Centre Régional des Énergies Renouvelables

Efficacité énergétique – Énergies renouvelables

Edouard Chesnel

information conseil formation expertise

A propos du <u>CRER</u>

- Localisation : Région NA (La Crèche (79) et Limoges (87))
- Association pour la transition énergétique
- Activités : la sobriété, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables
- Objectif : facilitateur
- Les bénéficiaires : particuliers, entreprises du bâtiment, collectivités, établissements tertiaires, agriculteurs, industriels…
- Equipe organisée en secteur de compétences (21 personnes)
- Un centre de ressource exemplaire avec la construction du 1er bâtiment passif à énergie positive (siège à la Crèche-79)
- Animateur régional concernant la géothermie
- **Animateur régional concernant la démarche les Générateurs**
- Formateur qualifié auprès des professionnels
- Plus de 900 adhérents

information conseil formation expertise

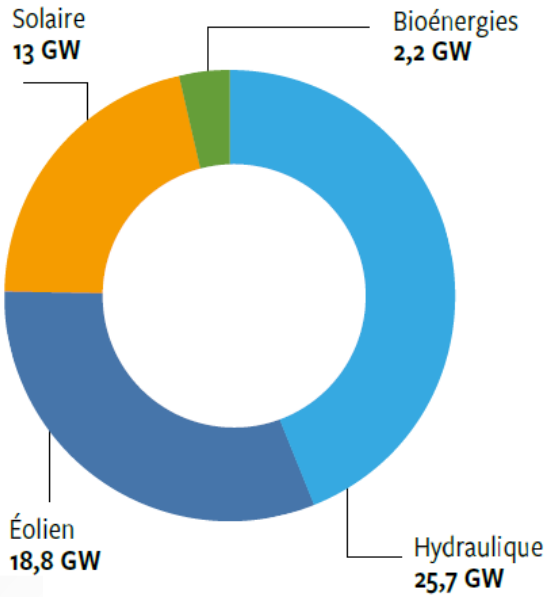
L'énergie éolienne

1. Le développement des ENR et de l'éolien en France
2. Le gisement éolien
3. La technologie éolienne
4. Aspects économiques et administratifs
5. Aspects environnementaux

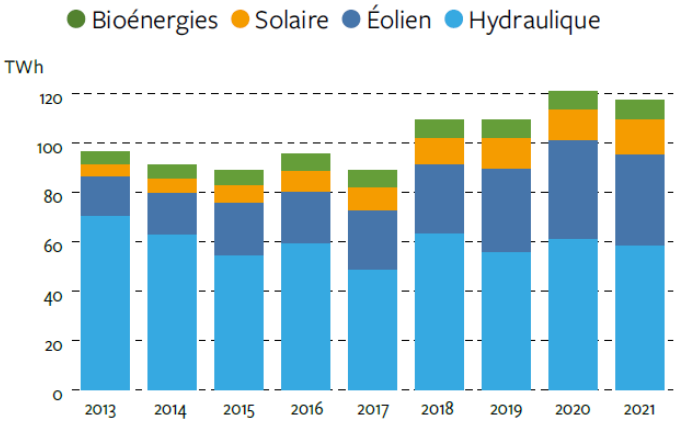
Le développement des ENR et de l'éolien en France

Répartition des ENR électriques en France

Parc renouvelable au 31 décembre 2021



Production renouvelable annuelle



Production renouvelable annuelle

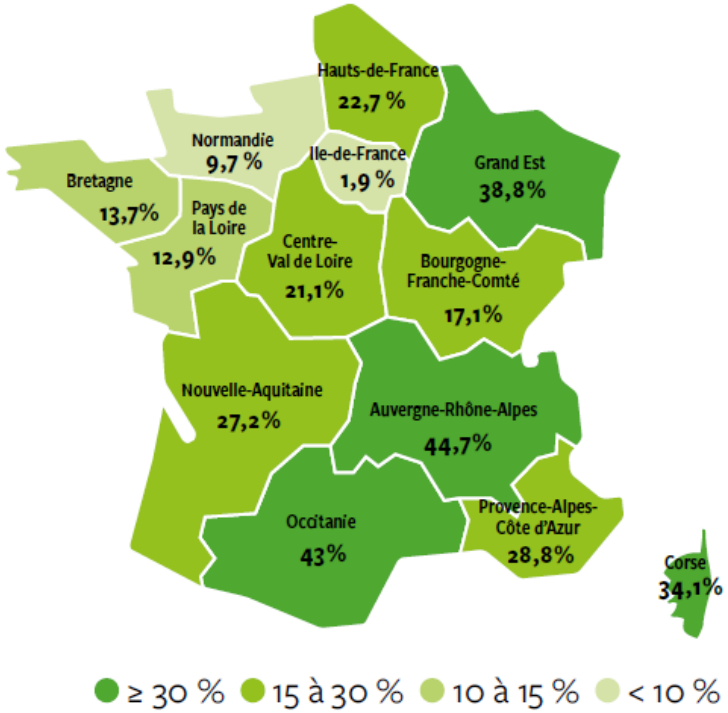
117 TWh

- 3,1% par rapport à 2020

+ 22% par rapport à 2013

Taux de couverture EnR

Couverture de la consommation par la production renouvelable en 2021

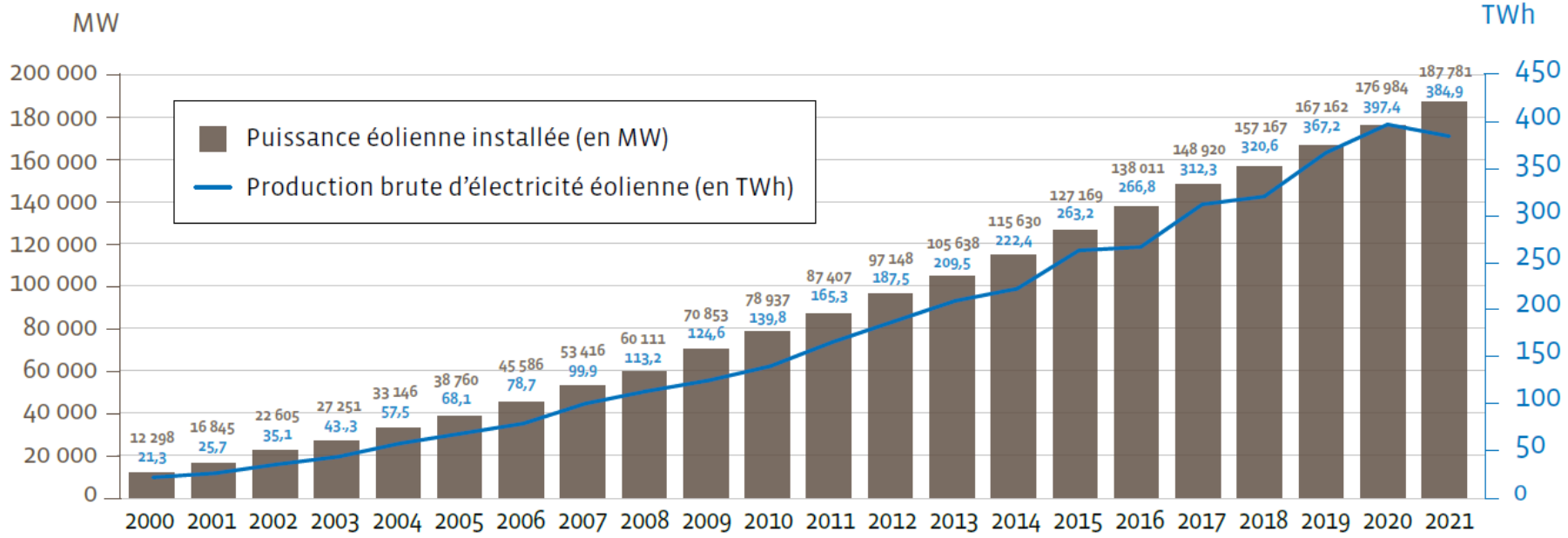


L'électricité renouvelable couvre 24,9 %
de l'électricité annuelle consommée en 2021.

Ce taux s'élève à **19,7%**
sur le T4 2021.

