

Du gisement éolien à la production d'électricité

Auteur :

BESLIN Guy, Précédemment, directeur technique & achats industriels ENGIE (ex-GDF SUEZ), Production d'Électricité France, Direction des Énergies Renouvelables

25-02-2022



Le défi d'émettre de moins en moins de CO₂ pour limiter le réchauffement climatique de la planète impose de concevoir un mix électrique peu carboné dans lequel l'hydraulique, le nucléaire, l'hydrogène, le solaire, l'éolien et d'autres énergies renouvelables seraient associés. La production d'électricité éolienne connaît une forte croissance depuis le début des années 1980. Ce développement concerne de nombreux pays et depuis une vingtaine d'années, les sites en mer. L'enjeu est tel qu'il n'est pas de jour sans que l'on trouve dans les médias des discussions sur les diverses constructions de mix électrique imaginables. Dans ce contexte, quel peut être l'apport du gisement éolien et quelles en sont les caractéristiques ? Comment fonctionnent les aérogénérateurs industriels modernes, souvent appelés « éoliennes » ? La chaîne de production d'électricité à partir du vent est-elle compétitive ? Quelle pression exerce-t-elle sur les territoires, quelle est la consommation de matière première de ces équipements et quelles sont les contraintes d'aménagement des parcs éoliens ?

1. Le gisement éolien : une ressource énergétique accessible, inépuisable, exploitable en milieu terrestre et en mer

Le gisement éolien à basse altitude est le résultat du déplacement de masses d'air autour de la terre. Il trouve son origine dans le rayonnement solaire, la rotation de la Terre et le relief, susceptible d'accélérer ou de ralentir la vitesse du vent. En se déplaçant, les particules d'air acquièrent une énergie cinétique et exercent alors une pression sur les surfaces ou les obstacles qu'elles peuvent rencontrer. Elles sont capables d'exercer un couple moteur et d'entraîner en rotation des machines aérodynamiques plus ou moins sophistiquées. La production d'électricité est obtenue lorsqu'un générateur est accouplé sur l'arbre moteur de la turbine. On parle dans ce cas d'aérogénérateurs [\[1\]](#).

Jusqu'au début des années 1970, la conversion de l'énergie éolienne visait essentiellement la production d'énergie mécanique sur

des sites isolés équipés de « moulins à vent » afin d'activer des minoteries, ateliers textiles, pompes à eau, etc.

Depuis une cinquantaine d'années, l'énergie éolienne sert à la production « industrielle [2] » d'électricité grâce à la mise en œuvre progressive sur tous les continents d'aérogénérateurs regroupés dans la grande majorité des cas pour former des parcs éoliens. Ces installations industrielles bénéficient d'un progrès technologique incrémental à la faveur du retour d'expérience consolidé à partir de centaines de milliers d'éoliennes installées dans le monde.

Les aérogénérateurs [3] - dans la grande majorité des cas, de type danois - trois pales face au vent [4] - ont des dimensions de plus en plus imposantes ; ils ont une puissance nominale plus importante (multi-MW) ; ils sont plus performants et sûrs.

Les grandes étapes qui marquent la diffusion de ces équipements de production d'électricité en milieu terrestre sont : en Amérique du Nord le « Wind Rush Californien » dans les années 1970 – 80, puis le développement en Europe (Danemark, Pays-Bas, Allemagne, Suède, Espagne, Royaume-Uni). Le démarrage de l'exploitation des installations éoliennes suivra en France avec un décalage d'une dizaine d'années, puis à partir des années 2000, il concernera l'Asie du Sud-Est (principalement Chine et Inde).

L'aménagement des parcs éoliens en mer [5] a débuté au début des années 2000 en eau peu profonde (quelques mètres) à proximité des côtes de pays pionniers (Danemark, Pays-Bas, Royaume-Uni, Allemagne) et s'étend progressivement sur des sites plus profonds (quelques dizaines de mètres) et plus éloignés des côtes (quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres voire une centaine de kilomètres des côtes dans le futur).

En 2019, la production d'électricité éolienne s'établit dans le monde à plus de 1 597 TWh pratiquement non carbonés [6], correspondant à une puissance installée en fin d'année de 650 GW (terrestre + offshore) dont 29 GW pour l'éolien en mer.

Tableau 1. Chiffres clés de la production d'électricité éolienne dans le monde en 2019 [Source : IEA (2019), [IEA Wind TCP Annual Report 2019](#). Tous droits réservés]

	IEA Wind Member Countries	Global Statistics
Total installed capacity (land-based and offshore)	549.1 GW	650.1 GW
Total offshore wind power capacity	29 GW	29 GW
Total new wind power capacity installed	51.7 GW	60.4 GW
Total annual output from wind	1,168.4 TWh	1,597.4 TWh
Wind-generated electricity as a % of electric demand	7.1 %	5.9 %

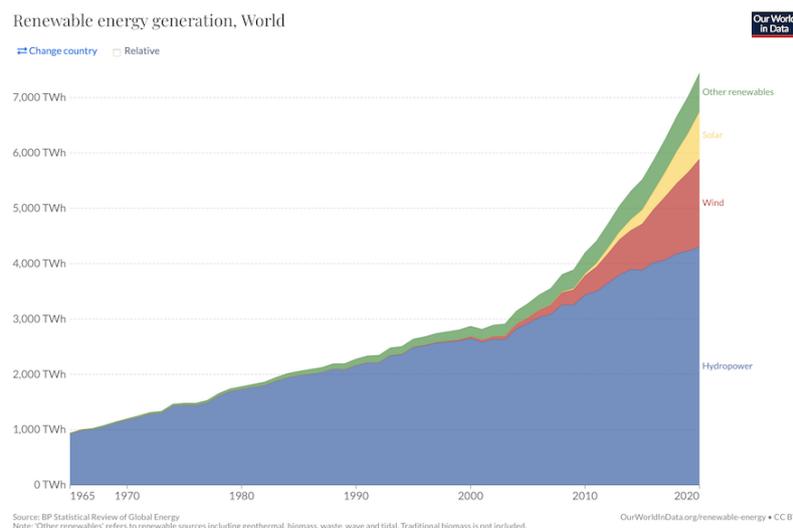


Figure 1. Production d'électricité renouvelable dans le monde [Source : Our world in Data - "Renewable Energy Generation, world". Publié en ligne sur [OurWorldInData.org](https://ourworldindata.org/grapher/modern-renewable-energy-consumption?country=~OWID_WRL) - https://ourworldindata.org/grapher/modern-renewable-energy-consumption?country=~OWID_WRL]

Ainsi en 2019, l'exploitation du gisement éolien a contribué à hauteur de 5,9% de la consommation mondiale d'électricité et

demeure la deuxième source d'électricité en France. L'éolien devance toujours en 2019 la production d'électricité d'origine solaire qui bénéficie d'une dynamique plus soutenue.

