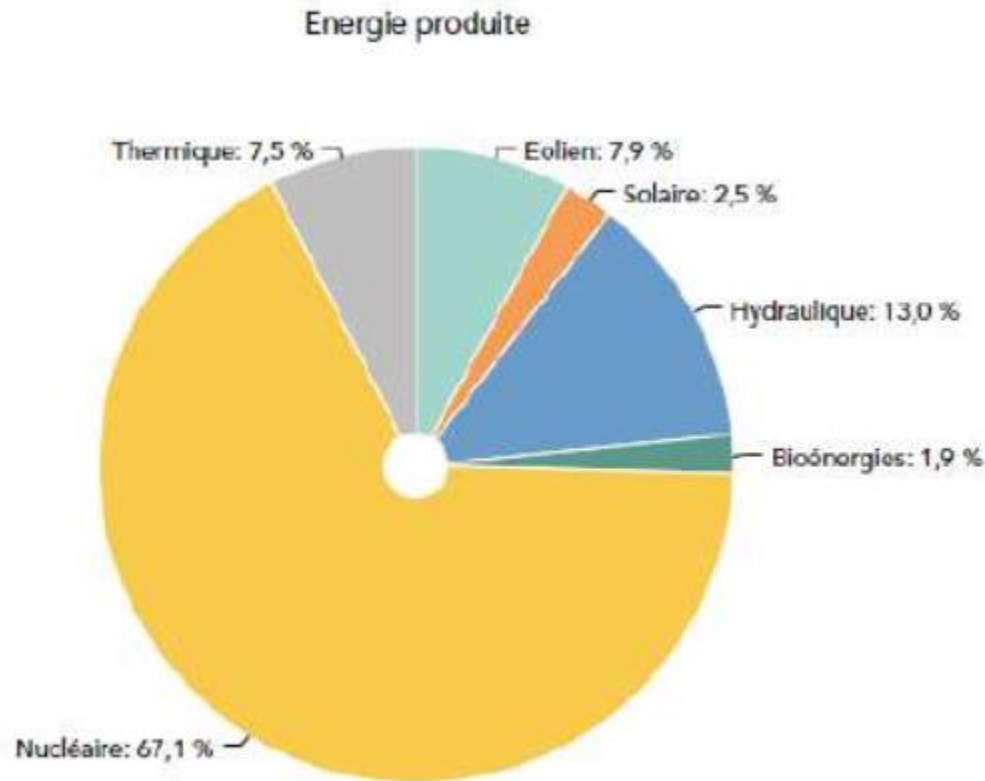


- A) Quelques chiffres**
- B) Le vent**
- C) Constitution**
- D) Conversion cinétique mécanique**
- E) Conversion mécanique électrique**
- F) Exemples de réalisations**
- G) Hydroliennes**

Quelques Chiffres

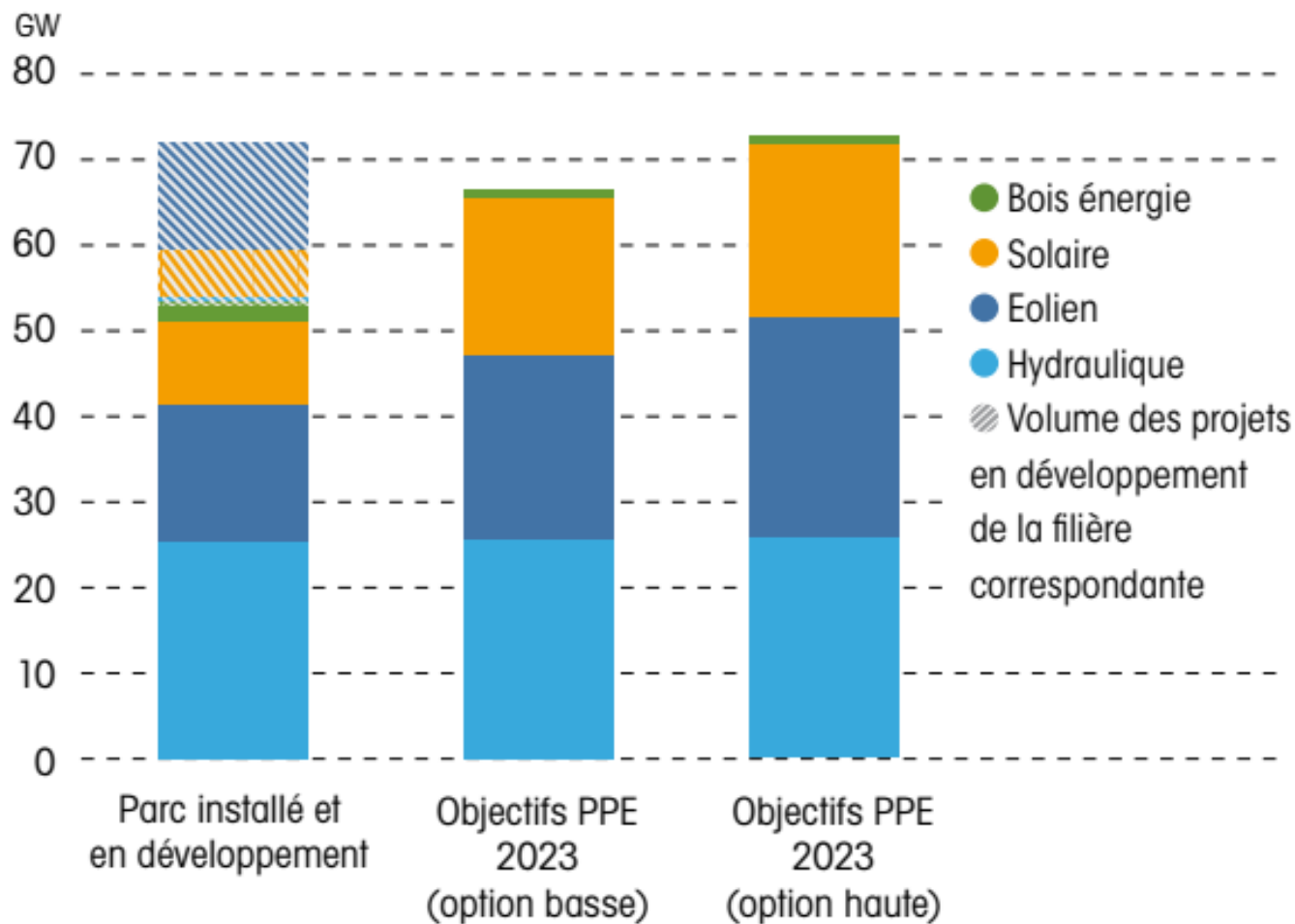
Bilan énergétique (Source : RTE)

2020



Puissance installée en France (RTE)

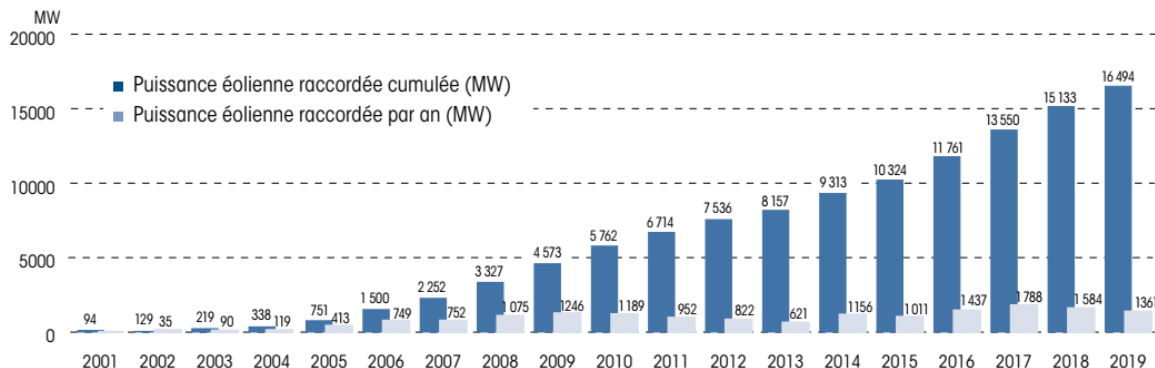
Puissance installée et projets en développement, objectifs PPE 2023



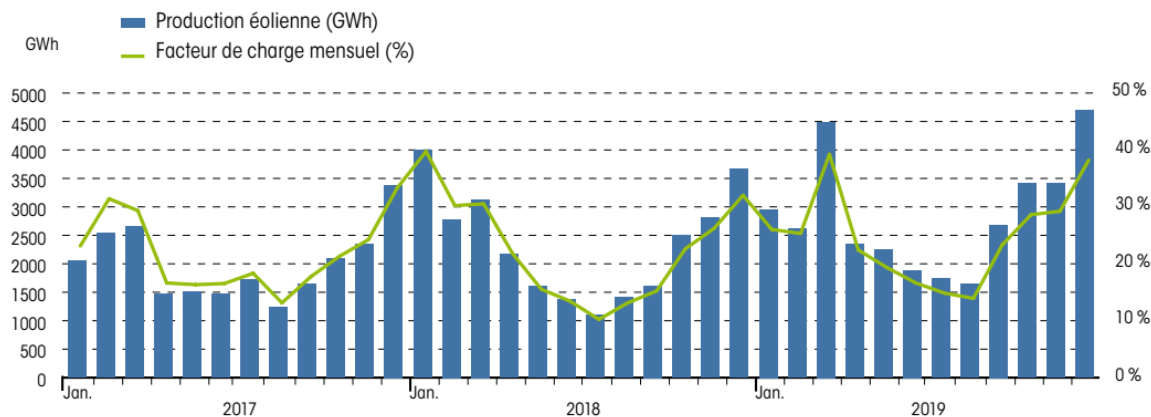
L'éolien en France

Source : Syndicat des Energies Renouvelables - France Energie Eolienne

Évolution de la puissance éolienne raccordée (MW)



