

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

1. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

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

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET ORGANISATION

L'hélice fait tourner un générateur électrique par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse (voir figure 1). La puissance d'une éolienne est fonction de la surface balayée par l'hélice et de la vitesse du vent.

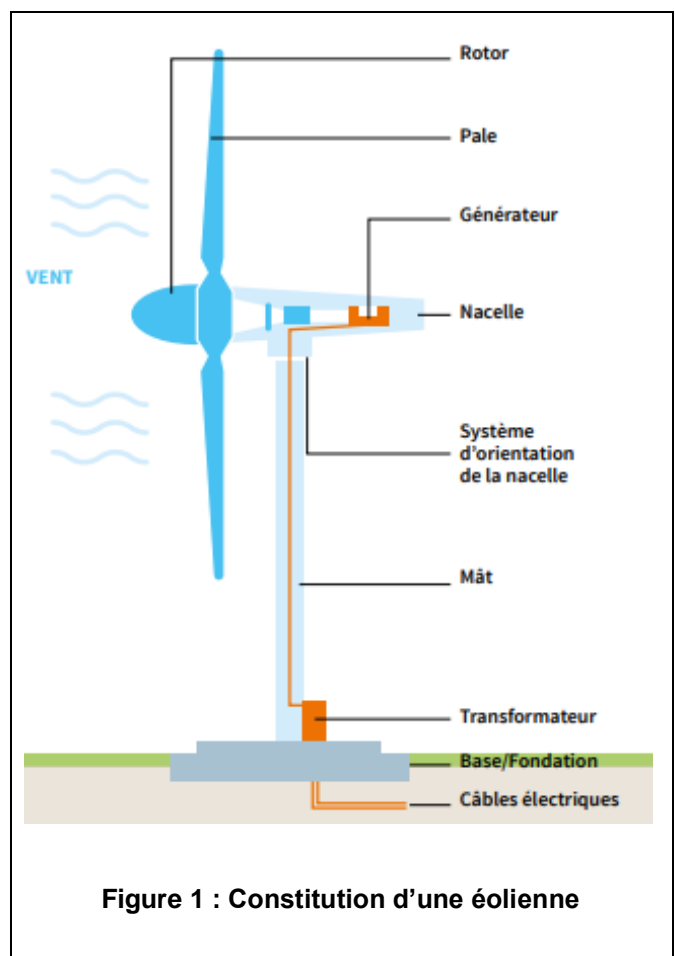
Pour produire le maximum d'énergie, les éoliennes (ou aérogénérateur) doivent être en permanence face au vent ce qui est réalisé soit par un gouvernail situé à l'arrière, soit par un « servomoteur » commandé par une petite girouette donnant la direction de vent.

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

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

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

Les éoliennes de puissance sont regroupées dans des parcs d'éoliennes et reliées au réseau électrique. Ceci permet de réduire la longueur des connexions et d'assurer une bonne gestion de la puissance d'appoint fournie au réseau.



3. DIFFÉRENTS TYPES D'ÉOLIENNES

Il existe deux grands types d'éoliennes, caractérisées par la position de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent et deux catégories d'implantation (éoliennes terrestres et éoliennes maritimes) :

L'éolienne horizontale : L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus « classique », et les plus répandues à travers le monde, du fait de leur meilleur rendement. Elles sont orientables mais elles manquent de couple au démarrage et il y a un effet important du sillage du rotor. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien.

L'inconvénient principal de ces éoliennes est le bruit qu'elles émettent. De plus, la complexité d'installation en fonction de la hauteur du mât est à prendre en compte au moment d'opter pour ce mécanisme.

L'éolienne à axe vertical : Les pales des éoliennes verticales tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Cette solution est moins répandue que l'éolienne horizontale. Leur principal avantage est leur capacité à capter des vents faibles. L'éolienne verticale n'a donc pas besoin de rafales ou de vents puissants, voire violents, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent. De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Cependant l'éolienne verticale démarre moins vite car le poids des rotors pèse sur l'axe, et provoque des frottements. Elle offre un rendement plus faible ; est plus fragiles mécaniquement et d'un entretien plus difficile.