1.1. Caractérisation du gisement éolien

De nos jours, le gisement éolien peut être évalué avec une bonne précision au plan régional ou national (larges mailles de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres de côté) ou localement (mailles serrées de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres de côté).

Pour cela, les analystes disposent de mesures effectuées par les satellites et par les stations météorologiques locales qui ont accumulé dans la plupart des pays des chroniques de mesures de vent fiables. Ils disposent aussi de modélisations numériques pour reconstituer l'écoulement du vent en trois dimensions et surtout de la banque de données d'excellente qualité constituée à partir des mesures de vent relevées par les stations et mâts [7] de référence des parcs éoliens et des enregistreurs embarqués sur tous les aérogénérateurs modernes en exploitation.

Les établissements publics [8] et privés qui contribuent à l'évaluation du gisement éolien en milieu terrestre et en mer sont très nombreux. La coopération constructive qui existe entre les experts favorise par ailleurs l'échange des données entre les différents acteurs.

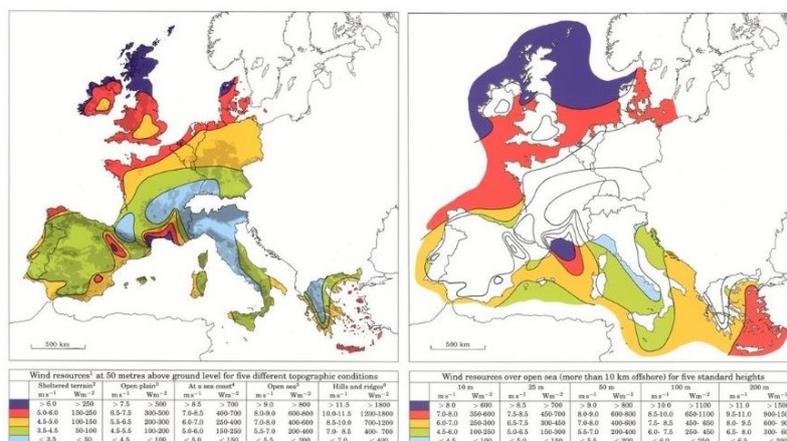


Figure 2. Atlas européen du gisement éolien terrestre et offshore réalisé en utilisant le logiciel de modélisation des écoulements WASP™, Laboratoire RISOE [Source : © WASP - A gauche :

https://www.wasp.dk/wind-atlas/european-wind-atlas/european-wind-atlas_vi/ewa-mapandlegendandnotes-600dpi-jpg - à droite :

https://www.wasp.dk/wind-atlas/european-wind-atlas/european-wind-atlas_vi/ewa-mapandlegend-300-dpi-jog

Confortée par le retour d'expérience dont dispose la filière éolienne et par l'accroissement de la puissance de calcul numérique, la Commission Européenne a publié en 2009 une nouvelle version de l'expertise du gisement éolien [9]. Celle-ci réévalue le potentiel éolien exploitable dans les pays de l'UE en considérant la meilleure technologie des aérogénérateurs du moment (Figure 2).

En pratique, pour estimer la ressource éolienne locale, il est fréquent d'effectuer une approximation des distributions de la vitesse du vent issues de relevés expérimentaux et discrets (par exemple, avec un pas de vitesse de 1 m/s) par une distribution de Weibull dont il reste à définir les deux paramètres A et k, selon la géographie du site :

$$f(v) = k/A \cdot (v/A)^{k-1} \exp[-(v/A)^k]$$

A est un paramètre d'échelle proche de la vitesse moyenne du vent,

k est un paramètre de forme représentatif de la turbulence plus ou moins prononcée du site. Plus k est faible, plus le site est turbulent. Pour les sites terrestres en Europe, on pourra considérer en première approche une valeur voisine de 2 (sauf pour les sites complexes).

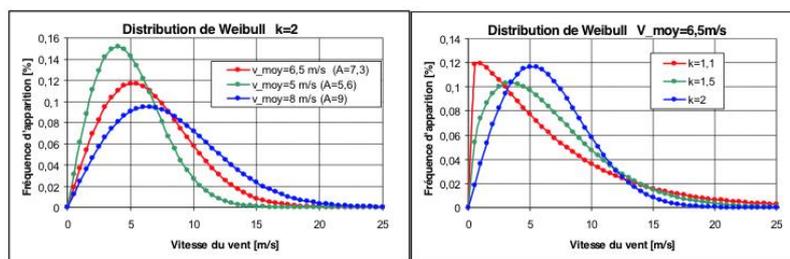


Figure 3. Exemples de distribution de Weibull de vitesse du vent en fonction des différents paramètres [Source : © BESLIN, G. et MULTON, B., 2016, [Production éolienne : de son gisement éolien à ses aérogénérateurs](#), *Encyclopédie de l'Énergie*]

La figure ci-après représente plusieurs courbes de distribution de Weibull en fonction des différents paramètres.

Le vent est variable en force et en direction. Il en résulte un aléa statistique qui affecte la ressource éolienne et par conséquent la production d'électricité.

1.2. Les turbines éoliennes

1.2.1. Éoliennes à axe vertical

Au début du XX^e siècle, alors qu'apparaissent des « moulins » à vent, de plus en plus nombreux dans différentes régions du monde, notamment dans les pays scandinaves, un ingénieur français Georges Darrieus [10] et un architecte inventeur finlandais Sigurd Savonius [11] déposent plusieurs brevets relatifs à la transformation de l'énergie mécanique du vent grâce à des éoliennes à axe vertical [12]. Ces brevets entendent apporter une rupture technologique.



