

# Eoliennes

GE3 - ER

Florent Ravelet<sup>1</sup>

Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques

<sup>1</sup>Arts et Métiers - Sciences et Technologies

20 octobre 2020



LIFSE



# Sommaire

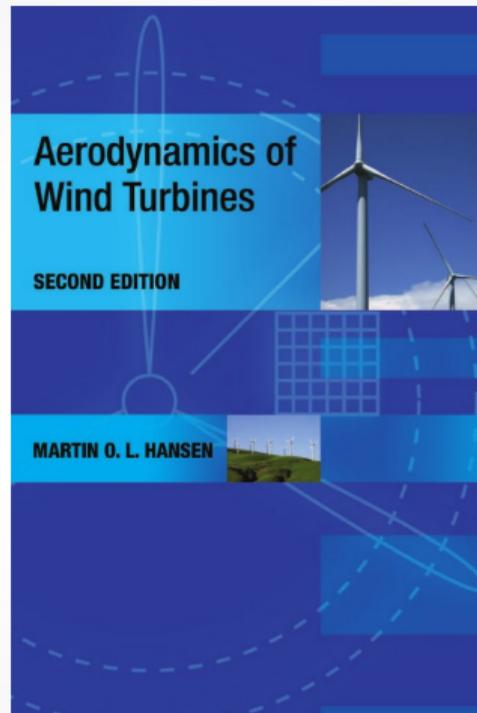
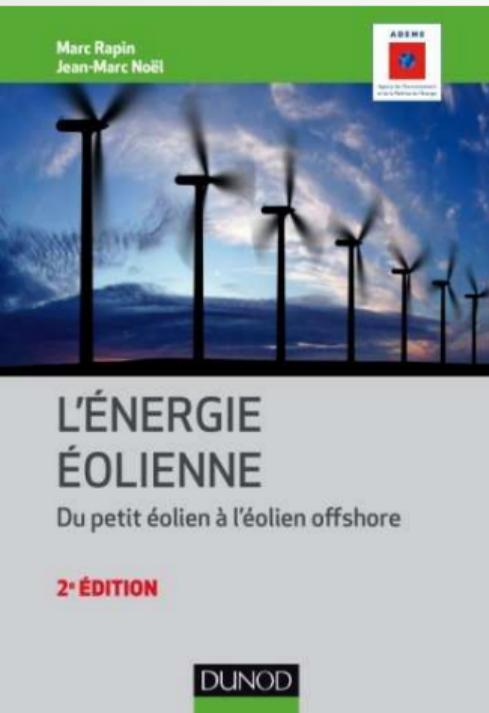
1. Le vent

2. Evolution technologique des éoliennes

3. Aspects économiques



# Éléments bibliographiques





A l'issue du cours, vous devez être capable de :

- Déterminer les principaux paramètres dimensionnant d'une éolienne à axe horizontal (diamètre, nombre de pales, vitesse de rotation) en fonction de la ressource et de la puissance à produire.
- Etablir la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent à partir de la caractéristique d'une éolienne.
- Prévoir l'énergie produite connaissant la caractéristique de la machine et les paramètres de la distribution de probabilité du vent sur le site.
- Etablir le lien entre l'écoulement autour des pales et la puissance produite en utilisant la méthode des éléments de pale.

3 chapitres de cours

- Etude du vent et de son potentiel énergétique, évolution des concepts et aspects économiques de l'énergie éolienne.
- Théorie de Froude-Rankine, Théorie des éléments de pale (Blade Element Momentum theory)

Un projet avec TP en soufflerie, TP de simulation numérique des écoulements



# Le vent : origine et potentiel énergétique



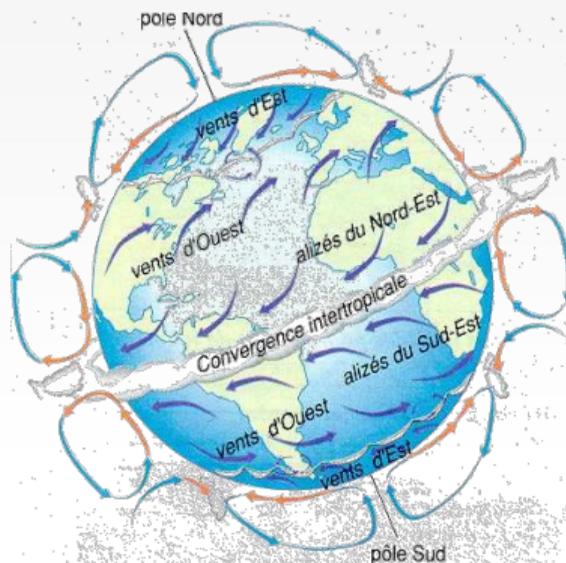
## Origine du vent

- L'énergie éolienne est une énergie solaire créée par le rayonnement solaire.
- Elle résulte de la différence de rayonnement sur la surface de la terre en raison de :
  - Zones de jour et de nuit
  - Variation d'incidence par rapport à la surface de la terre
  - Différence de transparence de l'atmosphère
  - Variation des coefficients d'absorption ou de réflexion de surface

# Origines du vent



- Une dépression est créée dans les régions chauffées.
- Un mouvement des masses d'air s'engage à partir des régions voisines.
- A l'échelle planétaire, l'air chaud dans les régions tropicales va monter et sera remplacé par de l'air plus froid venant des régions voisines.
- En régions polaires, l'écoulement est en sens inverse.
- Globalement, une circulation générale est créée:
  - Deux cellules équatoriales dans le sens direct dites cellules de Hadley
  - Deux cellules à circulation inverse dites cellules de Ferrel
  - Deux cellules polaires à nouveau à circulation directe



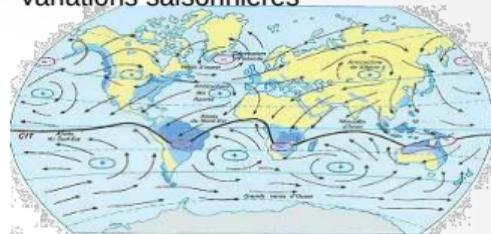
# Origines du vent



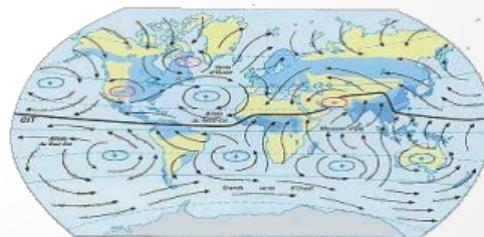
- Effet de la rotation de la terre (forces de Coriolis): au sol on observe une déviation vers la droite dans l'hémisphère nord
- Vents dominants:
  - Alizés d'est (tropiques)
  - Vents d'ouest (régions tempérées)
  - Vents d'est (régions polaires)
- Variations saisonnières
- Variations locales journalières

Variations saisonnières

janvier

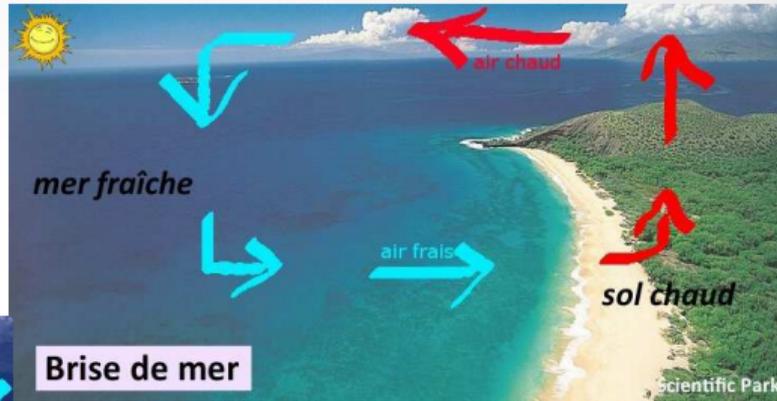


juillet



# Origines du vent

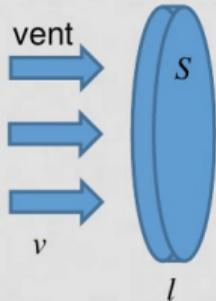
Variations locales journalières



# Potentiel énergétique

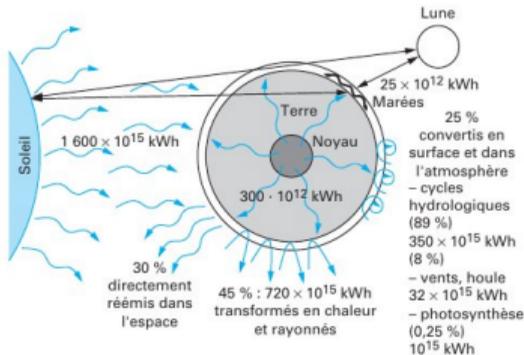


Surface de section  $S$  traversée par un vent de vitesse  $v$  pendant un temps  $t$



$$V = Sl \text{ et } l = vt \text{ d'où } E_c = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 t$$