L'éolien offshore, une voie d'avenir : Compte tenu des freins actuels à l'extension du parc terrestre, la politique de développement de l'éolien s'est fortement orientée vers l'exploitation des vents marins au large des côtes maritimes. Bien que plus complexe et plus coûteux à mettre en œuvre, l'éolien *offshore* présente l'avantage de moindres contraintes d'occupation physique de l'espace et de **plus grandes capacités de puissance**.

Deux types d'installation en mer sont en construction ou en projet :

- des **éoliennes amarrées** (ou **posées**) sur des fonds marins à quelques kilomètres des côtes (Mer du Nord et Manche notamment) ;
- des **éoliennes flottantes** posées sur des plateformes, plus au large des côtes, pouvant bénéficier de vents plus forts et plus constants (Atlantique, Méditerranée).

Un premier parc, situé à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique) qui comporte 80 éoliennes, d'une puissance de 6 MWc chacune, est aujourd'hui opérationnel. Six autres, au large des côtes maritimes françaises, sont en cours de développement à Dunkerque (Pas-de-Calais), Fécamp, Le Tréport (Seine-Maritime), Courseulles-sur-Mer (Calvados), Saint-Brieuc (Côtes d'Armor), et Noirmoutier (Vendée). Leur mise en service est prévue entre 2024 et 2028.

4. PERFORMANCES ET DISPONIBILITÉ DES ÉOLIENNES

Les éoliennes modernes démarrent avec un vent de l'ordre de 10 km/h en dessous duquel il est difficile d'assurer une bonne régulation.

À partir de 40 km/h, la vitesse de rotation est stabilisée pour pouvoir fournir un courant de bonne qualité immédiatement utilisable. C'est particulièrement vrai pour les éoliennes raccordées au réseau qui doivent fournir un courant avec une fréquence constante quelle que soit la vitesse du vent. Ceci est obtenu en régulant la vitesse de rotation grâce à l'orientation des pales.

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

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

Afin de récupérer le maximum d'énergie il faut :

- avoir la plus grande surface possible balayée par l'hélice (400 watt/m² à la puissance max). Le diamètre des hélices des machines de puissance est fréquemment compris entre 30 et 60 m, soit des puissances crêtes de l'ordre de l'ordre du MW
- situer les machines dans les endroits venteux (en mer et bord de mer, sommet de collines, couloirs venteux pour bénéficier de l'effet Venturi) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent
- situer les hélices en haut d'un mât de façon à s'affranchir de l'effet de freinage du vent au niveau du sol (plus de 120 m pour les grosses machines)
- garder un intervalle important entre deux machines pour éviter les pertes de rendements par des turbulences induites.

Les sites éoliens terrestres intéressants en France sont d'abord la façade ouest des côtes de la Manche et de l'Atlantique soumise aux vents d'ouest forts et dominants, la vallée du Rhône avec le Mistral et le Sud-Ouest de la côte méditerranéenne soumis à la Tramontane. La carte des vents de la figure 2 ci-après donne la répartition des vents sur l'ensemble du pays.

Pour les éoliennes maritimes, les sites retenus sont, le long des côtes de la Manche entre St Brieuc et le Tréport et sur la côte atlantique entre St Nazaire et le Médoc en Gironde.



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

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

5. PROBLÈME DE L'INTERMITTENCE DE LA SOURCE D'ÉNERGIE

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

Pour les éoliennes, le facteur de charge est souvent assimilé au *rendement global* qui est le produit du rendement mécanique, du rendement électrique et du rendement aérodynamique, facteur principal sur une longue période. En France le taux de charge dépend de la situation géographique. Pour l'éolien terrestre¹, il varie de 19 % en Bourgogne à 31 % en Languedoc-Roussillon, la valeur moyenne se situant à 23 %.

En réalité, une machine tourne près de 70 % du temps mais à une puissance inférieure à la puissance maximale, dite puissance installée. Pour simplifier le calcul on considèrera que la puissance moyenne globale de l'éolien terrestre correspond à 25 % de la puissance installée et à 40 % pour l'éolien maritime.