Figure 4. Exemples d'éoliennes à axe vertical. A gauche, éolienne du type Darrieus et à droite, éolienne du type Savonius [Source : A gauche : W. Wacker, Public domain, via Wikimedia Commons - à droite : Toshihiro Oimatsu, [CC BY 2.0](#), via Wikimedia Commons]

Toutefois, les machines tournantes à axe vertical souffrent de plusieurs handicaps : des efforts très importants transmis au roulement inférieur situé à la base de l'équipage mobile, l'absence de couple moteur au démarrage, l'absence de régulation aérodynamique, etc. Sur le terrain, elles ne parviennent pas s'imposer et leur développement s'est limité jusqu'à présent à la fabrication de prototypes ou dans quelques rares opportunités, à la fabrication en petite série de machines dont la puissance unitaire ne dépasse pas quelques dizaines de kW.

1.2.2. Éoliennes à axe horizontal

Caractéristiques techniques

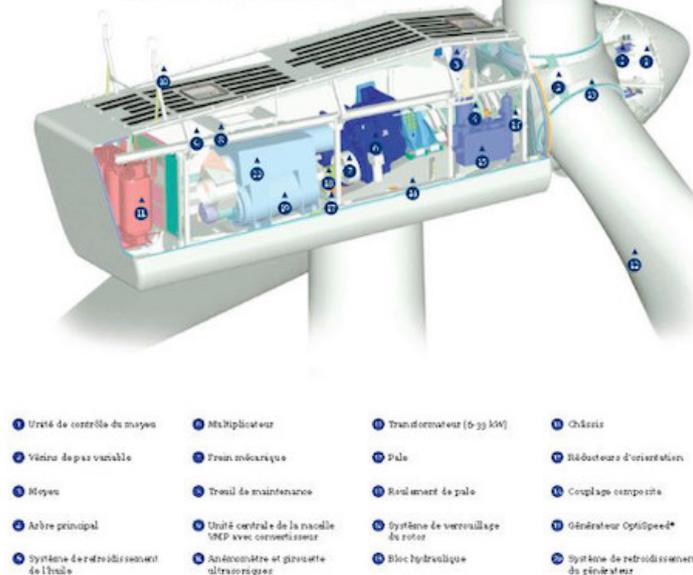


Figure 5. Vue éclatée de la nacelle VESTAS® - V90 – 2 MW [Source : © VESTAS - droits réservés]

Les turbines à axe horizontal apparaissent dès la fin du 19^e siècle. Mais c'est à partir des années 1970 que les constructeurs d'aérogénérateurs soutenus par la demande de plusieurs pays ayant la volonté de valoriser l'énergie éolienne ont mis en œuvre des budgets de R&D importants, souvent subventionnés par les pouvoirs publics, et proposé une offre technique qui s'annonçait efficace. Les constructeurs ont convergé vers l'architecture de machines aérodynamiques comportant trois pales face au vent, communément appelées modèles « danois [13] ». La technologie des éoliennes de type « danois » s'est par la suite imposée dans tous les pays pour la production industrielle de l'électricité. Cette technologie s'applique aujourd'hui aux aérogénérateurs installés en milieu terrestre et en mer.

1.3. Conversion du gisement éolien en production d'électricité

Le gisement éolien (terrestre et offshore) à faible altitude (par exemple, à une centaine de mètres au-dessus du sol) est considérable. Il dépasse de loin la demande d'énergie mondiale. L'enjeu majeur est de pouvoir capter « au mieux » cette énergie naturelle exempte de carbone, inépuisable.

La production d'électricité est une voie privilégiée [14]. S'il n'y avait pas d'autres contraintes, notamment par rapport à l'environnement et aux habitants, les aérogénérateurs modernes répartis sur les différents continents seraient en mesure de produire des volumes d'électricité dans des conditions technico-économiques satisfaisantes [15] qui seraient supérieures à la production mondiale d'électricité [16], toutes filières confondues.

Sur le terrain, le frein majeur qui s'oppose au développement massif de la production éolienne est constitué par les impacts sur l'environnement et par les conflits d'usages [17] que certains opposants ou groupes de pression organisés considèrent ici ou là comme néfastes pour la collectivité.

La communauté scientifique et les industriels disposent à présent d'un retour d'expérience international d'une cinquantaine d'années. Ils ont effectué des choix technico-économiques « raisonnables » qui s'imposent aujourd'hui au plan mondial.

Ces choix structurent la mise en valeur et l'exploitation de l'énergie éolienne : (i) la quasi-totalité des installations éoliennes ont pour finalité la production industrielle d'électricité ; (ii) les aérogénérateurs sont regroupés dans le cadre d'installations de production d'électricité – souvent appelés parcs éoliens - de puissance significative (quelques MW à plusieurs dizaines de MW voire plusieurs centaines de MW installés, notamment dans le cas des sites de production en mer) qui sont raccordées au réseau public de distribution ou de transport d'électricité et livrent à ce dernier la totalité de l'énergie électrique produite, déduction faite des pertes dans le réseau interne au parc éolien ; (iii) la production d'électricité est assurée par des aérogénérateurs « multi-MW [18] », machines aérodynamiques sophistiquées, fabriquées en série qui convertissent l'énergie éolienne en milieu ouvert, disposant d'un axe horizontal et très généralement de trois pales qui s'orientent face au vent.

La puissance aérodynamique disponible au niveau de l'arbre moteur s'exprime avec la formule :

$$P_{\text{méca}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

Dans laquelle C_p désigne le coefficient de régulation de puissance, ou rendement aérodynamique de la machine ($C_p < 1$), ρ étant la masse volumique de l'air [19], S la surface balayée par le rotor, et V_1 la vitesse du vent à l'amont du rotor.

