construction et durables. Ces annonces n'offrent (pas plus que la quantité d'énergie produite exprimée en nombre d' « habitants » ou de « familles ») aucune garantie d'une réalité et servent surtout comme les promesses électorales à donner un argument aux promoteurs des projets avant la décision. Les hôtels et les agences de communication y verront sans doute une retombée économique.

	Directs	Indirects
Saint-Nazaire	1 000	4 000
Saint-Brieuc	2 000	

Tableau 4 – Emplois avancés dans les débats publics (source : EDF-EN et ENGIE)¹⁸

¹⁸ Vincent Guénard, *L'éolien en mer*, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) [170609-ademe-l-eolien-en-mer-article-pour-le-cesm.pdf]

L'environnement

Le microclimat



Figure 16 - Phénomène de traînée à l'arrière d'éoliennes

Photo du champ de Horns Rev 3 au Danemark (49 turbines Vestas de 8 MW). Dans certaines conditions météorologiques (température, humidité, vent...), la traînée à l'arrière est mise en évidence visuellement.

L'hexafluorure de soufre (de formule SF₆, un atome de soufre et 6 atomes de fluor) est un isolant électrique performant largement utilisé dans la fabrication des éoliennes. Interdit dans la plupart des secteurs industriels, le SF₆ reste largement utilisé dans les tableaux de distribution électroniques des éoliennes installés dans l'espace réduit de la nacelle. La quantité utilisée, de l'ordre de 2 Kg par éolienne, devient très importante avec le nombre d'éoliennes installées et les fuites ne sont plus négligeables, en particulier en Allemagne avec 30 000 éoliennes installées,

Le maritime

Il est tout d'abord difficile d'extraire des documents mis à la disposition du public un bilan précis et fiable des matériaux, de construction et énergétique, utilisé par le parc éolien. Le site du parc éolien de Saint-Nazaire est le plus explicite sur ce point, mais certaines données laissent un doute sur leur interprétation. Les données équivalentes n'existent ni pour le parc de Saint-Brieuc, ni pour le parc de Lorient. En première approximation, on pourrait considérer, compte tenu des puissances installées, que les quantités sont équivalentes à celles de Saint-Nazaire pour le parc de Saint-Brieuc et une fois et demi plus importante pour le parc de Lorient.

Bilan en matériaux	Unité	Saint-Nazaire ¹⁹
Acier	t	137 940
Cuivre	t	1 800
Composites et polyuréthanes (plastiques)	t	227
Zinc	t	
Aluminium	t	55 149
Fibre de verre	t	14 280
Ciment	t	4 928
Dysprosium ²⁰	t	?
Néodyme	t	?
Eau	t	?
Fuel domestique	t	530 +
Gaz naturel	m3	?

Tableau 5 - Tentative de constitution d'un bilan en matériaux

L'ensemble des matériaux utilisés pour le parc sont extraits de la croûte terrestre et induisent une consommation d'énergie apparemment prise en compte dans le bilan carbone et dans le taux de retour énergétique.

Le parc éolien maritime nécessite pour leur construction les quantités de matières suivantes :

Paramètre	Unité	Terrestre	Maritime	
Acier	t / MW	146	184	+ 26 %
Fibre de verre	t / MW	15	19	+ 27 %
Taux d'émission de gaz à effet de serre	g CO2 eq / kWh	12,7	14,8	+ 17 %
Facteur de charge déduit	%	25 %	35 %	+ 40 %
Temps de retour énergétique	mois	12	14	+ 17 %
Durée caractéristique d'exploitation	année	25	25	+ 0 %

Tableau 6 – Comparaison entre éolien terrestre et maritime

Les matériaux

Les éoliennes sont assez consommatrices de matériaux. Afin de réduire les masses en hauteur, les éoliennes maritimes privilégient des technologies (aimants permanents...) consommatrices de terres rares (en particulier néodyme et dysprosium).

¹⁹ d'après : parc-eolien-en-mer-de-saint-nazaire.fr/wp-content/uploads/555654/2015/06/SNA_Bilan_Carbonne.pdf - p. 7

²⁰ d'après <https://www.connaissancedesenergies.org/energies-renouvelables-lademe-fait-le-pointsur-les-besoins-de-terres-rares-191127> : 173 de néodyme et 33 tonnes de dysprosium pour 10 GW de puissance installée et https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/ADEME_fiche_technique_terres-rares_energies_renouvelable_stockage_energiei2019.pdf.

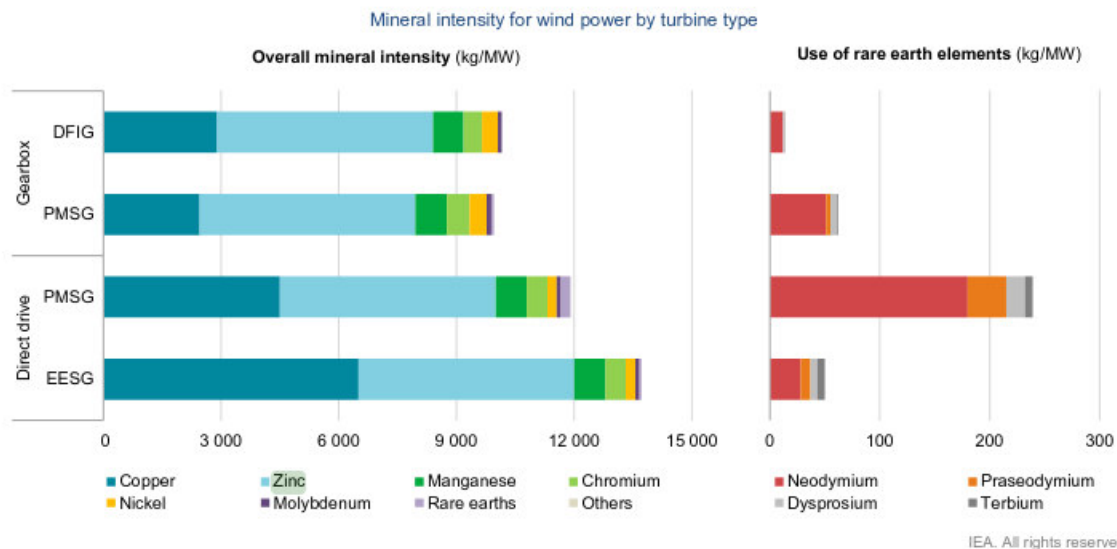


Figure 17 – Consommation de métaux et terres rares selon les technologies ²¹

Notes: DFK3 = double-fed induction generators; PMSG = permanent-magnet synchronous generator; EESG = electrically excited synchronous generator. The intensity numbers are based on the onshore installation environment. More copper is needed in offshore applications due to much longer cabling requirements. Sources: Carrara et al. (2020); Elia et al. (2020)