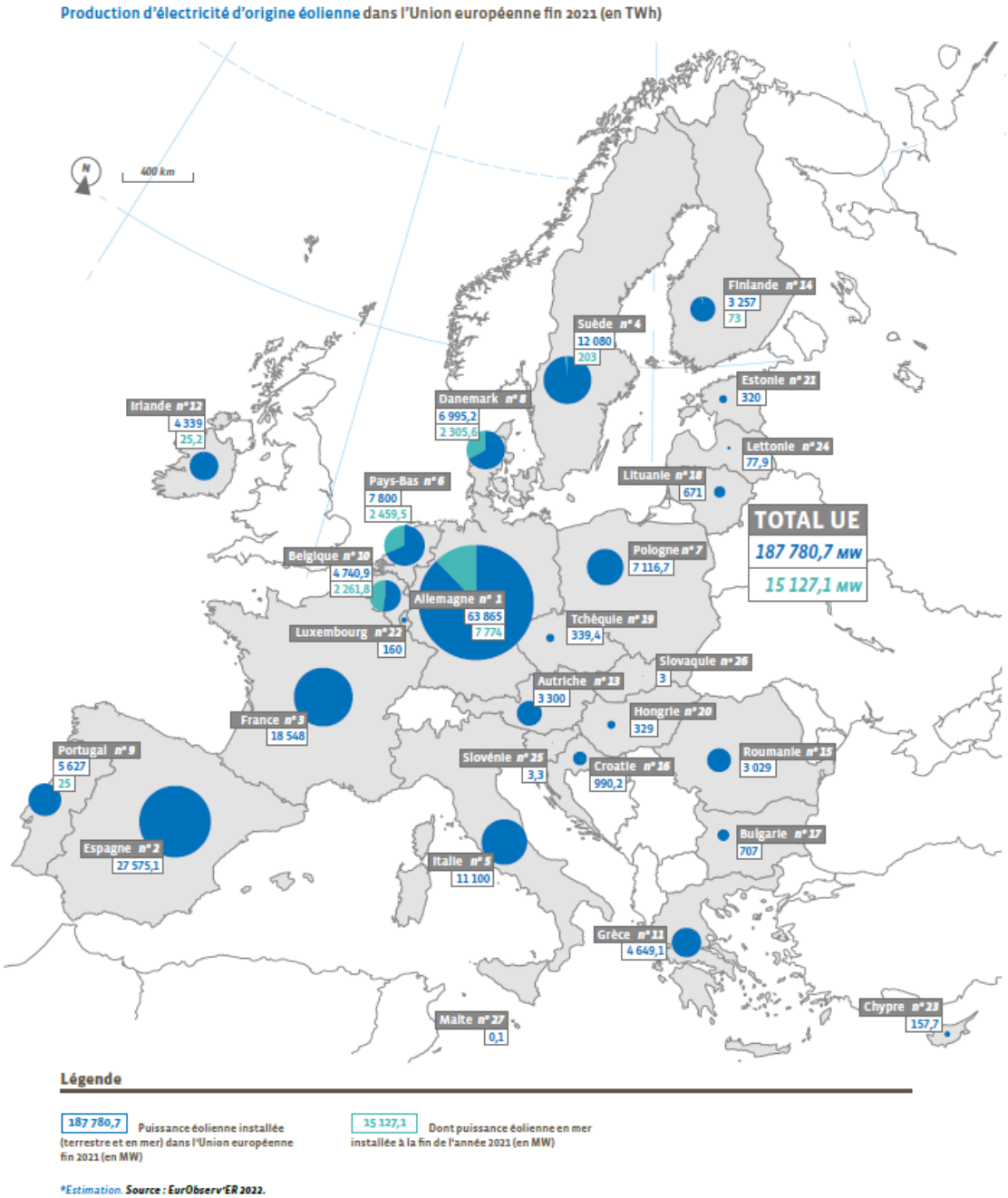
Evolution du parc éolien français

Évolution de la puissance éolienne installée* (en MW) et de la production brute d'électricité éolienne (en TWh) de 2000 à 2021 dans l'Union européenne à 27