De plus, le vent souffle de façon très intermittente, variable en durée et n'importe quand en heures, jours et saisons. La disponibilité aléatoire de cette énergie n'est pas compatible avec la disponibilité permanente que l'on exige de l'électricité. Il est donc nécessaire de faire appel à d'autres sources afin d'avoir un ajustement instantané production/consommation.

Pour les utilisateurs indépendants ou les petits réseaux autonomes, l'énergie est fournie par la source principale classique qui fonctionnera les $\frac{3}{4}$ du temps, l'éolienne n'apportant qu'une énergie d'appoint. La régulation est relativement aisée entre les deux sources.

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

¹ Irlande 29 %, Portugal 26 %, Espagne 24 %, Allemagne 17 %.

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

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

Afin de répondre en permanence aux besoins, il est nécessaire de disposer d'une capacité principale de production (française ou étrangère) couvrant la totalité de la demande. L'éolien doit être considéré comme une source secondaire, permettant d'économiser le plus possible les combustibles fossiles et ainsi réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette production électrique intermittente et aléatoire peut intervenir à des moments où l'on n'en a pas besoin, le surplus d'énergie peut alors être utilisé pour faire du stockage indirect, le vent n'étant pas stockable.

Quelques exemples de stockage :

- stocker l'énergie sous forme de gaz comprimé²
- stocker de l'eau par pompage/turbinage (STEP)³
- fabriquer de l'hydrogène par hydrolyse de l'eau (moteurs à hydrogène, piles à combustible)
- stocker l'énergie sous forme électrochimique (batterie NaS de 30 MW)

6. INFLUENCE DES ÉOLIENNES SUR L'ENVIRONNEMENT

Ce sujet est source de polémique entre les partisans et détracteurs de l'éolien. Nous ne ferons ici que soulever le problème sans traiter le fond. Il doit faire face à 3 types d'impacts : l'aspect esthétique et la dégradation du paysage, la santé et le bruit, l'impact sur la faune et les oiseaux.

Il est incontestable qu'à puissance égale l'emprise au sol de l'éolien est considérable par rapport à la plupart des autres sources d'énergie. Compte tenu des distances à respecter pour des problèmes de sillage (voir chapitre 3) la densité de puissance nominale d'un champ d'éoliennes terrestres, dans une zone favorable, est de l'ordre de 10 MW par km² soit une production annuelle de 20 GWh par km². Ceci ne rend pas le sol inutilisable pour une exploitation agricole mais le bruit généré peut avoir un impact sur la faune locale avec perte de l'habitat pour certaines espèces.

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

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

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

7. LES NOUVEAUX CONCEPTS

7.1. AVANCÉES DANS LE CONCEPT DES PALES

Devant le rendement modeste de ce type de machine, les recherches sur l'amélioration des performances se poursuivent. Deux nouveaux concepts semblent être porteurs de progrès : les éoliennes à effet Magnus et les éoliennes carénées développées par la société Stormblade.

Le but de ces nouvelles machines est d'élargir la plage de fonctionnement pour atteindre régulièrement un facteur de charge de 30 %. On trouvera dans l'encart en grisé ci-dessous, quelques détails sur le fonctionnement et les avantages de ces différentes machines.

L'effet Magnus a été découvert par Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), physicien allemand.

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

³ En France, la capacité de stockage dans les barrages de montagne est quasiment saturée.

Ce n'est rien d'autre que l'effet que l'on donne à une balle de tennis ou un ballon de football lors de la frappe. En plaçant un cylindre en rotation dans un flux d'air il se crée une force induite, la portance, perpendiculaire à ce flux. Cette portance est proportionnelle à la vitesse de rotation qu'on impose au cylindre et à celle du vent d'où une maîtrise parfaite de la puissance instantanée pour des vitesses de vent situées entre de 30 et 100 km/h. Des cylindres en rotation remplacent les pales. Leur vitesse de rotation est voisine de 3000 tours/min.

Ce projet ne s'applique pour le moment qu'aux éoliennes de petite puissance et les avantages demandent à être évalués (système développé par Mekaro Akita Co au Japon et « Projet étudiant » de génie physique financé par EDF et l'Anvar).