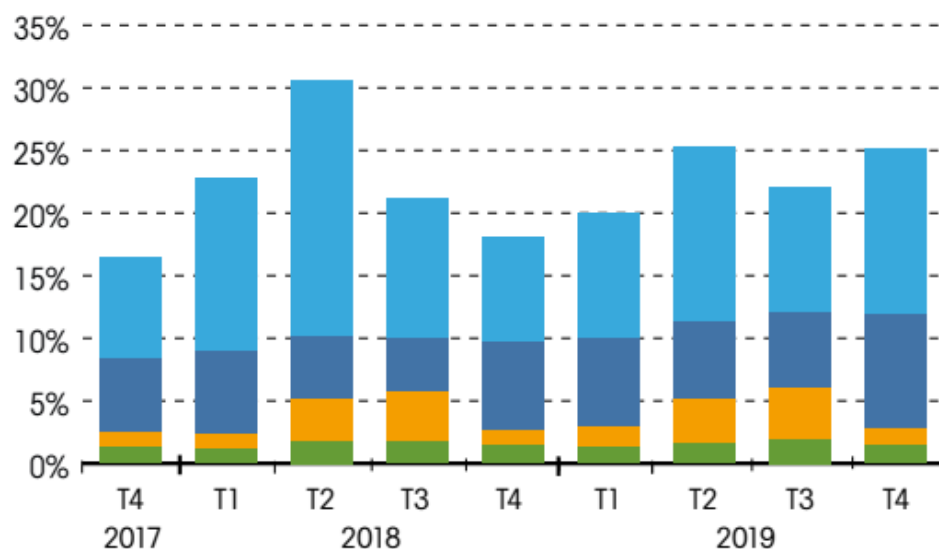
Production éolienne (GWh) et facteur de charge mensuel (%)



Le facteur de charge ou facteur d'utilisation d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période

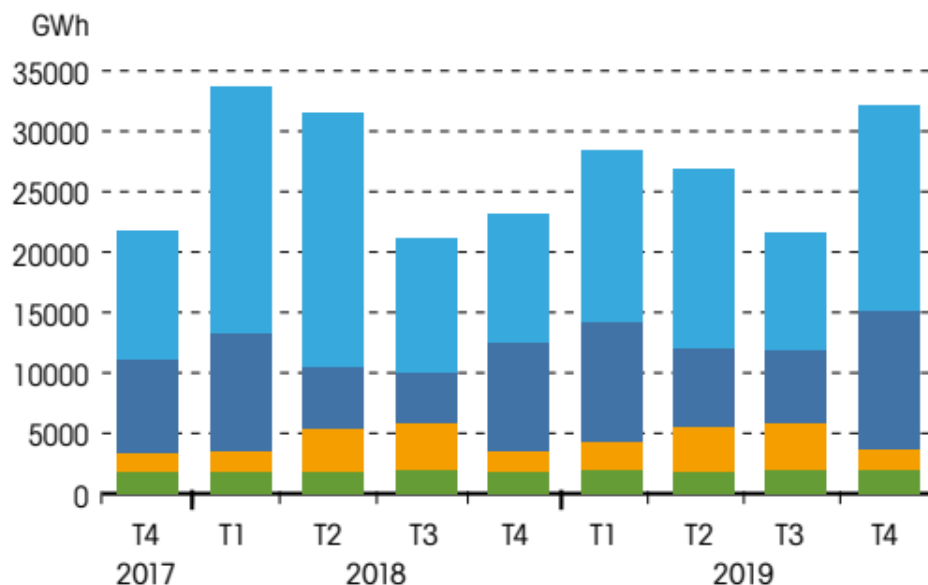
Couverture trimestrielle de la consommation par la production renouvelable

Bioénergies Solaire Éolien Hydraulique



Production renouvelable trimestrielle

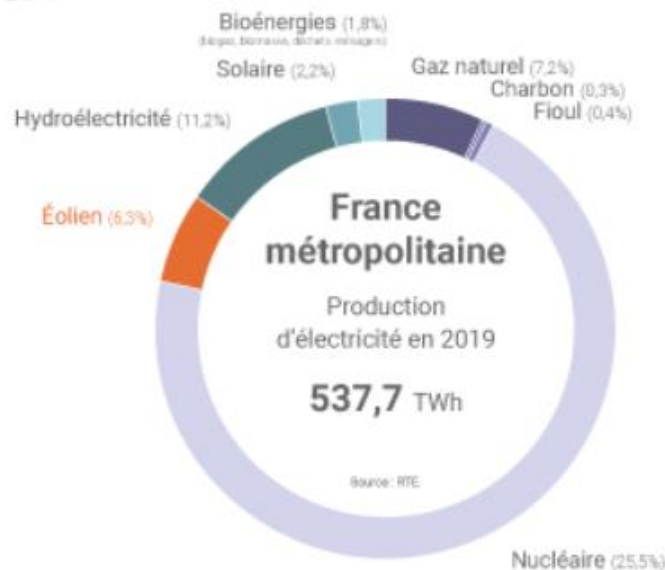
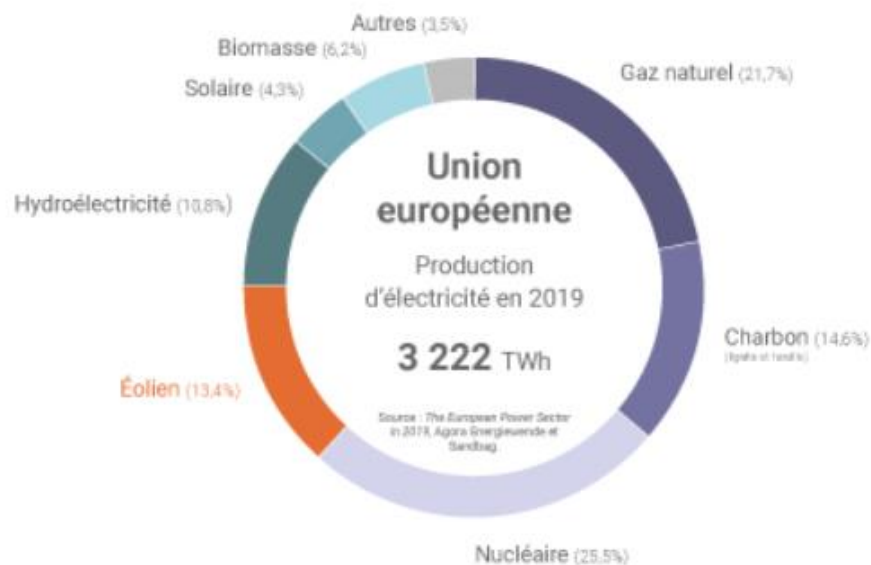
Bioénergies Solaire Éolien Hydraulique



L'éolien en Europe

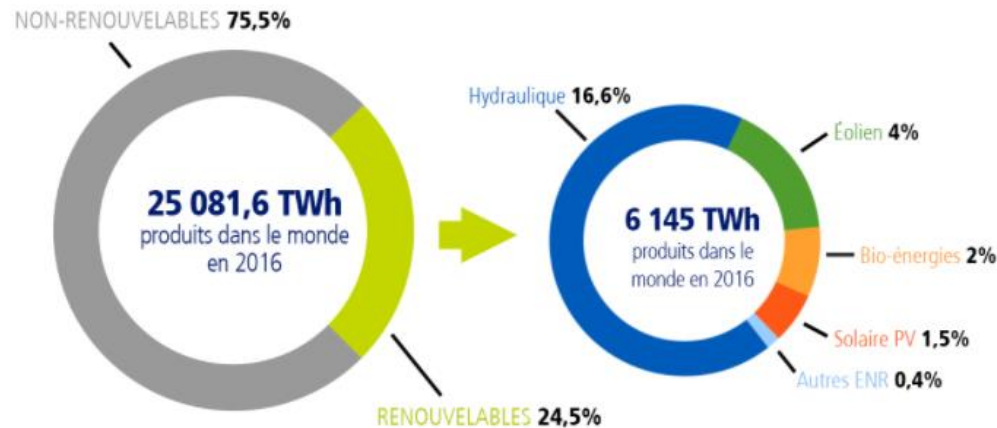
Source : Connaissance des énergies

Éolien Part dans le mix électrique de l'UE et de la France métropolitaine en 2019



L'éolien est la 4^e source d'électricité dans l'Union européenne, comme en France métropolitaine. (©Connaissance des Énergies, d'après GWEC)

L'éolien dans le monde



Part des renouvelables dans la production mondiale d'électricité en 2016

Source REN21 - 2017

© EDF

Monde Évolution des nouvelles capacités éoliennes installées



Source : GWEC Market Intelligence

Caractérisation : rose des vents



MÉTÉO FRANCE

ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Du 01 JANVIER 1974 au 31 DÉCEMBRE 2003

Connaître la source d'énergie : le vent

- La rose des vents
- La distribution des vitesses
- La dépendance en fonction de l'altitude

BEAUVAIS-TILLE (60)

Indicatif : 60630001, alt : 106 m., lat : 49°27'30"N, lon : 02°06'48"E

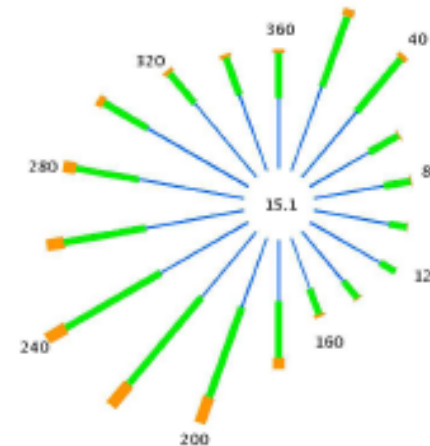
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs horaires entre 0 et 21 heure UTC

Tableau de répartition

Nombre de cas étudiés : 67503

Nanquants : 153



Dir.	[1.5,4.5]	[4.5,8.0]	> 8.0 m/s	Total
00	2.9	2.4	0.3	5.6
40	2.9	2.2	0.2	5.1
80	2.2	1.1	+	3.3
90	2.3	0.9	+	3.2
100	2.5	0.6	+	3.1
120	2.6	0.6	+	3.2
140	2.1	0.7	+	2.8
160	1.7	0.6	+	2.7
180	2.0	1.9	0.4	4.2
200	2.4	3.1	0.9	6.4
220	2.9	3.7	0.9	7.3
240	3.3	3.5	0.7	7.5
260	3.2	2.7	0.6	6.5
280	3.4	2.1	0.4	5.9
300	3.9	1.6	0.2	5.6
320	3.1	1.3	0.1	4.5
340	2.6	1.3	0.1	4.0
360	2.3	1.4	0.1	3.9
Total	47.6	31.0	5.2	84.9
[6:15]				15.1

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction

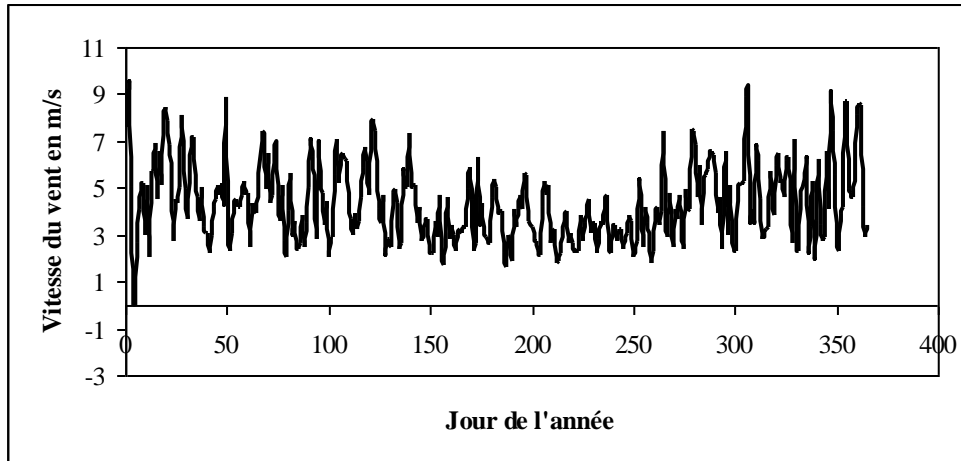


Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord
le signe + indique une fréquence non nulle mais inférieure à 0.1%

Distribution des vents

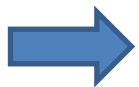
C'est l'histogramme des vitesses de vent sur une durée donnée.