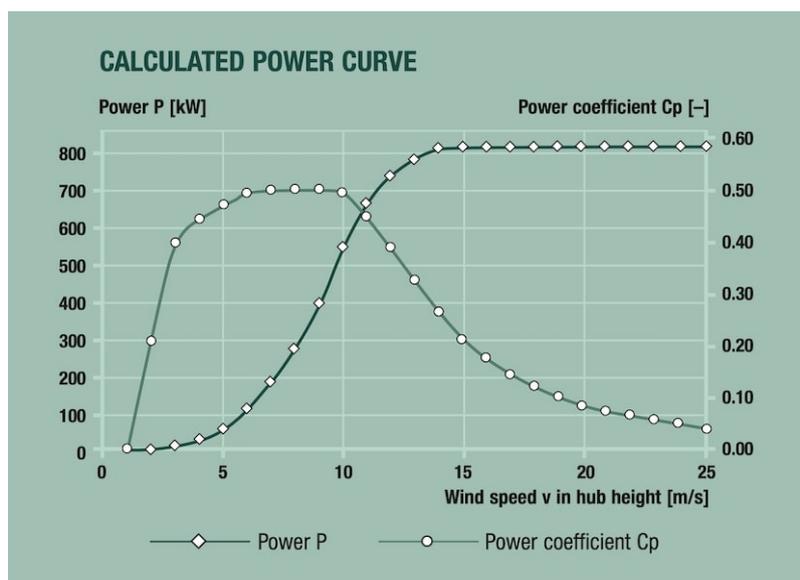


Figure 6. Courbe et coefficient de puissance de l'aérogénérateur ENERCON E82 – 2.3 MW [Source : droits réservés]

En tant qu'exemple, la figure ci-après illustre la courbe de puissance d'un aérogénérateur industriel disponible sur le marché. On observera que le coefficient de puissance C_p ne dépasse jamais la valeur de 0,59 (limite de BETZ [20]) et décroît fortement lorsque la vitesse du vent augmente.

1.4. Technologie des aérogénérateurs : évolution et progrès accomplis

Depuis une quarantaine d'années, la technologie des aérogénérateurs connaît des évolutions régulières, enregistrant ainsi des progrès incrémentaux [21]. Les machines présentent des performances (efficacité énergétique, performance technico-économique, fiabilité, sûreté, etc.) qui s'améliorent au fil du temps. Elles s'adaptent ainsi et répondent au cahier des charges de la demande internationale en forte croissance.

Les principales évolutions concernent les maillons de la conversion énergétique suivants :

Les pales et la régulation aérodynamique,

La transmission du couple moteur,

Le générateur électrique,

La régulation de vitesse et de puissance électrique.

Le tableau ci-après présente une synthèse des avancées technologiques les plus emblématiques que connaissent les aérogénérateurs de type « danois », trois pales face au vent, depuis les années 1980.

Tableau 2. Synthèse des avancées technologiques embarquées dans les aérogénérateurs depuis 1980 [Source : Compilation par l'auteur de caractéristiques techniques d'aérogénérateurs commercialisés par différents constructeurs, 2021, Encyclopédie de l'Environnement, www.encyclopedie-environnement.org]

Progrès technologiques	Pales	Transmission du couple moteur	Générateur électrique	Régulation de vitesse et de puissance électrique
1^{ère} Génération d'aérogénérateurs	Pales fixes disposant d'un « pit [22] » de sécurité en bout de pale. Régulation aérodynamique « stall [23] ».	Arbre avec multiplicateur de vitesse à 3 étages.	Génératrice asynchrone à simple champ magnétique	Vitesse de rotation des pales quasiment fixe (glissement limité par la génératrice asynchrone). Pas de régulation de puissance électrique effective.
2^{ème} Génération	Orientation des pales variable. Régulation aérodynamique « pitch control [24] » + spoiler [25] en bout de pale.	Arbre avec multiplicateur de vitesse à 3 étages.	Génératrice asynchrone à double champ magnétique.	Vitesse de rotation des pales variable. Contrôle électronique de la puissance électrique.
3^{ème} Génération	Orientation des pales variable. Régulation aérodynamique « pitch control » + spoiler en bout de pale.	Entraînement direct (sans multiplicateur de vitesse) ou multiplicateur de vitesse à 1 étage.	Alternateur synchrone (induction par courant statorique ou par aimants permanents).	Contrôle électronique de la vitesse de rotation des pales, de la puissance électrique active et réactive.

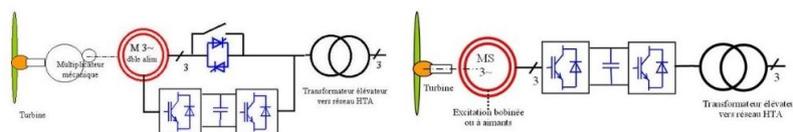


Figure 7. Représentation schématique d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne impliquant à gauche un générateur asynchrone à double alimentation et à droite un générateur synchrone, chacun d'eux associé à leur convertisseur électronique de puissance [Source : © MULTON, B. et al.]

Les aérogénérateurs équipés soit d'une génératrice asynchrone à double champ magnétique, soit d'un alternateur synchrone

représentent l'immense majorité des équipements installés aujourd'hui [26]. Il est intéressant d'en donner une représentation simplifiée (cf. Figure 7).

2. Production d'électricité éolienne : surfaces neutralisées et matières premières embarquées

2.1. Des surfaces « neutralisées [27] » sur les territoires

Dans le cas d'un parc éolien comportant plusieurs turbines, il existe des effets de sillage plus ou moins importants en fonction de la distance qui sépare les turbines et de la direction du vent. Pour atténuer ces effets qui dégradent le coefficient de conversion de puissance C_p moyen pondéré du parc, on préconise une distance minimale entre éoliennes, de l'ordre de 5 à 10 fois leur diamètre selon le relief du site et la distribution du vent (vitesse et direction). On recherche alors le compromis technico-économique entre le nombre d'aérogénérateurs installés, la production d'électricité annuelle, la surface de terrain dédiée à cet effet, les impacts sur l'environnement, sur la collectivité et les habitants [28].

La puissance nominale moyenne des aérogénérateurs installés en 2019 dans le monde s'établit à 2,75 MW [29] à comparer à 1,5 MW dix ans plus tôt. Pour obtenir cette puissance nominale (2,75 MW), le diamètre du rotor des aérogénérateurs commercialisés à l'heure actuelle est compris entre 110 et 125m selon les modèles [30]. Grâce à la productivité des machines modernes, la densité de puissance électrique installée peut dépasser aujourd'hui 20 MW/km² de territoire neutralisé par les aérogénérateurs.

Le rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie (2019) fournit le classement des pays « Top Ten » en fonction notamment, de la puissance moyenne des aérogénérateurs installés à fin 2019 et de la densité de puissance installée rapportée à la surface des pays, ce qui caractérise la « pression » de la production d'électricité éolienne sur les territoires.