Puissance du vent :  $P = \frac{1}{2} \rho S v^3$

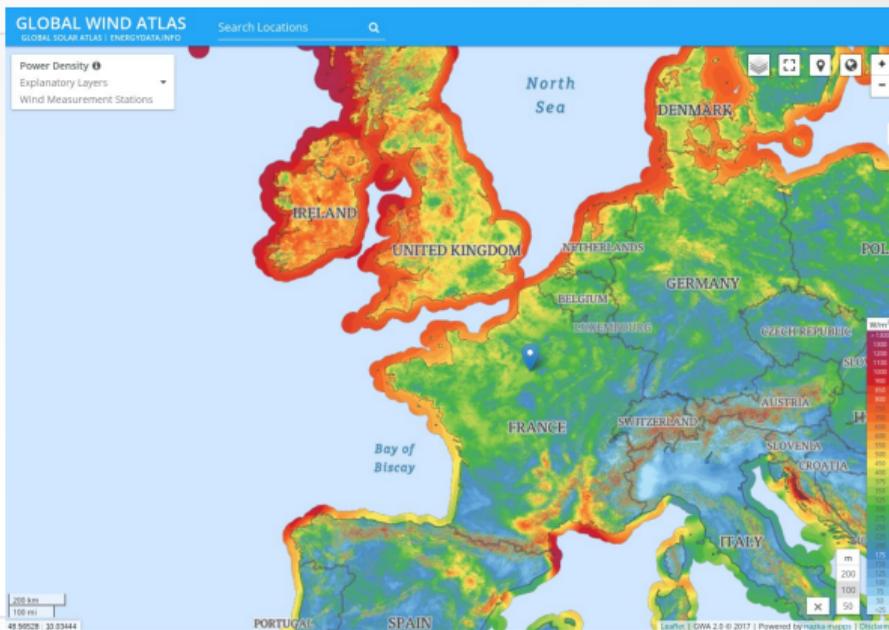


- Consommation annuelle d'énergie primaire commercialisée :  $150 \times 10^{12}$  kWh
- Potentiel éolien exploitable :  $50 \times 10^{12}$  kWh
- Potentiel hydraulique exploitable:  $20 \times 10^{12}$  kWh

# Potentiel énergétique



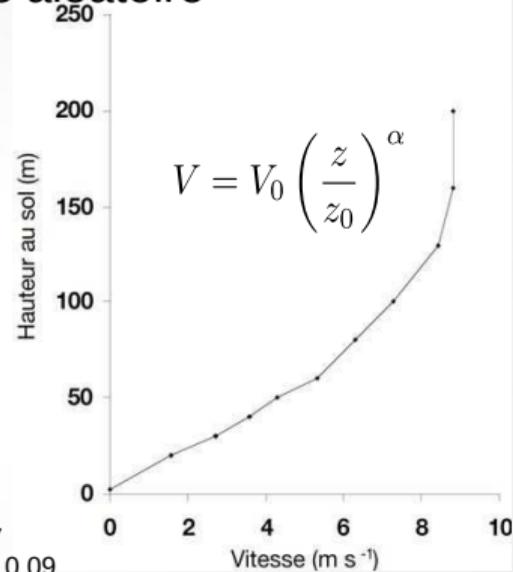
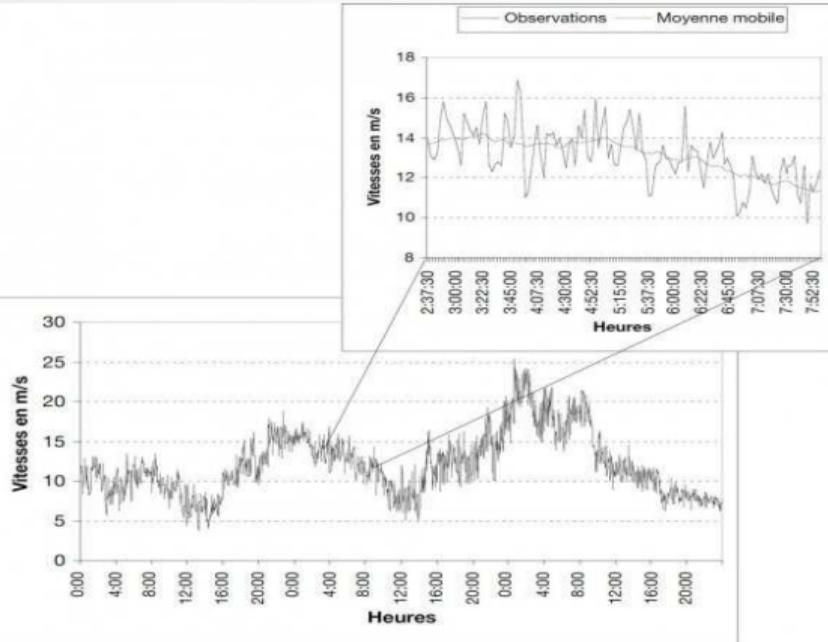
- La puissance est proportionnelle à la densité de l'air (effet faible)
- La puissance est proportionnelle à la surface balayée : construction de rotors de plus en plus grands (pales de 70 m)
- La puissance est proportionnelle à la vitesse du vent au cube :
  - Importance du choix du lieu d'implantation (études de vent)
  - Éoliennes de plus en plus hautes



# Comment prédire la production ?

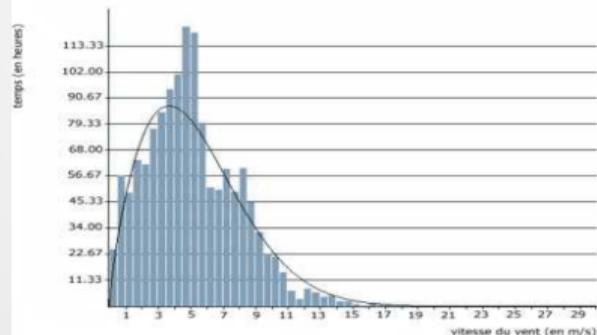
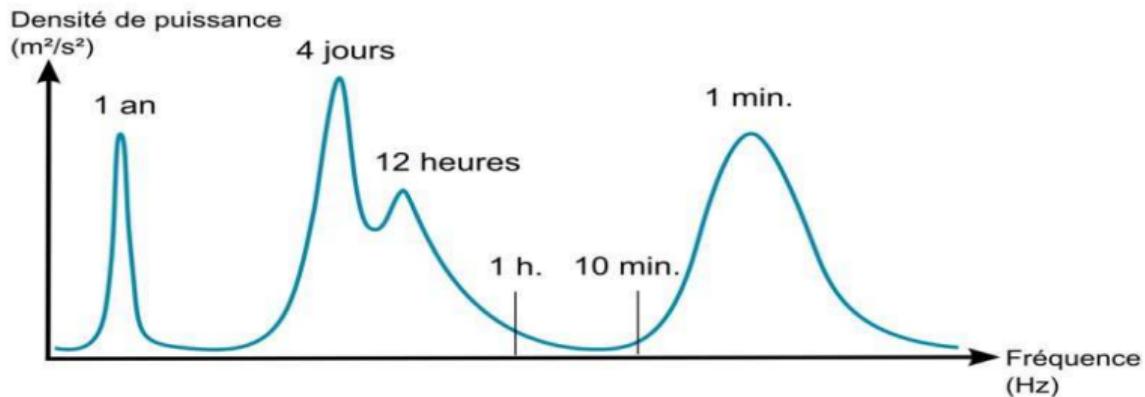


Le vent est un phénomène plus ou moins aléatoire



- Glace 0,07
- Mer calme 0,09
- Cultures, prairie à herbe haute 0,19
- Arbres et haies épars 0,24
- Arbres, haies, quelques bâtiments 0,29
- Bois 0,43

# Comment prédire la production ?



Les normes de la météorologie recommandent de prendre, pour la vitesse et la direction du vent, une moyenne calculée sur 10 minutes de mesures.

On s'intéresse ensuite à la fonction densité de probabilité (PDF)



Unnamed area



saved areas

Center (Lat, Long): 48.37997°, 2.11075°

Address: Saclas, Étampes, Essonne, Ile-de-France, Met...



Data for 10% windiest areas



Plot data

GWC file

What is a GWC file?

Height: 50m

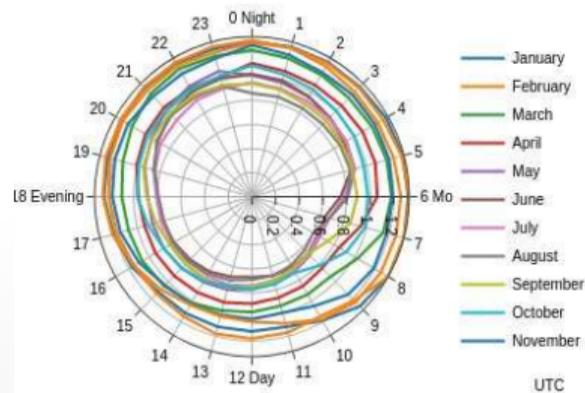
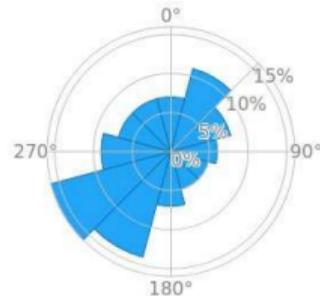
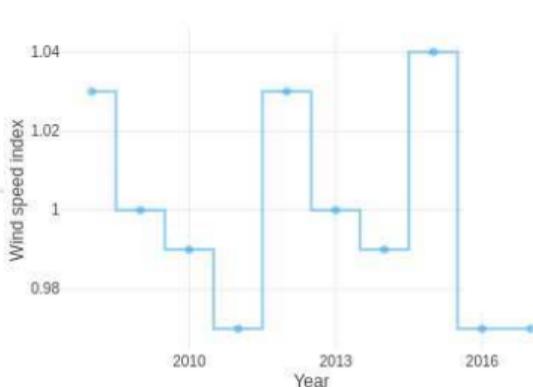
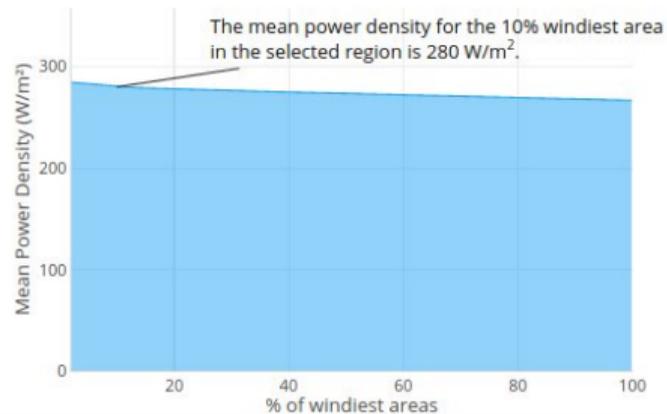
280 W/m<sup>2</sup>



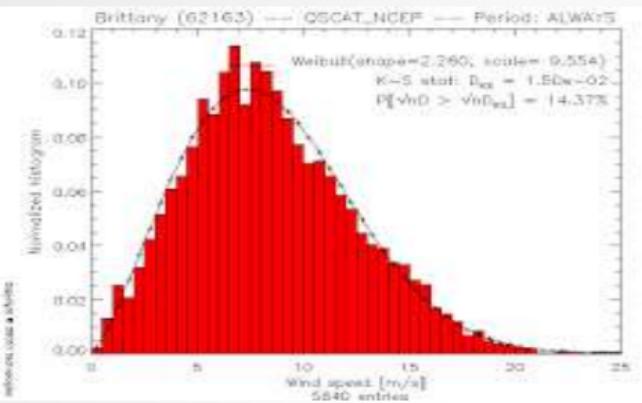
6.18 m/s

Mean Power De... | Wind Roses | Mean Wind Speed

Mean Power Density @Height 50m



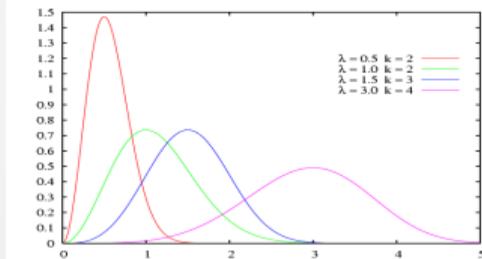
# Comment prédire la production ?



