

d'Alembert – Séminaire GrrrGr – 21 novembre 2024

Éoliennes

historique,
aérodynamique,
production
et perspectives

Ivan Delbende

- 1 Du moulin à vent à l'éolienne moderne
- 2 Croissance de l'éolien
- 3 Aérodynamique des éoliennes
- 4 Production annuelle
- 5 Quelques perspectives

1

DU MOULIN À VENT
À L'ÉOLIENNE
MODERNE

Historique

Premiers moulins à vent

644 : premiers écrits attestant la présence de moulins à vent en Perse (province du Sistan)



Moulin afghan à farine



Grand moulin chinois pour l'irrigation
Lin & Lin, 2012

Ces deux types de moulin sont à **axe vertical**.

Historique

Premiers moulins à vent

12^{ème} siècle :
apparition en Normandie
du **moulin pivot** ou
chandelier (*post mill*)
conception indépendante :
axe horizontal



enluminures du 14^{ème} siècle

puis diffusion en
Europe du Nord et de l'Est

Historique

Premiers moulins à vent

Fin du 13^{ème} siècle :
apparition du **moulin tour** dans le
sud de la France et autour de la
Méditerranée



Moulin d'Alphonse Daudet
à Fontvieille (13)



16^{ème} siècle : le **moulin
hollandais** avec son
toit orientable

Historique

Quelques évolutions techniques

Deux grandes inventions :

- 1745 : l'anglais Edmund Lee invente le gouvernail (*fantail*)
⇒ **orientation automatique** du moulin
- 1772 : l'écosseais Andrew Meikle invente les ailes à jalousie (*spring sails*)
⇒ **régulation** de la vitesse de rotation



et surtout, beaucoup d'empirisme :

- **vrillage** des ailes, même si de grands noms se sont penchés sur le problème : Gottfried Leibniz (1646-1716), Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonhard Euler (1707-1783)
- **vitesse de rotation** : vitesse du bout des ailes ≈ 2 fois et demi la vitesse du vent.

«Il paraît qu'à force de tâtonnement, l'on est parvenu à un très grand degré de perfection», Coulomb (1781).

Historique

Quelques évolutions techniques



Bilausehe Ventikanten
(Kurt Bilau, 1872-1941)

Début du 20^{ème} siècle :
amélioration des ailes basée
sur la toute nouvelle science
aérodynamique



Albert Betz (1885-1968)

...à une époque où **l'électrification des campagnes** rend le
moulin à vent complètement obsolète

Historique

L'éolienne américaine

Née du besoin des pionniers d'un appareil transportable pour pomper l'eau

- 1850 : invention par Daniel Halladay (mécanicien du Connecticut)
- 1867 : finalisation et brevet par Leonard Wheeler (missionnaire du Wisconsin) → **modèle Eclipse**



Éolienne Halladay
Laramie station, Wyoming (~1865)



Eclipse

1899 : 77 usines de production, 100 en 1930

6 millions d'exemplaires produits aux États-Unis

autres constructeurs :
Aermotor, Dempster, ...

l'électrification du pays
stoppe cette production.

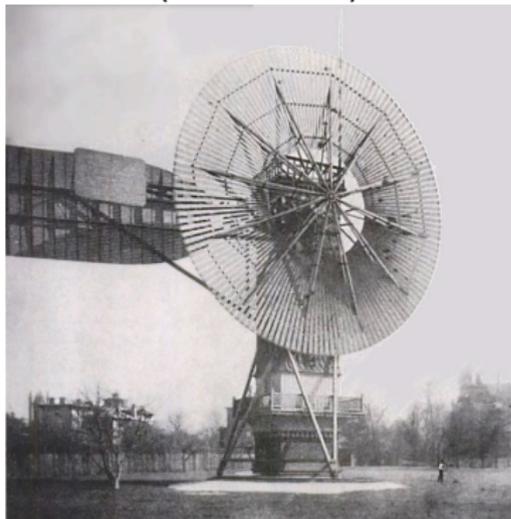
Historique

Débuts de l'aérogénération

Aux États-Unis

Charles Francis Brush

(1849-1929)



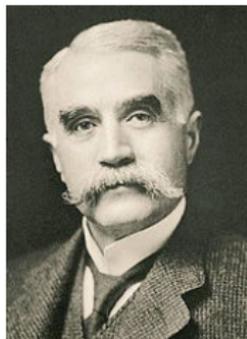
Cleveland, Ohio, 1888

puissance $P = 12$ kW,

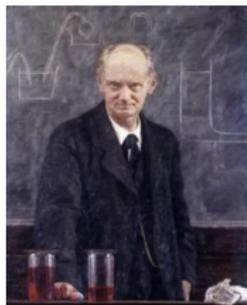
diamètre $D = 17$ m

144 pales en bois de cèdre

→ **stockage batteries**



Charles
Francis Brush



Poul la Cour

Au Danemark

Poul la Cour

(1846-1908)



Askov, Danemark, 1891

$P \sim 6$ kW (?), $D \sim 12$ m (?)

4 pales à jalousies

→ **hydrolyse de l'hydrogène** → éclairage

Ø'Alembert – 21 nov. 2024

Historique

2nde guerre et après-guerre

1942
Danemark



Smidth's Aeromotor
3 pales profilées fixes
 $P = 70 \text{ kW}$, $D = 24 \text{ m}$

1941-5
USA



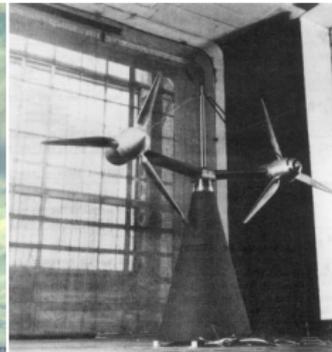
Smidth-Putnam
2 pales profilées
orientables
 $P = 1.2 \text{ MW}$, $D = 53 \text{ m}$

1958
France



EDF Nogent-le-Roi
éolienne BEST-Romani
 $P = 800 \text{ kW}$ $D = 30 \text{ m}$

1963
France



Projet BEST-Romani
en soufflerie
 $P = 2 \times 1 \text{ MW}$ $D = 32 \text{ m}$

- 1966 : abandon de l'éolien en France
- 1973 : reprise en Europe du Nord, et surtout après 1990

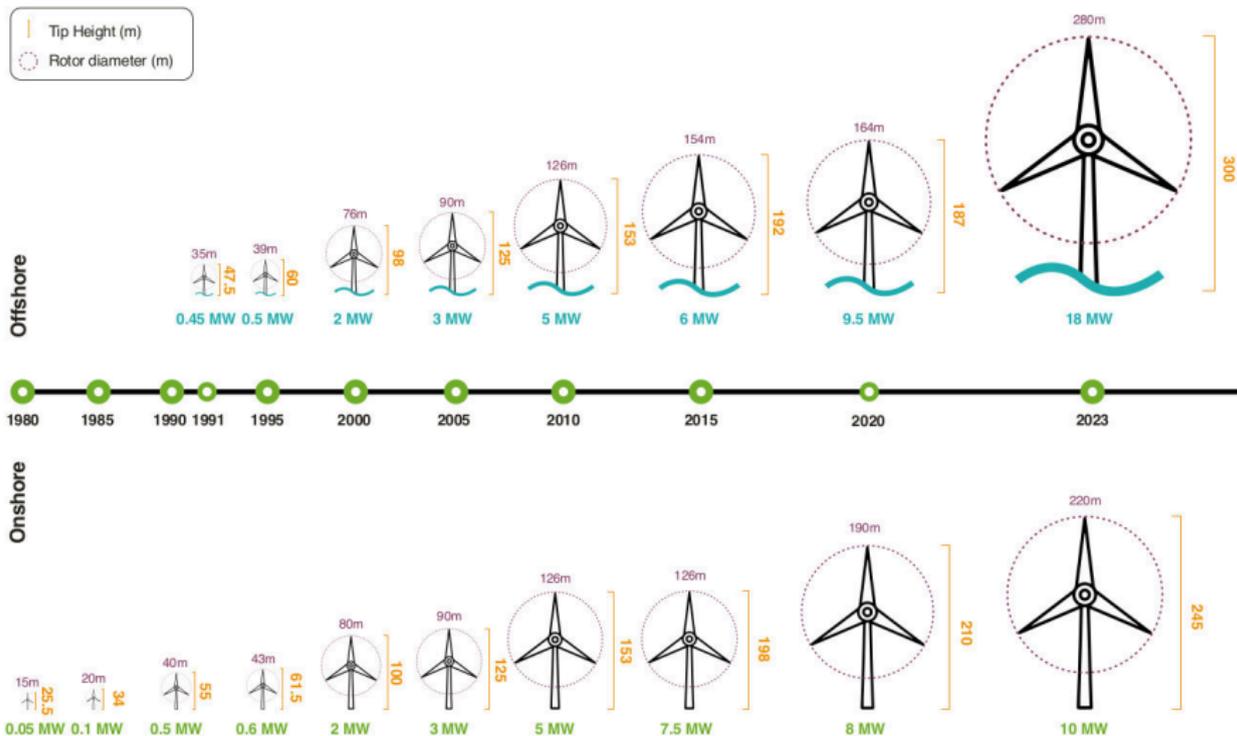
- Développement au Danemark (1986: 1% de l'électricité)
- Parcs éoliens aux USA (Californie) délaissés dans les 80's.