En général, mesures effectuées à la **hauteur de 10m** et **moyennées sur 10mn**

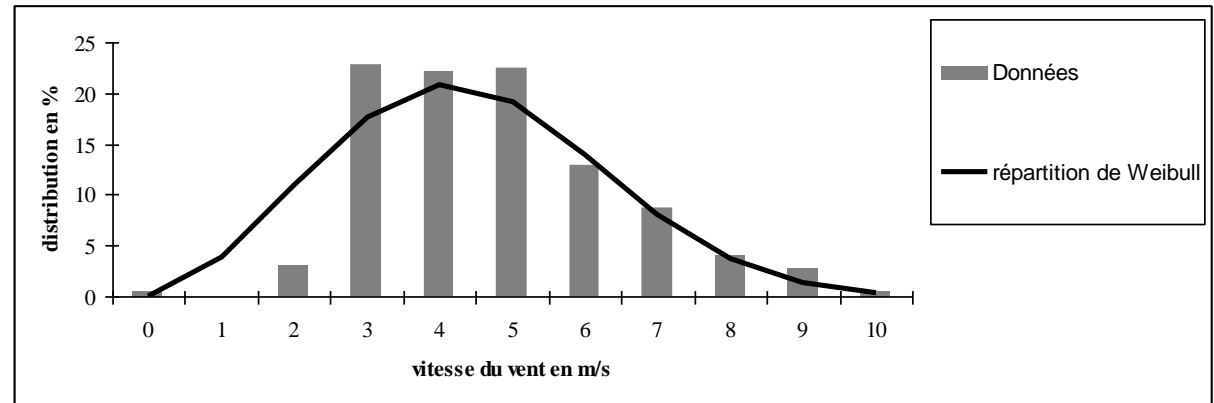


Relevé de vitesse en fonction du temps sur un site donné

Rem : Courbe difficilement exploitable



On lui préfère un **histogramme représentant la fréquence d'apparition des vents à une vitesse donnée.**



Histogramme des vitesses de vent

Weibull : distribution la plus appropriée

$$f(V) = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C} \right)^k}$$

Caractérisée par deux paramètres :

C : facteur d'échelle en m/s

k : un facteur de forme proche de 2 pour la plupart des sites

Rem : Pour $k = 2$, la distribution de Weibull s'identifie à une **distribution de Rayleigh**. Dans ces conditions le facteur d'échelle C est :

$$C = \frac{V_{\text{moy}}}{0,9}$$

Dépendance en fonction de l'altitude

Frottements avec la surface terrestre



la vitesse du vent varie en fonction de l'altitude.

Loi empirique :

$$\frac{V}{V_{\text{ref}}} = \left(\frac{H}{H_{\text{ref}}} \right)^{\alpha}$$

H : hauteur

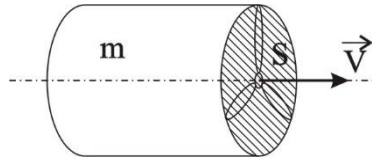
α : coefficient de rugosité du terrain.

Mer calme	$\alpha = 0,09$
prairie	$\alpha = 0,16$

Energie cinétique d'une colonne de vent

Energie cinétique d'une colonne de vent de masse m de vitesse V :

$$E_c = \frac{1}{2} m.V^2$$



Colonne de vent

Hyp : la vitesse de cette colonne est nulle en sortie de l'éolienne



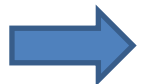
Energie élémentaire récupérable pendant dt ,

$$dE_c = \frac{1}{2} dm.V^2$$

dm représente la masse ayant traversé la surface S pendant dt .

$$dm = \rho.S.V.dt$$

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$: Masse volumique de l'air dans des conditions normales de P et T



$$dE_c = \frac{1}{2} \rho.S.V^3.dt$$



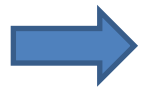
$$P_{Ec} = \frac{1}{2} \rho.S.V^3$$

Potentiel éolien d'un site

Principe de calcul de la **contribution pour chaque vitesse de vent** à l'énergie cinétique sur un an :

- Un vent de 5m/s **souffle 22% du temps** soit $0,22 \cdot 365 \cdot 24 = 1927$ h / an

- Puissance par unité de surface $\frac{P_{Ec}}{S} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 = 76,5$ W / m²



Contribution de cette vitesse à l'énergie :

$$\left(\frac{W_{Ec}}{S} \right)_{V=5m/s} = 76,5 \cdot 1927 = 150 \text{ kW.h / m}^2$$

Energie théorique sur un an et par unité de surface=
sommer les contributions des différentes vitesses.

$$\frac{W_{Ec}}{S} = 821 \text{ kW.h / m}^2 / \text{an}$$

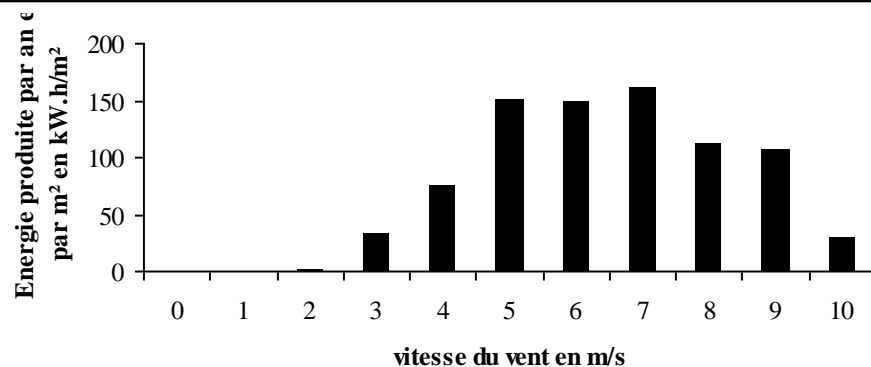
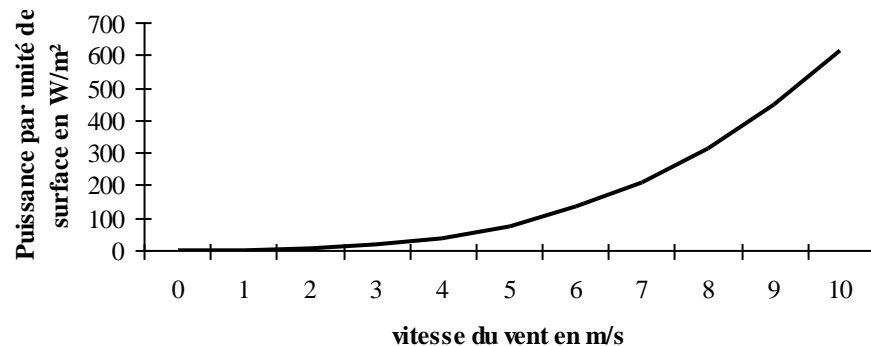
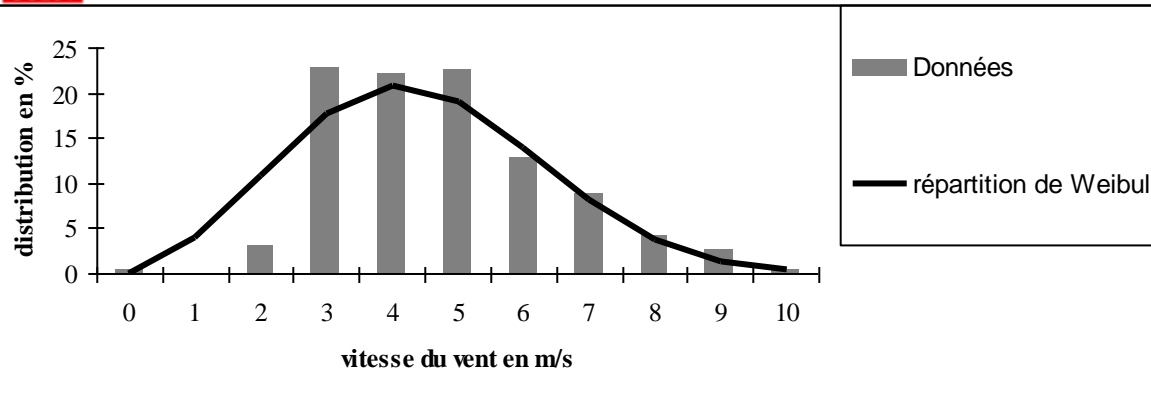


Eolienne balayant une surface de 100 m² (11m de diamètre)

$$W_{Ec} = 82100 \text{ kW.h / an}$$

Rem : Comme le montreront les chapitres suivants, l'énergie convertie sera beaucoup plus faible et représentera environ **50% de l'énergie du vent.**

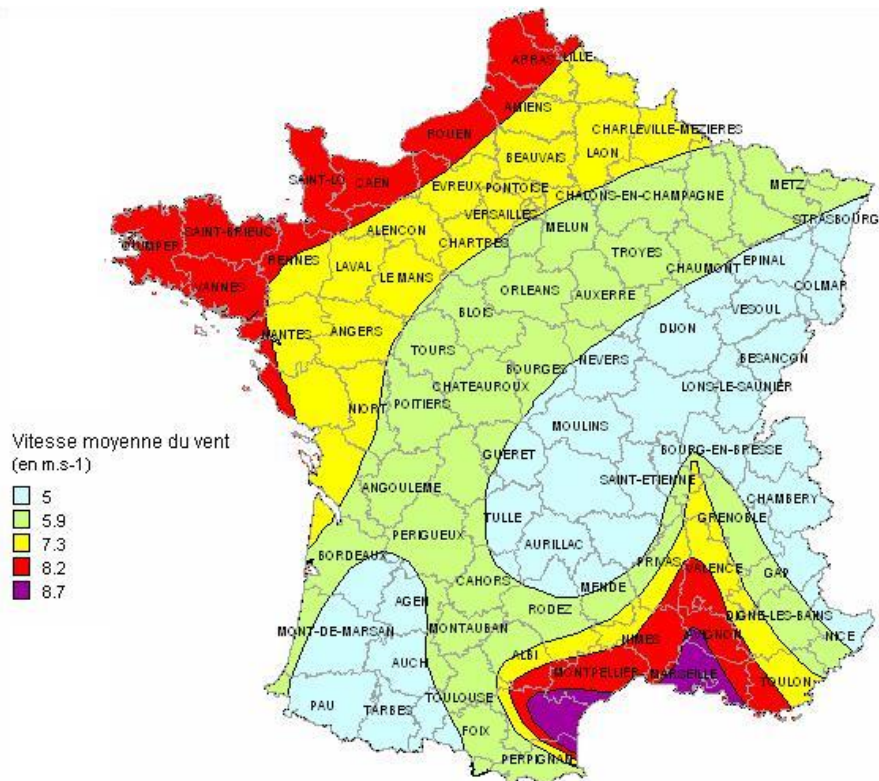
Potentiel éolien d'un site



Remarques:

- **Optimiser la conversion pour les vitesses dont la contribution à l'énergie est la plus grande.**
- Vitesses élevées, fréquence d'apparition faible, il ne sera **pas intéressant de dimensionner les éoliennes pour ces vitesses.**

Potentiel éolien en France



Potentiel éolien et implantation des éoliennes. Source : windpower.org

Différents types de turbines

- **Turbines à axe vertical**



Rotor de Darrieus



Rotor de Savonius



Grandes éoliennes de type Darrieus (4MW installée au Québec) : **abandonnées au profit des éoliennes à axe horizontal** qui ont un meilleur rendement.

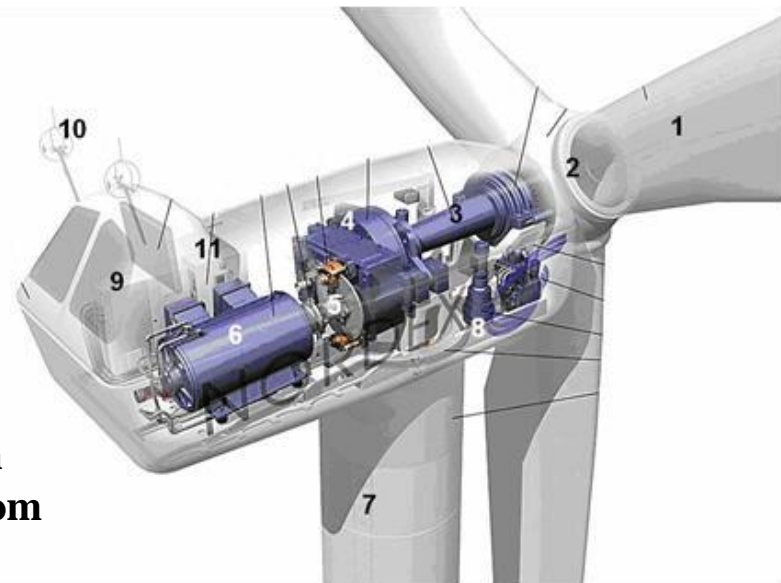
Par contre, elles sont proposées en **faible puissance pour équiper des habitations individuelles**.

Différents types de turbines

- **Les turbines à axe horizontal**



Eolienne Enercon
Source : enercon.com

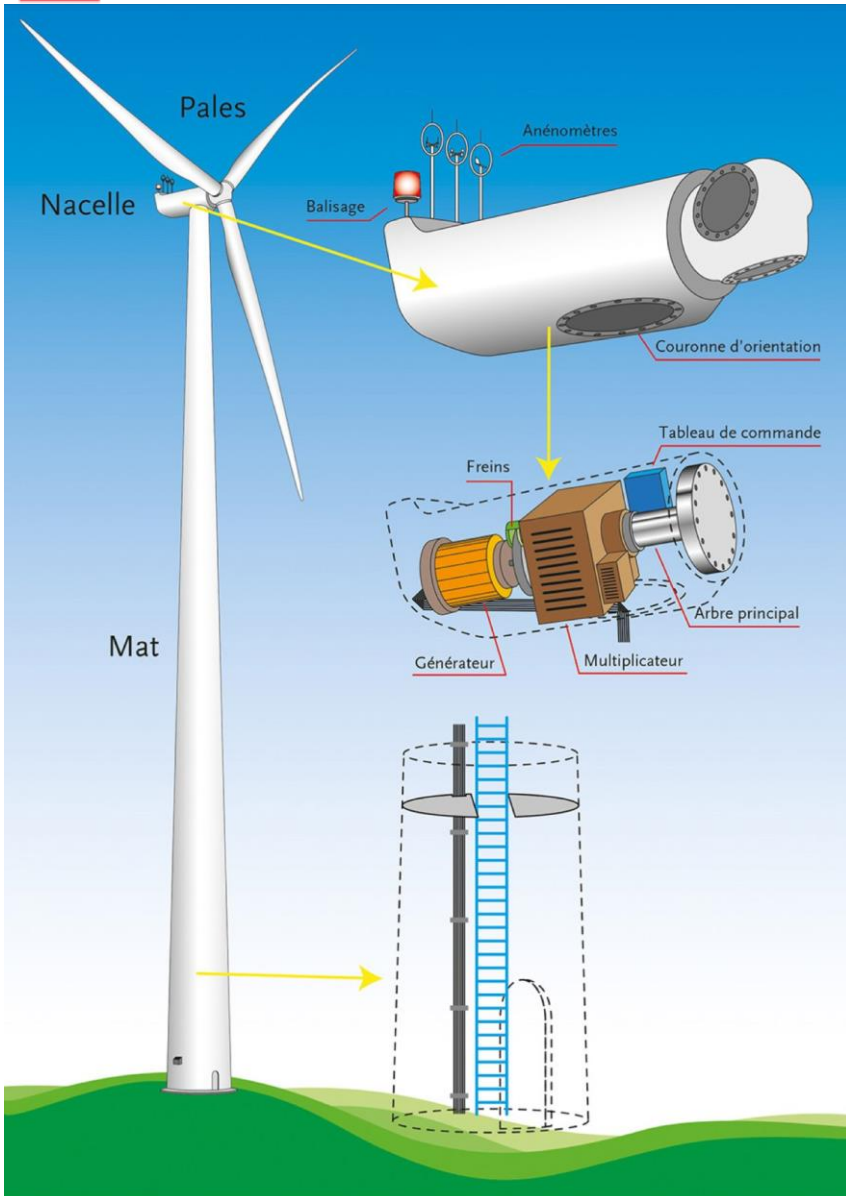


Constitution

- 1.Pales** : capteurs de l'énergie cinétique. En fibres de verre et matériaux composites. Profil fruit d'études aérodynamiques complexes.
- 2.Moyeu** : Pourvu d'un système qui permet d'**orienter les pales** pour réguler la vitesse de rotation.
- 3.Arbre primaire** (ou arbre lent) : **relie** les pales au multiplicateur.
- 4.Multiplicateur** : **réduit le couple** et **augmente la vitesse**. Intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- 5.Arbre secondaire** : **amène l'énergie mécanique** à la génératrice. **Equippé d'un frein à disque mécanique**.
- 6.Générateur électrique** : Production électrique (jusqu'à 5 MW). **dynamo** (CC) ou **alternateur** (AC).
- 7.Mât** : **tube en acier, pilier de toute l'infrastructure**. Plus **hauteur** importante, plus la vitesse du vent augmente.
- 8.Système d'orientation de la nacelle** : **couronne dentée équipée d'un moteur** permet d'**orienter** l'éolienne et de la **verrouiller dans l'axe du vent**
- 9.Système de refroidissement** : à air, à eau ou à huile et **destiné au multiplicateur et à la génératrice**.
- 10.Outils de mesure du vent** : girouette pour la **direction** et anémomètres pour la **vitesse**.
- 11.Système de contrôle électronique** : il **gère** le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- 12.**Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

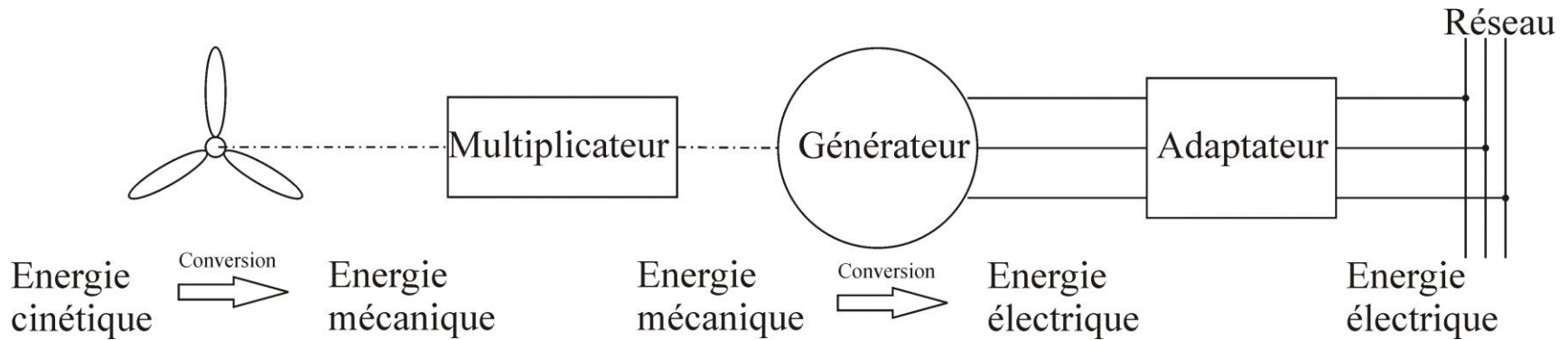
https://www.youtube.com/watch?v=5Cs_U8DncMU

Différents types de turbines



Conversions dans une éolienne à axe vertical

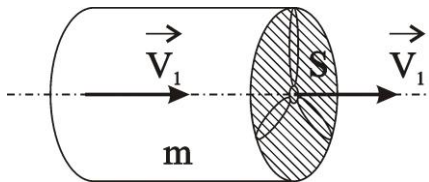
• Les turbines à axe horizontal



Différentes conversions

Conversion énergie cinétique, énergie mécanique

• Limite de Betz



$$P_{Ec} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Les particules constituant l'air ne pouvant disparaître en sortie de l'hélice, il y aura une **limite à cette puissance**

Albert Betz (1919) a démontré, en supposant l'écoulement d'air incompressible, que le transfert était limité à :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_{Ec}$$

Pour une hélice donnée, la puissance mécanique peut s'écrire :