La « Stormblade turbine » est basée sur le principe de la turbine du moteur à réaction, ce qui permet d'augmenter la vitesse de rotation du rotor sans avoir à subir le phénomène de précession gyroscopique et de dépasser ainsi la limite physique de la loi de Betz. La plage de vitesse des vents utilisables pourra ainsi doubler, de 11 km/h à 193 km/h, ce qui présente l'avantage d'avoir une production d'électricité plus continue et une puissance maximale plus élevée puisque celle-ci est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

Par contre, la puissance produite est aussi proportionnelle à la surface balayée par les pales et globalement la puissance délivrée reste inférieure à celles des éoliennes conventionnelles. L'avantage demeure sa production plus régulière ; les tests sur prototype donnent un rapport d'efficacité voisin de 3 par rapport aux éoliennes à pales.

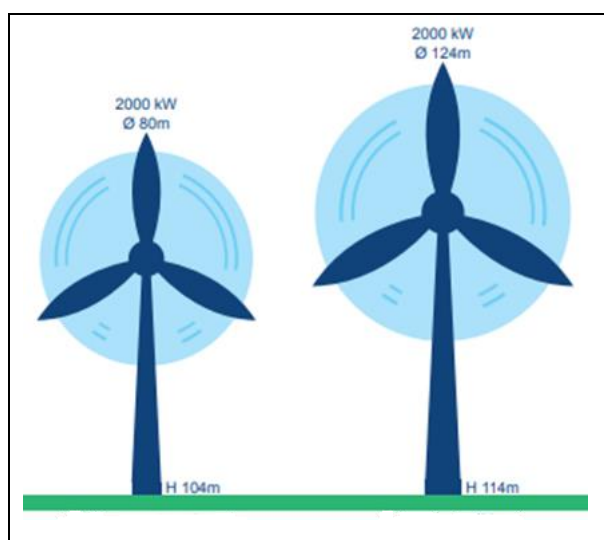
7.2. ÉVOLUTIONS EN MATIÈRE DE PUISSANCE

Les nouvelles générations d'éoliennes augmentent le rapport entre la surface balayée et la puissance nominale, ce sont des éoliennes dites « toilées ».

Une éolienne « standard » du parc installé en France présente un ratio entre 1,7 et 3,5 m²/kW, tandis que les nouvelles générations peuvent atteindre des ratios de 6 m²/kW (voir figure 3).

Elles permettent d'accroître le nombre d'heures en fonctionnement, de diminuer la variabilité de l'énergie électrique fournie et d'élargir la gamme de vent exploitable (on peut exploiter des sites avec des vitesses de vent plus faibles qu'auparavant).

Figure 3 : Evolution des tailles et puissances des machines ►



7.3. INNOVATIONS EN MATIÈRE D'HÉLICES



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

L'Haliade™ 150 – 6 MW est équipée d'un alternateur à aimant permanent et entraînement direct ainsi que de trois convertisseurs pleine puissance opérant à 900 V. Cette tension est ensuite augmentée grâce à un transformateur intégré à l'éolienne. L'onduleur, le transformateur, l'appareillage de commutation et le dispositif de couplage au réseau électrique de basse tension se trouvent au pied de l'éolienne.

En France, elle équipera les champs de Courseulles-sur-Mer (Calvados), Fécamp (Seine-Maritime) et Yeu-Noirmoutier (Pays de la Loire). Cette technique va permettre d'élargir la zone d'exploitation de l'énergie éolienne en donnant accès à des zones plus profondes ces machines étant simplement ancrées au fond sous-marins.

C'est le cas également du parc éolien de Saint-Nazaire qui dispose de 80 éoliennes d'une capacité chacune de 6 mégawatts pour une puissance totale de 480 MW. (voir figure 4 ci-contre).

◀ Figure 4 : Parc éolien en mer de Saint-Nazaire

8. ASPECTS TECHNIQUES LIÉES AUX IMPLANTATIONS OFFSHORE

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

8.1. AVANTAGES

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

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

8.2. INCONVÉNIENTS

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

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

8.3. LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES

8.3.1. Les éoliennes offshore amarrées

Elles représentent actuellement un parc de plus de 2000 machines installées en Europe, soit une puissance crête installée de plus de 6,5 TWh.