2

CROISSANCE
DE L'ÉOLIEN

Développement actuel

Puissance et taille des éoliennes



Source : GWEC (Global Wind Energy Council) Global wind report 2024

Évolution de la capacité mondiale installée (en GW)

● Onshore
● Offshore

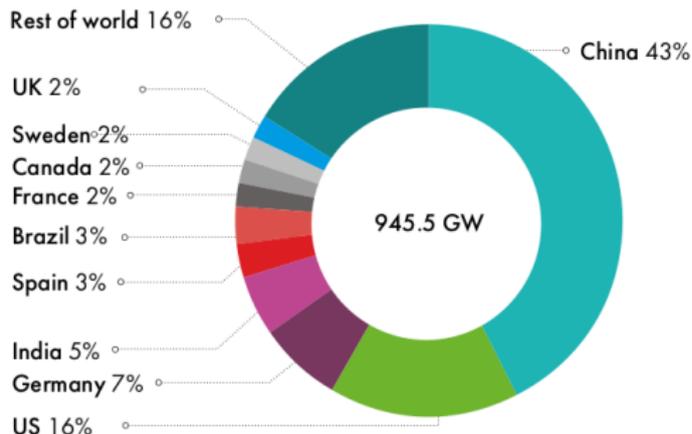
CAGR: Compound Annual Growth Rate
= taux de croissance annuel moyen



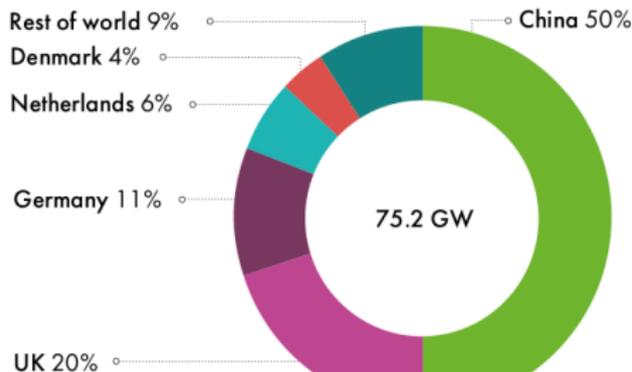
Source : GWEC 2024

Capacité totale par pays

Onshore



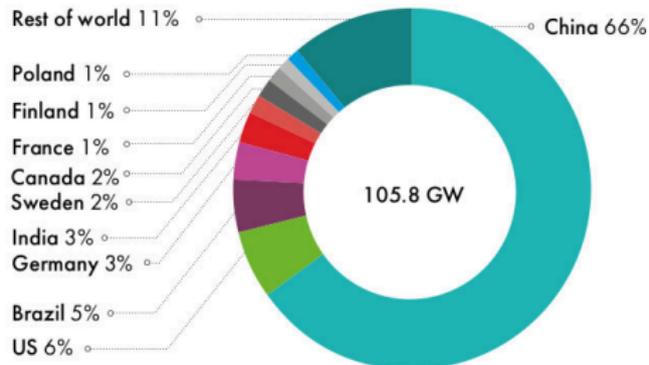
Offshore



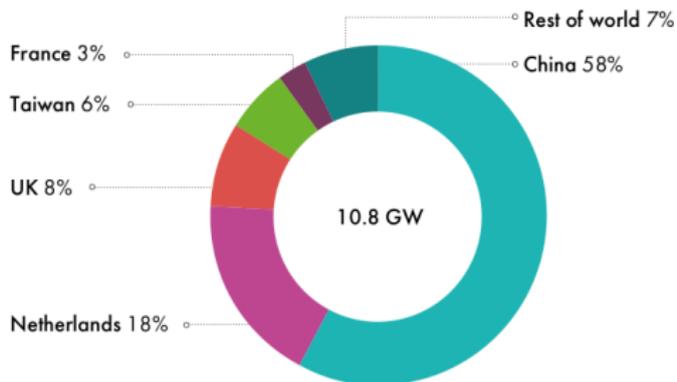
Source : GWEC 2024

Nouvelles installations en 2023

Onshore



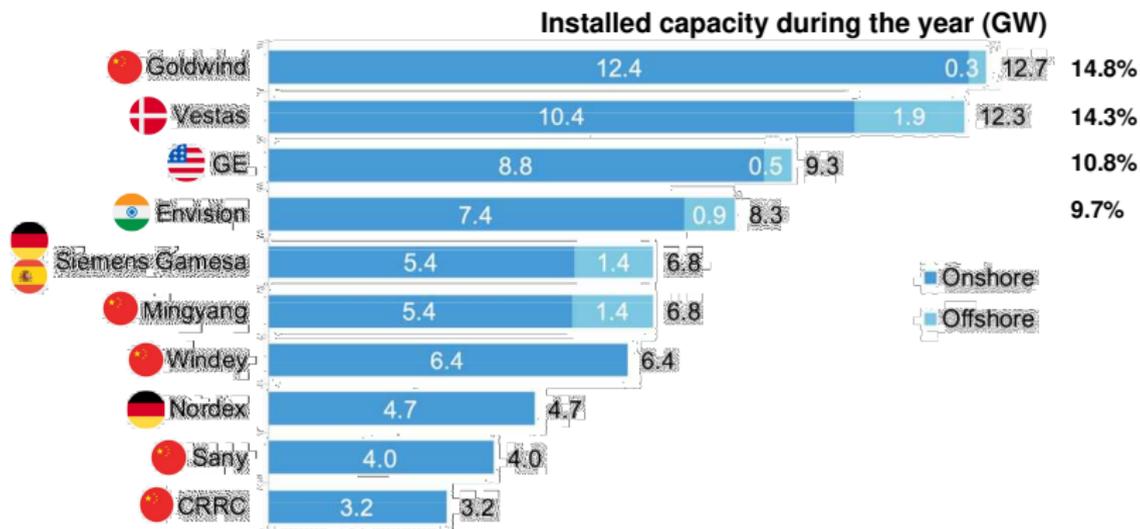
Offshore



Source : GWEC 2024

Développement actuel

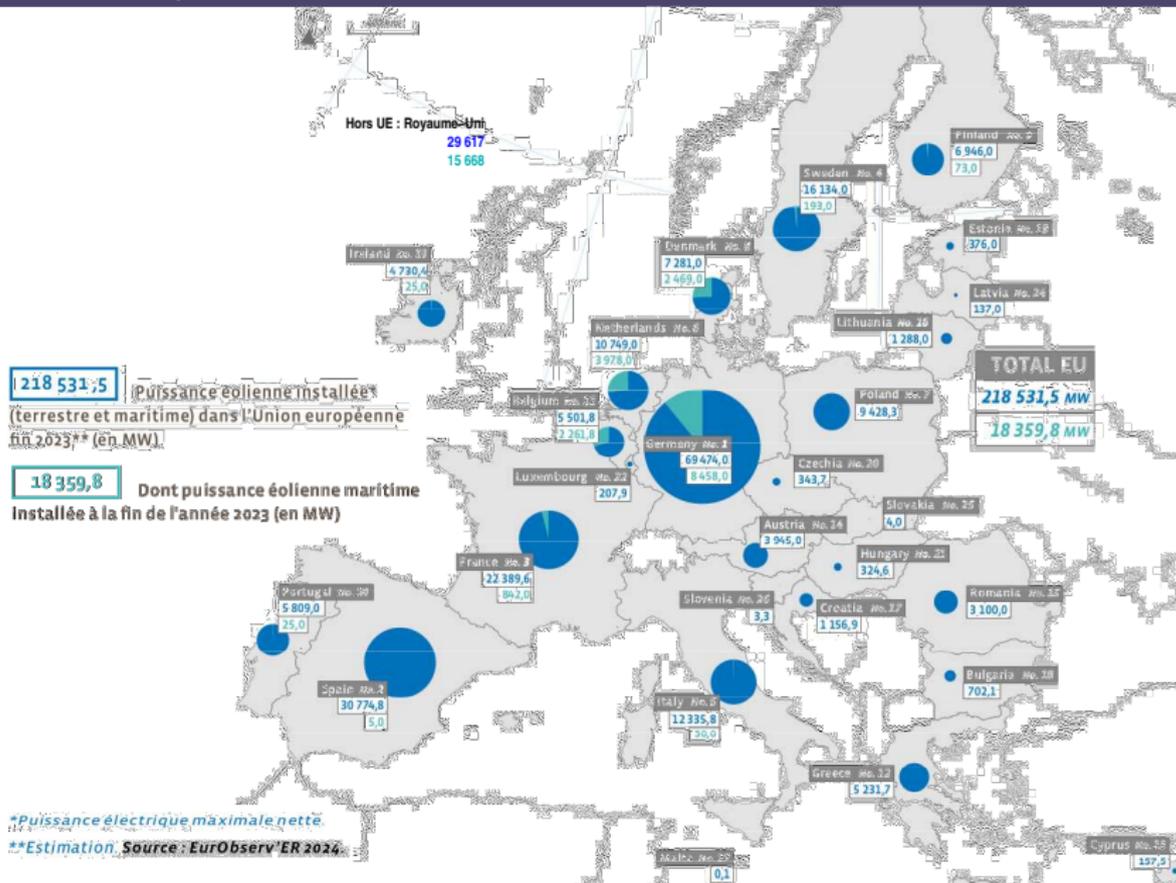
Principaux fabricants d'éoliennes



Source: BloombergNEF. Notes: Total commissioned wind capacity in 2022 was 86GW.