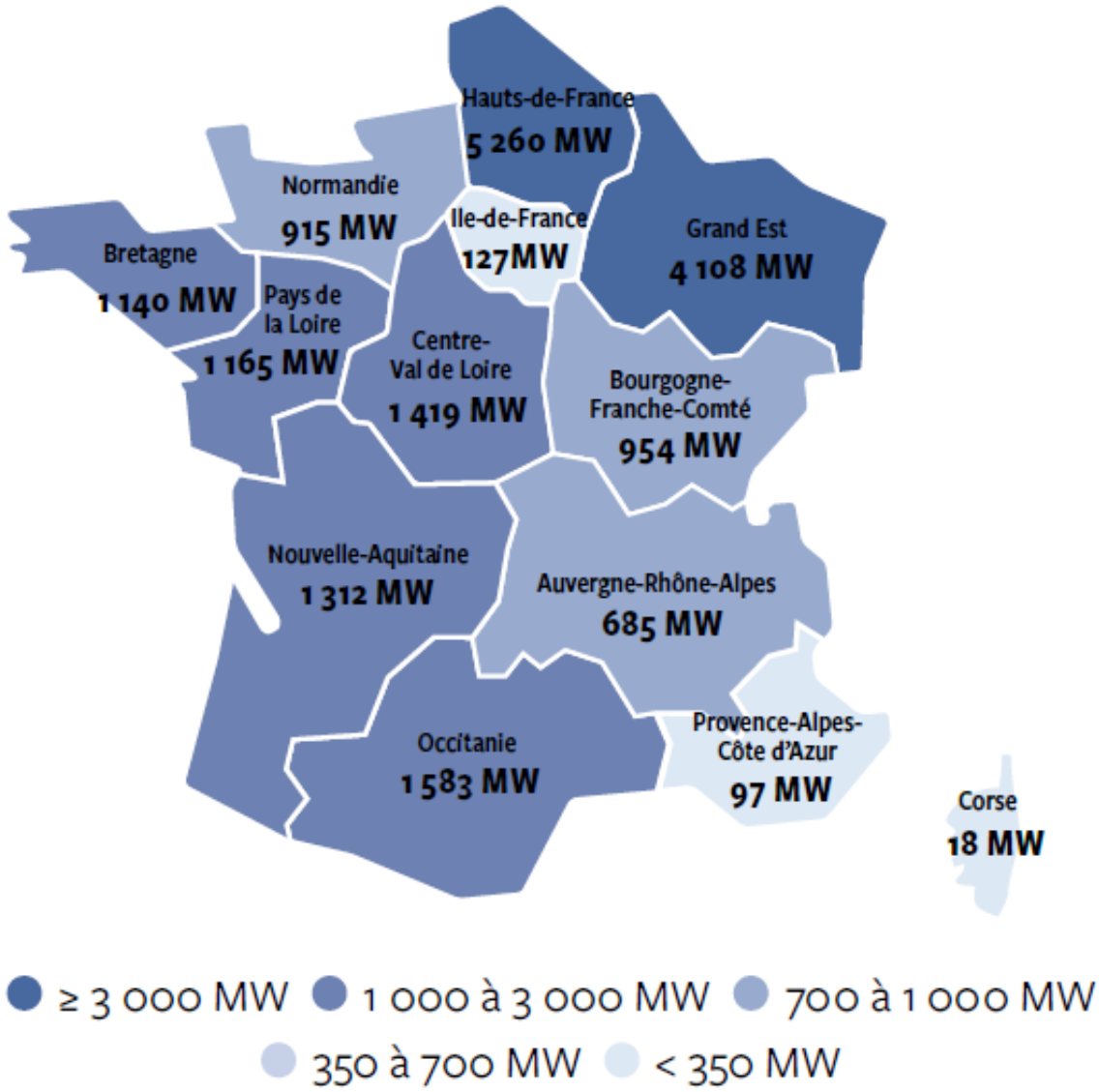


** Puissance électrique maximale nette.* ***Sources : années 2000-2020 : Eurostat, année 2021 : EurObserv'ER.***

Parc éolien européen

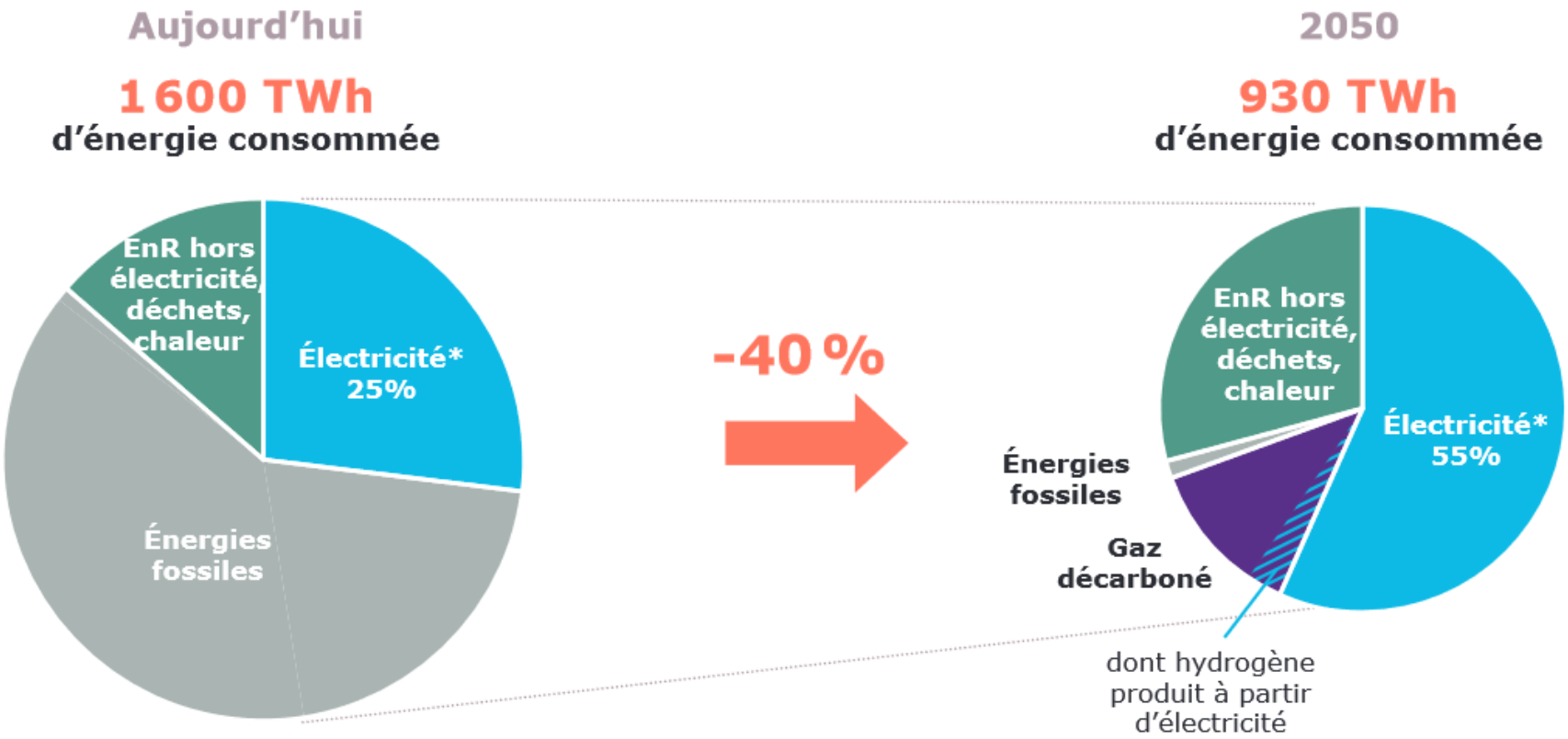


Développement de l'éolien par région



Scénarios 2050

Scénarios 2050



Scénarios 2050

Hydraulique	Énergies marines	Bioénergies	Imports	STEP
~22 GW	Entre 0 et 3 GW	~2 GW	39 GW	8 GW

En 2022, l'éolien c'est 19 GW

Scénarios 2050

Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire
~ 208 GW (soit x21)	~ 74 GW (soit x4)	~ 62 GW	/	/
~ 214 GW (soit x22)	~ 59 GW (soit x3,5)	~ 45 GW	16 GW	/
~ 125 GW (soit x12)	~ 72 GW (soit x4)	~ 60 GW	16 GW	/

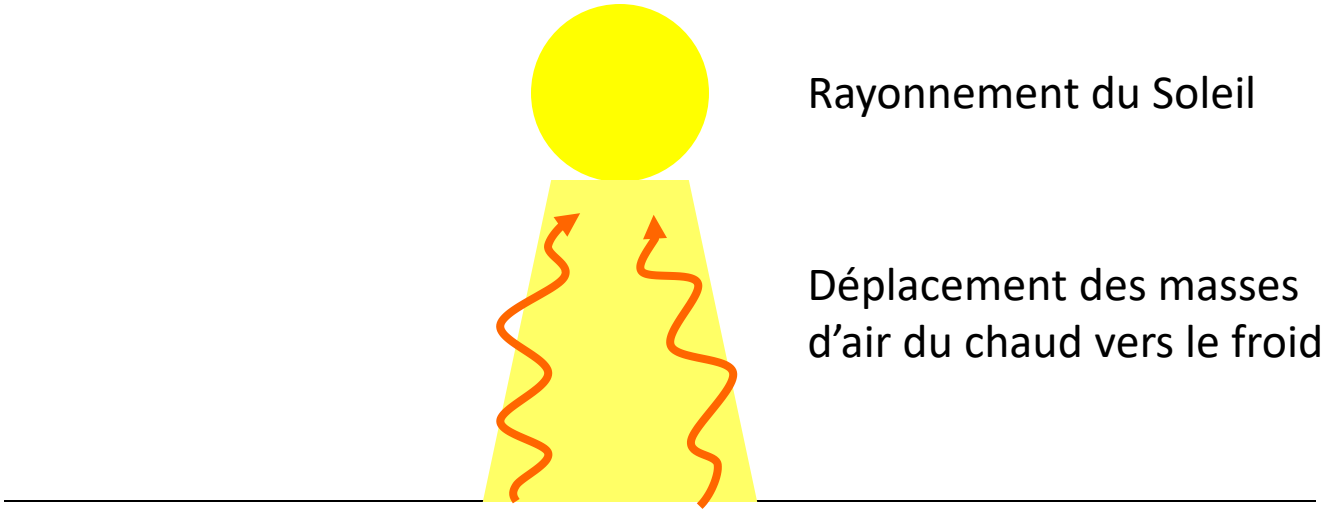
Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire
~ 118 GW (soit x11)	~ 58 GW (soit x3,3)	~ 45 GW	16 GW	13 GW (soit 8 EPR)
~ 90 GW (soit x8,5)	~ 52 GW (soit x2,9)	~ 36 GW	16 GW	23 GW (soit 14 EPR)
~ 70 GW (soit x7)	~ 43 GW (soit x2,5)	~ 22 GW	24 GW	~27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)

Le gisement éolien

Origine du vent

Le vent est lié aux différences de températures et de pression de l'air.

Ces différences sont liées à l'échauffement de la Terre par le Soleil.



Puissance disponible du vent

$$P_d = \frac{1}{2}.\rho.S.v^3$$

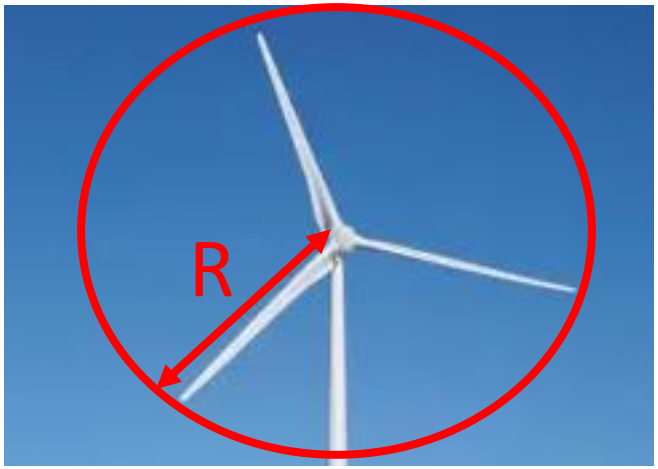
ρ:masse volumique de l'air (1,2 kg/m³ à 20°C au niveau de la mer – elle baisse avec l'altitude)