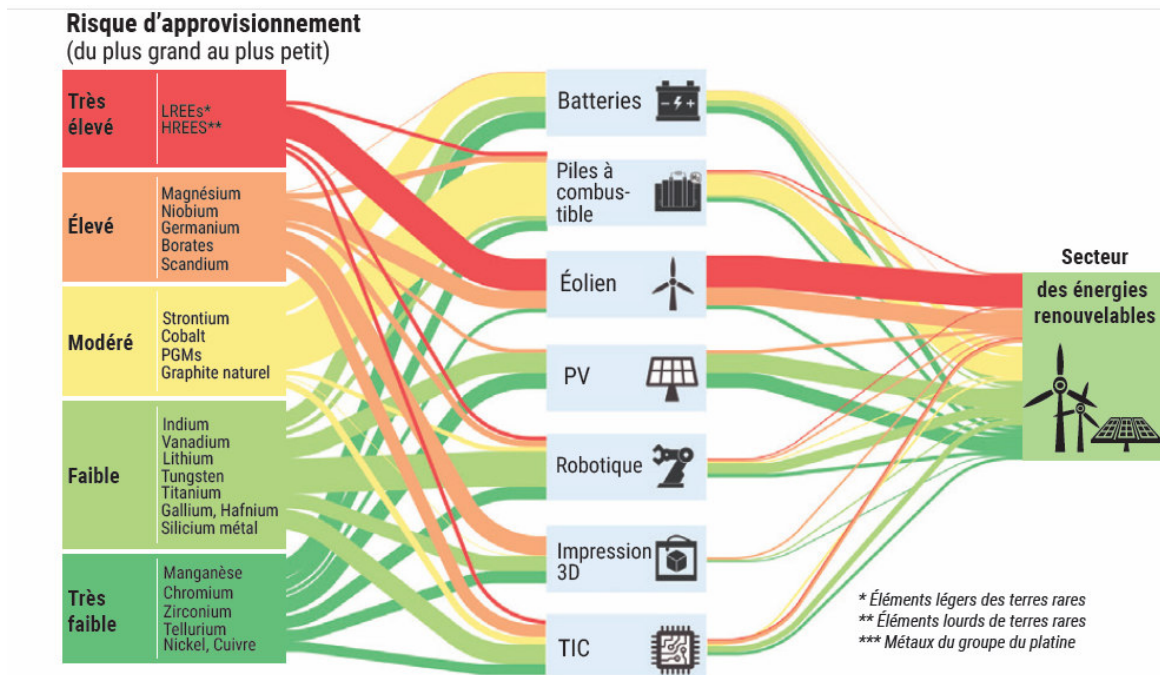
La transition énergétique fondée sur les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, s'inscrit dans une transition plus large vers l'électrification des activités humaines. L'énergie éolienne entre donc en concurrence avec d'autres usages électriques (mobilité, industrie, chauffage) pour l'accès aux matériaux critiques nécessaires aux technologies électriques.

Parmi ces matériaux, les terres rares, et en particulier le néodyme, sont considérées comme les plus critiques. Le néodyme est utilisé dans la fabrication des aimants permanents qui équipent certaines génératrices d'éoliennes, notamment les génératrices à aimants permanents sans multiplicateur (direct drive). Ces aimants présentent une forte densité énergétique et conservent leurs propriétés magnétiques même à haute température, ce qui est essentiel pour une utilisation fiable sur la durée (le néodyme assure la magnétisation, et le dysprosium ou le terbium sont parfois ajoutés pour la stabilité thermique (conservation des propriétés à haute température)).

La même technologie d'aimants permanents est utilisée dans les moteurs électriques des véhicules électriques, qui effectuent l'opération inverse de l'éolienne : convertir l'électricité en couple mécanique transmis aux roues.

La course à la hauteur et à la puissance des éoliennes, en particulier dans l'offshore, accentue la pression sur ces matériaux, car elle pousse à réduire les masses en hauteur (notamment dans la nacelle) et à diminuer le volume des génératrices, ce que permettent les aimants permanents à base de néodyme (et parfois de dysprosium).

²¹ IEA, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition*, <https://iea.blob.core.windows.net>, page 65.



Matériaux et technologies pertinents pour le secteur des énergies renouvelables, les couleurs chaudes indiquent le degré de criticité (European Union 2020 in Engie, ... , p. 90).

Les alternatives

Les matériaux critiques et les alternatives dans la conception des éoliennes

1. Matériaux critiques clés dans les éoliennes

Matériau	Utilisation principale	Remarques
Néodyme (Nd)	Aimants permanents (génératrices direct drive)	Forte densité énergétique, sensibles à la température.
Dysprosium (Dy)	Stabilisation thermique des aimants	Utilisé en petite quantité mais essentiel pour la longévité.
Terbium (Tb)	Idem	Moins courant que le Dy.
Cuivre (Cu)	Bobinage des génératrices, câblage, transformateurs	Forte demande industrielle, prix volatil.
Bauxite / Aluminium	Pales, structures internes légères	Moins critique mais consommé en masse.
Fibre de verre / Carbone	Pales, parfois nacelles	Non critiques mais difficiles à recycler.

2. Dépendance géopolitique

La Chine produit ~87 % des terres rares mondiales (raffinées), et contrôle la quasi-totalité de la chaîne de valeur : extraction, séparation, métallurgie. Dysprosium et terbium proviennent presque exclusivement de mines chinoises ou de zones sous influence. Cette situation crée un risque stratégique élevé, en cas de tensions commerciales ou politiques.

3. Alternatives technologiques

Alternative	Description	Avantages	Inconvénients / Conséquences
Génératrice à cage d'écurie (asynchrone)	Sans aimant, utilise champ tournant induit	Moins coûteuse, robuste	Moins efficace à faible vitesse, nécessite multiplicateur

Génératrice synchrone sans aimants ("à excitation bobinée")	Bobinage au rotor au lieu d'aimants permanents	Aucune terre rare, contrôle précis	Rotor complexe (collecteurs), maintenance plus lourde
Ferrites (aimants non terres rares)	Substitut aux aimants NdFeB	Abondants, stables	Beaucoup moins puissants, génératrice plus volumineuse
Entraînement indirect (avec multiplicateur)	Permet d'utiliser des génératrices standards	Réduction du besoin d'aimants	Complexité mécanique, risques de panne, bruit
Superconducteurs (futuriste)	Génératrices très compactes à perte nulle	Très haute densité énergétique	Coûts, refroidissement cryogénique, pas encore mature

4. Conséquences sur la conception des éoliennes

Choix technologique	Impact sur la conception
Sans aimant	Génératrice plus lourde ou volumineuse → augmente la taille de la nacelle ou impose un multiplicateur
Ferrites	Moins de performance → augmentation du diamètre du rotor ou baisse du rendement global
Aimants NdFeB optimisés	Moins de volume en haut, meilleure efficacité à basse vitesse → favorise le direct drive offshore
Asynchrone à double alimentation (DFIG)	Couramment utilisé, mais dépend d'un convertisseur partiel et d'un système de contrôle complexe

5. Stratégies de réduction de dépendance

- Diversification géographique : ouverture de mines en Australie, Canada, Suède (mine LKAB).
- Recyclage des aimants : émergent mais encore marginal.
- Éco-conception : choix de matériaux alternatifs dès la phase de R&D.
- Stock stratégique (envisagé en Europe et aux USA).

La biodiversité

Le premier impact de l'éolien sur la biodiversité est lié à la surface de territoire préempté pour capter le vent qui souffle sur ce territoire : le développement de l'éolien s'effectue au détriment du territoire, du sol qui est un capital multi-millénaire réservoir de matières physico-chimique et de matière organique. Le site d'un parc éolien, terrestre ou maritime, est une artificialisation durable du territoire.

L'éolien terrestre

<https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-energies-renouvelables-ont-elles-impact-biodiversite-80293/>

D'un côté, elles permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre en fabriquant de l'énergie « propre ». De l'autre, elles génèrent une artificialisation des espaces naturels avec une perte importante d'habitat et de biodiversité. Une nouvelle étude, publiée dans la revue *Global Change Biology*, a passé en revue près de 3.000 installations d'énergies renouvelables à travers le monde (centrales solaires, éoliennes et hydroélectriques), et calculé que ces dernières empiètent ou dégradent 886 espaces naturels protégés et plus de 800 sites clés pour la biodiversité, tels que définis par l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature).

Ces infrastructures, ainsi que toutes celles qu'elles génèrent comme les routes et les activités humaines associées, ont un impact dévastateur sur les espaces naturels et sont totalement incompatibles avec les efforts de préservation de la biodiversité », s'alarme José Rehbein, principal auteur de l'étude et chercheur à l'université du Queensland en Australie. Le constat est particulièrement flagrant en Europe de l'Ouest, où plus de 1.200 centrales (soit près d'une sur quatre) sont construites sur des zones sensibles ou protégées.