Source : BloombergNEF

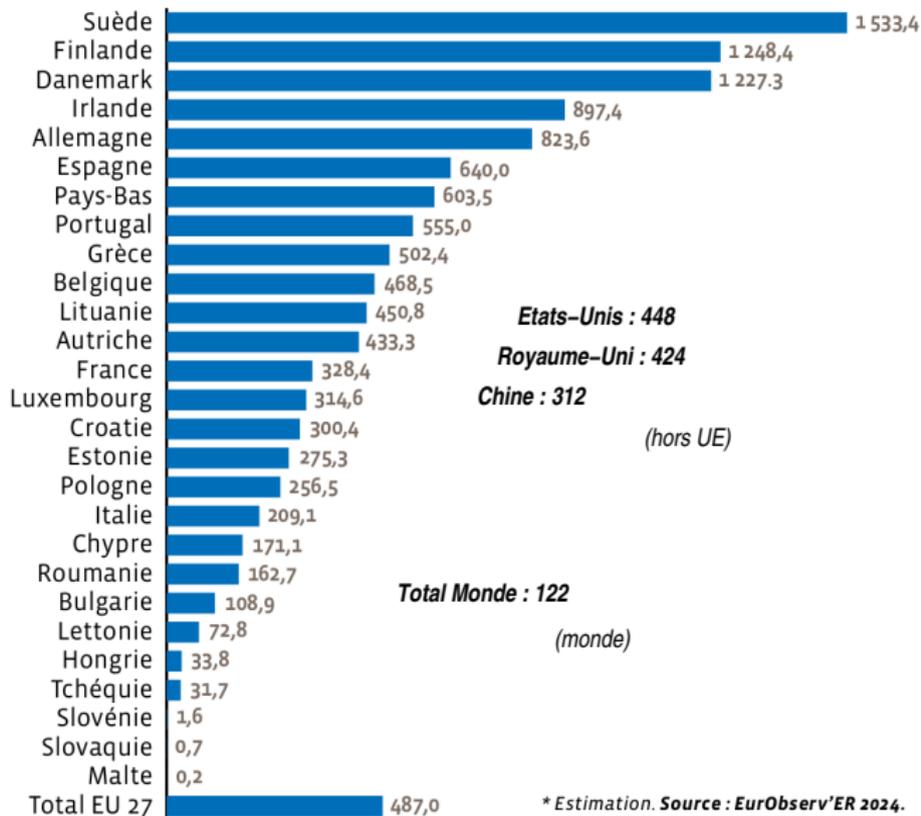
Développement actuel Eolien européen



Développement actuel

Puissance éolienne pour 1 000 habitants

dans les pays de l'Union européenne en 2023 (kW/1 000 hab.)*.



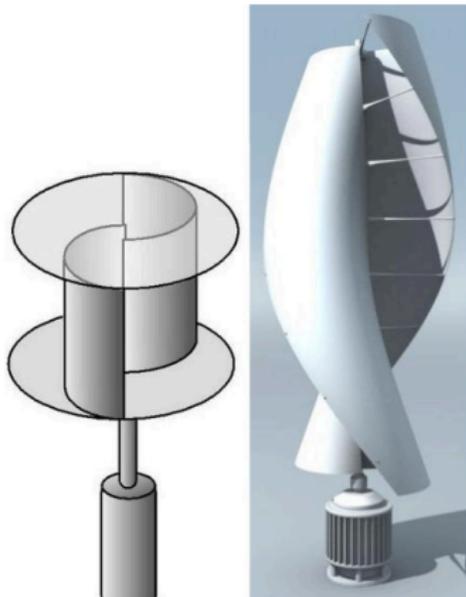
* Estimation. Source : EurObserv'ER 2024.

3

AÉRODYNAMIQUE
DES ÉOLIENNES

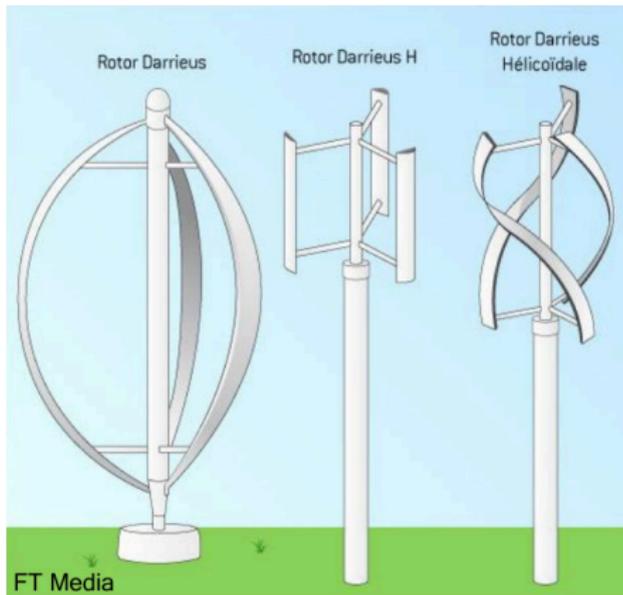
Axe de rotation **perpendiculaire au vent** : 2 types

Type Savonius



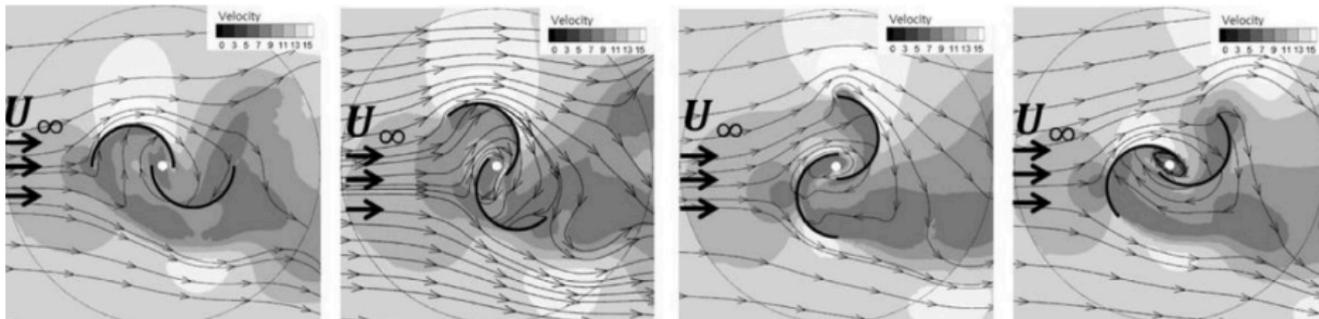
Savonius (1924) et variante hélicoïdale

Type Darrieus



Darrieus (1931), variantes H et hélicoïdale

Rotor Savonius : utilise principalement la traînée



Lee *et al.* 2016

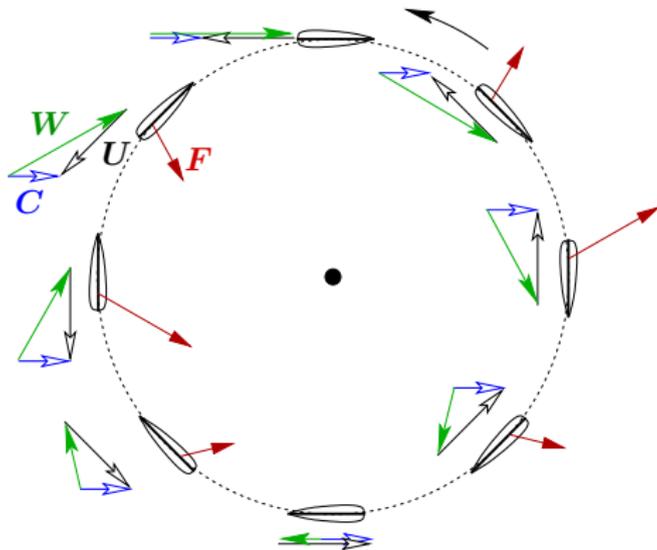
- **Pour**
 - Pas besoin d'orienter face au vent
 - Démarrage facile
- **Contre**
 - en fait traînée différentielle
 - **faible rendement**
 - masse importante
 - esthétique discutable !



Rotor Darrieus : utilise la portance



Éolienne à axe vertical de
Cap-Chat (Canada, 1983)
 $P = 3 \text{ MW}$, $h = 110 \text{ m}$.



Rotor Darrieus : utilise la portance

- **Pour**
 - pas besoin d'orienter face au vent
 - rendement acceptable
- **Contre**
 - démarrage non automatique
 - fonctionnement périodique complexe
 - sollicitations périodiques
 - tourne dans son propre sillage
 - forme complexe des pales (troposkine)
 - contrôle aérodynamique limité
 - maintenance complexe.



$P = 500$ kW (1985)



variante hélicoïdale

Axe de rotation **parallèle au vent** **Éolienne standard**

- Design dominant aujourd'hui
- Fonctionnement stationnaire (assez) simple
- Théorie analogue à celle des hélices marines
- Nécessité d'**orienter l'éolienne** face au vent
- **Calage** des pales autour de leur axe
 - contrôle aérodynamique de la puissance
 - protection efficace en cas de forts vents
- Optimisation de l'aérodynamique des pales
⇒ exploitation maximale de la portance.
- Éolienne la plus puissante actuellement :
Dongfang Electric Corporation **H18000**
 $P = 18 \text{ MW}$, $D = 260 \text{ m}$, $h = 160 \text{ m}$.
- *Bientôt* : $P = 26 \text{ MW}$, $D = 310 \text{ m}$, $h = 185 \text{ m}$.