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho S V^3 \right)$$

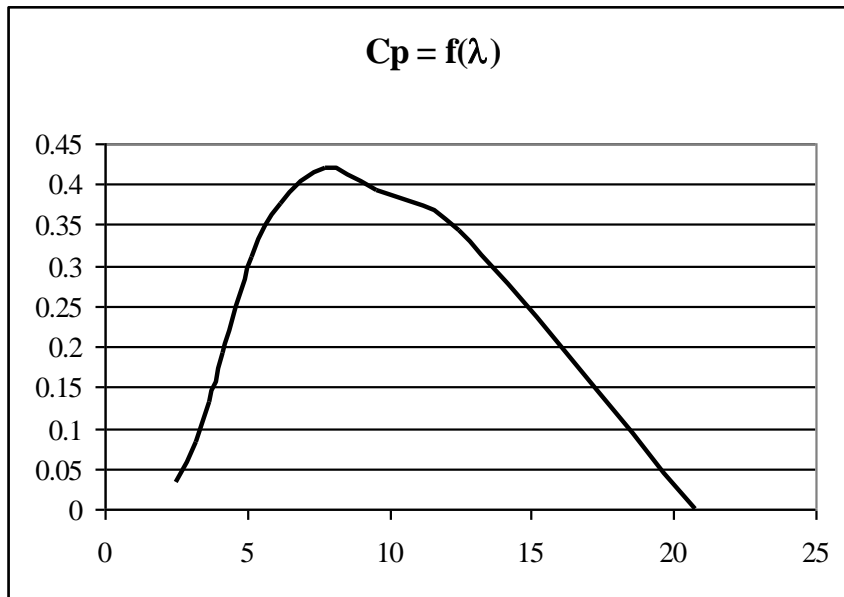
C_p représente le coefficient de puissance.

Ce coefficient est **fonction de deux paramètres** :

- Vitesse spécifique
- Angle de calage

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V}$$

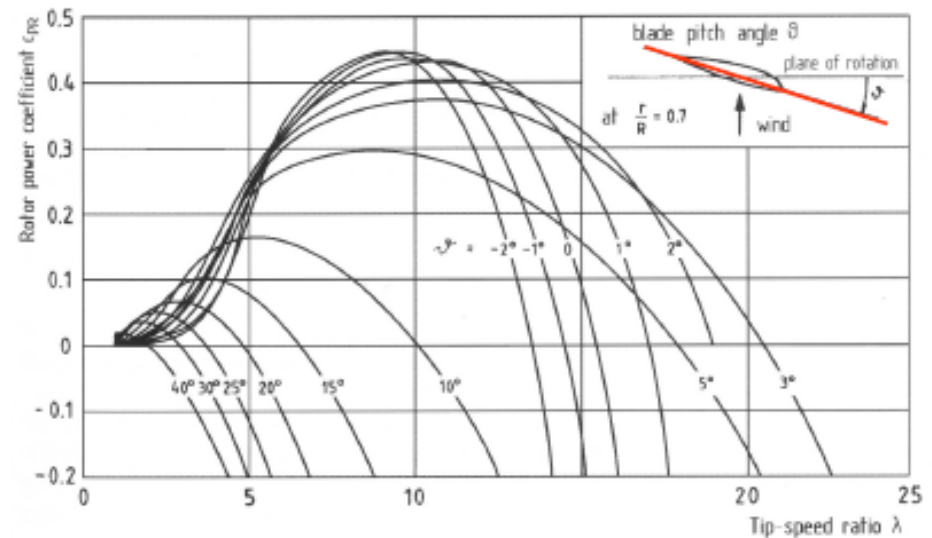
$$\beta_0$$



Evolution du coefficient de puissance pour une hélice d'éolienne Bonus de 600kW

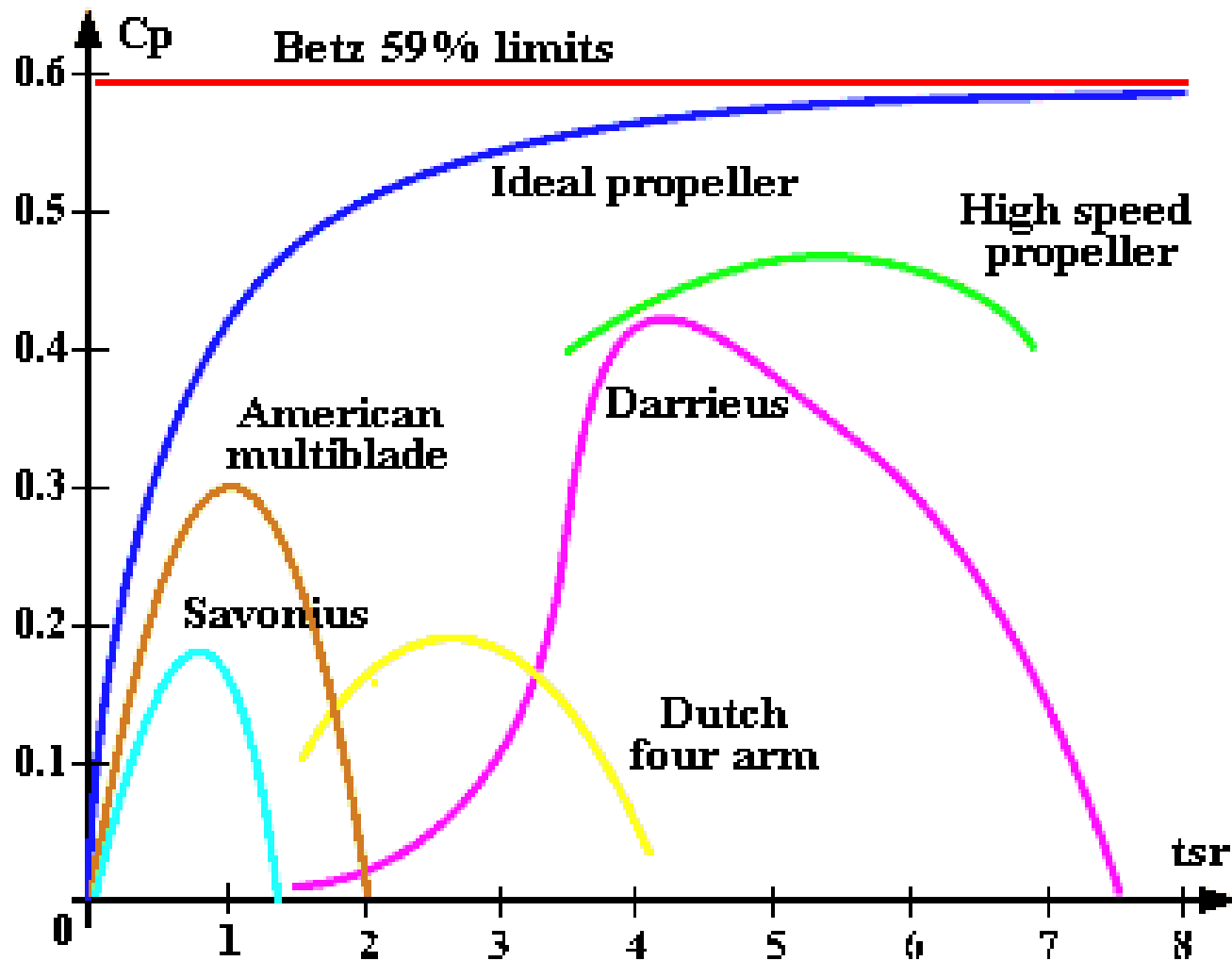
La **valeur maximale théorique de ce coefficient** est donnée par la **relation de Betz**

$$C_{p\max} = \frac{16}{27} = 0,593$$



Evolution du coefficient de puissance pour différents angles de calage [9]

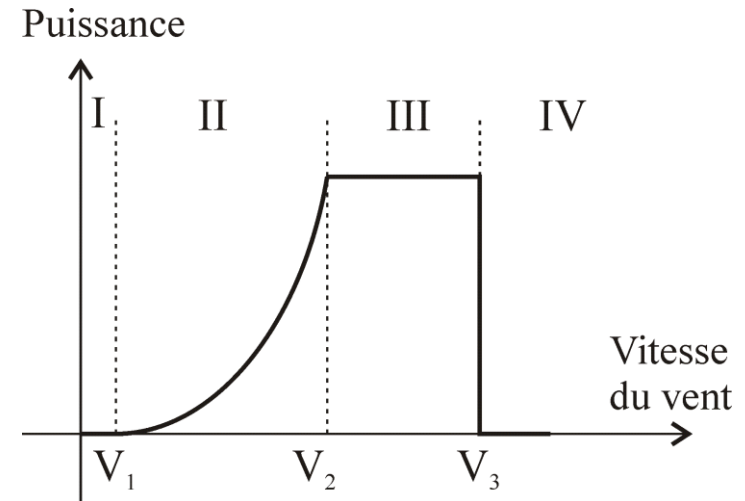
Comparaison des différents types de turbines



Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique [9]

Réglage de la conversion

Courbe type de puissance d'une éolienne



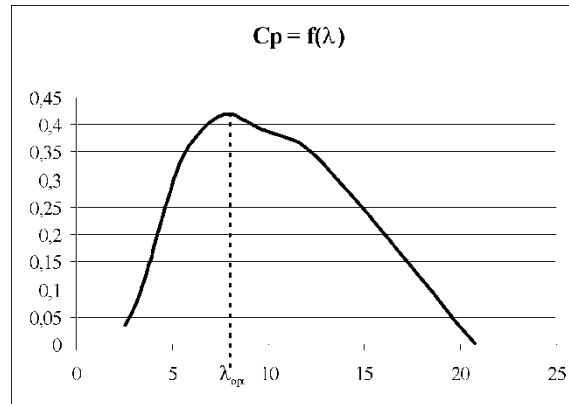
Zone 1 $V < V_1$ (3 à 4 m/s).
vent trop faible pour récupérer de l'énergie

Zone 2 $V_1 < V < V_2$ ($V_2 = 12\text{m/s}$ environ)

On cherche dans cette zone à optimiser la conversion d'énergie
par action sur :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\beta_0, \lambda) \rho \cdot S \cdot V^3$$

- **L'angle de calage** β_0 ➡ dispositif **d'orientation des pales**
- La **vitesse spécifique** λ : modifier la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent pour travailler à l'optimum de conversion
➡ aérogénérateur à **vitesse réglable**.



$$\Omega = \frac{V}{R \cdot \lambda_{opt}}$$

Point de fonctionnement optimum

Zone 3. $v_2 < v < v_3$ ($V_3 = 25$ m/s 90km/h environ)

On cherche à écrêter la puissance afin de ne pas surdimensionner l'éolienne (ces vitesses ont une fréquence annuelle faible)

Cette limitation en puissance est obtenue de deux façons :