S:surface balayée par le rotor

v:vitesse du vent

$$S = \pi.R^2$$

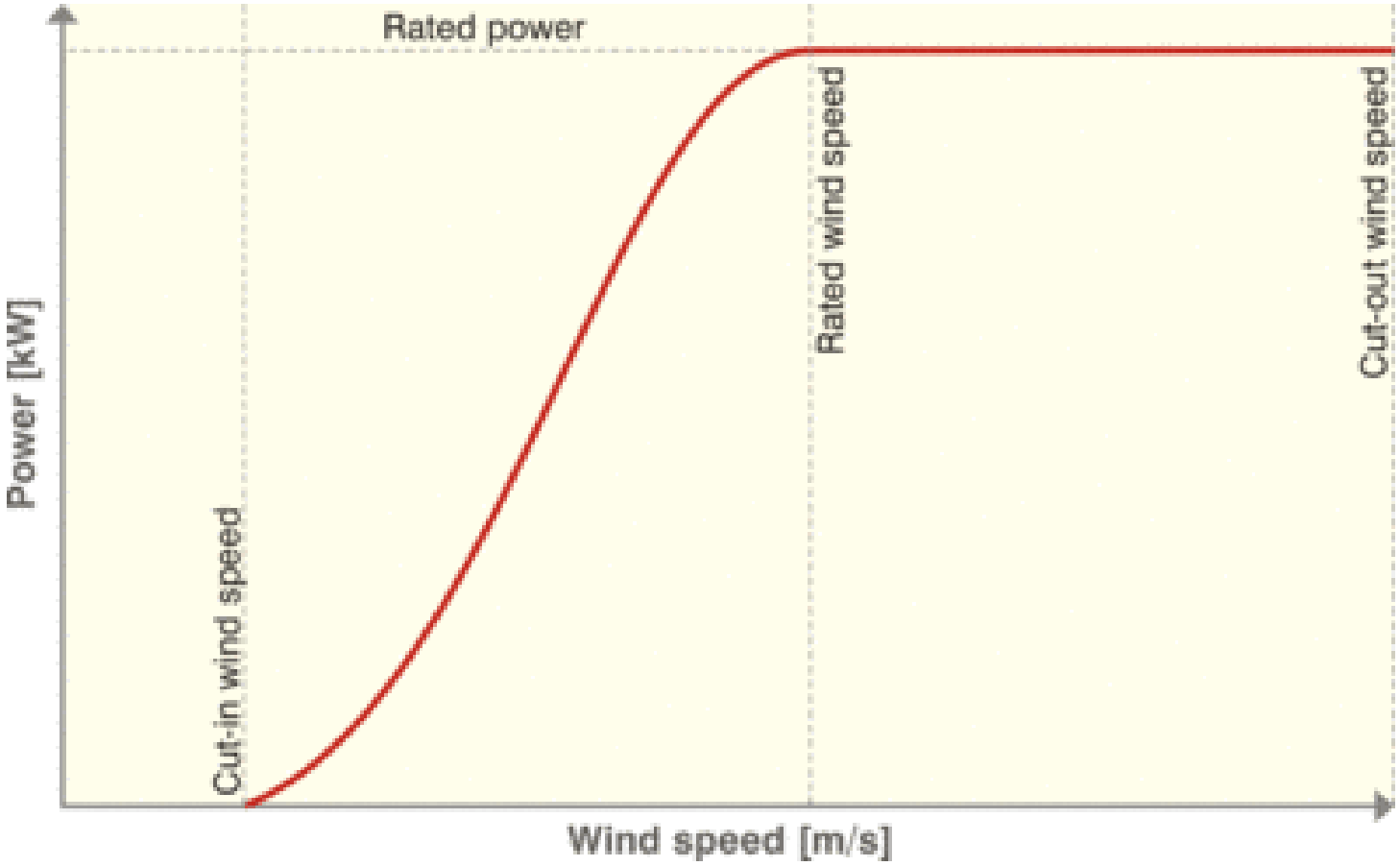
R:rayon du rotor



La puissance disponible est proportionnelle :

- **au cube de la vitesse du vent**
- **au carré du diamètre du rotor**

Courbe de puissance d'une éolienne



Facteurs impactant la vitesse du vent

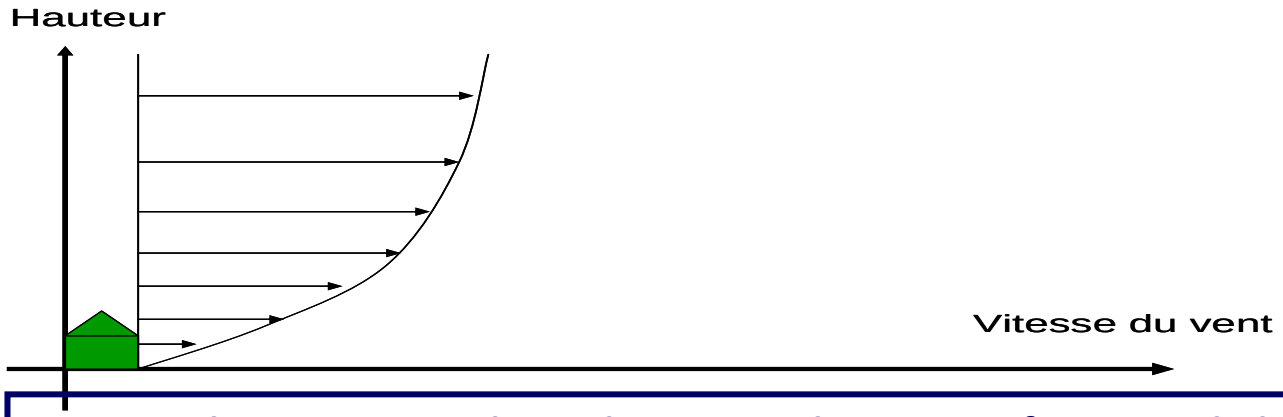
- La rugosité
- La hauteur
- Les turbulences
- La forme du terrain

Relation entre vitesse du vent, rugosité et hauteur

Classification des terrains selon leur rugosité (du plus favorable au moins favorable)

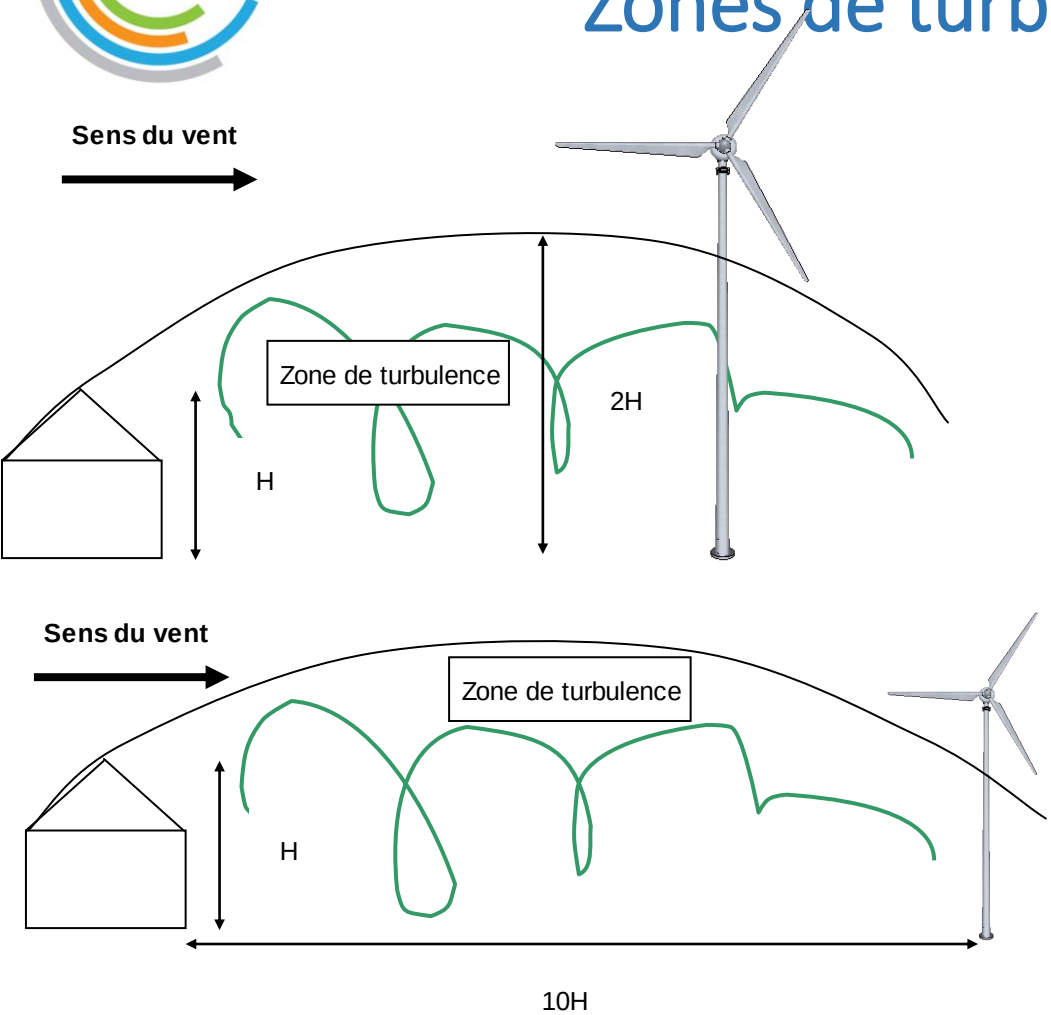
classe	description du terrain
1	Mer ouverte
2	Terrains bourbeux plats, neige; pas de végétation ni d'obstacles
3	Terrains plats ouverts; herbes, rares obstacles isolés
4	Cultures basses; larges obstacles occasionnels
5	Cultures élevées, obstacles dispersés
6	Terres clôturées, buissons; obstacles nombreux
7	Couverture régulière par de larges obstacles (faubourg, forêt)
8	Centre ville avec bâtiments de différentes hauteurs

On cherchera à avoir une hauteur de mât la plus importante possible afin de limiter l'impact de la rugosité.