DEC 18MW

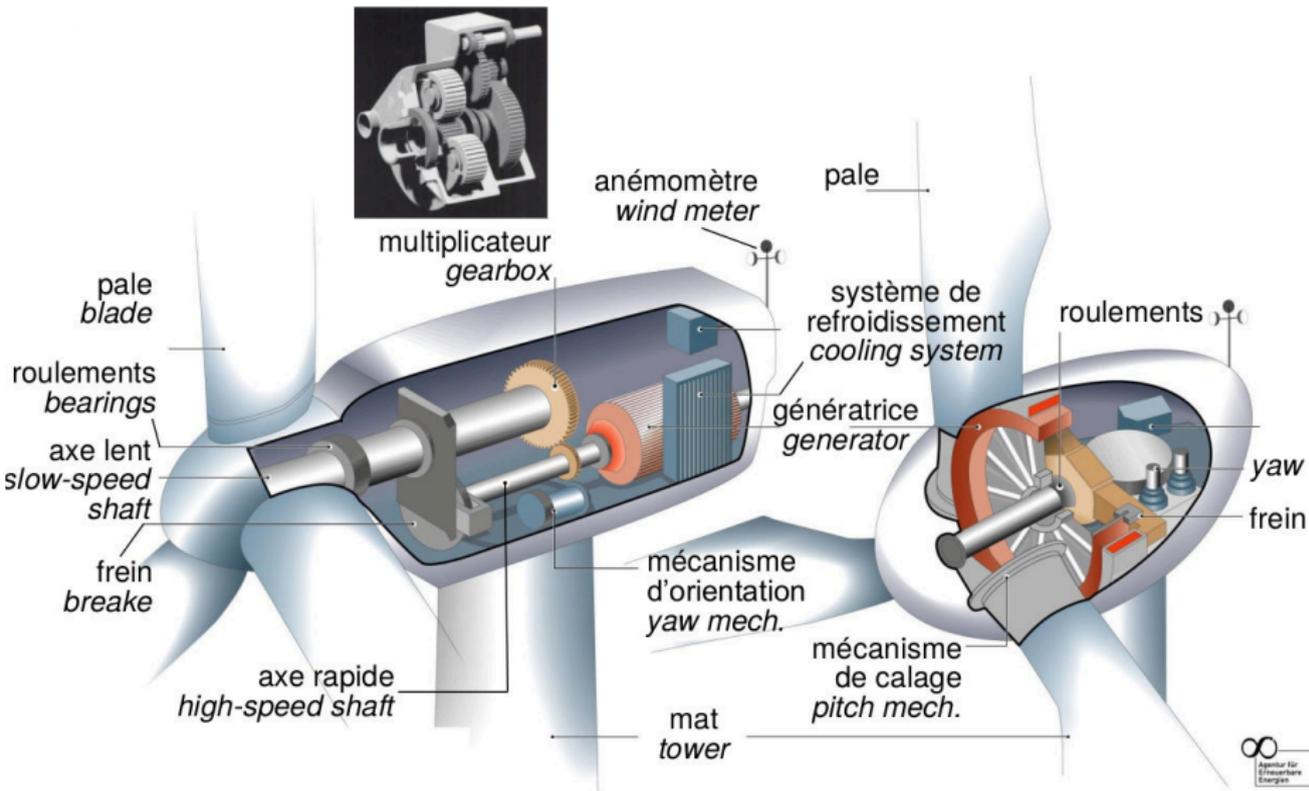


vue de la nacelle :



Aérodynamique

L'éolienne standard

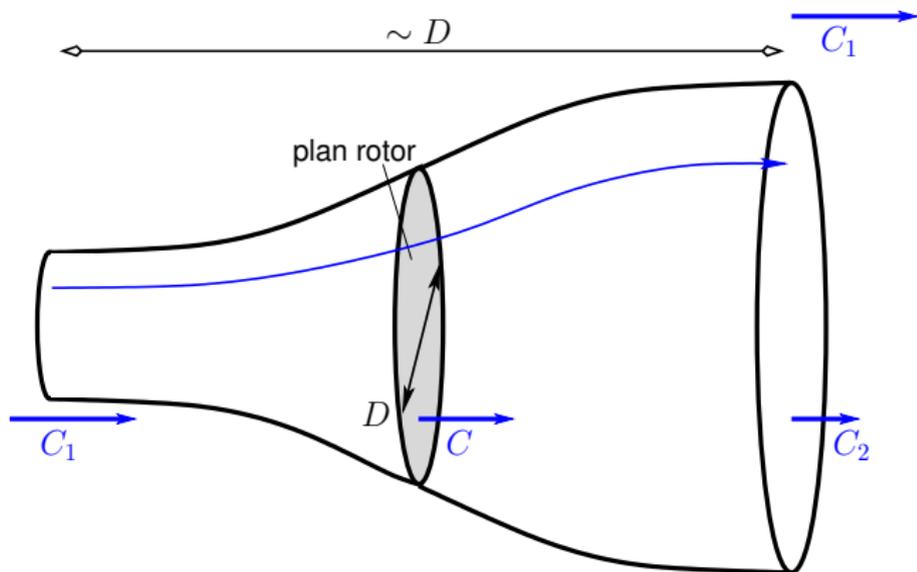


Éolienne **à multiplicateur**

à entraînement direct

Aérodynamique

Limite de Betz



Tube de courant intercepté par le rotor: échelle D

Puissance P_0 disponible :

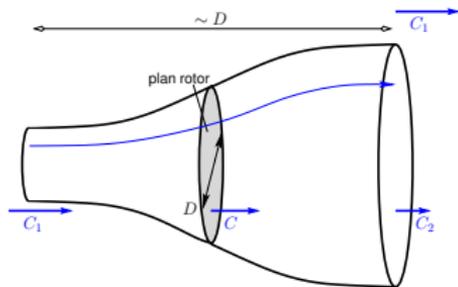
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho C_1^3 A$$

ρ masse volumique de l'air
 C_1 vitesse amont du vent
 A aire du disque rotor

Théorie unidimensionnelle de Betz

$$C \equiv C_1(1 - a), \quad C_\theta = 0$$

a coeff. d'induction axiale (uniforme)



Coefficient de puissance du rotor

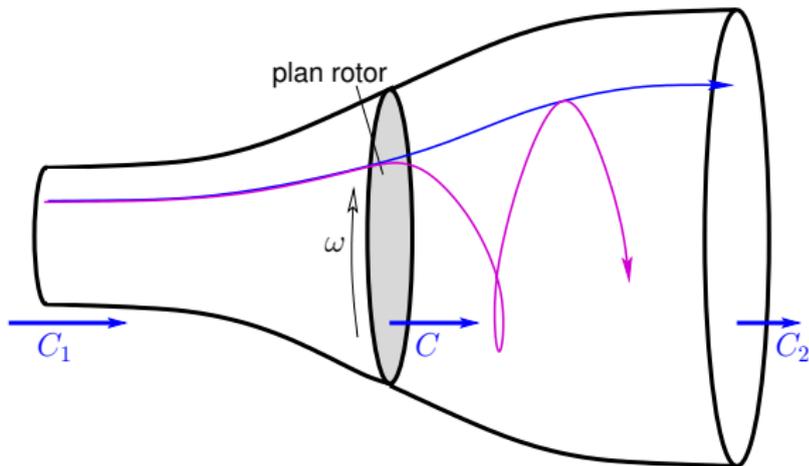
$$C_{PR} \equiv \frac{P_R}{P_0} = 4a(1 - a)^2 \leq \frac{16}{27} \approx 0.59$$

maximum
atteint
pour $a = 1/3$

Prise en compte de la rotation du rotor

Vitesse spécifique ou **TSR** (*tip-speed ratio*)

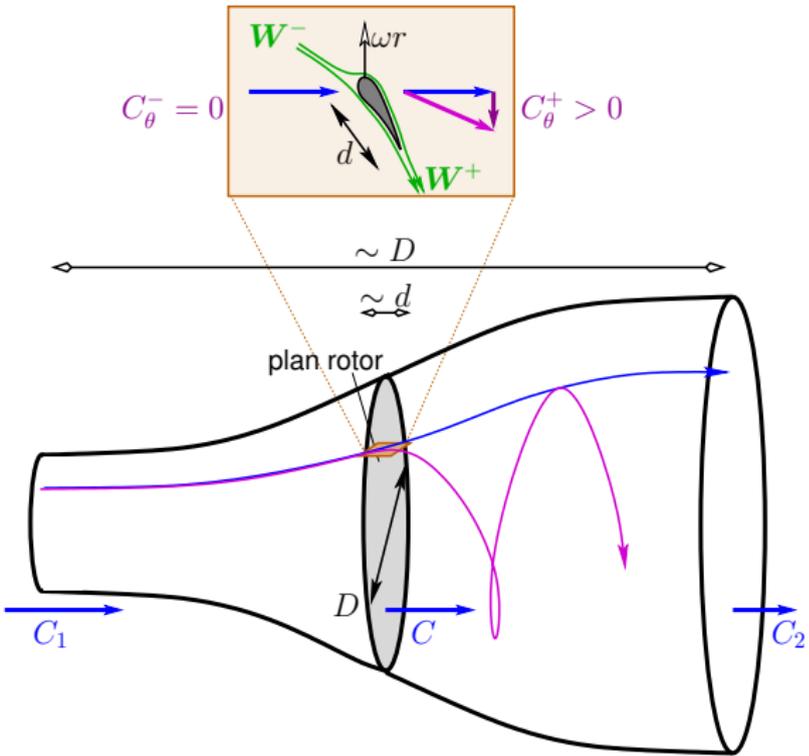
$$\lambda \equiv \frac{\omega R}{C_1}$$



Mise en rotation du fluide

Aérodynamique

Optimum de Glauert



Mise en rotation : échelle $d \ll D$

Théorie axisymétrique de Glauert

Tubes de courant élémentaires

- axisymétriques
- indépendants

$$C_{ax}(r) \equiv C_1(1 - a) , \quad C_\theta(r) \equiv a'\omega r$$

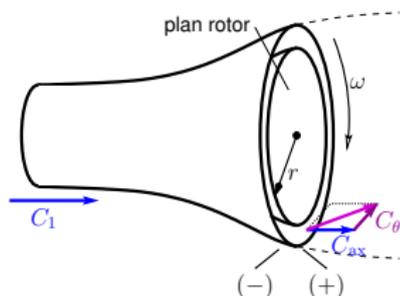
$a'(r)$ coefficient d'induction orthoradiale

Les bilans de m , p_{ax} , σ_{ax} , E

- entre plans amont (1) et aval (2),
- entre plans avant rotor (-) et après (+)

donnent la **puissance de la portion δr de rotor** :

$$\Rightarrow \delta P_R \propto a'(r)[1 - a(r)]r^3 \delta r$$



Coefficient de puissance du rotor dans la th. axisymétrique

$$C_{PR} = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(\xi)[1 - a(\xi)]\xi^3 d\xi$$