Fonction de répartition cumulative:  
Sur un signal temporel de vent de durée  $T$   
On compte le temps pendant lequel  $v < v_0$   
Divisé par le temps d'observation, il donne  
la probabilité d'observer  $v < v_0$

$$F(v_0) = \text{proba}(v < v_0)$$

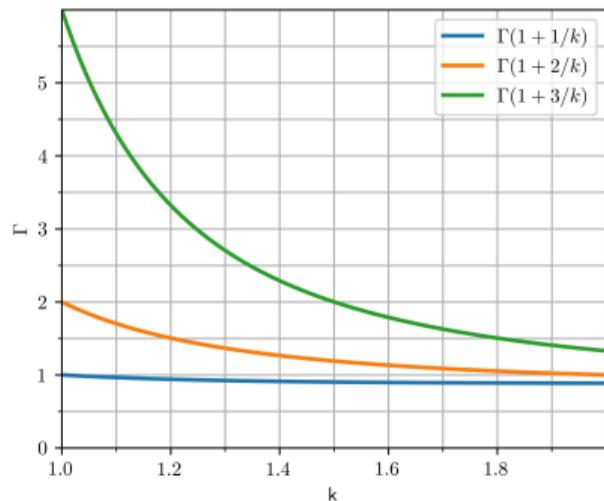
Fonction de densité de probabilité:  
Dérivée de la fonction de répartition cumulée, c'est la  
probabilité d'observer une vitesse  $v$  à  $dv$  près



Modèle: distribution de Weibull à deux paramètres (paramètre de forme et d'échelle)

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

# Comment prédire la production ?



Rappel: pour une variable  $x$  de pdf  $f(x)$ :  $\langle x \rangle = \int x f(x) dx$

Intérêt de la distribution de Weibull:

- ajustement aisé sur la fonction de répartition

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

- propriétés des fonctions de Weibull, lien avec la fonction Gamma d'Euler

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt$$

$$\langle v \rangle = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\langle v^3 \rangle = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$



Pour un site éolien, le vent est caractérisé par les paramètres de Weibull suivants :

$$k = 1.75$$

$$c = 5.9 \text{ m/s}$$

**On vous demande de calculer :**

- 1- le nombre d'heures par an où la vitesse de vent serait comprise entre 4.5 and 5.5 m/s.
- 2- le nombre d'heures par an où la vitesse est supérieure ou égale à 14 m/s.



On considère deux sites A et B avec la même vitesse moyenne annuelle égale à 5 m/s.

Les caractéristiques du vent sont définies par une distribution de Weibull avec un paramètre de forme différent pour les deux sites :

- $K_a = 1.32$  (site A)
- $K_b = 1.77$  (site B)

Calculer le potentiel énergétique du vent en kWh/m<sup>2</sup>/an (avec une masse volumique de 1.225 kg/m<sup>3</sup>)



# Evolution technologique des éoliennes

# Premières réalisations

Moulins à vents :

- Apparition en -700 en Perse
- En europe en l'an mille
- XIXè USA: pompage d'eau



# Renouveau au 19<sup>e</sup> siècle

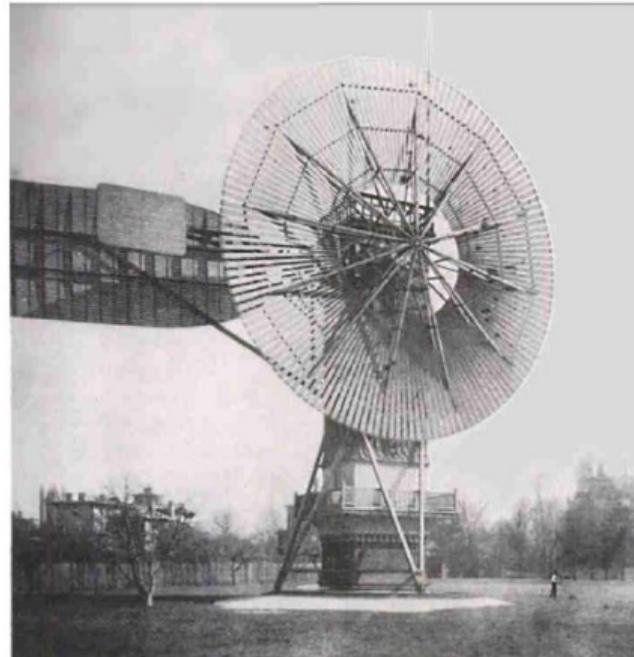


Pompage: le moulin "américain"



**Western Windmills**

1<sup>ère</sup> production d'électricité



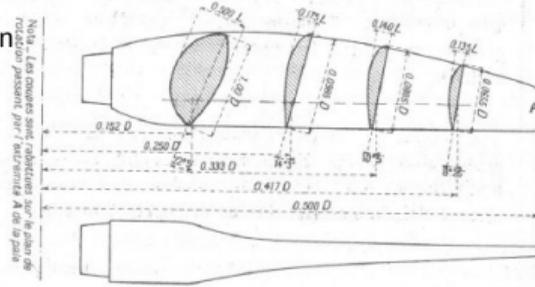
**C. Brush, 17m diam., 12kW, Cleveland 1888**

# Premières études

Début XXè: études aérodynamiques : perfectionnement (utilisation de profils aérodynamiques, réduction du nombre de pales)



1923 - L. Constantin, "Bois Rosé"



10's - Eiffel Laboratory  
on Propeller and Mills

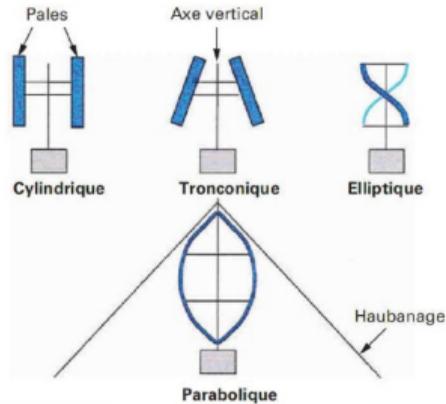


20's - Betz  
Göttingen Laboratory

# Axe vertical ou horizontal ?

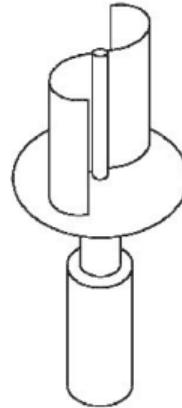


20's - G. Darrieus  
1925 - VAWT Patent



1922 - Sigurd Savonius

## Savonius-Rotor

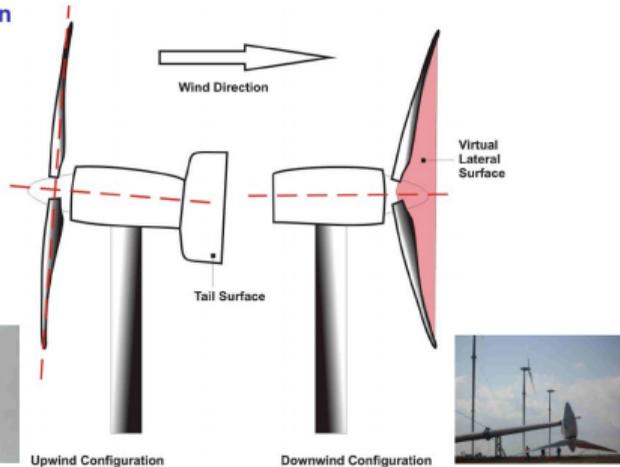


# Problématiques de fonctionnement



- Avantages des machines à axe vertical :
  - Indépendance à la direction du vent
  - Génératrice électrique au sol
- Inconvénients :
  - Efforts cycliques importants
  - Ne démarrent pas (toujours) toutes seules