Tableau 3. Classement des pays « Top Ten » en fonction de plusieurs critères, notamment la densité de puissance électrique éolienne installée par km² de surface du pays [Source : IEA (2019), [IEA Wind TCP Annual Report 2019](#). Tous droits réservés]

	Cumulative Capacity (end of 2019)		New Capacity (2019)		Increase in Cumulative Capacity (2019)		Capacity Relative to Country Size		Average Capacity New Land-based Turbines		Average Capacity All Turbines	
	Country	MW	Country	MW	Country	%	Country	kW/km ²	Country	MW	Country	MW
1	China	236,320	China	26,785	Norway	45%	Germany	170	Finland	4.34	Norway	3.06
2	US	105,591	US	9,137	México	26%	Denmark	140	Norway	4.13	Finland	3.03
3	Germany	60,840	Spain	2,243	Greece	25%	Belgium	125	Sweden	3.55	Austria	2.36
4	Spain	25,704	UK	2,205	Sweden	21%	Netherlands	109	Spain	3.54	Sweden	2.19
5	UK	23,975	Germany	2,092	Belgium	16%	UK	99	Korea	3.47	Korea	2.16
6	France	16,654	Sweden	1,588	Korea	15%	Portugal	59	Canada	3.41	México	2.14
7	Canada	13,413	France	1,419	Ireland	14%	Ireland	59	Germany	3.32	France	2.09
8	Italy	10,513	México	1,281	China	13%	Spain	51	Austria	3.10	Switzerland	2.03
9	Sweden	8,984	Norway	785	Finland	12%	Austria	38	México	3.06	Canada	1.98
10	México	6,125	Greece	725	UK	10%	Italy	35	Ireland	3.05	Netherlands	1.96

2.2. Matériaux et composants embarqués dans les aérogénérateurs

La technologie, les dimensions et la masse des aérogénérateurs ont évolué au cours des dernières décennies afin de tirer le meilleur parti de l'énergie cinétique du vent et produire l'électricité dans les conditions technico-économiques les plus favorables et cela, compte tenu de la faible masse volumique de l'air (1,292 kg/m³).

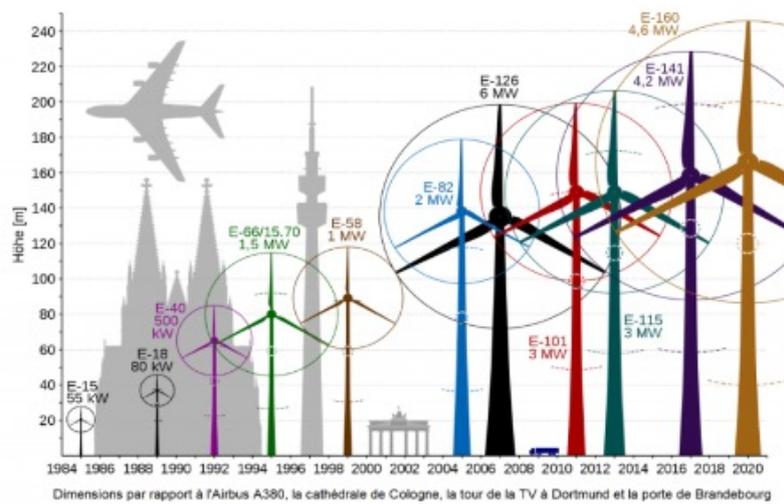


Figure 8. Évolution des dimensions et de la puissance nominale des aérogénérateurs ENERCON commercialisés pour les sites terrestres depuis 1984 [droits réservés] [Source : © ENERCON GmbH - droits réservés]

L'augmentation de la taille des aérogénérateurs installés sur terre et en mer est caractéristique [31].

La construction et l'installation sur site d'un aérogénérateur fait appel à l'assemblage de composants principaux qui sont : la fondation, pratiquement toujours gravitaire pour les sites éoliens terrestres, le mât [32], la nacelle ou « hub », le rotor sur lequel viennent s'articuler trois pales selon la technologie qui est adoptée aujourd'hui par la quasi-totalité des machines [33].



Figure 9. Vue d'un aérogénérateur et de ses principaux composants [Source : Pixabay / libre de droits]

On observera sur la figure ci-dessous la cabine placée en pied de mât à l'extérieur qui abrite le transformateur BT/HTA [34] et les organes de protection électrique (sectionneur, disjoncteur, mise à la terre des masses, comptage de l'énergie, etc.).



Figure 10. Fondation gravitaire pour éolienne multi-MW en cours de réalisation [Source : © Enerfip - [Fondations des éoliennes : revoir les bases](#) - droits réservés]

Le mât d'un aérogénérateur est solidement fixé à une fondation en béton armé qui est dans la grande majorité des cas, de type gravitaire pour les éoliennes terrestres. Après réalisation, la fondation disparaît sous le niveau du sol et est recouverte de terre végétale.

Le tableau ci-après mentionne les dimensions, masses et matières premières essentielles qui entrent dans la fabrication et l'installation sur site terrestre d'un aérogénérateur de 2,5 MW (puissance nominale proche de la moyenne installée en 2020 dans le monde).

Tableau 4. Composants principaux, dimensions et masses approximatives. Inventaire succinct des matières utilisées dans la fabrication d'un aérogénérateur 2,5 MW et pour la fondation gravitaire [Source : D'après les caractéristiques comparées de plusieurs aérogénérateurs (puissance nominale : 2,5 MW), 2021, Encyclopédie de l'Environnement, www.encyclopedie-environnement.org]