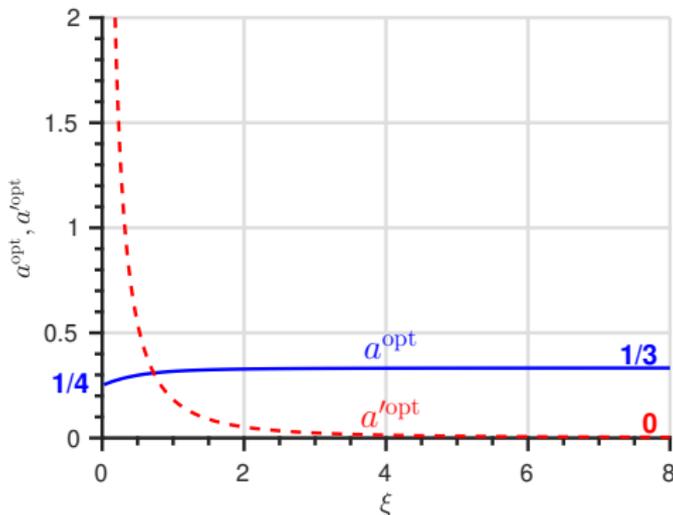
$$\text{où } \xi \equiv \frac{\omega r}{C_1} \quad (0 \leq \xi \leq \lambda)$$

L'optimum de Glauert est obtenu en **maximisant**, pour chaque ξ , le produit $a'(\xi)[1 - a(\xi)]$...

...mais a et a' ne sont pas indépendants !

$$\frac{a(1 - a)}{a'(1 + a')} = \xi^2$$

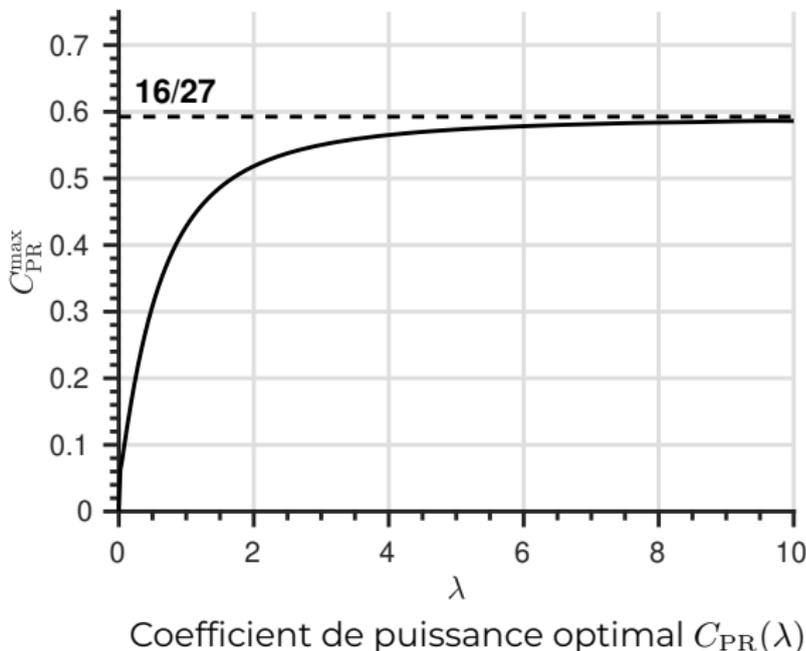
$$\rightarrow a^{\text{opt}}(\xi), a'^{\text{opt}}(\xi)$$



Facteurs d'induction optimaux

Optimum de Glauert

$$C_{PR}^{\max} = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'^{\text{opt}}(\xi) [1 - a^{\text{opt}}(\xi)] \xi^3 d\xi$$



Géométrie de la pale

Pour

- un **TSR de design** λ_A ,
- un **nombre** n_p **de pales**,

on calcule les distr. radiales

- de **corde du profil**
- de l'**angle de torsion**

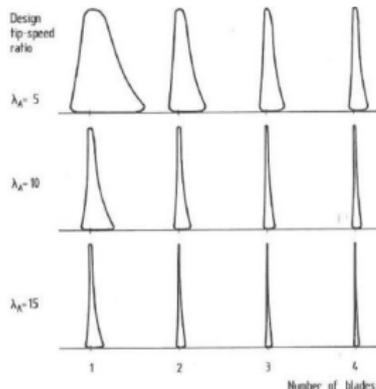
pour lesquels δF_x et δM_x de l'élément de pale égalent ceux de l'optimum de Glauert.

Nombreuses autres contraintes

- aéroélastiques, aéroacoustiques, structurelles, économiques, esthétiques...

Pale optimale pour $\lambda = \lambda_A$ et le calage $\theta = 0$.

Mais elle va être utilisée aussi pour d'autres valeurs de λ et θ .



Formes théoriques
obtenues Hau 2006

4

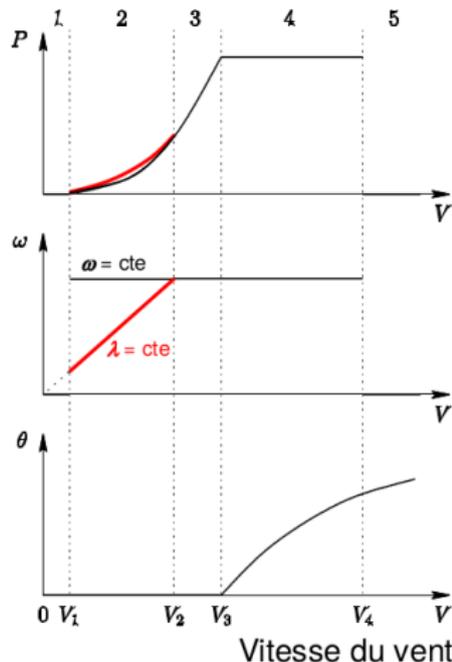
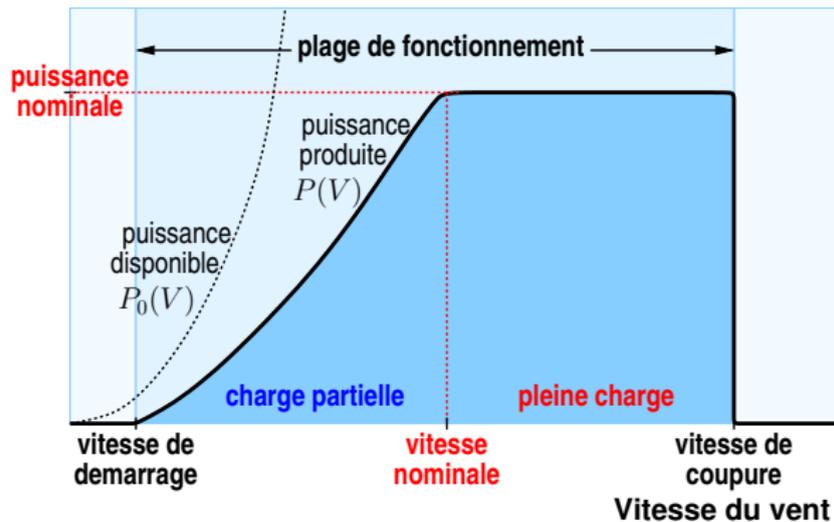
PRODUCTION
ANNUELLE

Production annuelle

Courbe de fonctionnement de l'éolienne

Caractéristique typique puissance-vitesse du vent

Puissance



Deux principes : rotation constante ou **TSR constant**

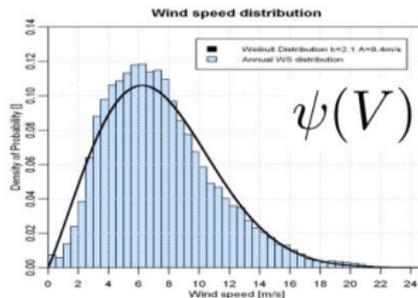
La production dépend de la ressource éolienne du lieu.

Densité de probabilité locale
du vent sur l'année

peut être modélisée par

$$\psi(V) \propto V^{k-1} e^{-(V/A)^k}$$

Weibull 1939



Site aux
Pays-Bas
(données
ECN)

Ici $A = 8.4 \text{ m s}^{-1}$, $k = 2.1$

Puissance moyenne
produite sur l'année

$$P_{\text{moy}} = \int_0^{\infty} P(V) \psi(V) dV$$

**Facteur de charge
de l'éolienne**

$$f_c = P_{\text{moy}} / P_{\text{nom}}$$

sur terre
 $f_c \sim 0.25$

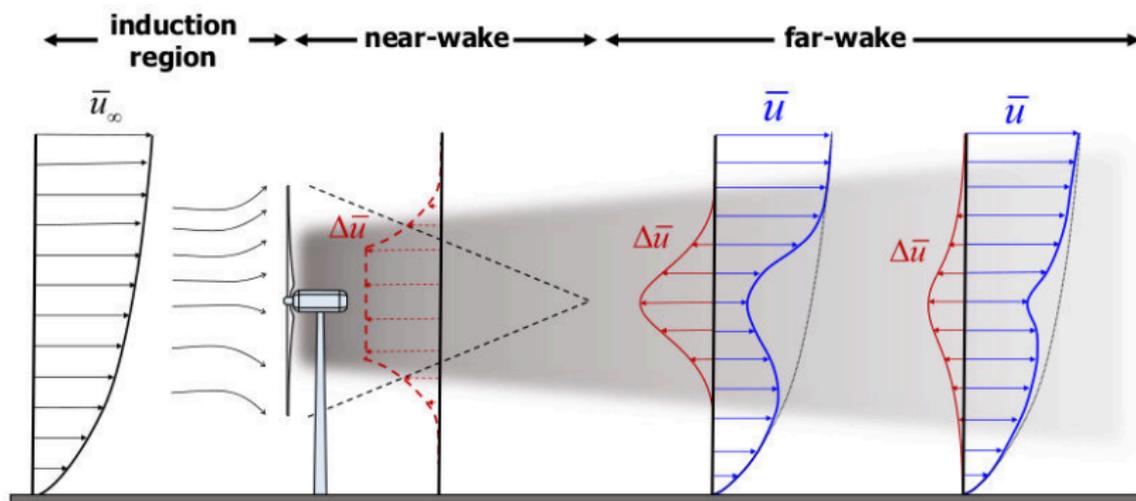
en mer
 $f_c \sim 0.4$

5

QUELQUES
PERSPECTIVES

Écoulement moyen dans le sillage d'une éolienne

- freinage axial \implies déficit de vitesse
- mise en rotation du sillage (souvent négligée)