## WT orientation



S'oriente naturellement  
Mais perturbation du mât

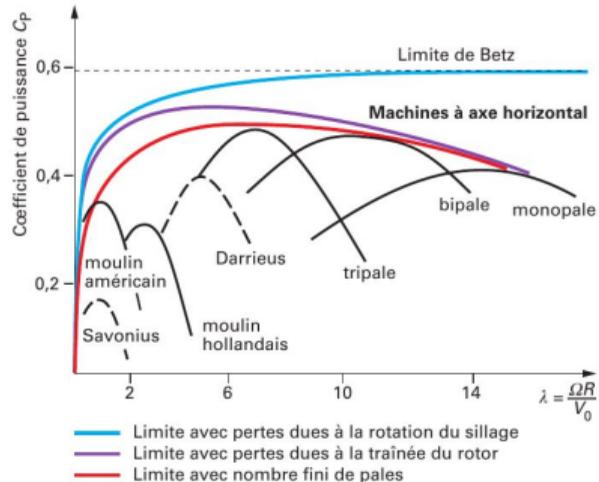
# Eoliennes de grande puissance



Rendement, et rapidité spécifique

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho S V^3$$

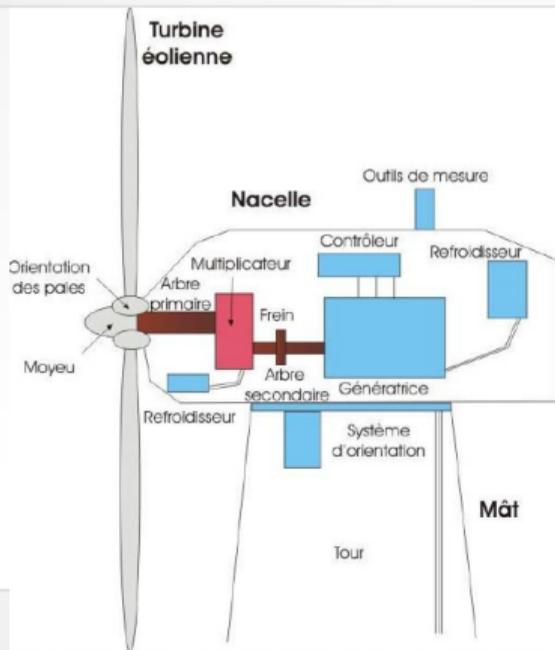
$$\lambda = \frac{\Omega R_{tip}}{V}$$



# Eoliennes de grande puissance



Problématique de génération de courant avec génératrice à 50 Hz

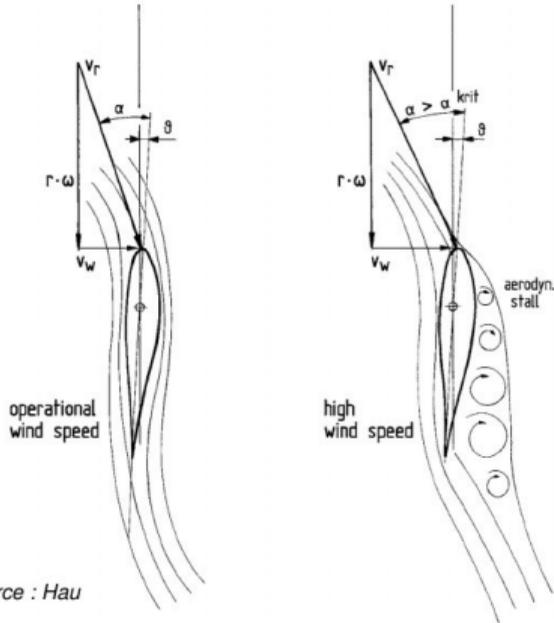


- Turbine, **calage** fixe ou **réglable**
- Arbre primaire (10-40 rpm)
- **Multiplicateur** pour passer à 1500 rpm si **génératrice asynchrone**
- Frein à disque
- Génératrice
  - Asynchrone 1000 ou 1500 rpm
  - **Synchrone annulaire sans multiplicateur**
- Contrôleur
- Mesures
- Refroidissement
- Orientation

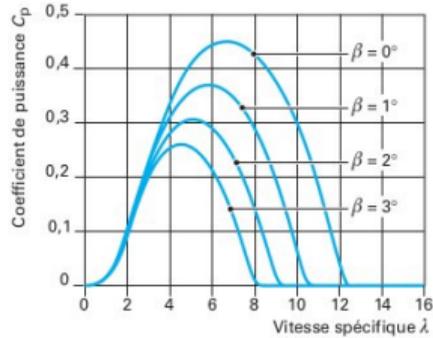




## Blade Control : Stall (Décrochage)

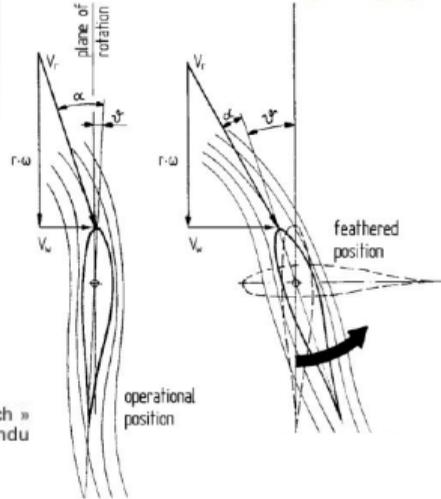


# Contrôle

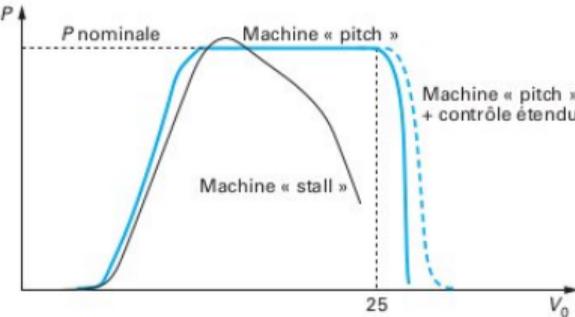
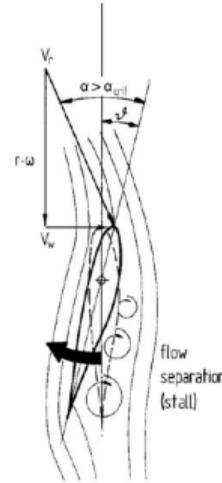


## Blade Control : Pitch (Calage)

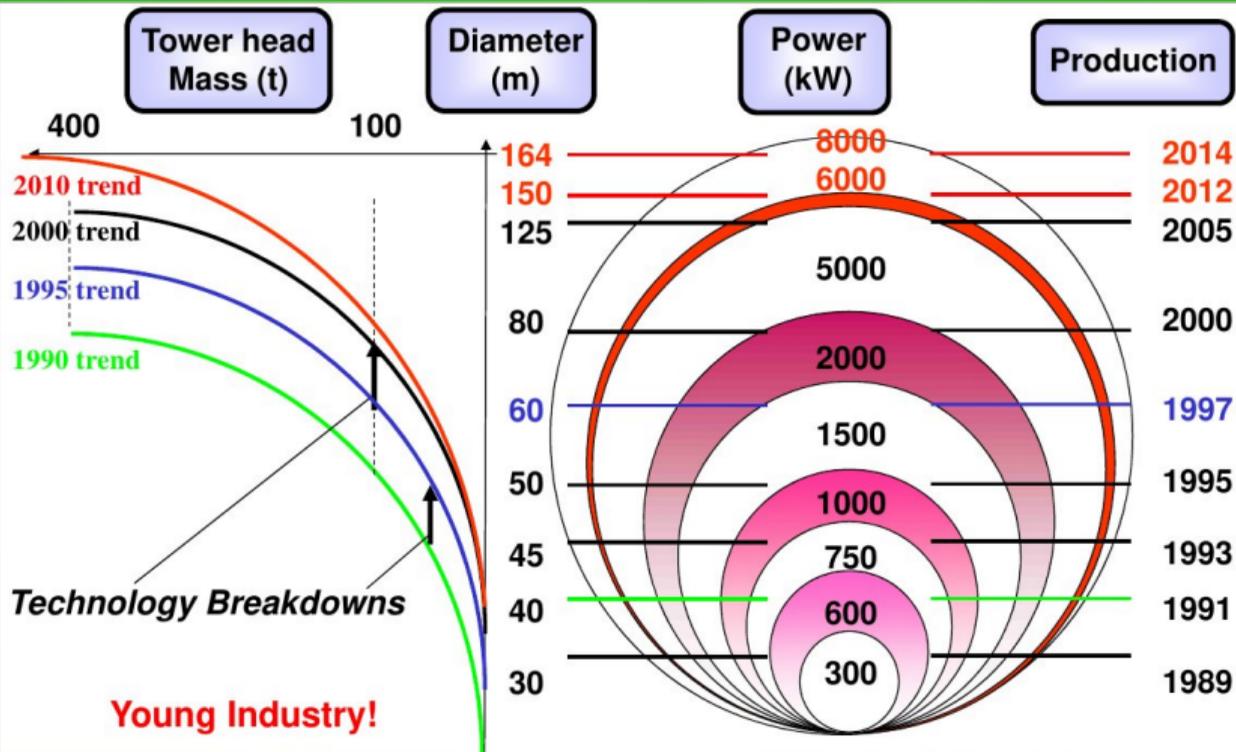
☞ 100% of medium/big machines



Source : [Hau\_06]