Elles sont fixées suivant différentes techniques sur les hauts fonds des plateaux continentaux (voir figure 5). Quatre principaux types de fondations sont utilisés pour les éoliennes posées en fonction des caractéristiques physiques du site, et notamment en fonction de la nature des sols selon qu'ils soient sableux et donc friables, ou au contraire rocheux et donc durs :

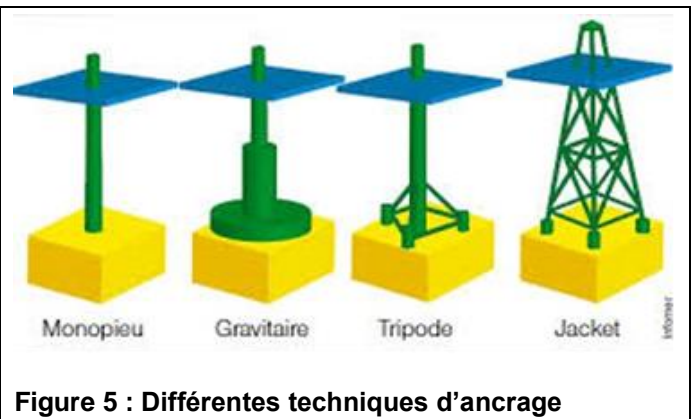


Figure 5 : Différentes techniques d'ancrage

- monopieu : structure constitué d'un tube en acier enfoncé dans les parties dures du sous-sol marin
- gravitaire : structure composée d'une large base en béton)
- tripode : structure en reposant sur trois pieux ancrés dans un socle en béton
- jacquet : structure « en treillis métallique reposant sur trois ou quatre pieux

8.3.2. Les éoliennes offshore flottantes



Plusieurs moyens existent pour maintenir une éolienne à la surface de l'eau : avec un ou plusieurs flotteurs en acier, des caissons en béton, toutes sortes d'ancres et de lignes lâches ou tendues.

La filière éolienne flottante française fait l'objet de plusieurs projets de démonstrations et de projets de fermes pré-commerciales.

Figure 6 : Parc éolien flottant Provence Grand Large - Fos sur Mer

La Méditerranée, où le fond marin descend très proche des côtes à plus de 60 mètres de profondeur, est particulièrement propice aux installations flottantes.

En 2023, les quatre projets de fermes pilotes éoliennes flottantes désignés par le Gouvernement en Méditerranée et en Bretagne sont en cours de réalisation. Avec l'installation fin 2023 du projet pilote Provence grand large à 17 km des côtes en face de Port-Saint-Louis-du-Rhône, en Méditerranée, la France se donne ainsi les chances de pouvoir bien se positionner pour le marché international. Ce projet Port-Saint-Louis-du-Rhône devrait être opérationnel au cours du deuxième semestre 2024.

9. COÛTS DE PRODUCTION ET RENTABILITÉ

L'ADEME [Réf. 8] a publié une évaluation des coûts de production complets des éoliennes (coût du kWh actualisé sur 20 ans en intégrant les investissements, le coût de raccordement, l'exploitation et la maintenance, mais pas le démantèlement ni les coûts liés à la variabilité des énergies renouvelables pour le système électrique) ; les fourchettes de prix tiennent compte des caractéristiques de site (zones plus ou moins ventées ; distance de raccordement...) et du taux d'actualisation⁴.

Ces coûts sont donnés dans le tableau 1 ci-dessous.

Coûts de production des éoliennes en France en 2017 (€/MWh)				
Type d'éolienne	Puissance unitaire	Taux de fonctionnement annuel à pleine puissance	Fourchette de coûts	Coûts avec taux d'actualisation de 5 %
Unité	MW	Heures	€/MWh	€/MWh
Eolien terrestre standard	2,3	1 800 à 2 400	54 à 108	61 à 91
Eolien terrestre de nouvelle génération (toilée)	2	2 400 à 2 700	50 à 94	57 à 79
Eolien en mer posé	6,9	3 500	123 à 227	123 à 169
Eolien en mer flottant	6 à 8	4 000	165 à 364	165 à 281

Tableau 1 : Coûts de production des éoliennes en France en 2017 (source ADEME)

Une comparaison avec d'autres sources à été effectuée. Elle est résumée dans la [fiche argumentaire GAENA N° 60](#) : « Coût de production de l'électricité en France ». Le tableau 2 ci-après en donne les principaux résultats.