L'éolien maritime

Les débats publics sur l'implantation de parcs éoliens marins mettent en évidence la méconnaissance de nombreux aspects de la biodiversité sous-marine et a fortiori, de façon telle que l'impact d'un parc éolien sur la biodiversité est imprédictible. Sans connaissance préalable de cette biodiversité, les études d'impact ne peuvent être menées et cet impact ne pourra jamais être évalué.

Des chercheurs du l'Institut universitaire européen de la mer à Brest mettent en évidence en juin 2023 le stress causé sur les coquillages par un parc éolien marin. Un exemple parmi d'autres d'études à mener avant et non après.

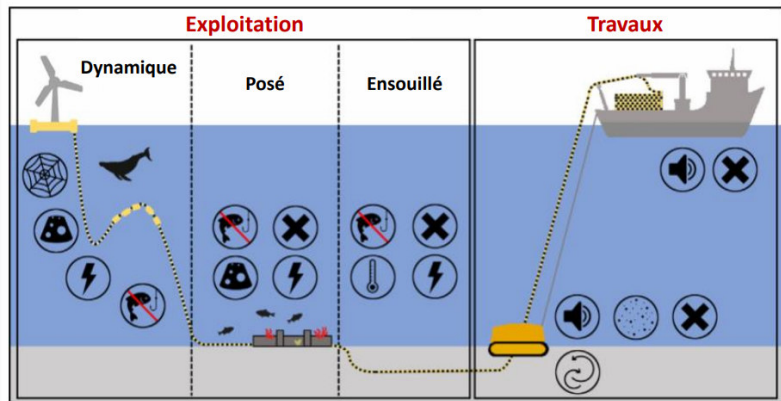
La phase de construction d'un parc éolien en mer a des impacts négatifs sur l'environnement, notamment sur les mammifères (cétacés, phoques) et les poissons. En fonctionnement, les éoliennes ont un impact sur les mammifères marins et les poissons à cause des vibrations générées, des émissions électromagnétiques dans les câbles d'export d'électricité ainsi qu'un impact sur l'avifaune du fait des risques de collisions et du phénomène d'évitement des parcs.

Un effet de type « récif artificiel » associé aux fondations des éoliennes a été très nettement observé au sein des parcs déjà construits, et ce, après un an seulement.

Les promoteurs des parcs éoliens marins mettent en avant que l'implantation de parcs éoliens en mer favorise l'augmentation locale de biomasse et de biodiversité marines, avec un effet positif sur les communautés de poissons.

Sea sheperd

-  Modification du substrat
-  Mise en suspension des sédiments
-  Rayonnement thermique
-  Modification de la chimie de l'eau et des sédiments
-  Bruits sous-marins
-  Emission de champs électromagnétiques
-  Effet « récif »
-  Effet « réserve »



Source : Taormina et al., 2018

Espaces protégés, znieff, zico, natura 2000,

Marais breton (Natura 2000)

Directive oiseaux Zones de protections spéciales (ZPS)

Directives habitats Zones spéciales de conservations (ZSC)

Les parcs maritimes

biodiversité



ARTE, Les éoliennes en mer, quelle cohabitation avec la nature ?
<https://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U>

La vidéo "Le dessous des cartes : Eoliennes en mer" explore les effets des parcs éoliens offshore sur les écosystèmes marins, en se concentrant sur la mer du Nord.

Voici un résumé des points clés abordés (synthèse par Google Gemini) :

* Impact sur la vie marine : La vidéo étudie si les installations éoliennes menacent la biodiversité ou si elles peuvent au contraire en bénéficier. Des chercheurs de plusieurs pays européens étudient leur impact sur diverses espèces, des microorganismes aux poissons, en passant par les oiseaux et les mammifères marins comme les marsouins [[00:50](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=50>)].

* Défis et solutions : Elle souligne les impacts négatifs comme la pollution sonore due à la construction, qui perturbe les mammifères marins [[19:15](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=1155>)], et le risque de collision pour les oiseaux [[28:52](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=1732>)]. Des solutions sont présentées, telles que l'utilisation d'un "rideau de bulles" pour réduire le bruit sous-marin [[23:17](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=1397>)], l'ajout de peinture sur les pales pour les rendre plus visibles aux oiseaux [[33:44](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=2024>)], ou l'arrêt temporaire des éoliennes pendant les périodes de migration [[40:31](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=2431>)].

* Transformation de l'écosystème : Le film explique comment les fondations des éoliennes créent de nouveaux habitats, formant de nouveaux "biotopes" et attirant une grande variété d'espèces [[04:17](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=257>)]. Il évoque également la possibilité de développer des récifs d'huîtres et d'utiliser les fermes pour l'aquaculture [[43:24](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=2604>)].

* Perspectives à long terme : La vidéo conclut sur la nécessité d'une coopération internationale pour trouver un équilibre entre la production d'énergie renouvelable et la préservation de l'environnement, reconnaissant que les parcs éoliens en mer ont à la fois des effets négatifs et de nouvelles opportunités pour la conservation marine [[48:22](<http://www.youtube.com/watch?v=frm7rnlAa2U&t=2902>)].

http://googleusercontent.com/youtube_content/0

Le résumé a été généré à partir des points clés de la vidéo, mais il est vrai que le chercheur mentionne explicitement le bruit équivalent à un porte-conteneur et que l'impact sur les marsouins est une préoccupation majeure. La conclusion de la vidéo, et la vôtre, est que la question est encore à l'étude et que les effets à long terme ne sont pas encore entièrement connus.

Récif ou « hotspot pour la diversité marine » coquillages, algues, poissons... Ce qui s'appelle bicolonisation, « encrassement biologique », biosalissure ou biofouling, un inconvénient pour les structures immergées ou les navires et fait généralement de traitement d'antifouling généralement des peintures biocides à base de toxines et à diffusion lente dans le milieu marin en général assez peu favorables aux coquillages et autres organismes. La bicolonisation est une préoccupation constante dans l'industrie navale et marine.

Si l'effet récif est positif pour la biodiversité, il le sera encore davantage sans l'éolienne et les activités qu'elle induit tout au long de son cycle de vie.

Enjeu : préservation de la biodiversité dans le long terme ?

L'hexafluorure de soufre (SF₆)

Oui, certaines éoliennes utilisent effectivement du SF₆ (hexafluorure de soufre), mais pas dans les pales ni les éléments combustibles : il est utilisé dans les appareillages électriques, en particulier dans les disjoncteurs haute tension, souvent situés :

- dans la nacelle (le "bloc technique" en haut du mât), ou
- dans la station de transformation électrique du parc (souvent au sol).

Pourquoi du SF₆ dans l'éolien ? Le SF₆ est un excellent isolant électrique :

- * Il permet de réduire la taille des équipements,
- * Il est stable, non inflammable, et efficace à haute tension,
- * Il est utilisé depuis des décennies dans les GIS (Gas Insulated Switchgear), en particulier dans les transformateurs compacts.

C'est pourquoi on le retrouve dans :

- Des disjoncteurs dans les éoliennes de moyenne ou forte puissance,
- Des cellules MT/HT (moyenne et haute tension),
- Des postes de raccordement des parcs au réseau.

Problème : le SF₆ est un gaz à effet de serre extrêmement puissant

Propriété	Valeur
Potentiel de réchauffement global (PRG sur 100 ans)	23 500 fois le CO ₂
Durée de vie dans l'atmosphère	~3 200 ans
Inflammabilité	✗ Non inflammable
Toxicité	Faible, sauf en cas de décomposition (incendie)

Et en cas d'incendie ? Le SF₆ lui-même ne brûle pas, mais :

- Sous l'effet de températures très élevées (arc électrique ou incendie), il se décompose en sous-produits toxiques :
 - Fluorure d'hydrogène (HF) : corrosif et toxique,
 - Thionyl fluoride (SOF₂), sulfuryl fluoride (SO₂F₂), etc.
- Ces gaz peuvent être dangereux pour les équipes d'intervention, et nécessitent des procédures spécifiques.