- **Décrochage aérodynamique passive (Passive stall)**

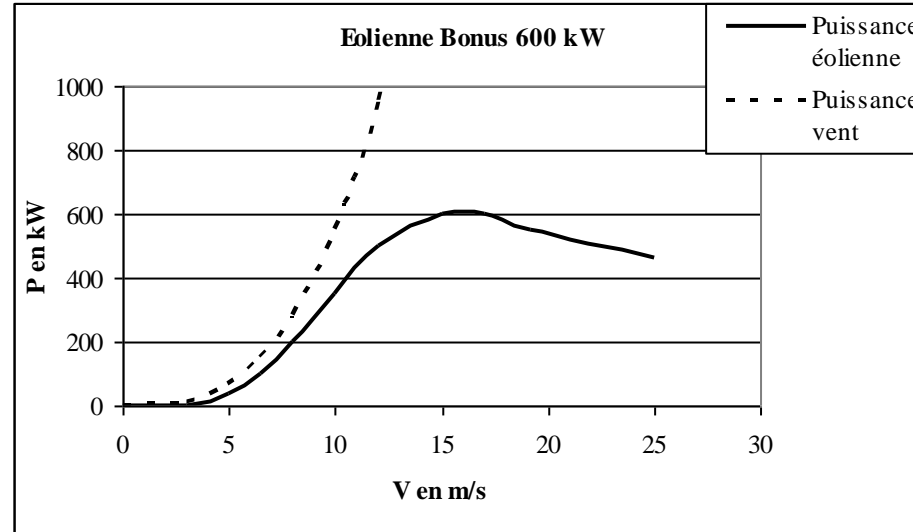
Réservée aux turbines où la vitesse de rotation est sensiblement constante.

- Par **contrôle de l'angle de calage (Pitch control)**

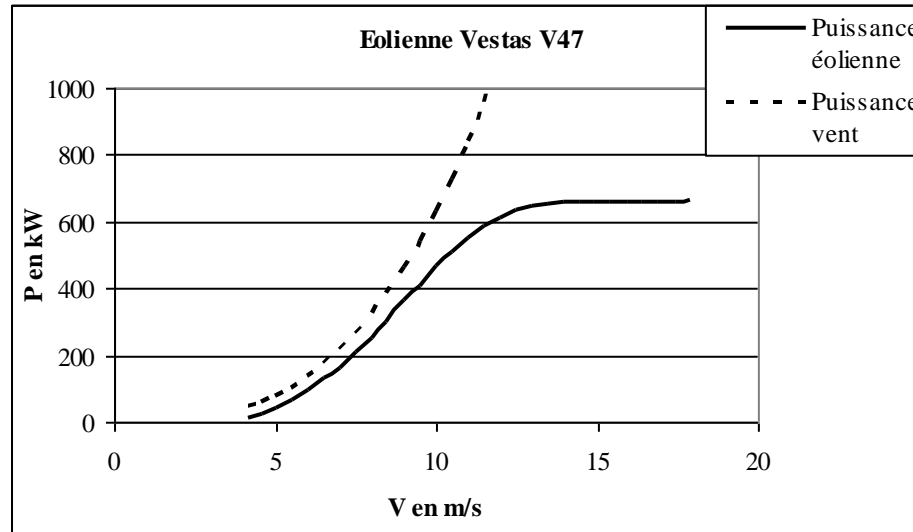
Zone 4 Au dessus de la vitesse V_3 , la machine est parquée.

Les pales sont mises en drapeau et le rotor est arrêté par un **frein en général mécanique**

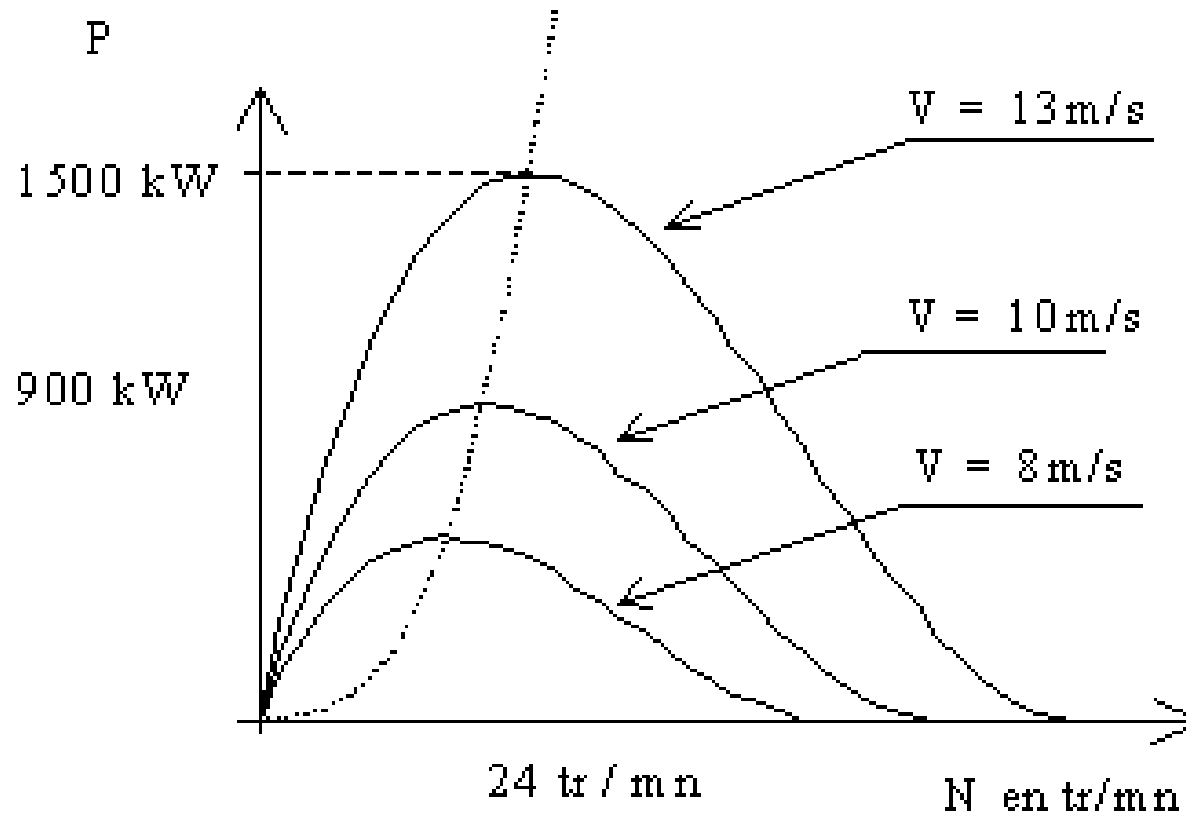
Exemples de caractéristiques



Courbe de puissance d'une éolienne à décrochage aérodynamique



Courbe de puissance d'une éolienne avec contrôle de l'angle de calage

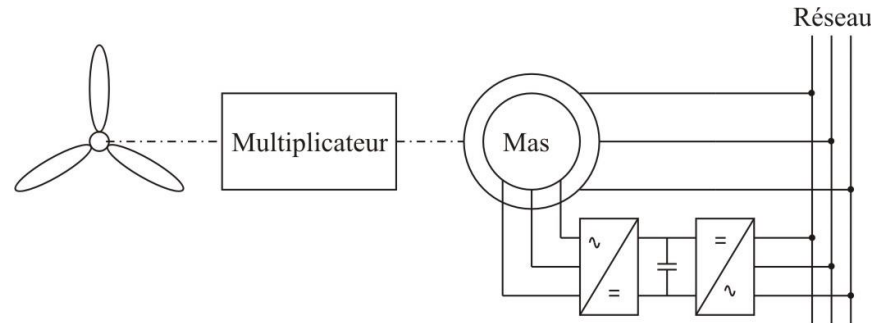


Courbe de puissance d'une éolienne

Générateurs à vitesse de rotation réglable

MADA : La vitesse est réglable par action sur la pulsation des courants rotoriques

$$\Omega = \frac{1}{p} (\omega_{\text{res}} - \omega_r)$$



Génératrice MADA

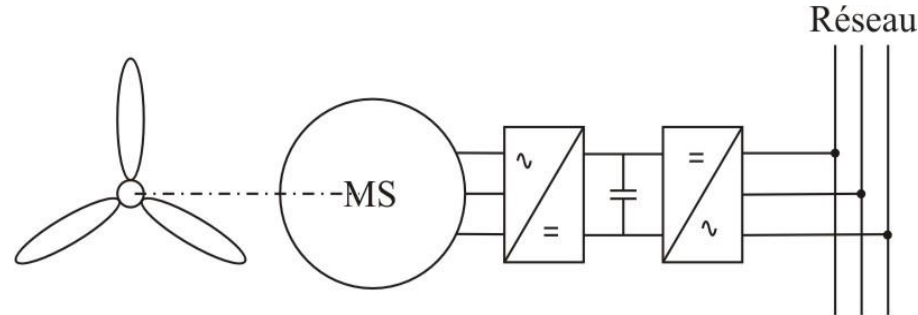
VESTAS V52-850 kW [17]	
Rotor Diamètre : 52m Surface balayée : 2124 m ² Fréquence de rotation : de 14 à 31.4 tr/mn Vitesse nominale de vent : 16 m/s Vitesse de vent de coupure : 25m/s Vitesse de vent de démarrage : 4 m/s Régulation de puissance : variation de vitesse et orientation des pales Multiplicateur Rapport de multiplication : 57.7	Génératrice Type : asynchrone à rotor bobiné tétrapolaire Puissance nominale : 850 kW Fréquence de rotation : de 807 à 1811 tr/mn Tension nominale : 690 V Fréquence : 50 Hz Convertisseurs Onduleur de tension, redresseur de courant à IGBT