Porté-Agel et al. 2020

Quelques perspectives

Effet de sillage

Parc éolien
Horn Revs 1
Danemark

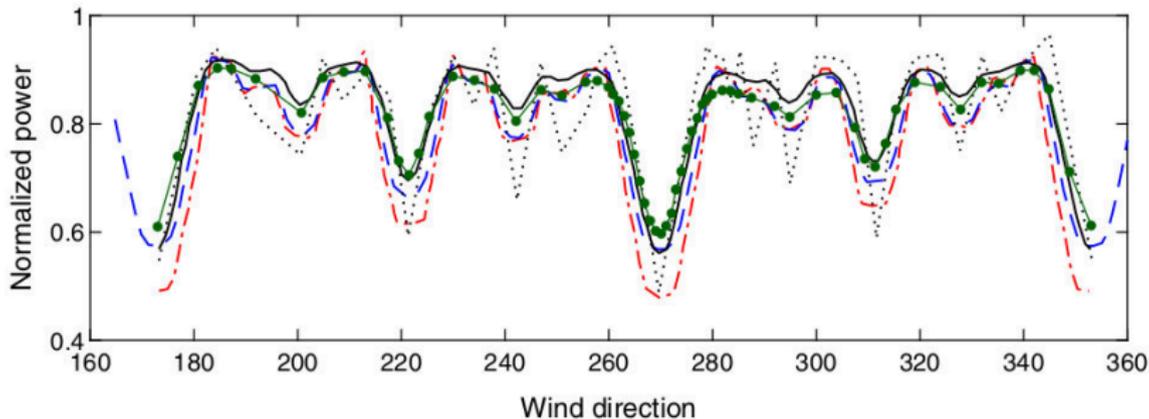


Photo : Christian Steiness

- La **prévision de la production** d'un parc éolien doit prendre en compte
 - l'**effet de sillage**
 - la disposition des éoliennes
 - la météo (direction du vent et intensité)
 - la couche limite atmosphérique
 - les interactions parc éolien/par éolien

Fort enjeu pour la **production d'un parc éolien**

- Parc de Horns Rev : **effet de la direction du vent**



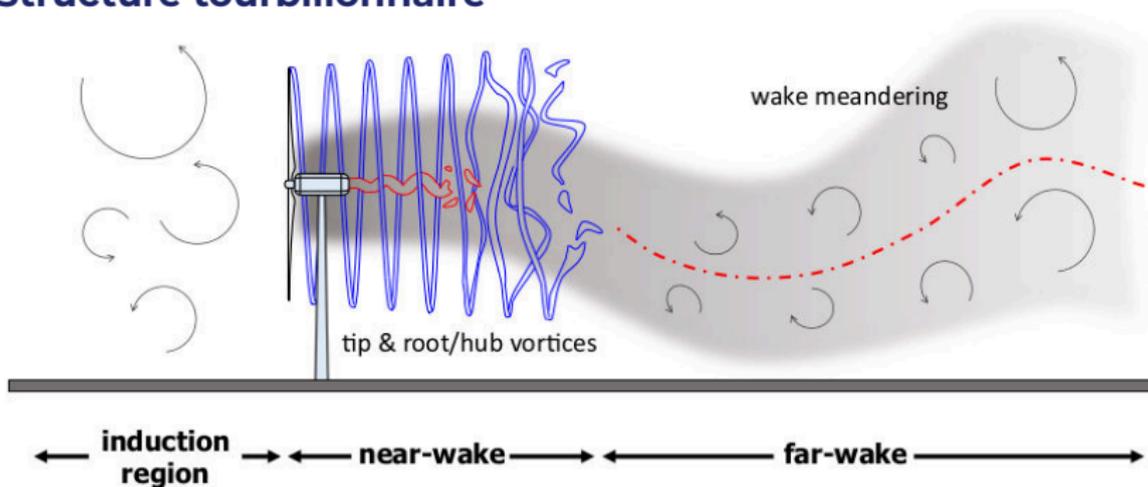
Porté-Agel et al. 2020

Rôles également importants

- du taux de turbulence
- de la stabilité de la couche limite atmosphérique

Peut-on modifier le sillage ?

Structure tourbillonnaire

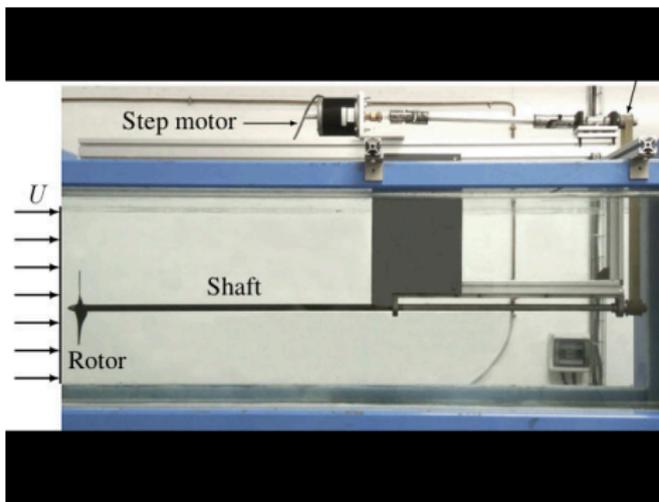


- **3 tourbillons hélicoïdaux** de bout de pale
- 3 tourbillons de moyeu (*hub*)
- **transition vers la turbulence** : plusieurs instabilités