Ces situations restent rares, mais documentées, surtout sur éoliennes offshore ou haute puissance, où les tensions sont plus élevées.

Le SF₆ dans une éolienne : en quelles quantités ?

- Une éolienne de 2 à 3 MW contient typiquement quelques centaines de grammes à 1 kg de SF₆.
- Un parc de 20 éoliennes peut contenir 10 à 20 kg de SF₆ en tout, si tous les appareillages sont au SF₆.
- À comparer avec les grandes stations électriques classiques, qui peuvent en contenir plusieurs tonnes.

Tendances actuelles

- L'Union européenne pousse à interdire progressivement le SF₆ dans les nouveaux équipements : Proposition de révision du règlement F-Gas (UE) : interdiction progressive dès 2026–2030 selon les usages.
- Des alternatives existent : air sec, gaz fluorés moins nocifs (G³, Novec), vide.

Les fabricants d'éoliennes (GE, Siemens Gamesa, Enercon, Vestas) s'engagent de plus en plus à :

- Ne plus utiliser de SF₆ dans les nouveaux modèles,
- Proposer des transformateurs et disjoncteurs "SF₆-free".

En résumé

- certaines éoliennes utilisent du SF₆ dans leur appareillage électrique,
- Pas dans les pales ni les composants combustibles,
- En cas d'incendie, il peut libérer des sous-produits toxiques, mais il ne s'enflamme pas lui-même.
- Le SF₆ est un gaz à effet de serre très puissant, en cours de remplacement progressif dans les technologies récentes.

Les substances préoccupantes pour l'environnement

<https://france3-regions.franceinfo.fr/bretagne/cotes-d-armor/saint-brieuc/eoliennes-en-mer-62-substances-chimiques-susceptibles-d-etre-emises-dans-l-eau-considerrees-comme-preoccupantes-pour-l-environnement-selon-une-etude-3209006.html>

Éoliennes en mer : 62 substances chimiques susceptibles d'être émises dans l'eau, considérées comme préoccupantes pour l'environnement, selon une étude



Ces substances proviennent essentiellement des systèmes anticorrosion et des peintures et pourraient s'avérer toxiques pour l'écosystème marin. En Bretagne, un parc éolien est déjà en service, en baie de Saint-Brieuc. Mais de nombreux autres parcs sont à l'étude. Cette problématique de pollution va être étudiée de près.

Il s'agit d'une étude internationale coordonnée par l'Institut belge de recherche pour l'agriculture, la pêche et l'alimentation et menée par l'Agence fédérale maritime et hydrographique allemande, ainsi que l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). Cette étude révèle que les parcs éoliens en mer pourraient libérer plus de 200 substances chimiques dans l'océan.

Parmi elles, 62 sont considérées comme particulièrement préoccupantes pour l'environnement, parce qu'elles figurent sur des listes prioritaires établies par l'Agence européenne des produits chimiques ou la Directives-cadre sur l'eau.

L'étude précise que ces substances pourraient être "potentiellement toxiques, persistantes, perturbatrices endocriniennes, cancérigènes ou bioaccumulables".

Comment mieux détecter, évaluer et réglementer ces substances ? Des solutions techniques et réglementaires existent pour réduire ces émissions. À l'échelle internationale, l'Allemagne joue un rôle de pionnier dans ce domaine. Toutefois, la coordination reste insuffisante à l'échelle européenne, aucune réglementation globale concernant les émissions chimiques des parcs éoliens en mer n'existe pour le moment.

<https://www.ifremer.fr/fr/presse/parcs-eoliens-en-mer-quelles-substances-peuvent-ils-emettre-et-comment-reduire-ces-emissions>

Selon une étude publiée dans la revue Marine Pollution Bulletin et coordonnée par l'Institut belge de recherche pour l'agriculture, la pêche et l'alimentation (ILVO), 228 substances chimiques sont susceptibles d'être émises par les champs éoliens en mer. 62 de ces substances auraient un impact potentiel sur l'environnement.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X2500390X> Chemical emissions from offshore wind farms: From identification to challenges in impact assessment and regulation

La majorité des substances identifiées appartiennent à la famille des composés organiques (64 %), suivis des composés inorganiques (19 %). Parmi ces 228 substances, 62 sont considérées comme particulièrement préoccupantes pour l'environnement, car elles figurent sur des listes prioritaires établies par l'Agence européenne des produits chimiques ou la Directive-cadre sur l'eau.

Ces substances pourraient être potentiellement toxiques, persistantes, perturbatrices endocriniennes, cancérigènes ou bioaccumulables. Cependant, des recherches complémentaires sont nécessaires pour déterminer les quantités effectivement rejetées par les parcs éoliens et leurs impacts sur le milieu marin. Ces données sont essentielles pour assurer la protection de l'Océan et une utilisation durable de ses ressources.

Un défi analytique : quelles quantités et Quelles origines ? Mais comment surveiller ces émissions dans la pratique ? La diversité des substances et leur usage dans d'autres domaines marins ou terrestres rendent difficile l'attribution précise des sources. Des analyses complexes sont donc nécessaires pour déterminer l'origine des substances, les quantités réellement rejetées et leurs effets sur l'environnement.

Pour obtenir des données fiables sur ces substances potentiellement émises, il faut des méthodes d'analyse de pointe, avec des limites de détection très basses. En outre, l'identification des sources de pollution dans des environnements où les émissions sont multiples nécessite encore des recherches approfondies

Pablo Zapata Corella

Chercheur postdoctoral à l'Ifremer

Une piste est de mesurer la concentration de certaines substances avant la construction et pendant l'exploitation des parcs éoliens, afin de détecter des variations. La modélisation permet également de mieux comprendre la dispersion et le comportement des substances dans l'environnement. Toutefois, il n'existe pas encore de procédures standardisées pour surveiller ces émissions.

Des solutions techniques disponibles, mais pas obligatoires

Avec le développement croissant de l'énergie éolienne en mer, il devient essentiel de surveiller les émissions chimiques et d'étudier leur impact. Il est aussi nécessaire de réduire ces émissions en adoptant des matériaux et technologies plus respectueux de l'environnement.

L'étude montre que certaines émissions peuvent être techniquement évitées, par exemple via des systèmes alternatifs de protection contre la corrosion, des systèmes de refroidissement fermés ou des matériaux biodégradables. Cependant, il n'existe pas de normes industrielles spécifiques à ce secteur, contrairement au transport maritime.

Les auteurs recommandent donc des directives techniques contraignantes, applicables à l'autorisation et à l'exploitation des parcs éoliens en mer.

Des réglementations nationales, mais pas internationales

L'étude compare également la réglementation des émissions chimiques des parcs éoliens en mer aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Allemagne. Les approches sont très différentes, et aucune réglementation globale n'existe pour le moment.

Aux États-Unis et au Royaume-Uni, les aspects environnementaux sont évalués lors de l'instruction des projets, en tenant compte des substances potentiellement émises. À l'échelle internationale, l'Allemagne fait figure de précurseur.

En Allemagne, les porteurs de projet doivent fournir au BSH un concept d'émissions dès la phase de planification, décrivant les apports potentiels de substances et les mesures d'atténuation. Une étude d'émissions détaillée est ensuite menée après l'approbation. Des concepts relatifs aux déchets et aux matériaux d'exploitation sont également exigés et doivent être régulièrement mis à jour.

Le BSH fixe des exigences techniques et environnementales contraignantes, concernant notamment le traitement des déchets, la protection contre la corrosion, la gestion des eaux usées, ainsi que l'utilisation des systèmes de refroidissement ou d'extinction.

Par exemple, les anodes à base de zinc et les peintures contenant des biocides sont interdites dans les eaux allemandes.

En France, les parcs éoliens font l'objet d'un suivi réglementaire de la qualité chimique des eaux et d'un suivi de la bio-colonisation des structures immergées.