Générateurs à vitesse de rotation réglable

Machine synchrone

La vitesse est réglable par action sur le convertisseur de fréquence

$$\Omega = \frac{\omega_s}{p}$$

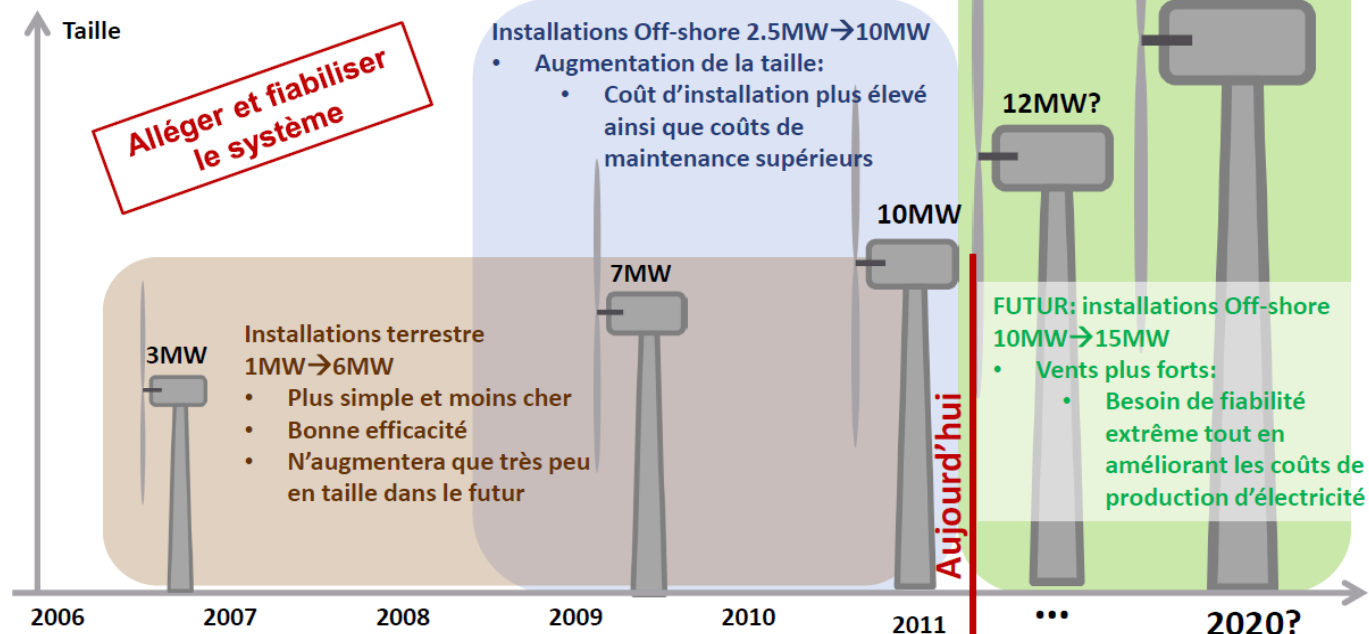


Génératrice synchrone

JEUMONT J48 [x]	
Rotor	Génératrice
Diamètre : 48 m	Type : synchrone discoïde à aimants permanents
Surface balayée : 1809 m ²	Puissance nominale : 750 kW
Fréquence de rotation : de 0 à 25 tr/mn	Fréquence de rotation : de 0 à 25 tr/mn
Vitesse nominale de vent : 13.5 m/s	Tension nominale : 875 V
Vitesse de vent de coupure : 25 m/s	Convertisseurs
Vitesse de vent de démarrage : 3 m/s	Onduleur de tension, redresseur de courant à IGBT
Régulation de puissance : variation de vitesse et orientation des pales	
Multiplicateur	
Attaque directe	

La puissance dans l'éolien

- Forte tendance à augmenter la taille et la puissance des turbines pour une meilleur efficacité et une réduction du prix de l'énergie générée (\$/MWh).

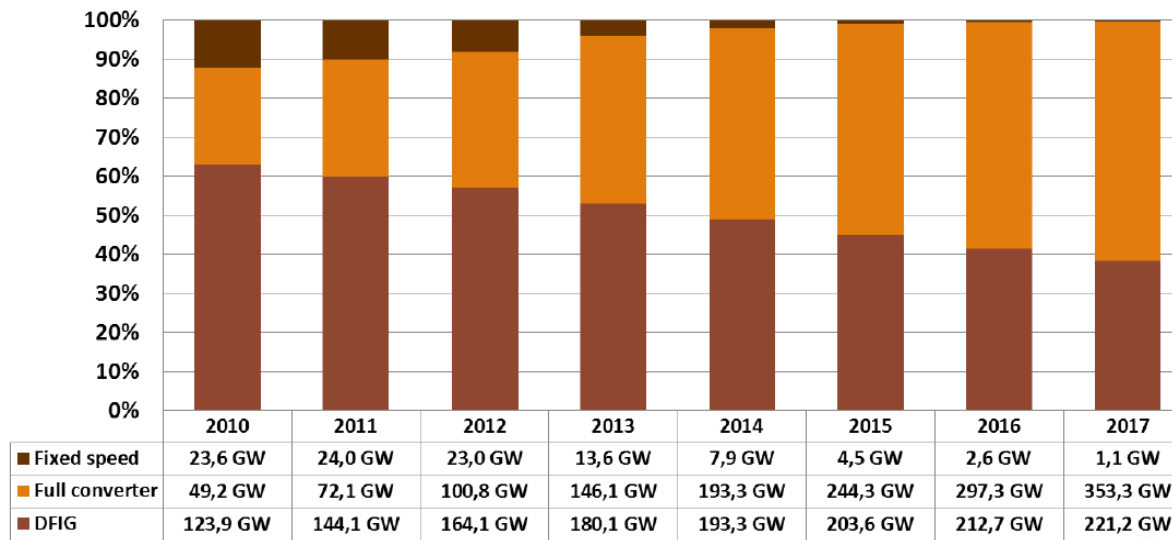


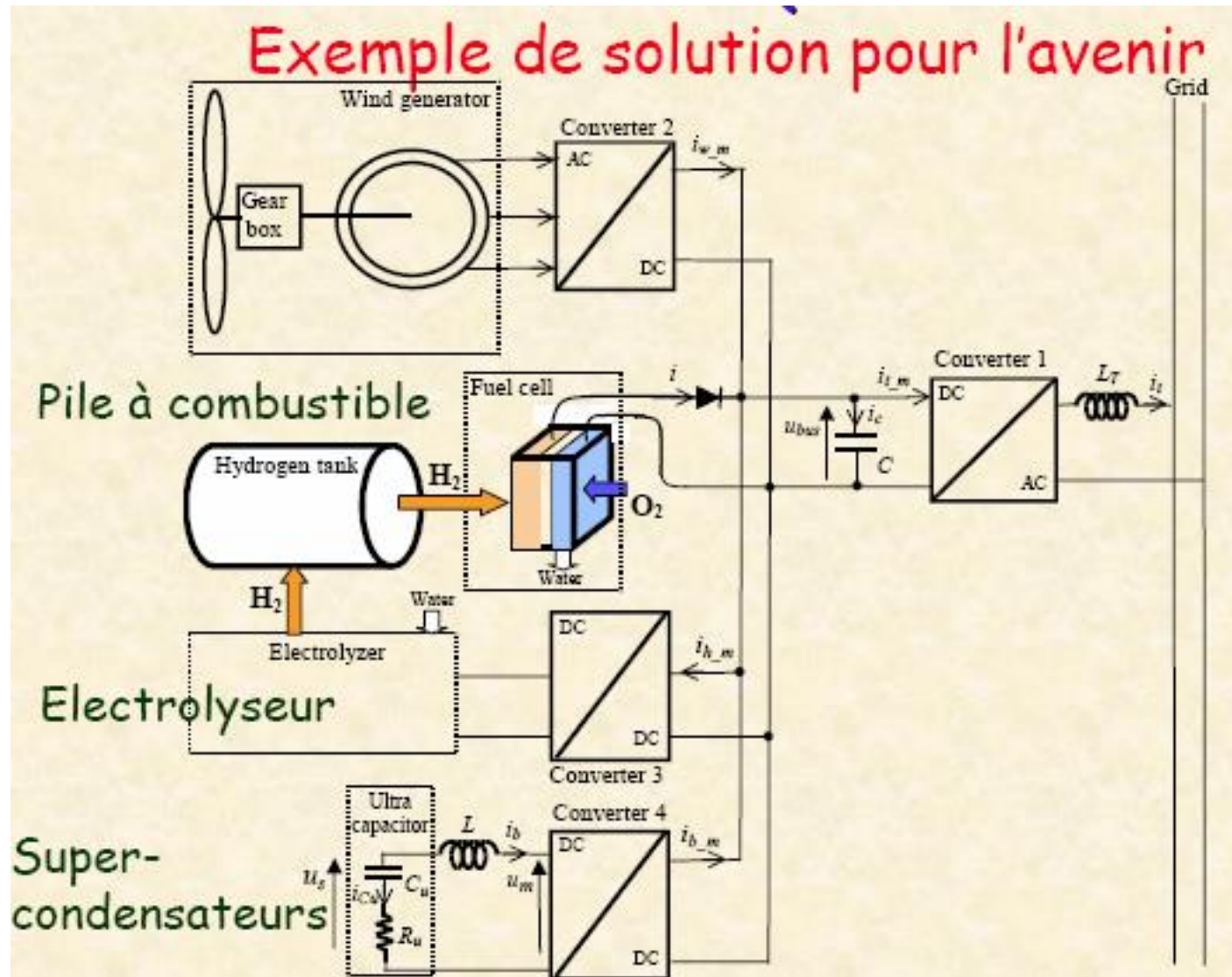
Tendances d'évolution des architectures d'éoliennes



- En 2012, les topologies à vitesse variable de type DFIG sont passées sous la barre des 60% des nouvelles installations. Il est prévu que les architectures à vitesse fixe disparaissent progressivement au profit des configuration de type « Full »

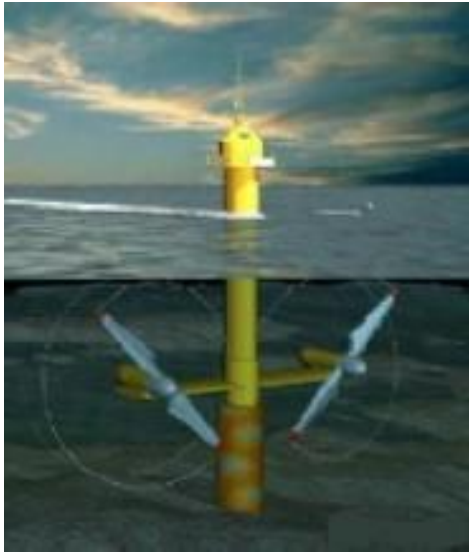
Wind converters total capacity split by architecture





Les hydroliennes

L'exploitation de l'énergie maritime n'a rien d'une nouveauté. Mais les usines marémotrices, comme celle de la Rance en France (240 MW) s'apparentent à des barrages. Situées en pleine mer, les hydroliennes, véritables « **éoliennes sous-marines** », ne retiennent pas l'eau et exploitent des **marées inépuisables et prévisibles**. Elles sont aussi largement plus discrètes que les éoliennes, même si leurs **effets sur les fonds marins sont encore inconnus**.