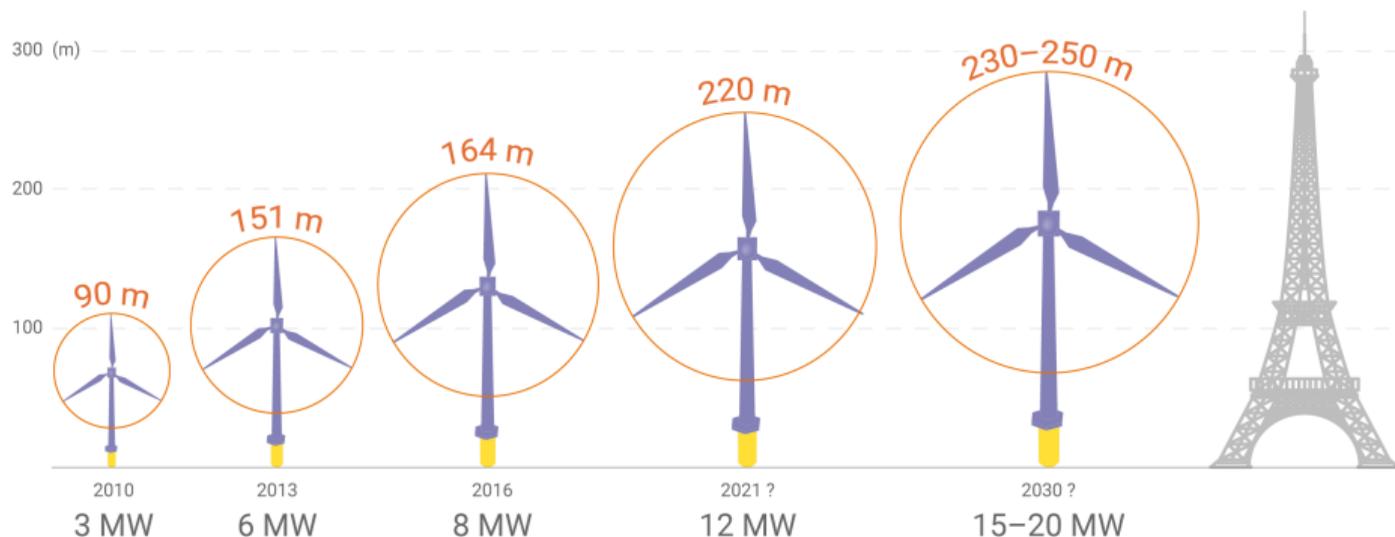
# Augmentation de la puissance



# Ordre de grandeur de taille et de puissance

## Éolien offshore

Évolution de la taille et de la puissance des nouvelles unités de production

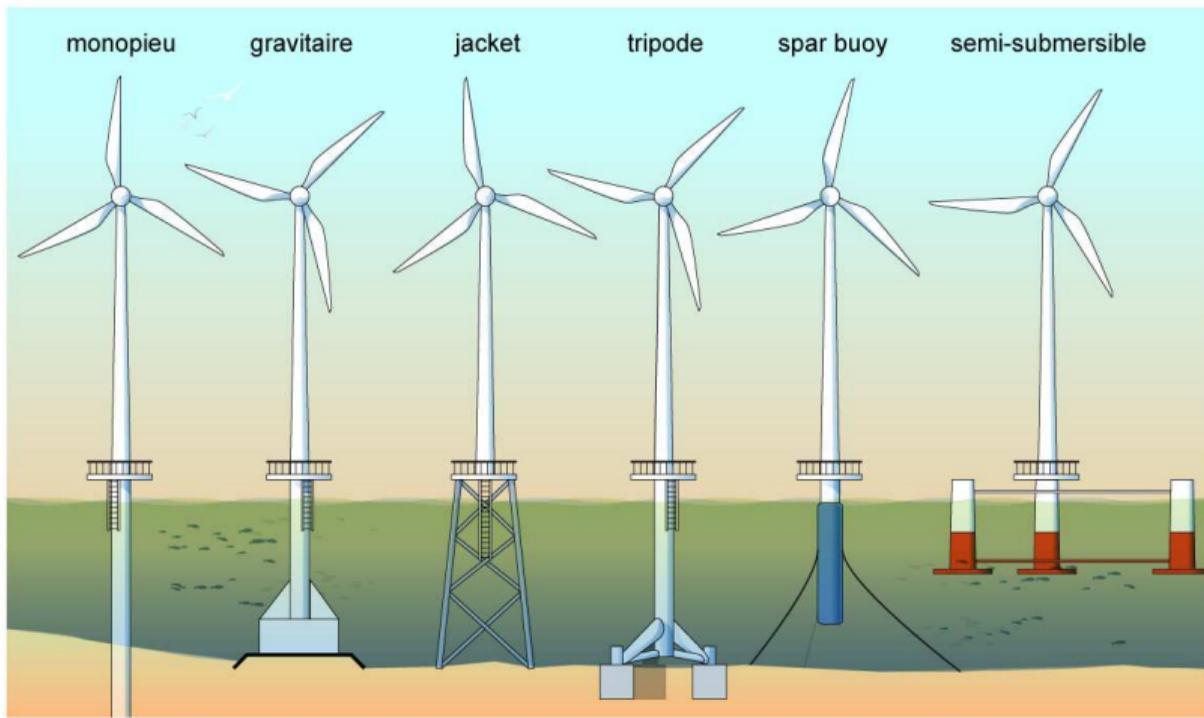


# Différents moyens d'installation



## ÉOLIENNES OFFSHORE

### Fondations



# Renouveau du petit éolien



*Downwind turbines*



*Vertical Axis Wind Turbine VAWT*



# Parc éolien



Dans un projet de parc éolien, 7 machines de diamètre  $D = 50$  m seront installées à une hauteur  $H = 54$  m de la surface du sol. L'analyse des données météorologiques du site du parc donne les paramètres de Weibull  $K = 1.52$  et  $C = 6.8$  m/s au niveau de l'axe de rotation des éoliennes. Pour simplifier le calcul, on prend un coefficient de puissance constant  $C_p = 0.40$ .

## On vous demande de calculer :

- La vitesse moyenne annuelle du vent.
- La production annuelle d'énergie du parc en Kwh qui vient des vitesses de vent autour de  $V = 12$  m/s dans la bande 11,5 m/s-12,5 m/s.
- Le chiffre d'affaire réalisé annuellement grâce à la vente d'énergie du parc au prix 0.08 euros/KWh.

Pour simplifier, on adopte les hypothèses suivantes :

- Coefficient de puissance constant  $C_p = 0.40$
- Fonctionnement des éoliennes pour toutes les vitesses de vent.
- Rendement constant de 90 % des génératrices électriques

On prend pour l'air  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup>

# Production annuelle d'une éolienne



Les caractéristiques énergétiques d'une éolienne réelle ( $D=42$  m) sont données dans le tableau joint.

Cette éolienne est installée pour fonctionner sur un site où les paramètres de Weibull sont:

$$C=8,72\text{m/s}$$

$$K=1,7$$

**On vous demande de déterminer la quantité d'énergie produite annuellement par l'éolienne .**

v(m/s)	p(kw)
3,5	0
4	15
5	47
6	90
7	130
8	192
9	240
10	300
11	350
12	400
13	440
14	480
15	500
25	500



# Aspects économiques



# Chiffres clés de la filière en 2019

**8 000** éoliennes installées

Un parc installé de **16,6 GW** au 31/12/2019

**6,3 %** de la production électrique française

**20 200** emplois au 31/12/2019, **+11 %** par rapport à 2018

**200 millions d'euros** de recettes fiscales

**2<sup>ème</sup>** énergie renouvelable en production en France

**1<sup>er</sup>** employeur du secteur des énergies renouvelables

Des éoliennes recyclables jusqu'à **95 %**



**~2 GW/an** de capacités additionnelles jusqu'en 2028

**62,2 €/MWh** au dernier appel d'offres AOS de février 2020



**1 GW/an** de capacités additionnelles d'ici à 2024

**44 €/MWh** au dernier appel d'offres de Dunkerque

6



# La place de l'éolien dans le mix énergétique français

L'éolien représente aujourd'hui 6,3 % de la production d'électricité française, avec un taux de croissance important : +21 % entre 2018 et 2019

Production totale d'électricité  
**537,7 TWh**  
-2 %



Nucléaire  
**379,5 TWh**  
-3,5 %



Hydraulique  
**60 TWh**  
-12,1 %



Eolienne  
**34,1 TWh**  
+21,2 %



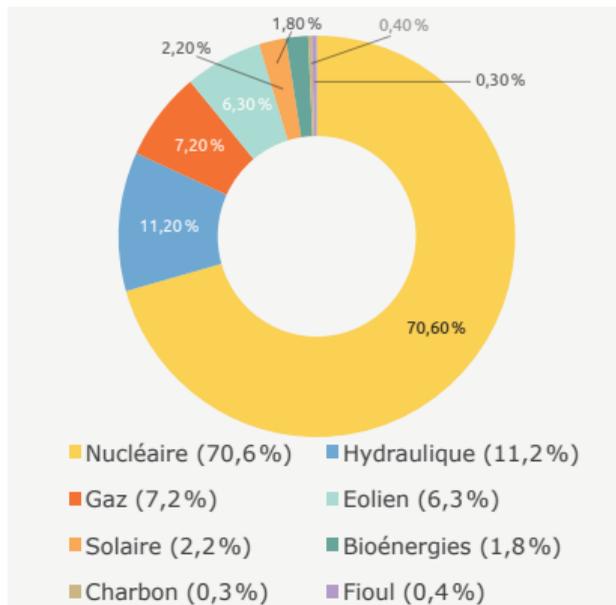
Solaire  
**11,6 TWh**  
+7,8 %



Bioénergies  
**9,9 TWh**  
+3,6 %



Thermique  
**42,6 TWh**  
+9,8 %



29

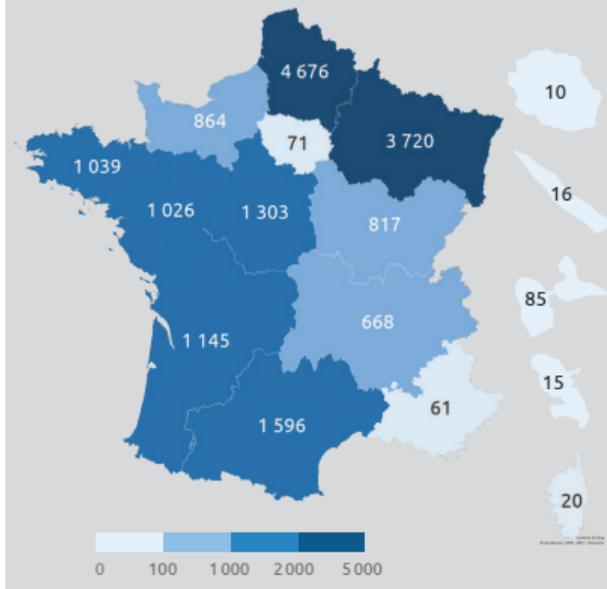
Source : RTE Bilan électrique 2019



# Bilan du marché de l'éolien

## La filière continue de progresser sur l'ensemble du territoire

Puissance totale des parcs éoliens raccordés (MW)  
par région au 30 juin 2020



Source : Etude FEE

Les capacités éoliennes sont réparties sur l'ensemble du territoire français, **avec plus de 1 450 parcs** comptant 8 436 éoliennes, implantés dans l'ensemble des régions métropolitaines ainsi qu'en Outre-Mer.