On observe un gradient de vitesse du vent en fonction de la hauteur. Ce gradient est lié à la rugosité du sol.

Zones de turbulences



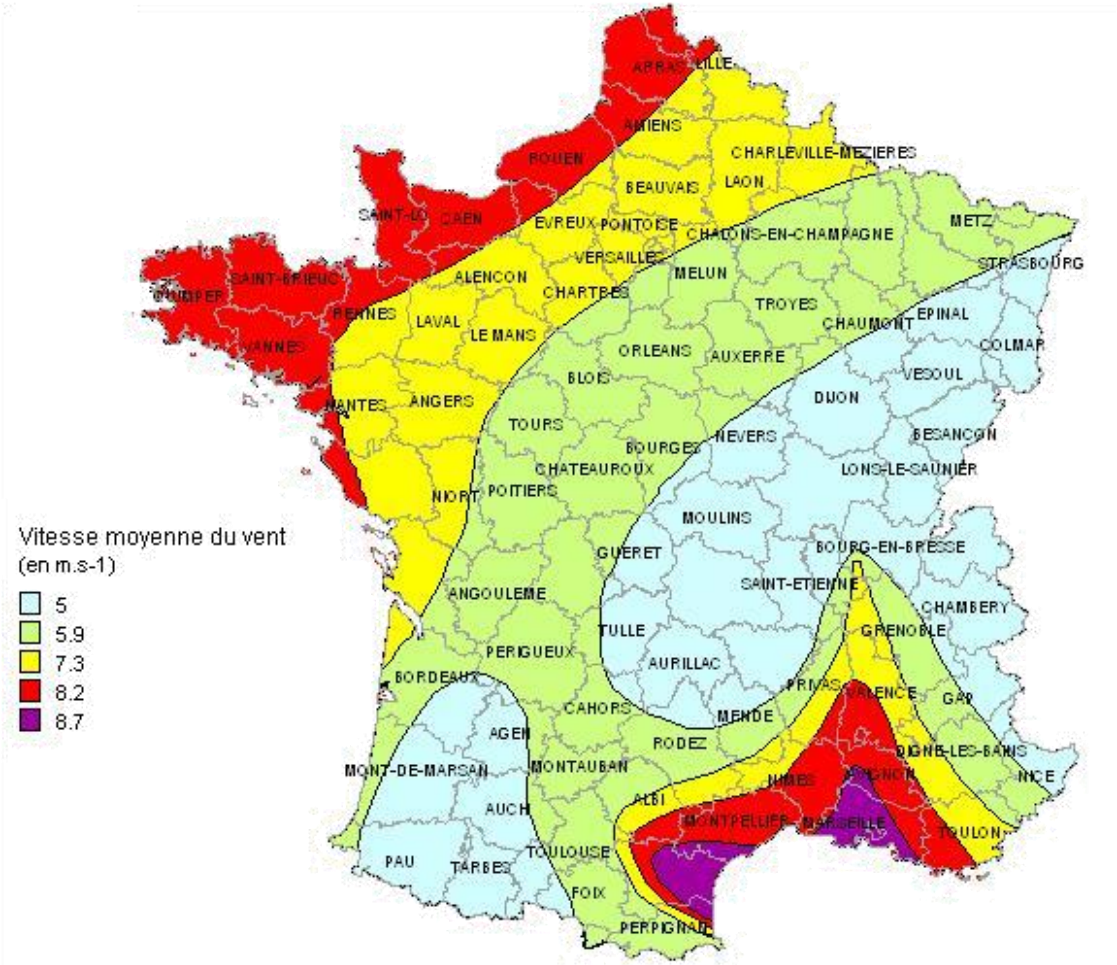
Impact des turbulences:

- Forte baisse de la production
- Vibrations et bruit
- Usure prématurée

A haute altitude, la turbulence est limitée

Les grandes éoliennes sont moins impactées que les « petites ou moyennes » éoliennes, moins hautes

Carte des vents

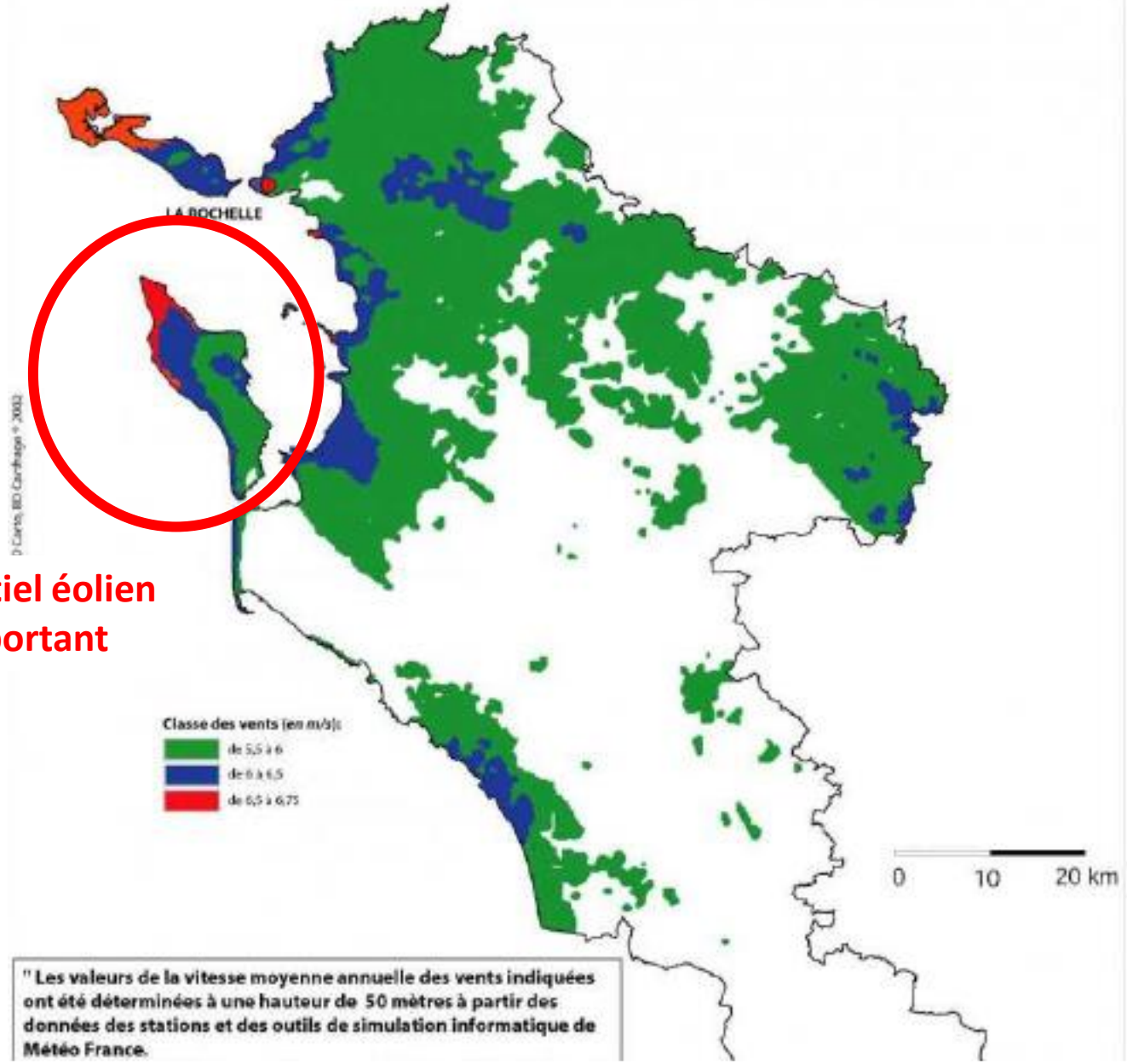


La carte des vents indique des <u>vitesses de vent moyennes enregistrées à 50 ou 60 m d'altitude</u>

Une étude de vent sur le site d'implantation de l'éolienne est indispensable!