Exemples d'hydroliennes

La **puissance mécanique d'une hydrolienne** est donnée par la **même expression qu'une éolienne**

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

C_p ; coefficient de puissance, $C_{p\max} = 0,59$ (limite de Betz)

ρ : densité de l'eau

$$\rho = 1000 \text{ kg / m}^3$$

V : vitesse des courants marins en m/s

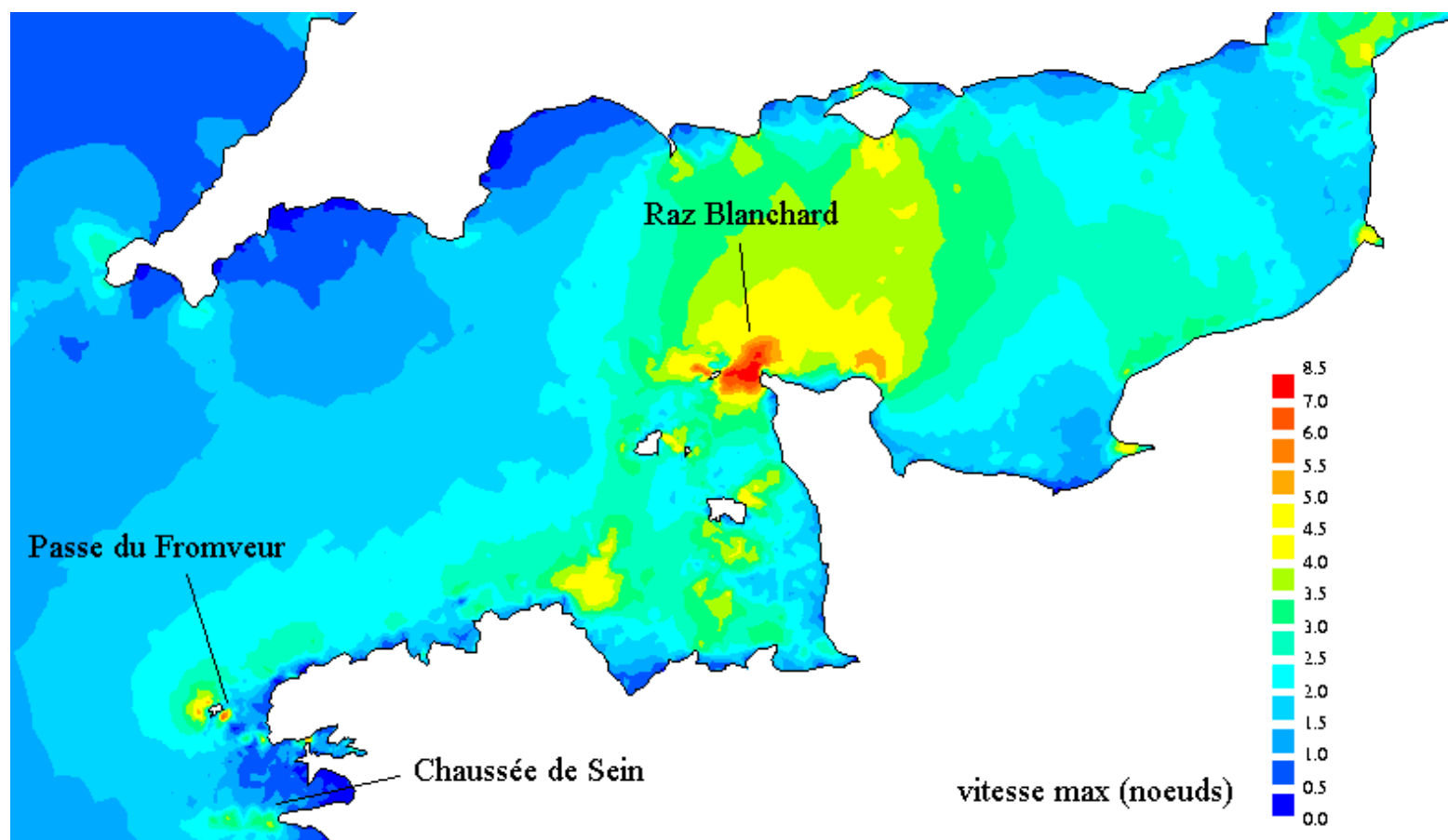
Rem : **Au large de la Bretagne**, les courants peuvent atteindre des vitesses maximales de **10 nœuds (raz Blanchard) soit 5,1 m/s** (1 nœud correspond à 1 mille par heure soit 1,852 km/h ou 0,51 m/s).

Dans ces conditions, la puissance maximale (limite de Betz et $V = 10$ nœuds) par unité de surface vaut :

$$P_{\max} = 40 \text{ kW / m}^2$$

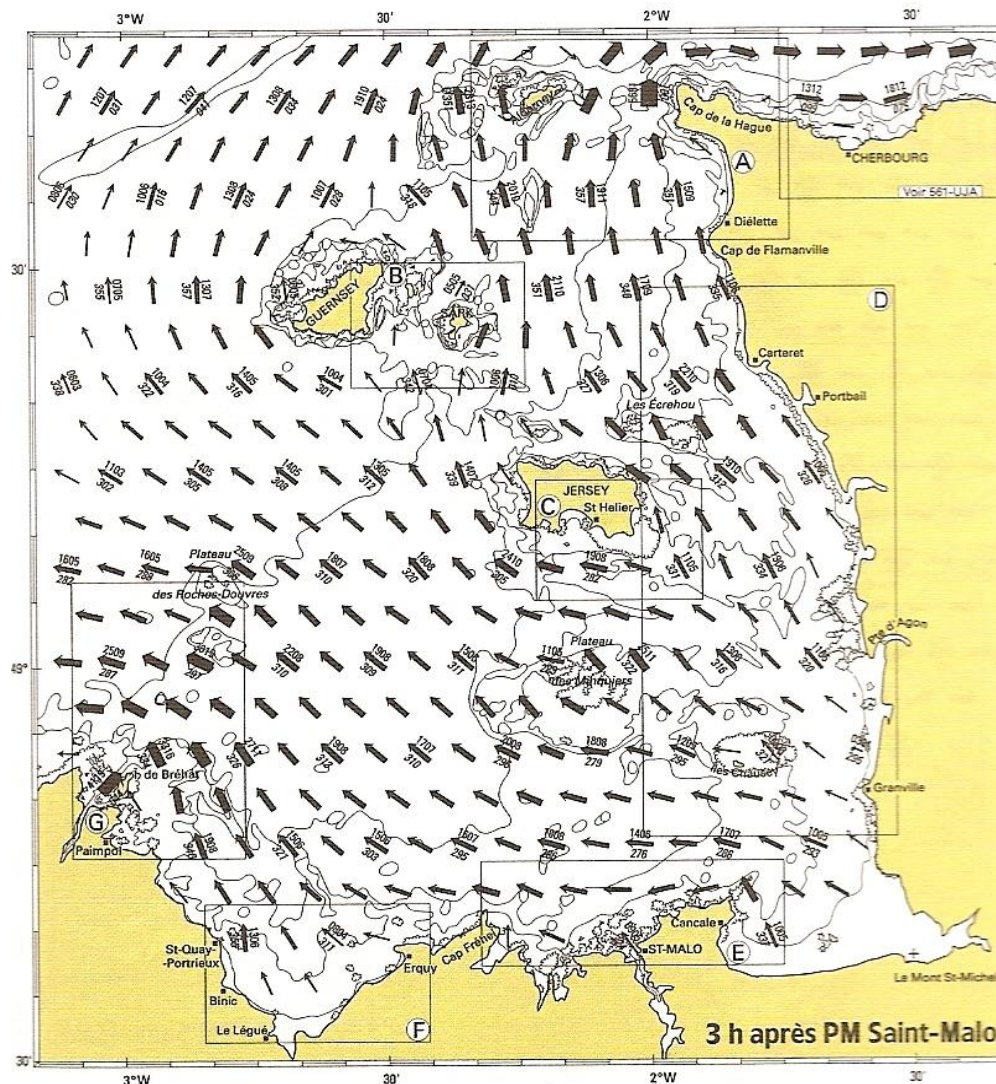
Pour une éolienne avec un vent de 25 m/s, la puissance maximum est de

$$P_{\max} = 5,6 \text{ kW / m}^2$$



Vitesse des courants marins sur la cote ouest

Contrairement aux vents, les **courants marins sont parfaitement prévisibles** et **ne dépendent que des coefficients de marée et de l'heure** par rapport à la pleine mer



Courants de marée 3h après la pleine mer à Saint-Malo. Source :Almanach du marin breton

ISEN

ALL IS DIGITAL!

OUEST



Réalisations

Guinard Energies

Hydrolienne P154

Diamètre: 150 cm

Puissance: 20 kW pour $V = 3$ m/s

GUINARD

ENERGIES

Hybrid System for Rural Electrification

Sabella

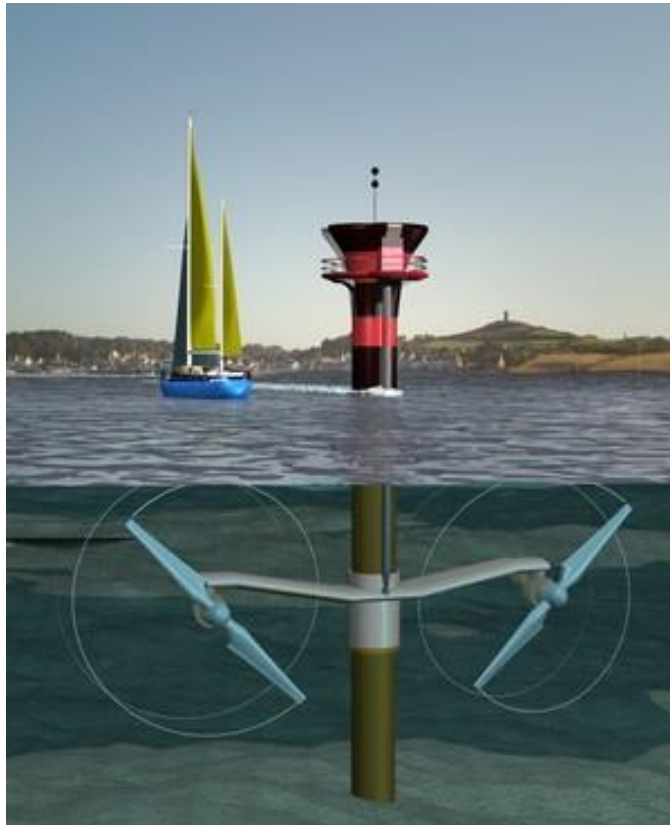
Hydrolienne D10

Diamètre: 10 m

Puissance: 1MW pour $V = 4$ m/s



D'autres hydroliennes sont également en phase de tests ou en **phase précommerciale en Europe** ; à commencer par la célèbre **Seagen** de la société britannique Marine Current Turbines, une hydrolienne de 1,2MW immergée au large de l'Irlande du Nord .



Hydrolienne de 1,2 MW immergée au large de l'Irlande. Source : www.marineturbines.com