Expérimentation/simulation à faible vitesse

Expérience en canal à eau

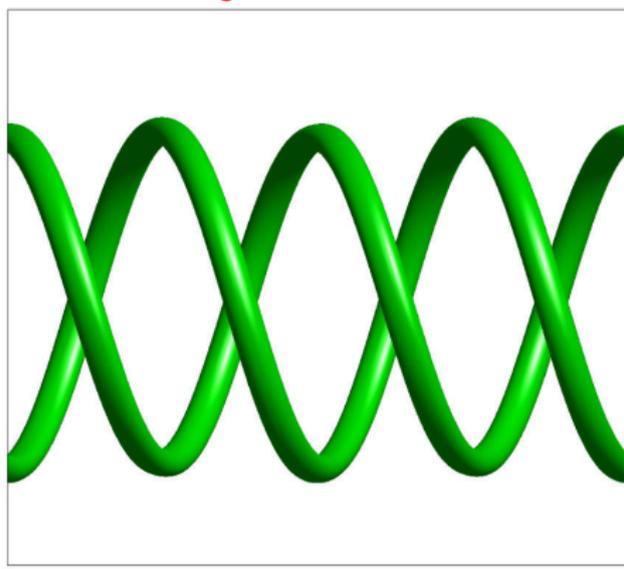
Leweke, IRPHE Marseille



Quaranta et al. 2019

Développement **spatial**

Simu en **symétrie hélicoïdale**



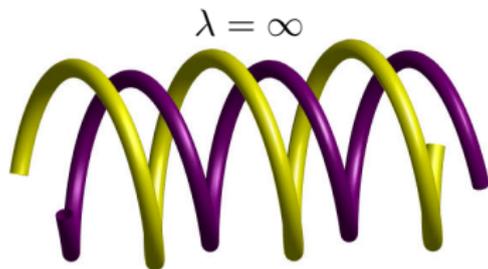
Selçuk, ID & MR 2018

Développement **temporel**

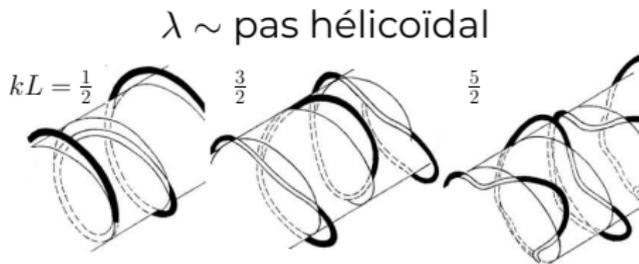
Quelques perspectives

Instabilités dans les tourbillons hélicoïdaux

- **Instabilités** de **grande** longueur d'onde λ



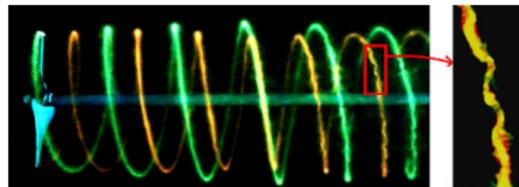
Okulov 2004, ID *et al.* 2021



Widnall 1972, Quaranta *et al.* 2015

- **Instabilités** de **courte** longueur d'onde

$\lambda \sim$ taille du cœur



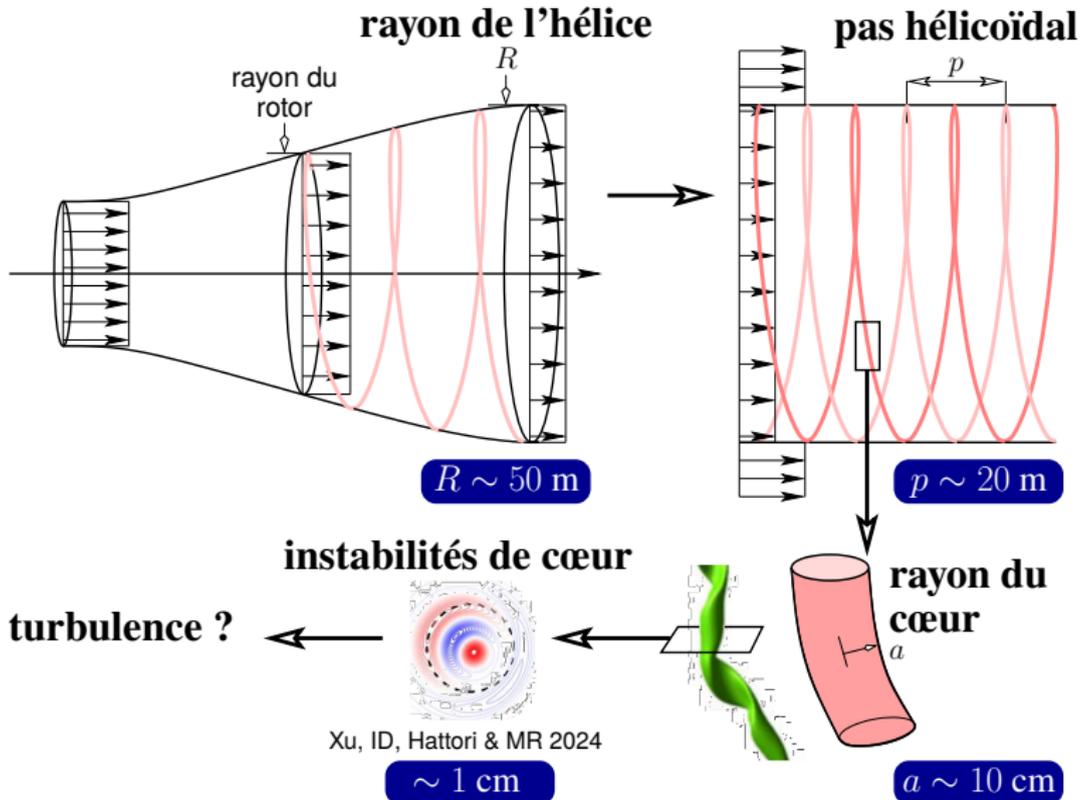
Quaranta *et al.* 2019

Instabilités de **résonance** dues

- à la **déformation elliptique**
- à la **courbure**

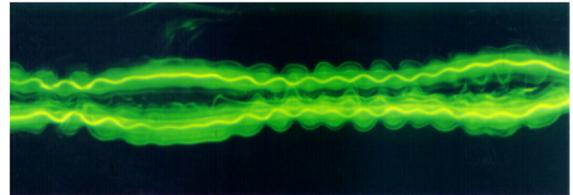
du vortex

Diversité des échelles déterministes

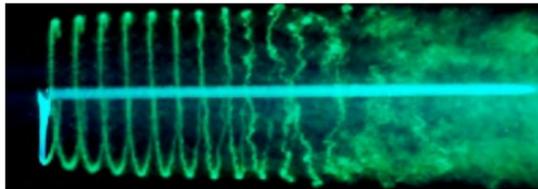


La **transition vers la turbulence** implique probablement

- une **interaction** entre **grandes** et **courtes** longueurs d'onde



Vortex de sillage d'avion
Leweke & Williamson 1998



Sillage de rotor Leweke 2012

- l'**instabilité secondaire** de l'instabilité de courte longueur d'onde

Quelques perspectives

Modification du sillage

Deux chercheurs ont déposé un **brevet** sur la manipulation du sillage par **dyssymétrisation du rotor** en 2020 pour l'Europe, avec une extension internationale en 2021.

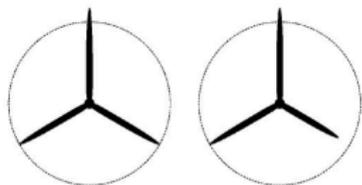


FIG. 6



FIG. 4

EP 3 985 246 A1



FIG. 5

Leweke & Sørensen 2020

Travail en cours : instabilités de courte longueur d'onde

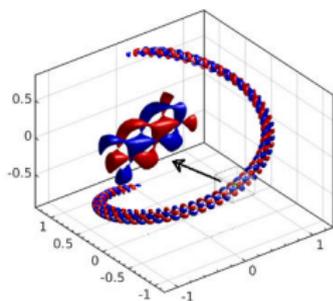
- développements théoriques et numériques
- cartographie systématique

Perspectives directes

- **interactions** entre ondes **longues** et ondes **courtes**
- mécanisme(s) de la **transition vers la turbulence**

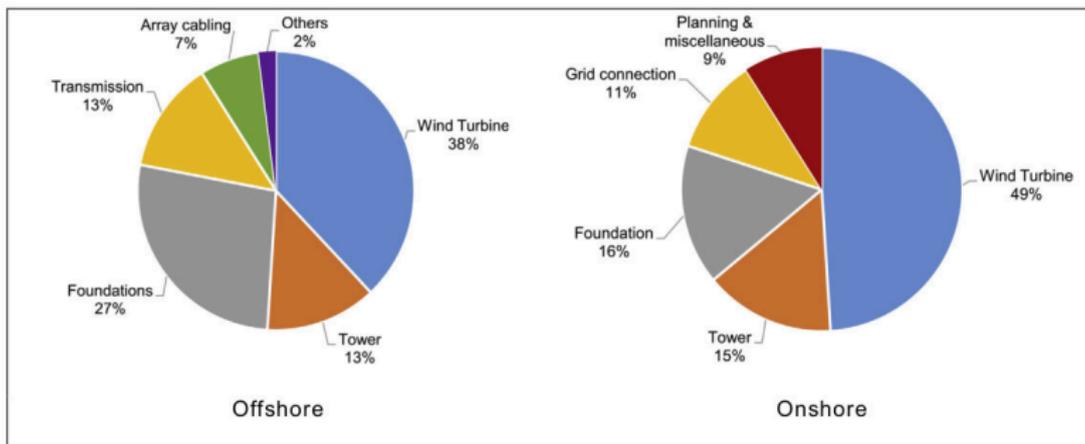
Sujet connexe

- effet de la stabilité de la couche limite atmosphérique sur les sillages proche et lointain



Xu 2022

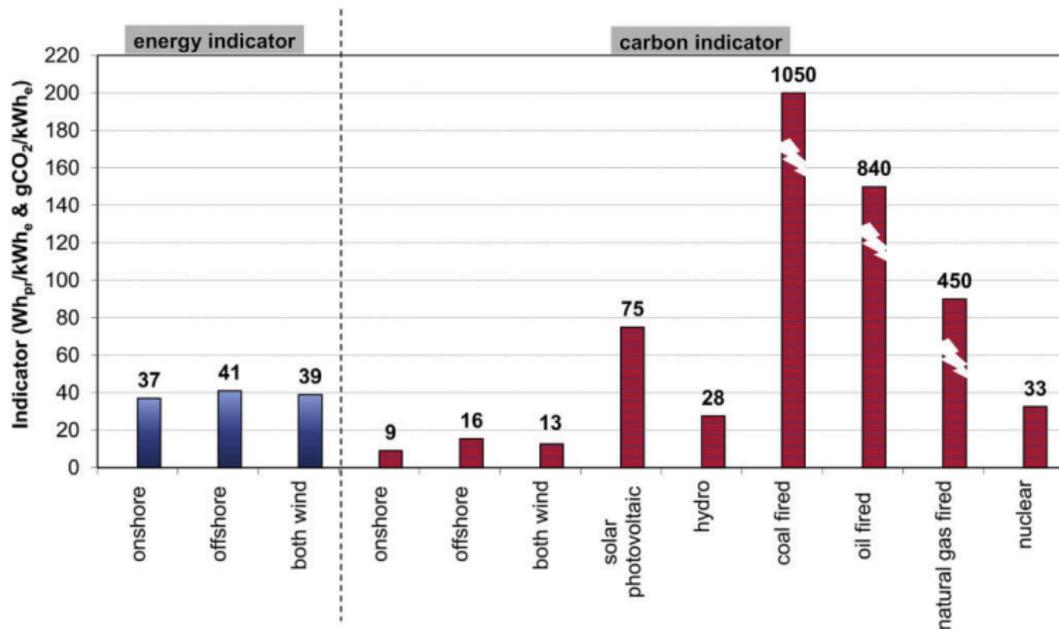
MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Kaldellis & Apostolou 2017

Cycle de vie

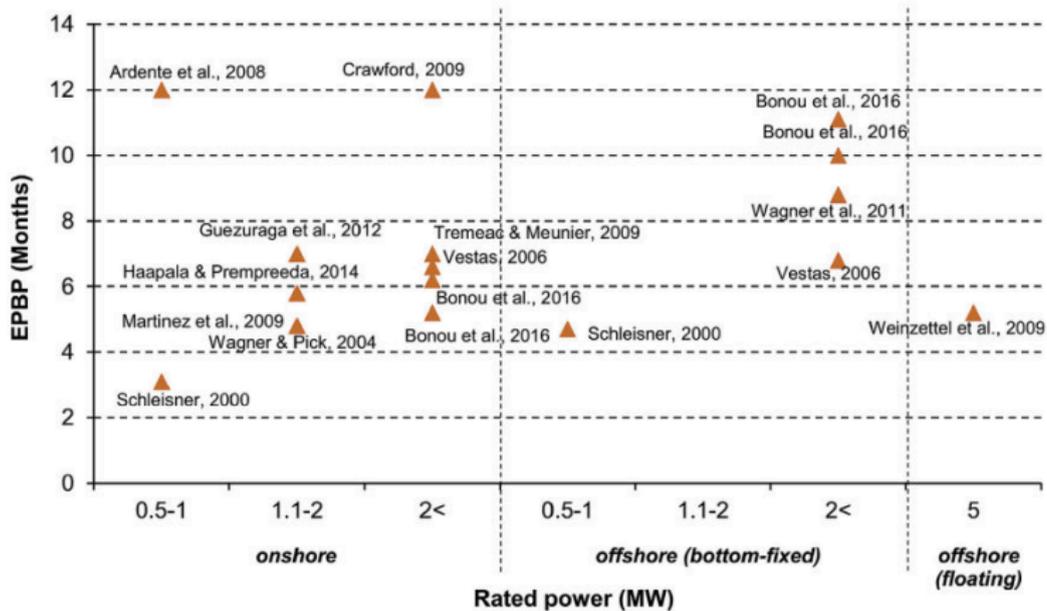
Énergie primaire et émissions carbonées par kWh produit