Composants	Dimensions approximatives	Matières premières et matériaux principaux
Rotor et 3 pales	Diamètre : 100 ± 10m Masse : 50 tonnes env. Dont pales : 3 x 15 tonnes	. Nez du rotor : fibre de verre, époxy . Couronne (régulation pitch) : acier, alliages usinés, bronze . Pales : structure bois ou fibre de carbone, revêtement fibre de verre, époxy ou fibre carbone
Nacelle : « hub »	Masse : 85 ± 5 tonnes Dont rotor et pales : 50 tonnes env.	. Carrosserie : fibre de verre, époxy . Châssis : acier mécano soudé, zinc . Couronne d'orientation : acier, alliages usinés, bronze . Générateur : aimants permanents (terres rares), tôles ferromagnétiques, cuivre, électronique de puissance (silicium) . Multiplicateur vitesse (si mis en œuvre) : acier traité, alliages, huile de synthèse (± 500 litres) . Roulements principaux : acier traité, usiné . Régulation de puissance : aluminium, silicium . Moteurs électriques, pompes auxiliaires : acier, tôles ferromagnétiques, cuivre . Régulation et automatismes BT/TBT : PVC, silicium, cuivre . Câbles électriques : cuivre et/ou aluminium . Tuyauterie, et conduits divers : acier, zinc, aluminium, PVC, caoutchouc.
Mât	Hauteur : 75 à 100m Masse : 280 ± 20 tonnes	. Mât : très généralement, en acier traité contre la corrosion, revêtement : peinture époxy résistante aux UV . Câbles électriques BT ou HTA : cuivre et/ou aluminium . Câbles régulation et automatismes : cuivre, fibre optique . Transformateur BT/HTA (si en pied de mât) : acier, tôles ferromagnétiques, cuivre . Ascenseur : acier traité, zinc . Dispositifs de sécurité et de protection générale (échelles, trappes d'accès) : acier traité, zinc . Raccordement électrique au réseau HTA interne au parc éolien : cuivre ou aluminium
Fondation (gravitaire)	Volume : 550 ± 50 m ³ Masse : 1 300 à 1 600 tonnes	. Excavation sur place par engins TP . Béton armé ferrailé : eau, sable, béton, acier . Recouvrement par terre végétale

2.3. L'énergie « grise [35] » nécessaire pour l'aménagement et la déconstruction des parcs éoliens terrestres

En plus de la fabrication des aérogénérateurs et de leurs composants en atelier, du transport exceptionnel de ces éléments vers le site, l'aménagement des parcs éoliens requiert la réalisation de travaux publics importants pour les infrastructures et VRD :

La voirie : pistes ou routes goudronnées permettant d'accéder aux différents aérogénérateurs, au poste de livraison d'énergie, au(x) mât(s) de mesure de vent, station météorologique, etc.

Le réseau d'eau, les champs d'épandage,

Le réseau de distribution électrique interne au parc éolien, généralement en moyenne tension HTA (20 kV), le réseau de télécommunications,

Le poste de livraison d'électricité pour raccordement selon la puissance du parc éolien au réseau public de distribution (moyenne tension HTA) ou au réseau de transport (haute tension HTB).

Au terme de la durée de vie des équipements et de la période d'exploitation, c'est à dire après une période d'exploitation de 20 à 25 ans dans la grande majorité des cas, le maître d'ouvrage a le devoir [36] de remettre en état le site. Cette phase - dite de déconstruction de la centrale -, appelle la réalisation de travaux importants de démantèlement, tri des matières premières, découpage de composants, remise en état, végétalisation du site, etc.

L'énergie « grise » absorbée par un parc éolien relève d'analyses complexes, d'application de modèles numériques. Elle diffère selon qu'il s'agit de parcs éoliens terrestres ou en mer.

Concernant la production d'électricité éolienne sur terre [37], les études convergent vers un temps de retour de l'énergie « grise »

équivalent à 12 mois de productible du parc éolien. Dans ces conditions, le contenu carbone [38] du kWh éolien est compris entre 20 et 30 grammes de CO₂/kWh, inférieur au taux d'émission moyen pondéré (proche de 80 grammes d'équivalent CO₂/kWh) pour le parc de production d'électricité en France [39] en 2020 qui est l'un des moins carbonés des pays de l'UE.

2.4. Valeur de la production d'électricité éolienne

Les aérogénérateurs en exploitation transforment l'énergie éolienne disponible à proximité de la surface terrestre, énergie qui est renouvelable, exempte de carbone, en une quantité d'électricité comprise selon les sites terrestres et les conditions d'exploitation entre 1 700 et 2 200 MWh [40] par tranche d'un MW installé et par an.

Le coût de production moyen actualisé de l'électricité (LCOE [41]) éolienne est compétitif, compris entre 70 et 80 €/MWh [42] en France.

Par ailleurs, cette énergie « verte » est très faiblement carbonée [43]. Elle contribue ainsi à des émissions de carbone évitées dans la plupart des mix électriques qui présentent généralement une signature « carbone » plus élevée du fait de l'exploitation, par ailleurs, de centrales de production fossiles.

3. Messages à retenir

Le gisement éolien à basse altitude est considérable, bien réparti sur les continents et sur les océans. Il peut être évalué par différentes méthodes complémentaires et est aujourd'hui bien documenté.

La production d'électricité par des aérogénérateurs aux dimensions et caractéristiques toujours plus imposantes (machines multi-MW) regroupés dans des parcs éoliens industriels (taille critique : plusieurs dizaines de MW en milieu terrestre, plusieurs centaines de MW en mer) raccordés au réseau public d'électricité (moyenne ou haute tension) est le processus industriel qui optimise aujourd'hui la conversion de l'énergie éolienne en un vecteur énergétique efficace et renouvelable. En 2019, la production d'électricité éolienne (terrestre et en mer) a représenté 5,9% de la demande mondiale d'électricité.

La production d'électricité éolienne, qu'elle soit en milieu terrestre ou en offshore, neutralise des surfaces ; elle demeure une filière consommatrice d'énergie « grise » lors de la fabrication des aérogénérateurs et de l'aménagement des parcs éoliens ; toutefois, celle-ci reste limitée à l'équivalence d'une année de production. S'appuyant sur l'efficacité d'une technologie éprouvée et optimisée sur les quarante dernières années, l'électricité éolienne est globalement très peu carbonée (20 à 30 gr de CO₂/kWh).

En sus d'être une énergie renouvelable, la production d'électricité éolienne est source de valeur : le coût de production du MWh en milieu terrestre est compétitif (France : 70 à 80 €/MWh en fonction du gisement éolien), ce qui la rend incontournable pour contribuer à un mix électrique efficace et de moins en moins carboné.

Notes et références

Image de couverture. Vue aérienne du parc éolien de Rodby Fjord au Danemark, 11 éoliennes (plateforme VESTAS 3.0 MW, diamètre du rotor : 117m) Parc éolien de Rodby Fjord, mis en service en 2016, Danemark [Source : © [VESTAS Wind Systems A/S](#), www.vestas.com, droits réservés]

[1] MULTON, B. *et al.*, Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'Ingénieur, <https://www.techniques-ingenieur.fr>

[2] On désigne par production « industrielle » d'électricité éolienne, l'énergie électrique produite par des parcs éoliens composée d'un ou généralement de plusieurs aérogénérateurs de puissance unitaire multi-MW – de nos jours – qui est injectée dans le réseau public d'électricité. Par opposition à la production d'électricité éolienne isolée destinée à l'alimentation d'installations ou de bâtiments raccordés ou non au réseau public d'électricité : installations agricoles, refuges en montagne, etc.