Les **Hauts-de-France** et le **Grand Est** sont les premières régions éoliennes. Ces 2 régions représentent à elles seules **50% de la puissance raccordée** en France. **L'Occitanie**, berceau historique de l'éolien en France, occupe quant à elle la **3<sup>ème</sup> position au niveau national**.

D'autres régions poursuivent leur progression. A titre d'exemple, le **Centre-Val de Loire**, **les Pays de la Loire** et **la Nouvelle-Aquitaine** ont raccordé respectivement **plus de 100 MW** entre juin 2019 et juin 2020.

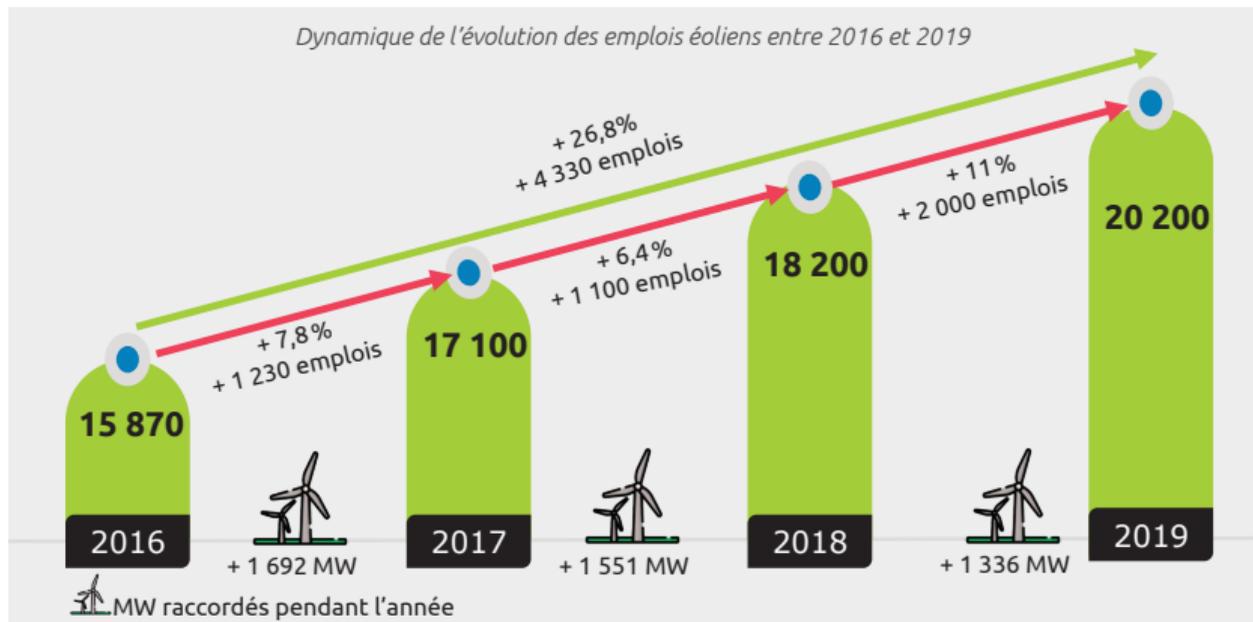
La région des **Pays de la Loire** passe ainsi le cap du gigawatt d'éoliennes installées, preuve du **développement harmonieux** de la filière en cours sur l'ensemble du territoire.

7 régions sur 13 comptent plus de **1 000 MW** de puissance éolienne raccordée sur le réseau à fin juin 2020



# La croissance de l'emploi

Le nombre d'emplois éoliens continue à augmenter malgré un ralentissement de la croissance de la capacité installée



Source : Etude FEE et traitement des données Capgemini Invent

57



# Détails par maillon de la chaîne de valeur

## Une activité répartie sur 4 segments

Les acteurs éoliens implantés en France couvrent l'ensemble des segments de la chaîne de valeur, sur lesquels les emplois éoliens sont répartis :

		% par rapport au total des emplois
	<b>Etudes et Développement</b> Ex. : bureaux d'études, mesures de vent, mesures géotechniques, expertises techniques, bureaux de contrôle, développeurs, financeurs	31 %
	<b>Fabrication de composants</b> Ex. : pièces de fonderie, pièces mécaniques, pales, nacelles, mâts, brides et couronnes d'orientation, freins, équipements électriques pour éoliennes et réseau électrique	23 %
	<b>Ingénierie et Construction</b> Ex. : assemblage, logistique, génie civil, génie électrique parc et réseau, montage, raccordement réseau	27 %
	<b>Exploitation et Maintenance</b> Ex. : assemblage, logistique, génie civil, génie électrique parc et réseau, montage, raccordement réseau	19 %

58



# Le marché éolien français dans le contexte européen

L'Europe de l'éolien poursuit sa croissance, avec des stratégies différentes entre l'onshore et l'offshore selon les pays



Puissance raccordée (onshore et offshore) fin 2019 en Europe



Zoom sur les 15 pays avec les plus grandes puissances raccordées fin 2019

	Pays	Puissance raccordée en 2017 (MW)	Puissance raccordée en 2018 (MW)	Puissance raccordée en 2019 (MW)	Puissance cumulée à fin 2019 (MW)	Dont puissance offshore à fin 2019 (MW)	% mix électrique 2019
1	Allemagne	6 581	3 122	2 189	61 357	7 445	<b>24,6%</b>
2	Espagne	96	397	2 319	25 808	5	20,8%
3	Royaume-Uni	4 270	1 901	2 393	23 515	9 945	19,8%
4	France	1 692	1 548	1 337	16 646	2	6,3%
5	Italie	252	452	456	10 512	0	6,7%
6	Suède	197	707	1 588	8 985	192	10,5%*
7	Danemark	342	268	402	6 128	1 703	<b>47%</b>
8	Pologne	41	16	53	5 917	0	8,7%
9	Portugal	0	53	69	5 437	8	27,8%
10	Pays-Bas	81	104	97	4 600	1 118	9,5%
11	Irlande	426	193	463	4 155	25	<b>33%</b>
12	Belgique	467	513	577	3 879	1 556	9,-5%
13	Grèce	282	192	727	3 576	0	12%*
14	Autriche	196	201	152	3 159	0	8,8%*
15	Roumanie	5	0	0	3 029	0	11,5%

\* Données 2018 Sources : WindEurope, « Wind energy in Europe in 2019 », 2020, IEA et énergéticiens nationaux

En moyenne, l'éolien contribue à hauteur de 17% du mix électrique dans les 15 pays européens qui possèdent les capacités éoliennes les plus importantes. En France, l'éolien contribue à hauteur de 6,3%, ce qui place la France en 13<sup>ème</sup> position. Le potentiel à exploiter reste considérable.



# L'éolien en mer

## L'éolien en mer, une technologie en plein essor

En 2020, la France compte **7 projets lauréats de parcs éoliens en mer en cours de développement et 4 projets pilotes flottants**. Alors que les premiers chantiers ont démarré en 2019, la filière de l'éolien en mer devrait représenter 10% de la capacité éolienne raccordée en France en 2023.

Le marché de l'éolien en mer est composé de deux segments liés à la distance et au type de fondation:

### L'éolien en mer posé

Fixes et destinées aux fonds marins jusqu'à 50-60 m, ces éoliennes peuvent exploiter les forts vents marins côtiers.

Puissance unitaire prévue : 6-8 MW (AO1) jusqu'à 12 – 15 MW (AO3)

### L'éolien en mer flottant

Avec une fondation flottante, reliée aux fonds marins par des lignes d'ancrage, ces éoliennes peuvent être implantées plus au large, dès 30-50m de profondeur. Puissance unitaire prévue : 8 MW à 10 MW (fermes pilotes)



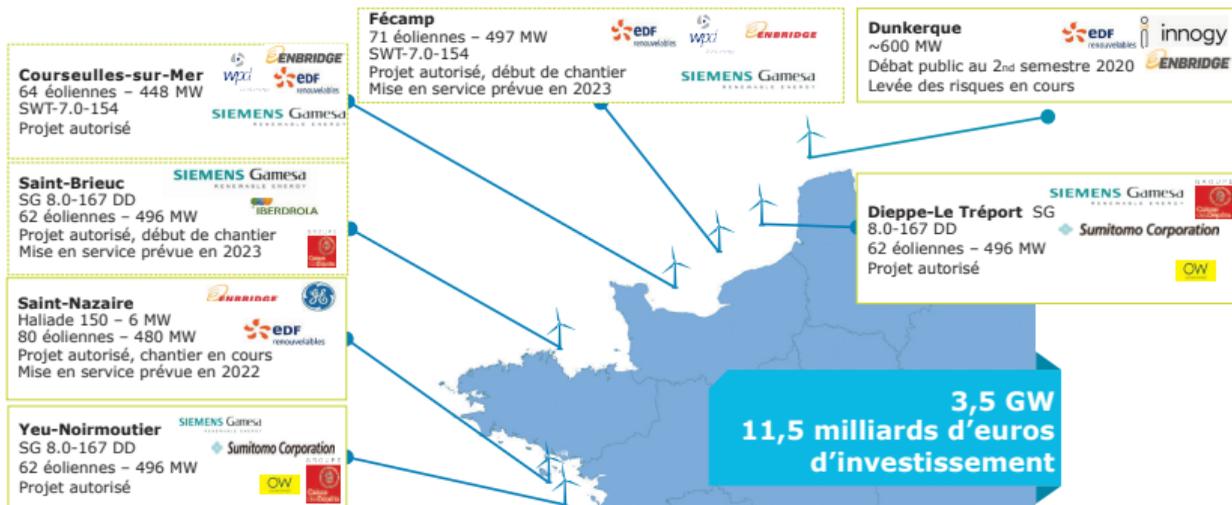
41

L'éolien en mer devrait représenter **10%** de la capacité éolienne raccordée en France en 2023



# L'éolien en mer

Après le début des travaux sur Saint-Nazaire, les projets de Fécamp et Saint-Briec sont désormais engagés



44

La hausse des investissements et de l'emploi en 2019 et début 2020 est en grande partie liée à l'entrée en construction du premier parc éolien en mer de 480MW au large des côtes françaises, à **Saint-Nazaire** dont la production des nacelles dans l'usine de GE Renewable Energy a commencé à Saint-Nazaire.