Vers une meilleure intégration entre recherche et pratique

Ces directives devraient s'appliquer non seulement au niveau national, mais aussi au niveau international, car les émissions chimiques se dispersent au-delà des frontières maritimes. Il est

également crucial d'impliquer les parties prenantes dès les premières étapes afin de mettre en œuvre rapidement des réglementations efficaces.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet européen Interreg Anemoui, en lien avec les groupes de travail « Chimie marine » et « Énergies renouvelables offshore » du Conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM/ICES). À l'avenir, elle pourra servir de base pour renforcer la coopération entre chercheurs, opérateurs et autorités réglementaires.

Notre étude bibliographique constitue une base importante pour la détection précoce des émissions chimiques des parcs éoliens en mer. Une coordination à l'échelle européenne et des exigences minimales en matière de surveillance et de réduction des émissions peuvent rendre le développement de l'éolien en mer plus respectueux de l'environnement

A surveiller. Eventuellement rédhibitoires ou possibilité de corriger ces effets ?

L'agriculture

Les parcs éoliens sont majoritairement installés à la campagne sur des terrains agricoles. Le terrain entre les éoliennes sont présentés comme restant utilisable pour des activités agricoles.

Effets sur la culture ? – question à poser ?

Effets sur l'élevage : de nombreux cas signalés d'affectation sur le bétail suite à l'installation d'éoliennes. Ces effets sont constatés non seulement à l'intérieur du parc éolien, mais aussi



France 3 Bretagne, *Elevage. Des vaches victimes des éoliennes*, (<https://www.youtube.com/watch?v=9mP3pgP7zL8>).

Et aussi :

France 3 Bretagne, *Morts inexplicables de centaines de vaches près d'installations électriques* (<https://www.youtube.com/watch?feature=shared&v=KyIXyV06G-Q>)

La pêche

Le plus grand impact sur l'économie concerne la pêche professionnelle, car le parc éolien prive les pêcheurs d'une partie de leur espace de travail, dans un contexte déjà impacté par le changement climatique et la raréfaction de la ressource halieutique. Les parcs éoliens privent aussi la pêche professionnelle de ressources humaines et logistiques, dans la mesure où les parcs éoliens ont besoin de personnel qualifié et expérimenté, notamment dans leur phase d'exploitation.

La défense

Les parcs éoliens, en particulier offshore, peuvent poser des contre-indications en matière de défense, soulevées tant par les autorités suédoises que françaises. Voici un résumé structuré des enjeux principaux :

1. Principales contre-indications

1. Perturbation radar (air et mer) : les turbines génèrent un « clutter » radar variable par leur rotation, rendant la détection de missiles ou ingénierie sous-marine plus complexe.
2. Détection acoustique / sonar : moins documentée, mais les turbines en mer peuvent masquer le bruit des drones, mines ou sous-marins, compromettant ainsi la surveillance maritime.
3. Zones stratégiques hautement sensibles : les parcs situés près de zones militaires clés (bases, frontières, lignes de défense) sont particulièrement sensibles.
4. Sécurisation physique des infrastructures : les parcs peuvent être vulnérables à des actions hostiles (sabotage, infiltration sous-marine, cyberattaques).

2. Considérations stratégiques : le cas de la Suède

Refus de 13 projets éoliens offshore en mer Baltique :

- Motif : risques pour la défense nationale, alors que l'infrastructure militaire est soumise à la pression géopolitique régionale.
- Le ministre de la Défense suédois a expliqué que ces parcs pourraient réduire de moitié le temps de réaction face à une attaque de missiles, notamment en perturbant les radars Patriot([Reuters][1], [4coffshore.com][2], [Le Guardian][3]).
- Les interférences radar et capteurs acoustiques induites par les turbines compliquent la détection d'attaques aériennes ou sous-marines([4coffshore.com][2], [Le Guardian][3]).

Une exception a été accordée à un projet sur la côte ouest (Poseidon), jugé moins problématique en termes de défense([Reuters][1], [Le Guardian][3]).

Le PDG de Ørsted a déclaré qu'il existait des solutions techniques (mitigation, coopération civil-militaire) pour dépasser ces obstacles, en s'appuyant sur des expériences dans d'autres pays baltiques([Reuters][4]).

3. France : préoccupations autour des radars militaires

Le Ministère des Armées avait mis en place des critères d'acceptabilité (basés sur l'intervisibilité radar) dans des instructions désormais abrogées en 2021, mais encore appliquées dans les faits([Pager Power][5]).

Jusqu'à 6 000 MW de projets éoliens (terrestres et offshore) auraient été bloqués en France pour préserver les performances des radars météo et militaires, principalement dans une zone d'environ 30 km autour de ces installations([Factor This™][6], [Pager Power][7]).

Des pistes techniques comme les lames « stealth » (à faible signature radar) ont été testées, par exemple par EDF EN en Auvergne, pour faciliter la cohabitation entre éolien et radars([Scientific American][8]).

4. Pistes d'atténuation et cohabitation

Dialogue civil-militaire précoce (comme pratiqué au Danemark, Pologne...) pour identifier des zones compatibles([Energy Institute][9], [WindEurope][10]).

Solutions techniques en développement :

- Logiciels de filtrage radar pour distinguer les éoliennes des menaces réelles.
- Revêtements absorbants radar permettant une cohabitation plus harmonieuse([The Times][11]).

Projets pilotes mixtes intégrant radars compensatoires, ou capteurs intégrés aux turbines, permettant de transformer celles-ci en atouts de surveillance([Pager Power][5], [The Times][11]).

5. Conclusion synthétique

Le développement des parcs éoliens, et offshore en particulier, soulève des préoccupations réelles pour la défense nationale :

- En Suède : un exemple marquant où la sécurité a clairement pris le pas sur la transition énergétique.
- En France : des blocages procéduraux autour des équipements radar, malgré les ambitions renouvelables.

Cependant, des solutions existent (techniques, organisationnelles) pour permettre une coexistence. Le succès dépendra de la mise en place de méthodes de coopération intégrées dès la phase de planification.

Sources :

[Le Guardian] (<https://www.theguardian.com/world/2024/nov/04/sweden-scrap-plans-for-13-offshore-windfarms-over-russia-security-fears>)

[The Times] (<https://www.thetimes.co.uk/article/how-wind-turbines-could-be-used-to-spot-incoming-missiles-vtqnmz3zw>)

[1]: <https://www.reuters.com/business/energy/sweden-rejects-baltic-sea-wind-farms-citing-defence-concerns-2024-11-04/> "Sweden rejects Baltic Sea wind farms, citing defence ..."

[2]: <https://www.4coffshore.com/news/swedish-armed-forces-oppose-planned-baltic-sea-wind-farms2c-citing-national-defence-concerns-nid30504.html> "Swedish Armed Forces oppose planned Baltic Sea wind ..."

[3]: <https://www.theguardian.com/world/2024/nov/04/sweden-scrap-plans-for-13-offshore-windfarms-over-russia-security-fears>"Sweden scraps plans for 13 offshore windfarms over Russia security fears"

[4]: <https://www.reuters.com/business/energy/swedish-defence-concerns-over-baltic-sea-wind-farms-can-be-addressed-says-orsted-2024-11-05/> "Swedish defence concerns over Baltic Sea wind farms can be addressed, says Orsted CEO"

[5]: <https://www.pagerpower.com/news/french-military-radar-impact-assessments/> "French Military Radar Impact Assessments"

[6]: <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/france-military-blocks-wind-development-over-fears-of-radar-interference/>"France Military Blocks Wind Development Over Fears of ..."