[3] BESLIN, G. et MULTON, B., 2016, Production éolienne : de son gisement éolien à ses aérogénérateurs, Encyclopédie de l'Énergie, www.encyclopedie-energie.org

[4] Quelques modèles d'éoliennes bipales de plus faible puissance sont commercialisés pour équiper des sites isolés ou des sites

dont le gisement éolien est complexe : turbulences, phénomènes cycloniques.

[5] Les installations de production d'électricité éoliennes en mer sont le plus souvent rattachées à la catégorie des sources d'énergie marines renouvelables, les conditions d'aménagement propres à l'environnement marin prenant le pas sur la source d'énergie.

[6] L'impact du carbone dans l'électricité éolienne est très réduit. Le processus de conversion d'énergie étant exempt de carbone, l'empreinte carbone à comptabiliser correspond à l'énergie « grise », comme il sera précisé ci-après, consommée lors de la fabrication des aérogénérateurs, du transport de ceux-ci, des travaux d'aménagement du site, de la construction des fondations et, au terme de la durée d'exploitation de l'installation, des opérations de déconstruction.

[7] Avant la réalisation des travaux d'un parc éolien, un ou plusieurs mâts de mesure de vent (hauteur : 10 à 50m voire davantage pour certains sites) sont implantés in situ afin de réaliser les études préalables et l'ingénierie du parc. Ces mâts de mesure sont généralement conservés pendant l'exploitation de l'installation de production. Ils peuvent alors servir de référence pour étalonner les enregistreurs embarqués dans les aérogénérateurs.

[8] Les instances politiques et gouvernementales, les organisations internationales telles que la Commission Européenne, le Département de l'énergie (DOE) des États-Unis, la Banque Mondiale, etc. contribuent au financement des études du gisement éolien terrestre et offshore.

[9] Europe's onshore and offshore wind energy potential. An assessment of environmental and economic constraints, 2009, European Commission, <https://www.energy.eu/publications/a07.pdf>

[10] Georges Darrieus (1888 – 1979) : ingénieur français ayant occupé différentes fonctions à la Compagnie Electro Mécanique (CEM). Il dépose un brevet en 1927 sur l'éolienne à axe vertical.

[11] Sigurd Savonius (1884 – 1931) : architecte et inventeur finlandais. Il conçoit l'éolienne à axe vertical dont le rotor est hémisphérique. Le couple moteur résulte de l'écoulement aérodynamique (déflexion) dans les coupelles hémisphériques.

[12] Le fonctionnement d'une éolienne Darrieus repose sur l'effet de portance d'un profil ou d'une aile soumis à la force d'un vent relatif, lequel va entraîner le profil ou l'aile dans un mouvement de rotation autour d'un axe vertical. L'éolienne Savonius comporte deux ou plusieurs godets ou profils demi-cylindriques, lesquels sont mis en rotation autour d'un axe vertical sous l'effet du vent.

[13] L'éolienne de type « danois » s'est imposée au marché. Elle comporte en haut du mât un rotor équipé très généralement de trois pales. Le rotor est posé sur un roulement et s'oriente en fonction de la direction du vent de façon à ce que les pales puissent tourner, face au vent.

Lors du « rush » aux États-Unis, les éoliennes installées en Californie étaient du type danois. La plupart des pays occidentaux ont développé des prototypes d'éoliennes à axe horizontal (tripales ou non). En France : une éolienne tripale de 800 kW a été étudiée par Lucien Romani, Bureau d'Études Scientifiques et Techniques (BEST) dans les années 1950.

[14] Support de cours : CRESSAULT, Y., Eoliennes, 2015 – 2016, Laboratoire Laplace, Université de Toulouse, https://btsfed.lyceevinciblanquefort.fr/lib/exe/fetch.php?media=2015:ads:cours-eoliennes_essentiel.pdf

[15] On peut dire que l'électricité éolienne est compétitive si les conditions techniques de production sont fiables et sûres grâce à la mise en œuvre des meilleures technologies du moment et si le coût de production n'excède pas 1,5 fois le coût de production moyen de l'électricité dans le pays, toutes centrales considérées : nucléaires, fossiles, hydroélectriques, etc.

[16] Production mondiale d'électricité en 2019 : 26 413 TWh. Source : Our World in Data, <https://ourworldindata.org>

[17] La production éolienne d'électricité se trouve comme toute autre activité humaine en compétition avec d'autres usages utiles aux populations : agriculture, élevage, habitations, zones industrielles et commerciales, voies de transport : routes, autoroutes, zones d'approche des aéroports, zones de transmission hertziennes, etc. et plus spécifiques à l'éolien en mer : zones de pêche et de navigation.

[18] Puissance unitaire nominale exprimée en MW des aérogénérateurs commercialisés aujourd'hui.

[19] Masse volumique de l'air : 1,292 kg/m³, air sec à la température de 0 °C et sous la pression atmosphérique normale.

[20] Albert BETZ (25 décembre 1885 - 16 avril 1968) est un [physicien allemand](#). Travaillant à l'Université technique de Berlin, il s'investit dans l'exploitation de l'énergie du vent et dans le fonctionnement des éoliennes. Il établit en 1920 la formule de BETZ : au maximum, 16/27^{ème} de l'énergie cinétique du vent à l'amont de l'éolienne fonctionnant en milieu ouvert peut être transformé

[21] A la différence de la rupture technologique qui traduit un profond changement de la technologie ou du procédé industriel mis en œuvre, le progrès incrémental caractérise une évolution par palier qui apporte une amélioration quantifiable sans remettre en cause le concept de base.

[22] On désigne ainsi par « pit » la partie mobile située en bout de pale qui peut s'orienter parallèlement à la direction du vent sous l'action d'un système de sécurité, de façon à freiner puis arrêter la rotation du rotor en cas de violentes rafales de vent ou d'absence de tension sur le réseau public de distribution (absence de couple électrique résistant). Lorsque l'aérogénérateur est à l'arrêt, le frein mécanique (serrage de l'arbre de transmission) peut être actionné et la machine est alors en position de sécurité.