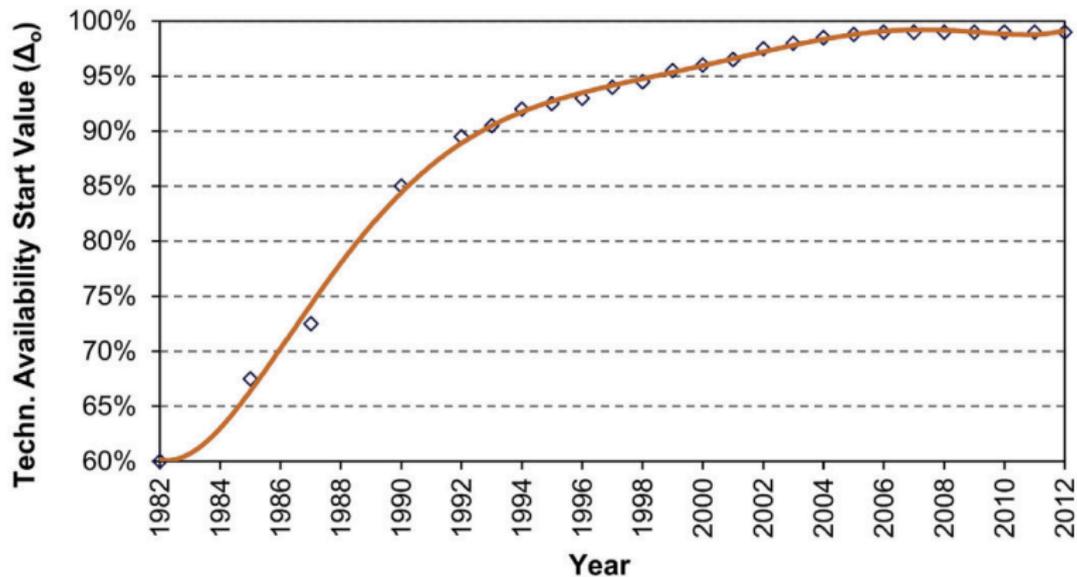
Kaldellis & Apostolou 2017

Cycle de vie

Temps de retour énergétique



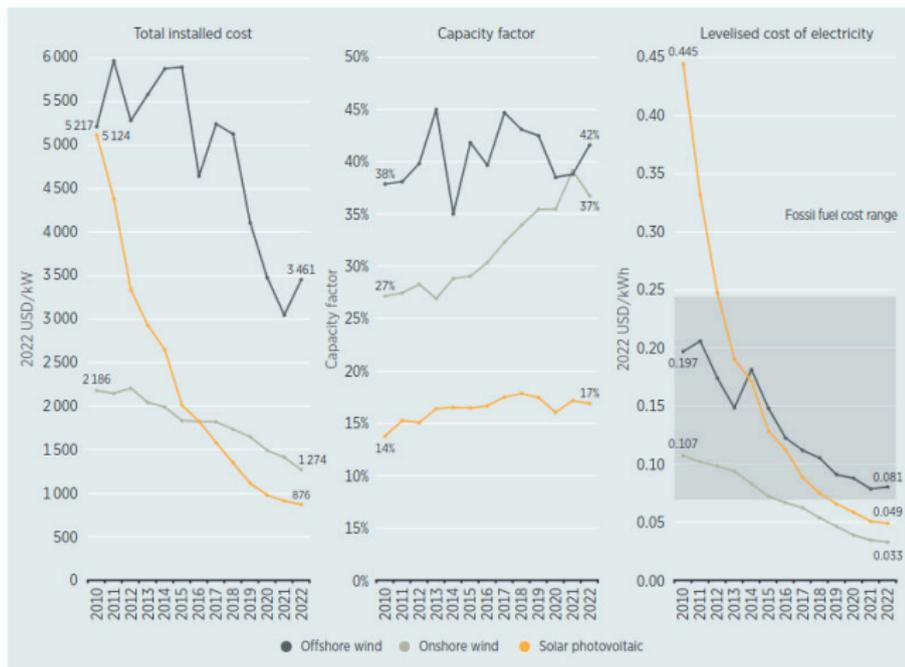
Kaldellis & Apostolou 2017



Kaldellis & Apostolou 2017

Évolutions

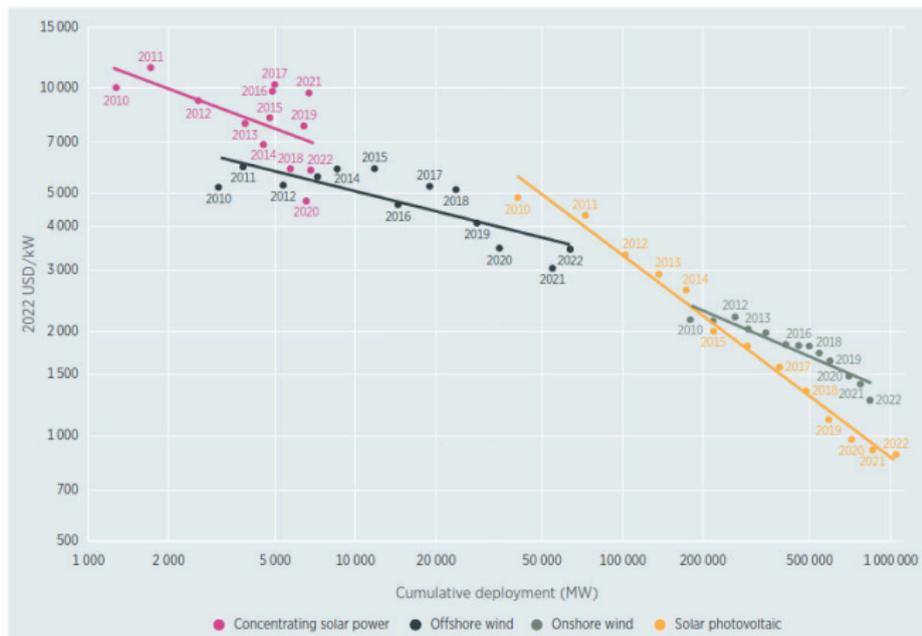
Coût installation – Facteur de charge – LCOE



Source : IRENA 2022

Évolutions

Coût des énergies renouvelables

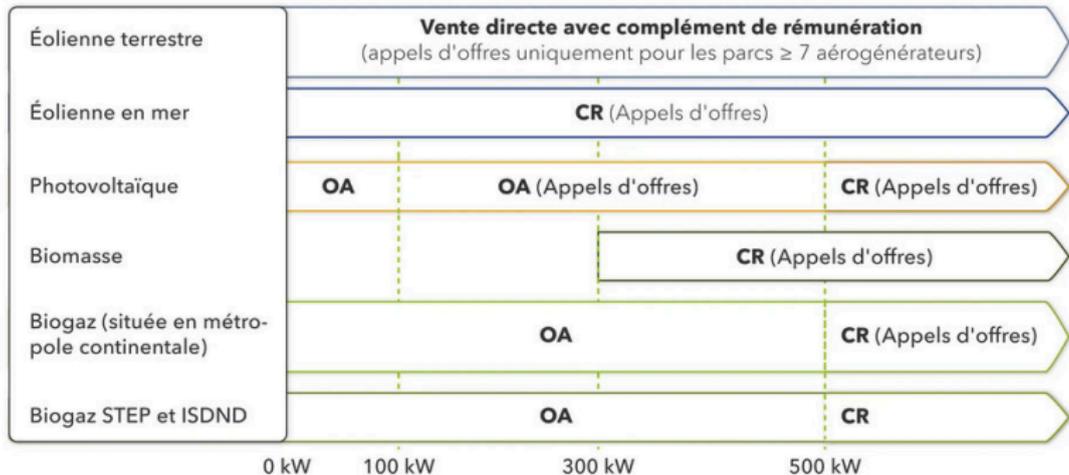


Source : IRENA 2022

Appels d'offre

Principe pour les différentes ER

Vue d'ensemble: Appels d'offres et instruments de soutien aux énergies renouvelables



OA: Obligation d'Achat; CR: Complément de rémunération/Prime à l'énergie

Source : DFBEW

Appels d'offre

Parcs offshore français

Projets éoliens en mer en développement
sur les façades maritimes françaises

Réseaux électriques existants

-  Lignes 225kV
-  Lignes 400kV

Etapas du projet

-  Débat public ou concertation
-  Mise en concurrence
-  En développement
-  Obtention des autorisations
-  En travaux
-  En service

 **Eolien posé AO1 et AO2**
(mise en service à l'horizon 2025)

 **Eolien posé AO3**
(mise en service à l'horizon 2027)

 **Eolien posé AO4**
(mise en service à l'horizon 2030)

 **Eolien flottant AO5**
(mise en service à l'horizon 2030)

 **Eolien flottant AO6**
(mise en service à l'horizon 2030)

 **Eolien posé AO7**
(mise en service à l'horizon 2030)

 **Eolien posé AO8**
(mise en service à l'horizon 2032)

 Eolien flottant (pilote)