[7]: <https://www.pagerpower.com/news/wind-farm-radar-objections-france/> "Wind Farm Radar Objections in France"

- [8]: <https://www.scientificamerican.com/article/stealth-wind-turbines-avoid-radar-interference-in-france/> "Stealth Wind Turbines Avoid Radar Interference in France"
- [9]: <https://knowledge.energyinst.org/new-energy-world/article?id=139168> "Swedish government rejects 13 offshore wind projects over ..."
- [10]: <https://windeurope.org/news/sweden-puts-its-industrial-competitiveness-and-energy-security-at-risk/> "Sweden puts its industrial competitiveness and energy ..."
- [11]: <https://www.thetimes.co.uk/article/how-wind-turbines-could-be-used-to-spot-incoming-missiles-vtqnmz3zw> "How wind turbines could be used to spot incoming missiles"

Le droit et la réglementation

L'Union européenne

Les directives

Les règlements

La France

Le code de l'énergie

La justice

Le parc éolien de Guern

<https://www.ouest-france.fr/bretagne/guern-56310/a-guern-la-deconstruction-du-parc-eolien-est-imminente-7fa8e0ec-1919-11ef-89e1-9d0ea397ae43>

Un groupe de riverains contre un parc éolien à Guern, dans le Morbihan, obtient gain de cause après 16 ans de procédures judiciaires, en obtenant le démantèlement de trois éoliennes.

En 2007, trois éoliennes ont été installées à proximité des habitations de plusieurs riverains. Ces riverains se sont plaints de nuisances sonores et visuelles, affectant leur qualité de vie et la valeur de leurs propriétés. Ils ont entamé une longue bataille juridique, passant par plusieurs instances judiciaires :

- 2009 : Le tribunal administratif de Rennes annule le permis de construire.
- 2011 : La cour administrative d'appel de Nantes confirme cette décision.
- 2013 : Le Conseil d'État rejette le pourvoi de la société exploitante.

En octobre 2023, la cour administrative d'appel de Nantes a finalement ordonné le démantèlement des éoliennes. Cette décision est basée sur le fait que le permis de construire initial n'aurait pas dû être accordé en raison de la proximité des habitations.

Citations:

[1] <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/morbihan/quand-le-pot-de-terre-gagne-ca-fait-vraiment-plaisir-ils-obtiennent-le-demantelement-de-trois-eoliennes-apres-16-ans-de-procedures-2980955.htm>

Annexes A – L'éolien alternatif

L'éolien alternatif porte sur des éoliennes de taille intermédiaire en milieu campagnard (ou rural) et l'éolien urbain.

La hauteur optimale

Cette question touche à un débat stratégique émergent dans l'éolien terrestre, qui commence à s'inspirer des logiques du nucléaire modulaire (SMR). Voici une réponse en trois temps :

1. Logique de compromis : moins haut = plus dense, mais plus cher à l'unité

Avantages des petites éoliennes plus basses (type < 80 m, 500 kW à 2 MW)

- Espacement réduit : permet une densité surfacique plus élevée (plus d'éoliennes/km²).
- Moins d'impact visuel et sonore, mieux accepté localement.
- Transport, fondations, grutage plus simples → logistique plus légère.
- Standardisation possible → série = baisse des coûts (comme les SMR).
- Peut être pertinent pour : zones agricoles, micro-parcs ruraux, projets citoyens ou coopératifs.

Inconvénients :

- Vent moins fort et plus turbulent à basse altitude → production moindre.
- Moins rentable à l'unité sans économie d'échelle ou fabrication modulaire.
- Coût par MWh plus élevé si pas produit en grande série.
- Nécessite plus de machines pour même production, donc plus d'entretien, plus de raccordements.

2. Existe-t-il une hauteur optimale de compromis ?

Il n'y a pas de valeur universelle, mais plutôt un optimum contextuel, selon :

Facteur	Influence sur la hauteur optimale
Vitesse du vent (région)	Plus le vent est faible, plus il faut monter haut.
Type de sol / logistique	Si accès difficile, grue haute coûte plus cher → limite la hauteur.
Cadre paysager / social	En zones sensibles, la hauteur doit être réduite.
Réglementation locale	Certaines régions fixent des limites (ex : <150 m en France).
Objectif du projet	Production max (hauteur +), acceptabilité (hauteur -), équilibre (hauteur moyenne).

Hauteurs optimales courantes en 2020s :

- Terrestre standard : 100 à 150 m de moyeu (axe), rotor 120–160 m.
- Approche modulaire : 60–80 m, rotor <100 m (plus dense, plus modeste).

3. Parallèle avec les SMR : pertinent et porteur

Éolien compact	SMR (Small Modular Reactors)
Moins puissants (1–2 MW)	Moins puissants (50–300 MW)
Fabrication modulaire possible	Idem
Déploiement dense ou local	Idem
Moins d'impact visuel ou politique	Idem
Rentabilité dépend du volume	Idem

Dans les deux cas :

- Approche centralisée = efficacité unitaire, mais complexité.
- Approche modulaire = souplesse, densité, rapidité, mais dépendante du nombre d'unités.

Conclusion : on peut concevoir une stratégie d'éolien modulaire plus bas et plus dense, à la manière des SMR. Mais pour qu'elle soit compétitive, il faut :

- Des modèles industrialisés en série (comme pour les onduleurs solaires ou les mini-turbines) ;
- Un contexte local favorable (densité acceptable, logistique simplifiée) ;
- Une volonté politique ou citoyenne claire (projets coopératifs, intercommunaux, etc.).

L'éolien intermédiaire

Les éoliennes en milieu urbain

Il existe des hauteurs compatibles avec le milieu urbain, mais elles nécessitent un changement de paradigme technologique. Dans les villes, les contraintes sont telles qu'il faut sacrifier un peu d'efficacité pour gagner en intégration — et c'est là que les éoliennes à axe vertical (EAV ou VAWT) entrent en jeu.

1. Contraintes du milieu urbain

- Turbulences importantes dues aux bâtiments : le vent change de direction, est saccadé.
- Hauteur réglementée : limitations de construction, sécurité aérienne, proximité des habitations.
- Acceptabilité sociale : bruit, vibrations, ombrage stroboscopique, esthétique.
- Espace restreint : impossible d'installer des éoliennes de 100 m de haut avec 100 m d'envergure...

Cela rend les éoliennes classiques à axe horizontal quasiment inapplicables dans les villes (sauf rares cas sur de grands toits industriels ou à la périphérie).

2. Éoliennes à axe vertical (EAV / VAWT) : plus compatibles

Avantages en ville :

- Fonctionnent quel que soit le sens du vent.
- Peu sensibles aux rafales et turbulences, mieux adaptées aux toits ou façades.
- Silencieuses, compactes, esthétiques (parfois intégrées à l'architecture).
- Peu ou pas d'effet stroboscopique.
- Hauteur typique : de 3 à 15 mètres, rarement plus de 20 m.

Inconvénients :

- Rendement faible : 20–40 % de celui d'une grande éolienne à axe horizontal.
- Démarrage souvent assisté électriquement.
- Nécessitent un flux d'air permanent, donc inadaptées dans des zones sans vent.

3. Hauteurs compatibles en pratique

Environnement	Hauteur typique d'éolienne possible	Technologie privilégiée
Toit d'immeuble	2 à 10 m	Axe vertical (hélicoïdal, Savonius, Darrieus)
Zone industrielle ou hangar	10 à 25 m	Axe horizontal possible, mais compact
Façade ou mobilier urbain	1 à 5 m	Micro-éoliennes design
Quartier dense	Très limité	Rare, sauf projets expérimentaux

Certains modèles sont conçus pour être intégrés dans les lampadaires, les abribus, les panneaux publicitaires, etc.

En résumé : Oui, il existe des hauteurs compatibles avec la ville, mais elles impliquent d'utiliser des technologies à axe vertical, moins performantes, mais mieux intégrées.

Le compromis est clair :

- Pas de production massive, mais une symbolique forte (visibilité, autonomie partielle, hybridation avec le solaire).
- Une vraie pertinence pour les bâtiments publics, les écoquartiers, les campus, etc.