Le parc éolien en mer de Fécamp, d'une puissance de **497 MW** va également débuter sa construction et devrait être **mise en service d'ici 2023**. Le chantier devrait mobiliser plus de **1 400 emplois locaux** ainsi que plus de **100 emplois liés à la maintenance** du parc. Le parc de Saint-Briec d'une puissance de **496 MW**, **a lui aussi confirmé sa décision finale d'investissement et devrait être mis en service d'ici 2023**. La prochaine décision finale d'investissement devrait concerner le projet de Courseulles (AO1), en Normandie.

Source : Etude FEE



# Couplage avec le stockage

## Les solutions de stockage des énergies renouvelables sont un enjeu clé pour le mix électrique de demain

Le 23 avril 2020, la France s'est dotée d'une nouvelle stratégie énergie climat. **La PPE pour les périodes 2019-2023 et 2024-2028** a ainsi été publiée au Journal officiel. **Le stockage y est mentionné** sans que ne soit établi une feuille de route précise malgré l'enjeu majeur qu'il représente en raison du développement des énergies renouvelables.

Le stockage d'énergie peut se faire de différentes manières. L'énergie peut être stockée sous forme de **gaz** (naturel ou hydrogène), d'**hydraulique** (barrage ou STEP) ou enfin de **chaleur**. Le stockage est essentiel afin de renforcer la compétitivité des énergies renouvelables, l'éolien étant une source variable d'énergie, et le solaire une source intermittente.

En 2023, l'électricité d'origine renouvelable devrait représenter 27 % de la production électrique et 33 à 36 % d'ici 2028. Cependant la PPE le répète : « A l'horizon de la PPE, en 2028, avec la pénétration des énergies renouvelables et l'évolution du mix électrique fixées par la présente PPE, **il n'y a pas de besoins additionnels de stockage pour assurer l'équilibre offre demande.** »

Et si la PPE identifie bien **l'hydrogène comme « le moyen de stockage massif inter-saisonnier des énergies renouvelables électriques intermittentes le plus prometteur »** le texte repousse à 2035 voire 2040 son développement. Il faudrait attendre « au-delà de 2030-2035 », pour que l'hydrogène contribue à l'intégration des énergies renouvelables au système électrique. **Néanmoins des premiers projets émergent et le secteur du couplage de la production d'énergie renouvelable avec stockage s'organise.**

Stockage mécanique  
=> pompage (STEP)

Stockage par air comprimé

Stockage électrochimique  
=> batteries lithium-ion  
notamment

 Stockage chimique  
=> l'hydrogène

Stockage thermique =>  
chauffage/climatisation

134

# Couplage avec stockage



Optimiser la performance



## Lhyfe veut produire de l'hydrogène à partir de parcs éoliens offshore

Lhyfe est une start-up vendéenne fondée en 2017. Son objectif est de produire de l'**hydrogène vert**, c'est-à-dire à partir d'énergies renouvelables, contrairement à l'**hydrogène gris**, le plus courant actuellement, produit à partir d'énergies fossiles.

Pour produire de l'hydrogène, Lhyfe utilise la technique de l'électrolyse de l'eau. L'électricité générée par les énergies renouvelables vient casser la molécule d'eau ( $H_2O$ ) en oxygène ( $O_2$ ) et en hydrogène ( $H_2$ ). Lhyfe prévoit de produire 300 Kg d'hydrogène par jour dans un premier temps avant d'atteindre plusieurs tonnes à terme.

Dans cette perspective, Lhyfe va construire en **2021 une unité de production d'hydrogène raccordée à un parc de huit éoliennes situé à Bouin, en Vendée**. L'hydrogène produit peut servir de nombreuses applications dont la mobilité en alimentant par exemple les réseaux de bus.

L'ambition de la start-up est de produire de l'hydrogène grâce à l'éolien offshore notamment, et de démontrer la **viabilité économique** de ce projet. **Aucun électrolyseur n'a jamais été connecté directement à une source d'énergie renouvelable intermittente**. Cette innovation reposerait sur la robustesse des composants électroniques de l'électrolyseur et d'une solution logicielle développée par la société. Cette solution gère la variabilité de la **production d'électricité pour produire de l'hydrogène vert sans être relié au réseau électrique**.

Lhyfe a tissé plusieurs partenariats avec le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Alliance Marine Energy ainsi que l'Institut de recherche pour le développement (IRD).

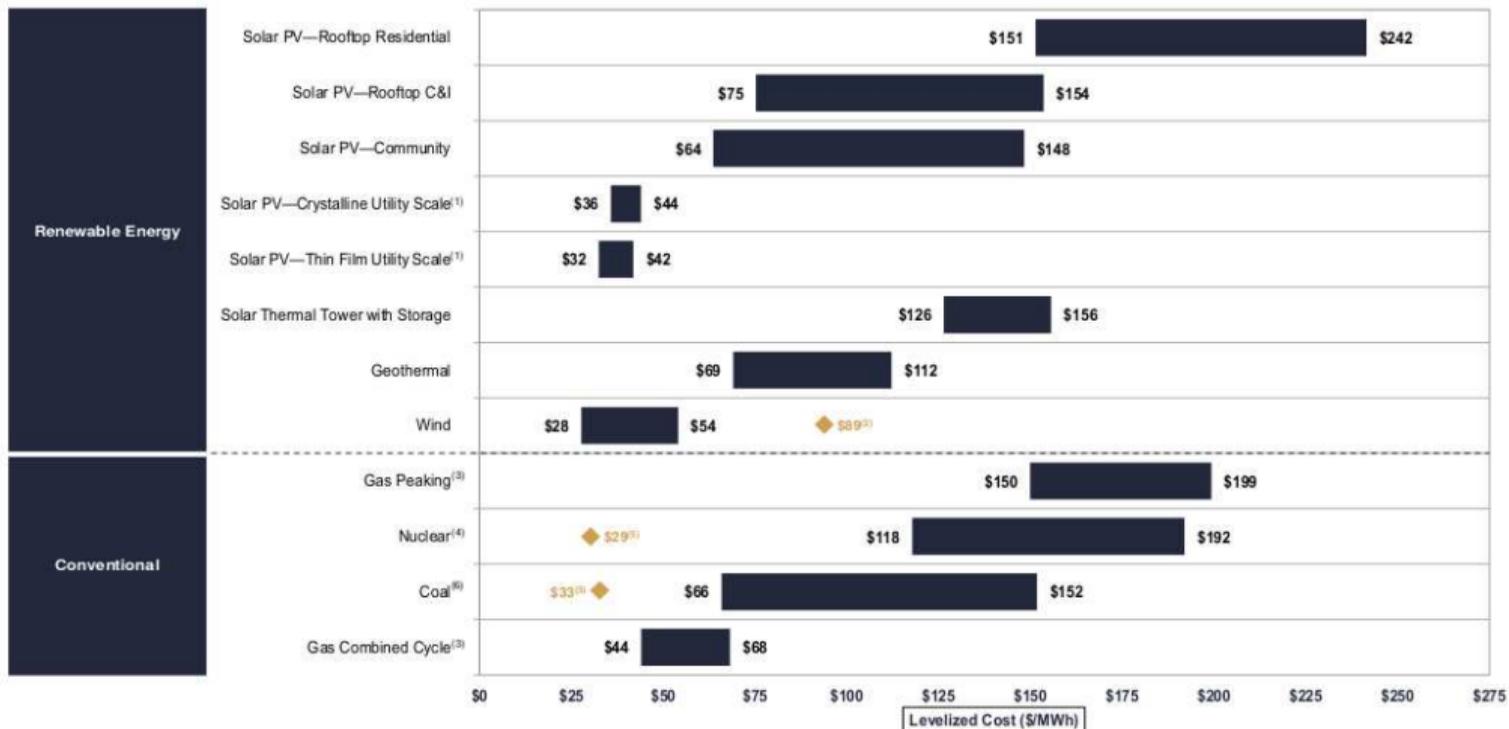
Source : Lhyfe , étude Capgemini Invent



135

« Notre objectif est de produire une plateforme de production d'hydrogène offshore d'ici à **5 ans** »  
Matthieu Guesné, PDG de Lhyfe

# Quel coût de production ? Estimation 1 (USA, 2020)



# Quel coût de production ? Estimation 2 (ADEME, 2017)



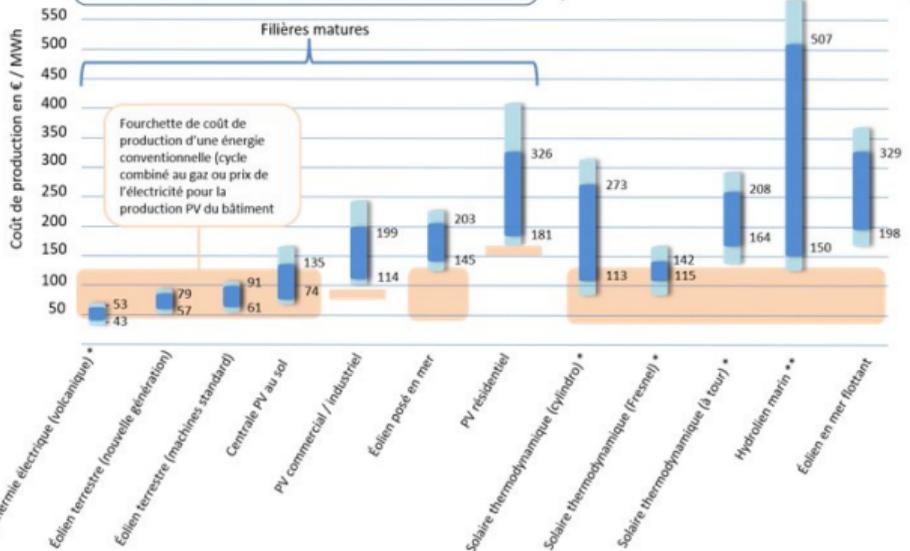
## Coûts complets de production en France pour la production d'électricité renouvelable