Carte n°2.2

Gisement éolien en Charente-maritime



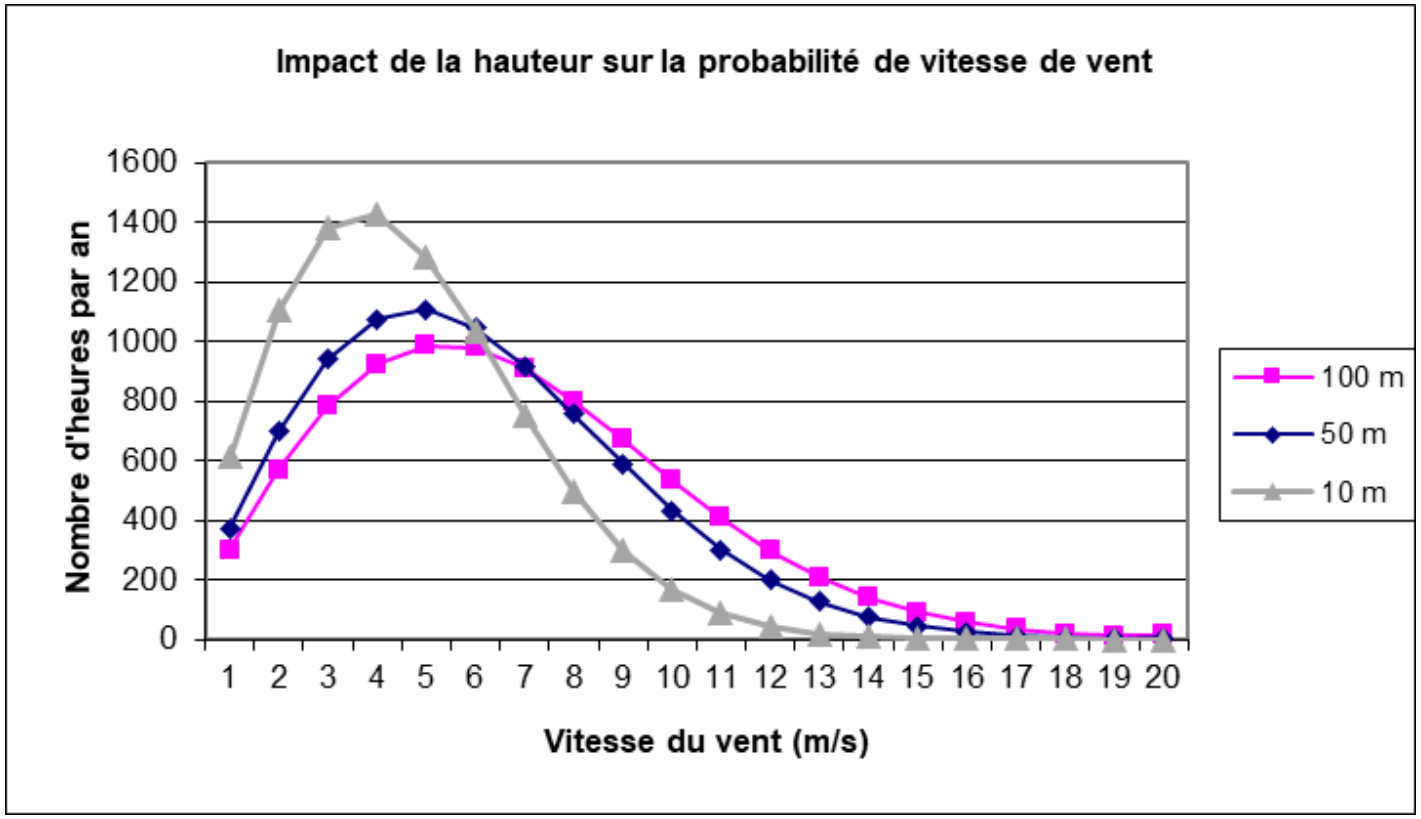
Potentiel éolien important

" Les valeurs de la vitesse moyenne annuelle des vents indiquées ont été déterminées à une hauteur de 50 mètres à partir des données des stations et des outils de simulation informatique de Météo France.

Distribution du vent

Elle représente le nombre d'heures annuelles de vent en fonction de sa vitesse.

Elle est fortement impactée par la hauteur et par l'environnement. Pour estimer une production éolienne, il est indispensable d'obtenir une courbe de distribution précise (avec un pas maximum de 1 m/s)



Résumé

La puissance du vent varie en fonction de :

- La hauteur
- La vitesse du vent
- La surface du rotor de la génératrice
- La rugosité

Les zones de turbulence sont néfastes au bon fonctionnement d'une éolienne car elle provoque:

- Une baisse de la production
- Une usure prématurée du matériel

Pour estimer une production éolienne, il est indispensable de réaliser une étude de vent préalable, de préférence par une mesure de vent sur le lieu d'implantation de la génératrice

La technologie éolienne

La transformation du vent en électricité

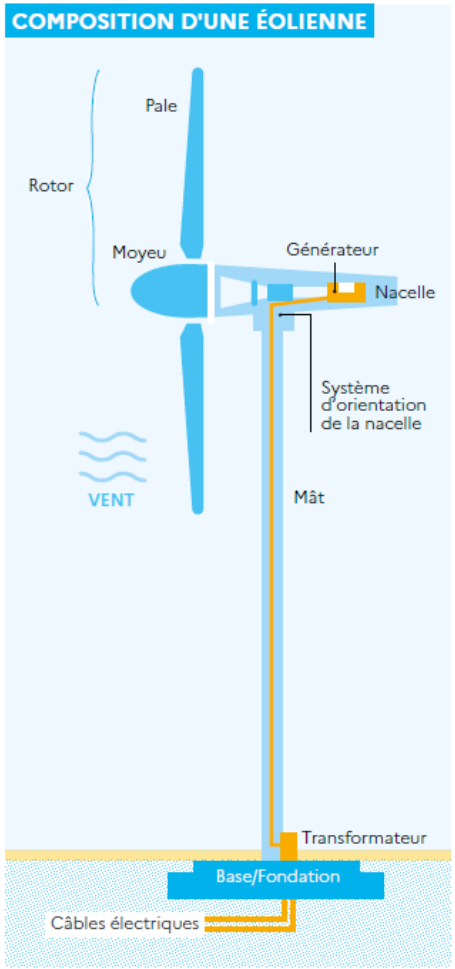
Transformer la force du vent en électricité

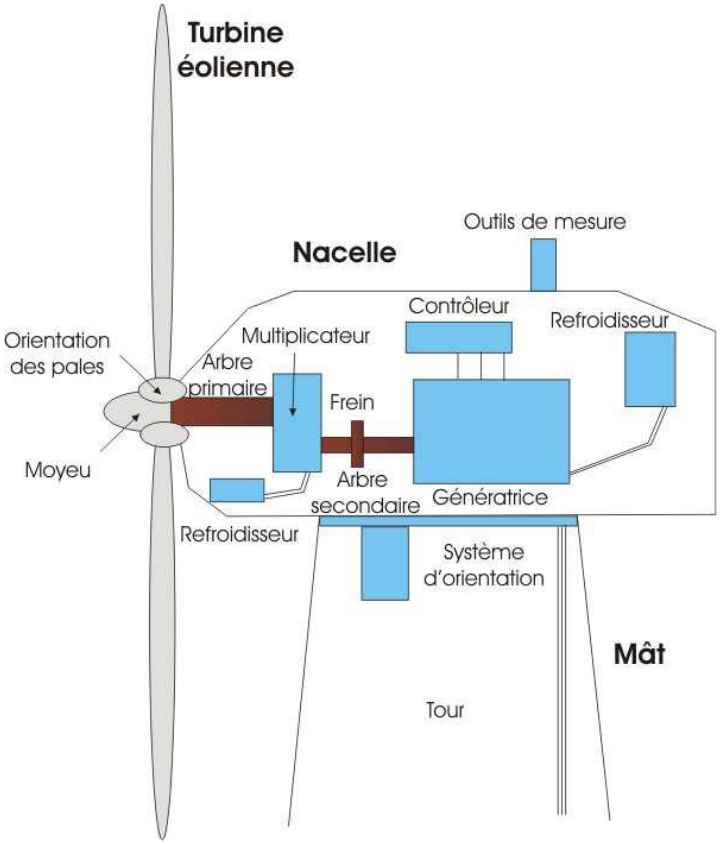
Les éoliennes fonctionnent à des vitesses de vent généralement comprises entre 10 et 90 km/h. Un système permet d'orienter la nacelle afin que le rotor soit toujours face au vent.

Les pales de l'éolienne captent la force du vent et font tourner un axe (le rotor) de 10 à 25 tours par minute. L'énergie mécanique ainsi créée est transformée en énergie électrique par un générateur situé à l'intérieur de l'éolienne, dans la nacelle. Cette électricité est ensuite convertie pour être injectée dans le réseau électrique par des câbles sous-terrains.