Typologie des éoliennes urbaines

Voici une typologie claire et structurée des éoliennes urbaines, adaptée aux contraintes du milieu urbain (turbulences, bruit, encombrement, esthétique) et aux usages possibles (toitures, mobilier urbain, bâtiments collectifs...).

Typologie des éoliennes urbaines

Éoliennes à axe vertical (VAWT / EAV)

Fonctionnent indépendamment de la direction du vent. Les plus adaptées en ville.

1. Éoliennes de type Savonius

- Forme : demi-cylindres ou pales courbes (comme une hélice à plat).
- Avantages : très silencieuses, démarrage facile, robustes.
- Inconvénients : faible rendement, production limitée.
- Usage typique : mobilier urbain, éclairage public autonome, abribus.
- Hauteur : 1 à 5 m.

Parfaites pour des micro-usages visibles, simples et robustes.

2. Éoliennes de type Darrieus (ou « œuf battu »)

- Forme : pales courbes en rotation verticale.
- Avantages : rendement meilleur que Savonius, design élégant.
- Inconvénients : instables au démarrage, nécessitent un vent régulier.
- Usage typique : toitures de bâtiments, campus, zones industrielles.
- Hauteur : 5 à 15 m.

Pour production complémentaire sur toit d'immeuble ou bâtiment tertiaire.

3. Éoliennes hélicoïdales (hélice verticale, type "DNA")

- Forme : ruban torsadé, esthétique futuriste.

- Avantages : très silencieuses, stables, bien intégrées.
- Inconvénients : coût élevé, production modeste.
- Usage typique : écoquartiers, campus, projets démonstrateurs.
- Hauteur : 3 à 10 m.

Idéal pour les projets à forte visibilité symbolique ou pédagogique.

II. Éoliennes à axe horizontal (HAWT / EAH)

Plus performantes, mais très contraignantes en ville (bruit, encombrement, turbulence).

4. Petites éoliennes tripales classiques

- Forme : identique aux grandes, en version réduite.
- Avantages : bon rendement, technologie maîtrisée.
- Inconvénients : bruyantes, sensibles aux turbulences.
- Usage typique : sites industriels, fermes urbaines en périphérie.
- Hauteur : 10 à 30 m.

Peu adaptées aux centres urbains, sauf exception en zone dégagée.

5. Micro-éoliennes domestiques (< 500 W)

- Forme : mini-rotor à 2 ou 3 pales, souvent orientable.
- Avantages : prix abordable, autonomie partielle.
- Inconvénients : production symbolique, sensible au vent faible.
- Usage typique : pavillons, tiny houses, toitures avec peu de surface.
- Hauteur : 1 à 4 m.

Pour autonomie partielle d'une maison ou d'un abri.

III. Applications urbaines intégrées

Application	Type d'éolienne	Exemple
Abribus, mobilier	Savonius ou hélicoïdale	Éclairage LED autonome
Toits d'immeubles	Darrieus / hélicoïdale	Production d'appoint
Lampadaires hybrides	Savonius + panneau solaire	Éclairage hors réseau
Zones piétonnes, places	Hélicoïdale design	Projet de quartier intelligent
Bâtiments publics	Darrieus ou micro-éolienne	Signal écologique

En résumé

Type	Rendement	Bruit	Hauteur	Pertinence urbaine
Savonius	<input type="checkbox"/> faible	<input checked="" type="checkbox"/> très bas	<input type="checkbox"/>	✓✓✓
Darrieus	· moyen	· faible	·	✓✓
Hélicoïdale	· moyen	<input checked="" type="checkbox"/> très bas	·	✓✓✓
Axe horizontal	· élevé	· élevé	· ·	X(en ville dense)

La contrainte structurelle

Installer une éolienne de type Savonius sur un toit d'immeuble est envisageable, mais cela suppose de prendre en compte plusieurs contraintes techniques, mécaniques et réglementaires. Voici un tour d'horizon précis.

1. Contrainte structurelle du bâtiment

a) Poids

Une éolienne Savonius de 2 m de diamètre × 5 m de hauteur pèse généralement entre 200 et 600 kg, selon les matériaux (acier, aluminium, composites). Cela impose de :

- Vérifier la capacité portante de la toiture (surcharge ponctuelle + dynamique).
- Prévoir une semelle de fixation ou lestage bien dimensionnée pour éviter les efforts sur la dalle.

b) Efforts dynamiques

Une éolienne crée des vibrations, même légères → risque de résonance, propagation au bâtiment. Il faut désolidariser mécaniquement l'éolienne de la structure (silent-blocs, plots amortisseurs).

c) Prise au vent

Une Savonius est un frein aérodynamique : elle « freine » le vent plutôt qu'elle ne le dévie. Elle exerce une force importante sur sa base, surtout en cas de rafales. En zone ventée, la structure doit supporter des efforts horizontaux > 1000 N en pointe.

2. Dimensions types et production

Paramètre	Valeur indicative
Hauteur	4 à 6 m
Diamètre	1,5 à 2 m
Surface balayée	$\pi \times R \times H \rightarrow \sim 5 \text{ à } 10 \text{ m}^2$
Poids	250 à 600 kg
Puissance nominale	300 à 1000 W
Production annuelle	300 à 1000 kWh/an (vent moyen 4–6 m/s)

3. Densité surfacique de puissance

- Surface au sol occupée (structure + zone de sécurité) : $\sim 3 \text{ à } 5 \text{ m}^2$
- Production annuelle typique : 300 à 800 kWh/an → soit 0,03 à 0,08 kWh/m²/an
- Puissance surfacique installée : 0,1 à 0,3 kW/m² (environ)

Très faible comparé au solaire photovoltaïque ($\sim 0,2 \text{ kWc/m}^2$) ou aux grandes éoliennes terrestres ($\sim 1\text{--}2 \text{ W/m}^2$ de surface réelle). La densité surfacique est donc basse, mais acceptable dans une logique d'autonomie locale symbolique ou pédagogique.

4. Contraintes réglementaires (en France, à adapter selon pays)

- Déclaration préalable de travaux ou permis de construire selon taille, visibilité, localisation.
- En zone urbaine protégée ou bâtiment classé → souvent interdit ou très encadré.
- Respect de la réglementation acoustique, même si Savonius est silencieuse.
- Respect des normes CE, des normes parasismiques éventuelles, et de sécurité en toiture.

En résumé – Exemple réaliste

Une éolienne Savonius de 5 m de haut × 2 m de diamètre, sur une toiture bien conçue, peut produire environ 500 à 700 kWh/an, dans un vent moyen de 5 m/s. Elle nécessite une structure de fixation anti-vibrations, une étude de charge, et une déclaration administrative. Sa densité surfacique reste faible, mais son intégration esthétique, sonore et éducative peut en faire un bon choix urbain.

L'éolienne urbaine sur mât

Oui, installer une éolienne Savonius au sommet d'un pylône dépassant les immeubles est concevable, techniquement intéressant, et parfois mieux adapté que sur un toit. Mais cela pose aussi des contraintes spécifiques qu'il faut bien anticiper.

1. Avantages de l'installation sur pylône

a) Exposition au vent améliorée

En dépassant les obstacles (immeubles, arbres), on atteint une zone moins turbulente, plus propice à la régularité du vent. Le gain en hauteur (même modeste : +5 à +15 m) peut augmenter significativement la vitesse du vent → donc la production (rappel : puissance $\propto V^3$).

b) Pas de vibrations transmises à un bâtiment

Contrairement à une installation sur dalle de béton d'un toit, le pylône peut être conçu pour absorber les efforts mécaniques sans nuire à un habitat ou une structure fragile.

c) Plus grande liberté d'orientation et d'entretien

On peut choisir un emplacement isolé, dégagé, avec une base technique. Le montage, démontage et entretien sont parfois plus simples que sur des toitures étroites et difficiles d'accès.