La partie la plus foncée des plages de variation présente les coûts de production pour les taux d'actualisation les plus probables. Les parties les plus claires présentent les coûts pour lesquels les conditions de financement sont les plus et les moins favorables

Filières moins matures

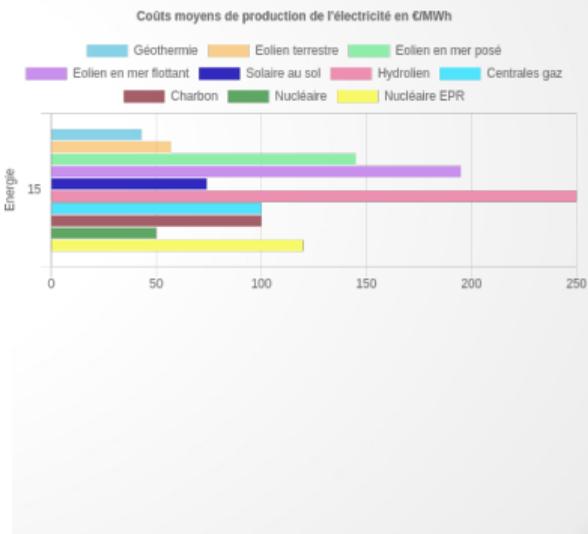
Filières matures

Fourchette de coût de production d'une énergie conventionnelle (cycle combiné au gaz ou prix de l'électricité pour la production PV du bâtiment)

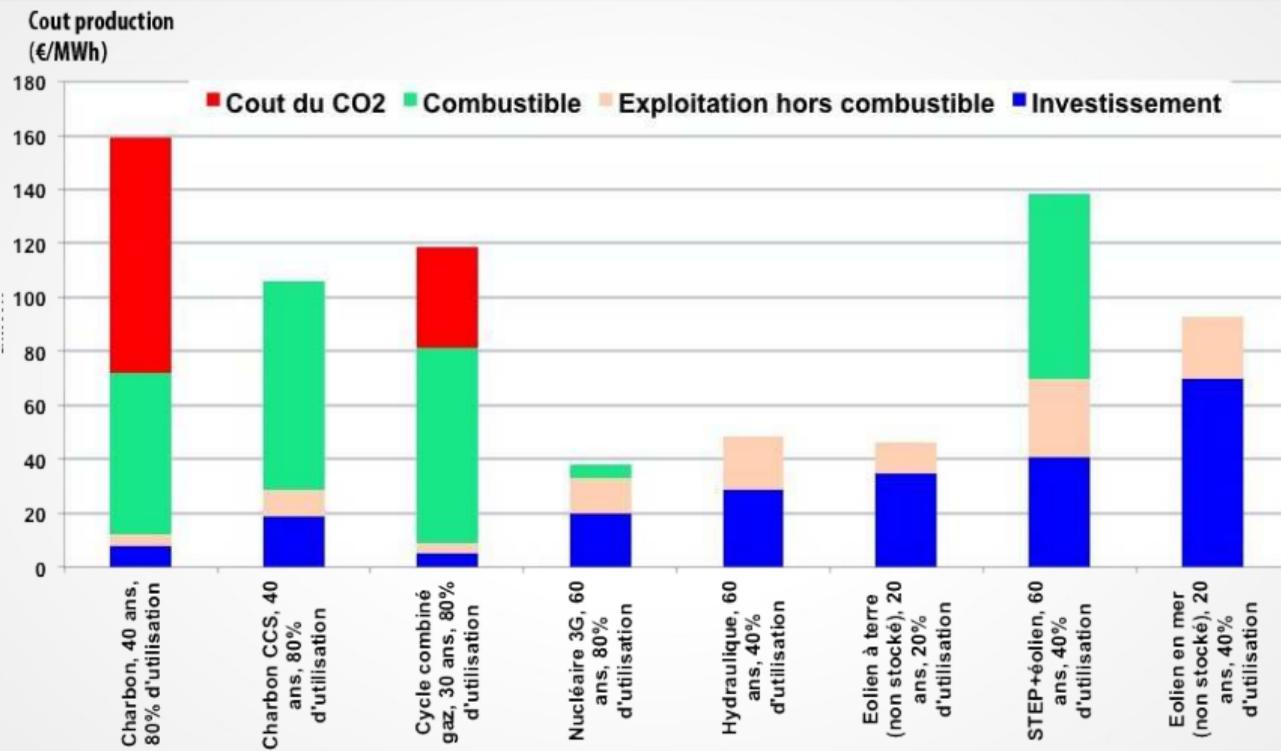


\* Données internationales

\*\* Données françaises et internationales



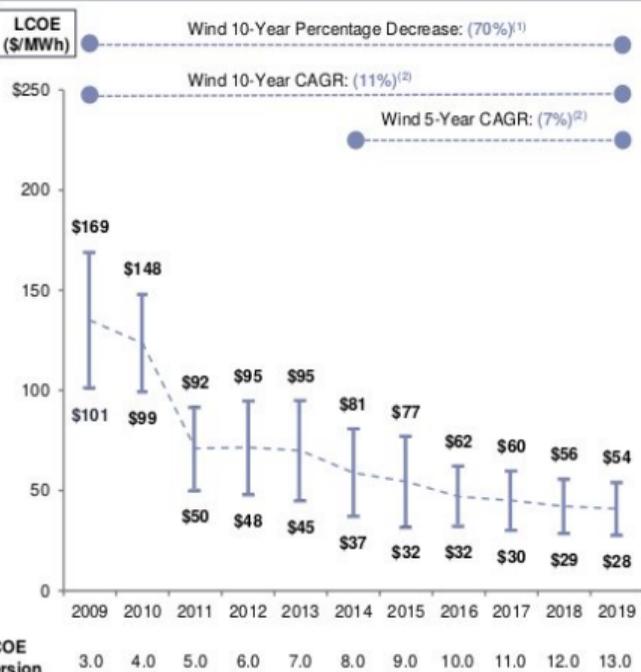
# Quel coût de production ? Estimation 3 (Jancovici, 2012)



# Une certitude : tendance à la baisse



## Unsubsidized Wind LCOE



Attention : baisse liée à augmentation de puissance unitaire

Pour  $P \geq 600kW$  Installation  $\simeq 1 k\text{€} \cdot kW^{-1}$

Petit éolien:

Quelles éoliennes sont concernées ?

- Puissance < 36 kW (9 à 10 m de diamètre)

Quels usages ?

- Autoconsommation (sans stockage)
- Sites isolés (avec stockage)

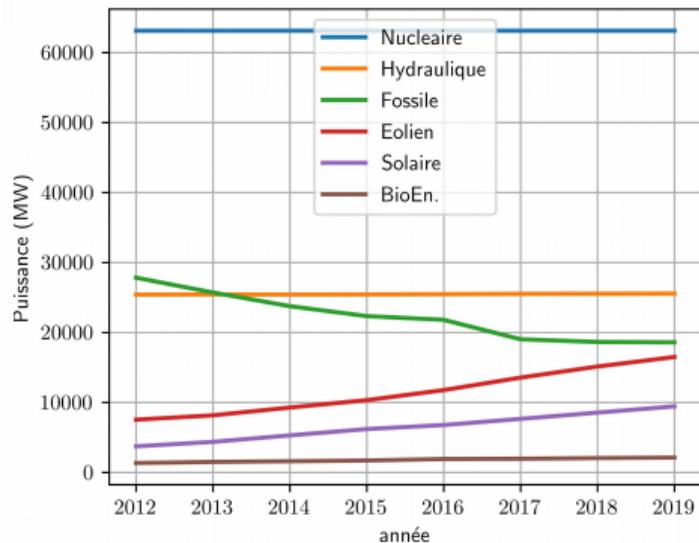
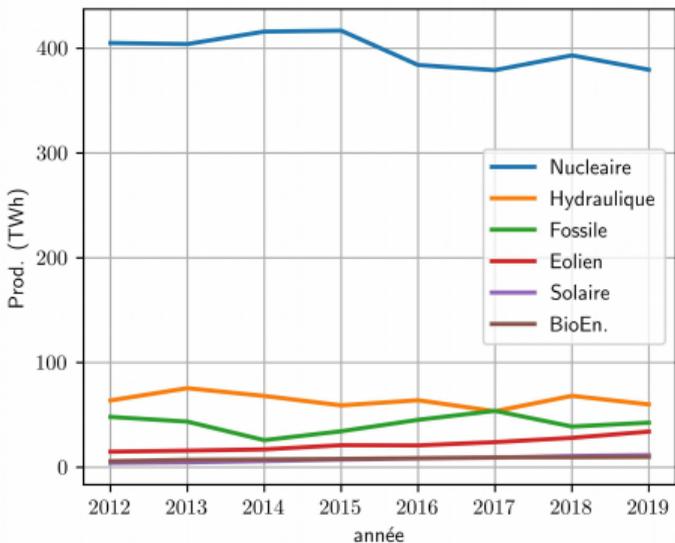
Combien de petites éoliennes en France

- Environ 3000 d'après le SEPEN

Combien ça coûte ?

- Environ 10 k€/kW pour les petites machines ( $P < 99 kW$ )
- Environ 4 k€/kW pour les machines de 10 à 50 kW

# Mix énergétique Français



# Mix énergétique Français