Encore plus performantes, les « éoliennes toilées »

Les éoliennes toilées disposent d'un rotor de plus grand diamètre et de pales plus longues qui balayent une plus grande surface. Elles captent ainsi des vents plus faibles et produisent annuellement plus d'électricité qu'une éolienne non toilée à puissance égale sur un même site.





Différents types d'éoliennes

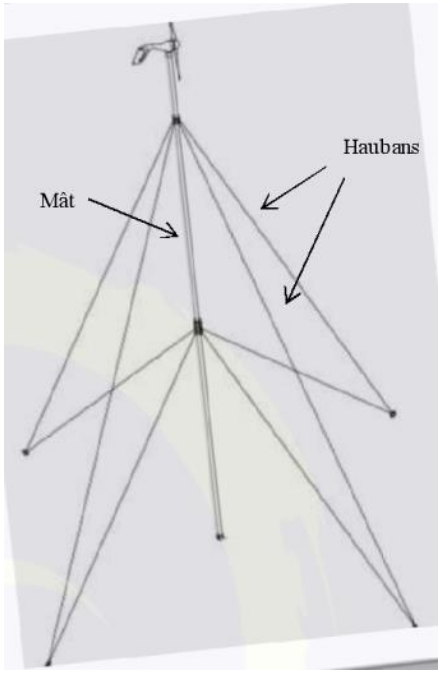
	Principale force entraînant la rotation
Eolienne à axe horizontal	Portance
Eolienne à axe vertical type Daerrius	Portance
Eolienne à axe vertical type Savonius	Poussée

Différents types d'éoliennes

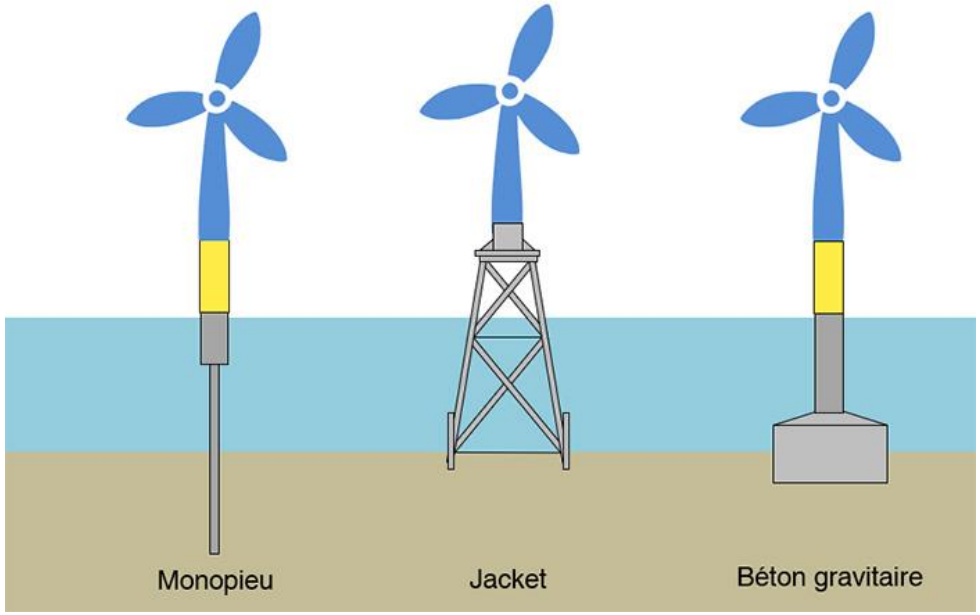
	Avantages	Limites
Eolienne à axe horizontal	Bon rendement Maturité de la technologie	-
Eolienne à axe vertical type Daerrius	Compacité Pas de contraintes sur la direction du vent	Faible rendement Démarrage difficile
Eolienne à axe vertical type Savonius	Compacité Pas de contraintes sur la direction du vent	Faible rendement

Génie civil et mâts – Eoliennes terrestres

- Mâts treillis autoportants
- Mâts tubulaires autoportants (généralisés aujourd'hui sur les grandes éoliennes)
- Mâts tubulaires haubanés



Eoliennes Offshore



Eoliennes fixées au sol

Eoliennes flottantes

Aspects économiques et administratifs

- Règles d'urbanisme
- Types de branchement
    - Production

Démarches administratives

hauteur de mât inférieure ou égale à 12m	hauteur de mât supérieure à 12m et inférieure ou égale à 50m	hauteur de mât supérieure à 50m
- déclaration préalable de travaux (périmètre classé) - demande de raccordement - consuel	- permis de construire - notice d'impact - demande de raccordement - déclaration ICPE	- permis de construire - étude d'impact - enquête publique - demande de raccordement - déclaration ICPE

Grandes éoliennes - distance minimale des habitations : 500m

Différents principes d'installations éoliennes

Injection réseau:

- Auto-consommation (petites et moyennes éoliennes)
- Auto-consommation avec vente de surplus (petites et moyennes éoliennes)
- Vente de la totalité de l'électricité (moyennes et grandes éoliennes)

Aspects économiques: coût d'une installation

Petites éoliennes (Mât de 12m):

2 kW: 12000-15000€

6 kW: 20000-25000€

10 kW: 30000-40000€

Augmentation de la hauteur de mât:

+ 3000-5000€ (prendre en compte les fondations)

Mât à 24m:

36 kW: 75000-90000€

Grandes éoliennes terrestres (>50m) : environ 1M€ / MW

Production

- Petite éolienne (<12m)
  - Sur site dégagé environ 1000kWh/kW installé
- Moyenne éolienne (18-50m)
  - 1500 à 2000kWh/kW installé
- Grande éolienne (>50m)
  - 2000 à 2500 kWh/kW installé
- Eolienne Offshore
  - 3000 à 4000 kWh/kW installé

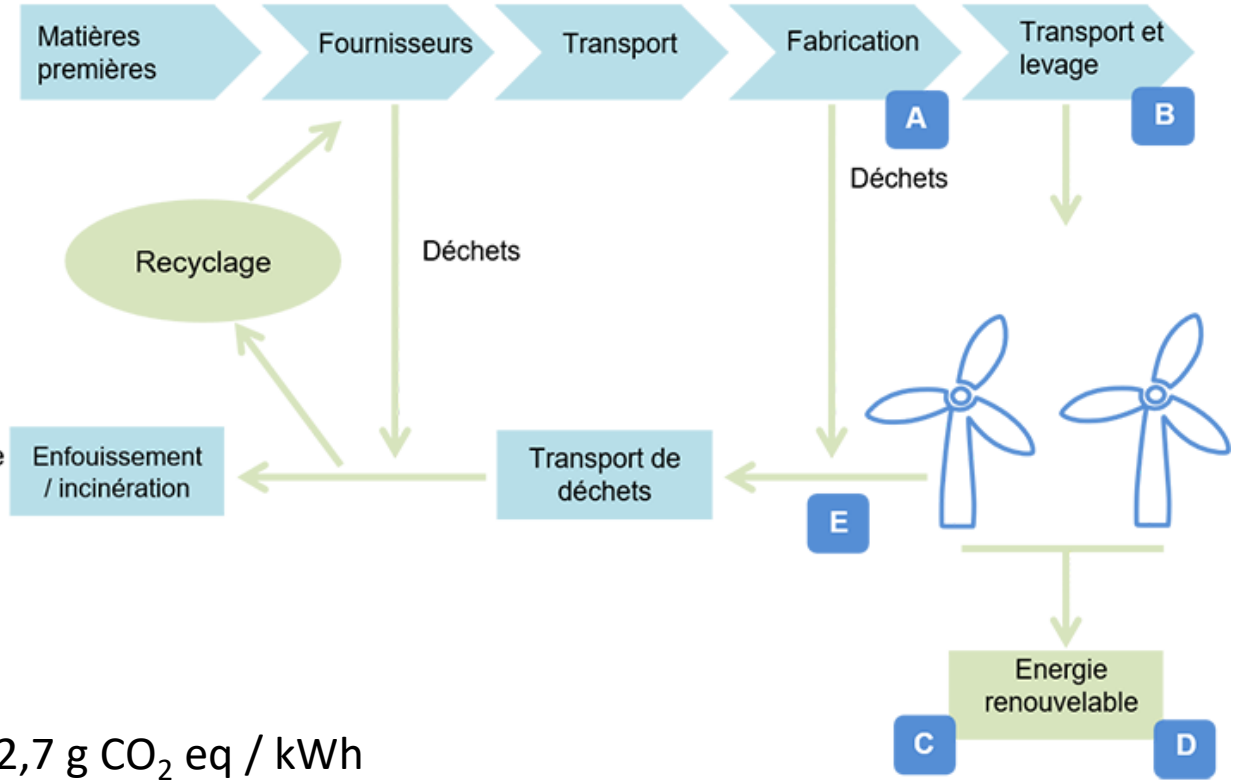
Exemple : un parc de 3 éoliennes terrestres de 3MW produira environ 18000 MWh/an, ce qui correspond à la consommation de plus de 5000 foyers