2. Mais aussi des contraintes importantes

a) Stabilité et ancrage du pylône

Une éolienne Savonius, même modeste, exerce une force latérale importante, car elle agit comme une voile ou une hélice inversée. Le moment de flexion au pied du mât augmente fortement avec la hauteur → il faut :

- Un socle bétonné important, ou
- Des haubans solides pour stabiliser le mât, selon le design retenu.

Le pylône doit être conçu spécifiquement pour l'éolienne (et pas juste réutiliser un mat de télécom).

b) Accessibilité et sécurité

Il faut pouvoir accéder à la nacelle pour entretien, lubrification, surveillance (ou automatiser tout cela). Risque de chute d'élément, foudre, etc. → nécessite un plan de sécurité.

c) Règlementation stricte

- Hauteur >12 m = souvent permis de construire obligatoire.
- Visibilité, urbanisme (notamment zones classées ou soumises à PLU/ABF).
- Risque de refus administratif dans des zones urbaines denses.

3. Dimensions et cas réaliste

Élément	Valeur indicative
Hauteur du pylône	10 à 20 m (au-dessus des toits)
Hauteur éolienne	3 à 5 m
Diamètre Savonius	1,5 à 2 m
Fondation	1,5–3 m ³ de béton (selon sol et hauteur)
Ancrage alternatif	Pylône haubané (style antenne radio)

4. Scénarios d'usage

Contexte	Pertinence
Quartier d'éco-construction	☑ Haute symbolique, production d'appoint
Bâtiment public (école, mairie)	☑ Pédagogique + autonomie partielle
Projet coopératif local	☑ Fort impact visuel, engagement citoyen
Centre-ville historique	✗ Risque de refus, impact visuel trop fort

En résumé

Installer une éolienne Savonius en haut d'un pylône dépassant les immeubles est concevable et parfois préférable à une installation en toiture, à condition :

- de concevoir un mât adapté (structure, ancrage),
- de gérer la réglementation locale,
- et de viser une fonction mixte : production + signal environnemental ou pédagogique.

remplacer une Savonius par une éolienne hélicoïdale (type Gorlov, QuietRevolution, Urbane Wind, etc.) améliorerait significativement le concept, sur plusieurs plans. Voici une analyse comparative et structurée :

1. Amélioration aérodynamique et production

Critère	Savonius	Hélicoïdale
Principe	Résistance (frein au vent)	Portance (inspire le vol d'une aile)
Démarrage	Très facile (dès 2 m/s)	Facile (2,5–3 m/s)
Rendement (Cp)	~0,15–0,25	~0,25–0,4
Production annuelle (à dimensions égales)	Faible	Moyenne à bonne

Gain estimé : +30 à +70 % de production annuelle à vent équivalent, à dimensions égales.

2. Comportement au vent et turbulence

Les deux types sont bien adaptés aux milieux turbulents, mais :

- L'hélicoïdale offre une meilleure stabilité de rotation.
- Elle est moins sujette à l'à-coup mécanique à chaque passage de pale.
- Moins de variation de couple → meilleure durabilité mécanique et moins de vibrations → idéal sur pylône.

3. Silence et esthétique

Les deux sont silencieuses, mais l'hélicoïdale génère une rotation plus fluide (pas de « claquement » d'alternance comme Savonius). L'effet visuel est plus élégant : design moderne, fluide, souvent apprécié dans les projets d'urbanisme ou d'architecture contemporaine.

Exemples : Quiet Revolution QR5 (5 m de haut, 3 m de diamètre) : installée sur campus, hôpitaux, écoquartiers. Urbane Wind ou modèles inspirés du rotor de Gorlov.

4. Intégration sur pylône

- Hauteur similaire : 4 à 6 m.
- Poids comparable : 300 à 800 kg.
- Efforts dynamiques mieux répartis : moins de force latérale par à-coups, ce qui réduit les exigences sur le mât ou la base.
- Meilleure résistance au vent fort (rotation plus régulière, portance répartie).

Cela permet :

- D'envisager des pylônes plus élancés, avec moins de haubanage.
- De réduire les nuisances mécaniques transmises à la structure.

5. Exemple réaliste

Paramètre	Valeur typique
Hauteur hélicoïdale	4,5 m
Diamètre	2,5–3 m
Vitesse de démarrage	2,5–3 m/s
Puissance nominale	1 à 3 kW
Production annuelle (vent moyen 5 m/s)	800 à 2 000 kWh/an
Masse totale	~500–800 kg

6. Coût

Élément	Savonius	Hélicoïdale
Coût matériel (éolienne seule)	2 000 – 5 000 €	5 000 – 15 000 €
Coût installation sur pylône	similaire (socle, ancrage)	
Maintenance	moins fréquente sur hélicoïdale (rotation régulière)	

Rentabilité faible mais meilleure pour l'hélicoïdale, surtout si valorisée en autoconsommation ou dans un projet d'image durable.

Conclusion : Oui, une éolienne hélicoïdale sur pylône urbain est une amélioration notable par rapport à une Savonius :

- Meilleure production,
- Rotation plus fluide et silencieuse,
- Esthétique moderne,
- Moins de contraintes dynamiques,
- Plus d'acceptabilité publique.

Sommaire long

Sommaire	3
Présentation	4
Le vent.....	5
Le vecteur vent.....	5
Le vent en temps réel	5
La rose des vents	6
L'altitude.....	7
La basse altitude	7
La haute altitude	9
La variabilité	10
Les statistiques du vent	13
La durabilité.....	16
L'éolienne	19
Les architectures	19
Les éoliennes maritimes.....	20
L'éolien planté.....	20
L'éolien flottant	20
Le fonctionnement	21
La conversion du vent en énergie mécanique.....	21
La conversion mécanique électrique	22
Les équations.....	23
L'énergie cinétique du vent	23
La puissance du vent disponible	23
La limite de Betz.....	24
La puissance réelle.....	24
Le nombre de tip speed ratio	24
Le couple mécanique.....	25
Le coefficient de performance aérodynamique	25
L'énergie produite	25
D'autres paramètres complémentaires.....	25
La hauteur et la puissance.....	25
L'évolution.....	26
Le rapport diamètre sur hauteur (D/H).....	26
Le cycle de vie	27
La durée de vie	28
Le démantèlement.....	29
Les pales	31
Les socles.....	36
Les parcs éoliens	39
Les parcs terrestres.....	39
Les parcs maritimes	40
Les parcs plantés.....	40
La densité surfacique du parc éolien	41
Les facteurs de charge.....	43
Vers un éolien intermédiaire	45
La station de raccordement	47
Le raccordement au réseau.....	48
L'industrie	53
Les fabricants d'éoliennes.....	53
Les opérateurs de parcs éoliens.....	53
L'industrie en Bretagne.....	53
Le territoire.....	55
Le site.....	55

Le paysage et le patrimoine.....	56
Le logement.....	57
La finance.....	58
Les coûts.....	58
Les subventions.....	59
La sécurité.....	61
La santé.....	62
Le travail et l'emploi.....	63
L'environnement.....	64
Le microclimat.....	64
Les matériaux.....	65
Les alternatives.....	67
La biodiversité.....	69
L'éolien terrestre.....	69
L'éolien maritime.....	69
Les parcs maritimes.....	70
L'hexafluorure de soufre (SF2).....	72
Les substances préoccupantes pour l'environnement.....	73
L'agriculture.....	77
La pêche.....	78
La défense.....	79
Le droit et la réglementation.....	82
L'Union européenne.....	82
La France.....	82
La justice.....	83
Le parc éolien de Guern.....	83
Annexes A – L'éolien alternatif.....	84
La hauteur optimale.....	84
L'éolien intermédiaire.....	85
Les éoliennes en milieu urbain.....	85
Typologie des éoliennes urbaines.....	86
La contrainte structurelle.....	87
L'éolienne urbaine sur mât.....	89
Sommaire long.....	92