	Coûts de production en € ₂₀₁₀ / MWh sur 2011- 2025	UFE/DGEC (2011)	Cour des comptes (2014 et ENR 2013)	Energie 2050 (RTE 2012)	ADEME Rapport 2017	ENR corrigées des coûts de substitution par CCG ⁵
Energies intermittentes	Eolien terrestre	65	62-102	73	61-91	ajouter 54-64 €
	Eolien offshore	143	87-116	102	141-203	ajouter 48-56 €

Tableau 2 : Synthèse des estimations des coûts actuels de l'électricité par filières

⁴ Le taux d'actualisation est le coût d'opportunité du capital investi, c'est-à-dire le rendement qu'il serait possible d'obtenir en investissant ailleurs le même capital. Ce taux intègre une prime de risque lié au projet, qui traduit sa probabilité d'échec. À priori le risque est différent selon les filières, notamment du fait de leur maturité, et le taux d'actualisation devrait donc être différent selon les filières.

⁵ Hypothèses retenues pour le calcul des coûts de l'intermittence (ou de substitution par un CCG (centrale thermique à Cycle Combiné Gaz) : au coût de production électrique de chaque ENR aléatoire il convient d'ajouter les coûts fixes totaux du CCG plus une partie des coûts variables du CCG au prorata des durées annuelles d'adossement de l'ENR au CCG (75 % du temps pour de l'éolien terrestre, 65 % du temps pour de l'éolien marin. Exemple, coût de substitution par CCG de l'éolien terrestre : $9 + 75 \% (2 + 53 + 5) = 54 \text{ € si } 14 \text{ €/tCO}_2$ ou $9 + 75 \% (2 + 53 + 18) = 64 \text{ € si } 50 \text{ €/tCO}_2$ (voir chiffres du Tableau 2).

10. INTÉRÊT ET LIMITATION DE L'ÉOLIEN

La production électrique était de 550 TWh en 2010 et devrait passer à 575 TWh en 2030 (voir [fiche argumentaire GAENA N° 4](#)).

Le scénario initial envisagé par RTE de limiter la part du nucléaire à 50 % aurait alors conduit à 56 TWh d'éolien et photovoltaïque et 60 TWh d'hydraulique, représentant les 20 % d'énergie renouvelable escompté.

Mais le besoin en 2030 et l'intermittence de ces moyens de production aurait alors nécessité de faire fortement appel aux énergies fossiles (turbines à gaz) avec une production de CO₂ de l'ordre de 110 Mt pour 39 actuellement.

Si l'on ne veut pas, dans l'avenir, augmenter fortement la production de gaz à effet de serre, il sera nécessaire de trouver un bon équilibre entre les différentes sources d'énergie. Ce compromis pourrait se situer autour de 72 à 75 % de nucléaire et 15 % de renouvelable.

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

10. SOURCES

- [Réf. 1] Quels sont les différents types d'éoliennes ? <https://www.totalenergies.fr/>
- [Réf. 2] L'éolien : Etat des lieux – Axes de développement <https://www.vie-publique.fr>
- [Réf. 3] Les énergies renouvelables : Etat des lieux et perspectives – Les différents types d'éoliennes <https://uved.univ-perp.fr/>
- [Réf. 4] Effet Magnus : Quand l'effet Magnus fait s'envoler les éoliennes. <https://www.futura-sciences.com>
- [Réf. 5] Effet Magnus : Une éolienne brave les typhons : vers une transition énergétique des îles. <https://www.autodesk.com/fr/design-make/articles/eolienne>
- [Réf. 6] Stormblade de Turbine : Un nouveau design d'éolienne <https://www.techno-sciences.net/>
- [Réf. 7] Haliade™ 150-6 MW Éolienne en mer https://www.actu-environnement.com/in/alstom/fiche_produit_haliade.pdf
- [Réf. 8] [ADEME – Coût des énergies renouvelables en France](#)