[23] Régulation « stall » : dans le cas de pales fixes, désigne un principe de régulation aérodynamique passif qui repose sur le profil des pales conçu pour éviter le décrochage en cas de vent faible et l'emballement lorsque la vitesse du vent augmente.

[24] Régulation « pitch control » : dans le cas de pales disposant d'un pas ou angle d'attaque variable, il s'agit d'un principe de régulation aérodynamique actif. Celui-ci permet de réguler la puissance délivrée par l'aérogénérateur en fonction de la vitesse du vent, notamment de limiter la puissance lorsque le vent devient fort ou d'arrêter la machine en cas de vents violents en plaçant les pales « en drapeau » parallèlement à la direction du vent, réduisant ainsi la prise au vent.

[25] Le spoiler en bout de pale s'est progressivement généralisé sur les aérogénérateurs modernes. Il améliore l'aérodynamisme des pales et par conséquent, le rendement de conversion énergétique de la machine. Il réduit aussi le bruit dû à l'écoulement de l'air.

[26] HORSIN MOLINARO, H. et MULTON, B., Energie électrique : génération éolienne, juillet 2020, Sciences de l'Ingénieur, École Normale Supérieure Paris – Saclay, <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/12>

[27] L'installation des aérogénérateurs n'obère pas l'utilisation des terrains pour certains usages après la réalisation des travaux. Des activités agricoles peuvent être maintenues : cultures, élevage, etc. En revanche, les zones d'habitation, de commerce ou les zones industrielles, de même que les routes doivent être maintenues à distance, principalement pour des raisons de bruit et de sécurité.

[28] BESLIN, G., 2021, Impacts de la production éolienne. Quel bilan en 2020 ? Quelles perspectives ?, Encyclopédie de l'Environnement, www.encyclopedie-environnement.org

[29] Source : IEA Wind Technology Collaboration Program (TCP), Annual Report 2019, Wind Database, International Energy Agency, www.iea.org

[30] En considérant une vitesse de vent moyenne comprise entre 7,5 et 8,5 m/s (distribution de Weibull, Classe IEC II), le diamètre du rotor des aérogénérateurs commercialisés à l'heure actuelle relevant de la meilleure technologie se situe entre 115 et 125m, pour une puissance nominale comprise entre 3,5 et 4,5 MW.

[31] En 2020, un jury a élu, comme chaque année, la « meilleure » éolienne de l'année. Ce fut l'occasion pour le constructeur ainsi récompensé de rappeler la trajectoire des aérogénérateurs destinés aux sites terrestres commercialisés depuis le début des années 1980.

[32] Le mât est dans l'immense majorité des cas en acier. Il existe quelques modèles d'aérogénérateurs avec des mâts en béton armé.

[33] Pour les sites terrestres dont le régime de vent est particulièrement fort et turbulent avec probabilité de violentes rafales, sur certaines îles et dans les régions cycloniques, des aérogénérateurs de dimensions et puissance nominale moins importantes sont installés avec des caractéristiques qui répondent au gisement éolien local. Ces éoliennes dites cycloniques comportent quelquefois deux pales et leur mât est rabattable.

[34] Dans de nombreux pays, notamment en UE, l'aérogénérateur délivre l'électricité en BT (690 V) jusqu'à une puissance nominale d'environ 5 MW ; puis la tension est élevée en HTA (20 kV) pour rejoindre le réseau interne éolien ou le réseau public de distribution.

[35] « Énergie grise » : quantité d'énergie équivalente dépensée lors de la phase initiale d'aménagement du site, de fabrication des aérogénérateurs et autres équipements connexes (poste de livraison d'énergie, par exemple), de réalisation des fondations, etc. puis lors de la déconstruction (travaux de démantèlement). Le calcul de l'énergie « grise » relative à un ouvrage de production d'électricité exclut par conséquent la consommation d'énergie carbonée – dans le cas des centrales fossiles - qui intervient directement en phase d'exploitation dans le processus de production d'électricité, laquelle est nulle dans le cas de la production d'électricité éolienne.

[36] Dans de nombreux pays, notamment de l'OCDE et de l'UE, les obligations du maître d'ouvrage pour assurer la construction du parc éolien et après la période d'exploitation, la déconstruction des équipements sont définies dans le permis de construire. Tel est le cas en France.

[37] Pour l'offshore : l'énergie grise est plus complexe à estimer. Elle dépend du site : profondeur de la mer, éloignement par rapport à la côte, nature du sous-sol, type de fondation : gravitaire, monopile, tripode, structure flottante, etc.

[38] Source : L'éolien, Commission énergie, France, <https://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/comment/leolien/> Des études internationales (GIEC) placent le contenu CO₂ du kWh éolien autour de 10 grammes.

[39] Source : Bilan Électrique de la France, 2020, Réseau de Transport d'Électricité, www.rte-france.com

[40] On désigne ainsi la productivité moyenne annuelle des installations éoliennes terrestres. Cette amplitude de la production (1 700 à 2 200 MWh par MW de puissance installée et par an) couvre la majorité des installations de production d'électricité éoliennes récentes dans les pays de l'UE. On en déduit le facteur de charge moyen annuel qui est donc compris entre 19,4% et 25,1%. Pour les installations éoliennes en mer, le facteur de charge moyen annuel est plus élevé, compris entre 2 800 et 3 200 h/an, au bénéfice du gisement éolien en mer qui est plus régulier.

[41] LCOE : Levelized Cost Of Energy, soit : coût de production moyen actualisé sur la durée d'exploitation de l'installation de production (20 ans pour la grande majorité des sites). Ce coût prend en compte le coût d'investissement (CAPEX), les dépenses d'exploitation et de maintenance (OPEX) et le coût de déconstruction actualisés, rapportés au Chiffre d'Affaires actualisé sur la durée d'exploitation de l'installation de production électrique.

[42] Source : <https://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/comment/leolien/>

[43] Il s'agit de l'énergie grise comme indiqué précédemment. Le processus industriel de conversion proprement dit de la ressource éolienne en électricité étant exempt de CO₂.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur** : BESLIN Guy (2022), Du gisement éolien à la production d'électricité, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=14855>

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