Aspects environnementaux

L'Analyse du cycle de vie

Les différentes étapes du cycle de vie d'une installation éolienne sont définissent les limites de l'analyse

- **A** Fabrication des composants du système
- **B** Installation du système éolien
- **C** Utilisation
- **D** Maintenance
- **E** Désinstallation, traitement en fin de vie



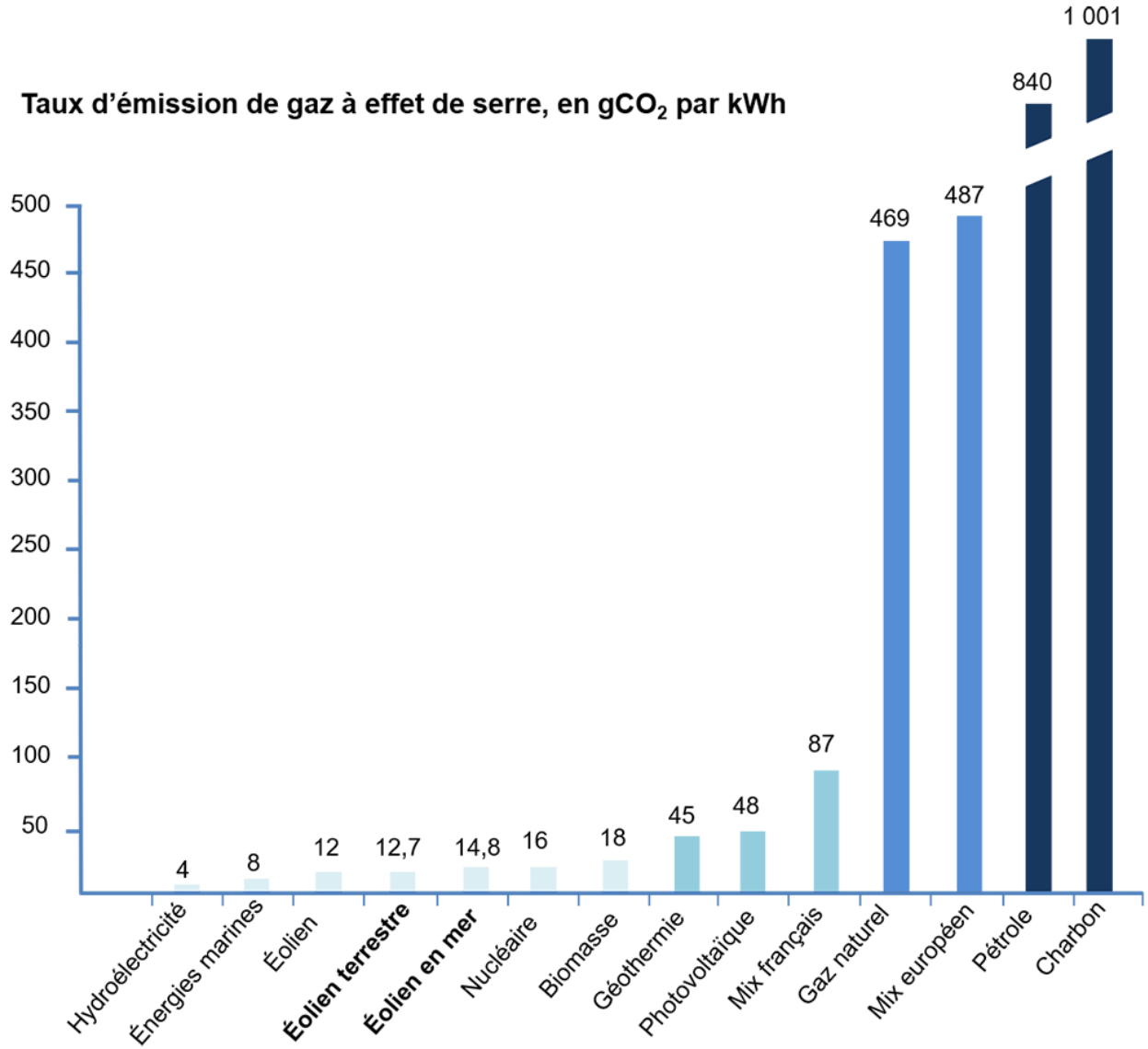
Éolien terrestre

Taux d'émission de 12,7 g CO_2 eq / kWh

Éolien en mer

Taux d'émission de 14,8 g CO_2 eq / kWh

Impact carbone des énergies



Source : Rapport GIEC (2011), Ademe (2015), Ecoinvent (données 2011)

Recyclage

L'éolien en 10 questions, Ademe, avril 2019
Code de l'environnement (section 7, article 29)
Arrêté du 10 décembre 2021

93 % du poids d'une éolienne terrestre sont totalement recyclables (acier, béton, cuivre et aluminium).
Les pales (6 % du poids de l'éolienne) sont aujourd'hui plus difficiles à recycler, mais peuvent être valorisées en tant que combustible. Des travaux de recherche sont conduits pour améliorer leur conception et leur valorisation.
Depuis juin 2020, la réglementation impose des objectifs de recyclage, à la fois pour les éoliennes déjà installées et pour les éoliennes futures.
Ainsi, pour les éoliennes existantes démantelées à compter du 1er juillet 2022 :
• au minimum 90 % de la masse totale des aérogénérateurs démantelés, fondations incluses, doivent être réutilisés ou recyclés.
• au minimum, 35 % de la masse des rotors doivent être réutilisés ou recyclées.

Par ailleurs, les éoliennes dont le dossier d'autorisation sera déposé après les dates suivantes devront avoir au minimum :
• après le 1er janvier 2024, 95 % de leur masse totale, tout ou partie des fondations incluses, réutilisable ou recyclable ;
• après le 1er janvier 2023, 45 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable ;
• après le 1er janvier 2025, 55 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable.
Ces objectifs minimaux doivent permettre d'accélérer le développement d'une filière de recyclage des pales.

Remise en état

Code de l'environnement (section 7, article 29)
Arrêté du 10 décembre 2021 article 16

Les opérations de démantèlement et de remise en état comprennent les opérations suivantes :

1. Le démantèlement des installations de production d'électricité, des postes de livraison ainsi que les **câbles dans un rayon de 10 mètres** autour des aérogénérateurs et des postes de livraison ;

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

3. La remise en état qui consiste en le décaissement des aires de grutage et des chemins d'accès sur une profondeur de 40 centimètres et le remplacement par des terres de caractéristiques comparables aux terres à proximité de l'installation, sauf si le propriétaire du terrain sur lequel est sise l'installation souhaite leur maintien en l'état.

Les déchets de démolition et de démantèlement sont réutilisés, recyclés, valorisés, ou à défaut éliminés dans les filières dûment autorisées à cet effet.

Bruit

L'éolien en 10 questions, Ademe, avril 2019

Les éoliennes émettent un bruit de fond, principalement des basses fréquences entre 20 Hz et 100 Hz. Ce bruit est dû à des vibrations mécaniques entre les composants de l'éolienne et au souffle du vent dans les pales.
À 500 mètres de distance (distance minimale entre une éolienne et une habitation), il est généralement inférieur à 35 décibels : c'est moins qu'une conversation à voix basse.

Les éoliennes sont aussi à l'origine d'infrasons.
Les campagnes de mesures de bruit réalisées récemment par l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) montrent que ces infrasons sont émis à des niveaux trop faibles pour constituer une gêne et encore moins un danger. À titre de comparaison, les infrasons émis par notre organisme (battements cardiaques ou respiration) et transmis à notre oreille interne sont plus intenses que ceux émis par les éoliennes.

Impact à mesurer et contrôler

Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes, ANSES, 2008 (https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2006et0005Ra.pdf)
Evaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens, ANSES, 2017 (https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2013SA0115Ra.pdf)
Infrasons émis par les éoliennes: une nouvelle étude confirme leur innocuité, Revolution énergétique, sept. 2020 (https://www.revolution-energetique.com/eoliennes-et-infrasons-une-nouvelle-etude-universitaire-confirmeleur- innocuite/)

Merci de votre attention