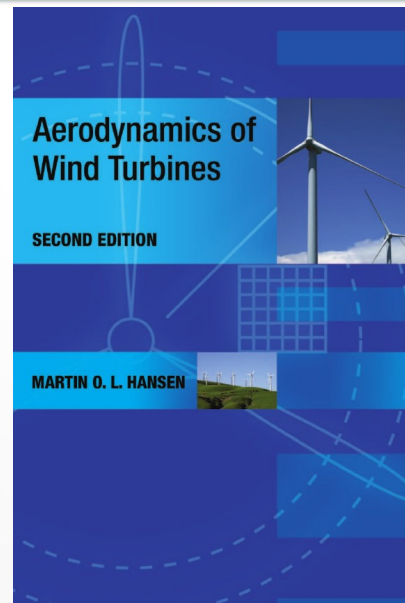
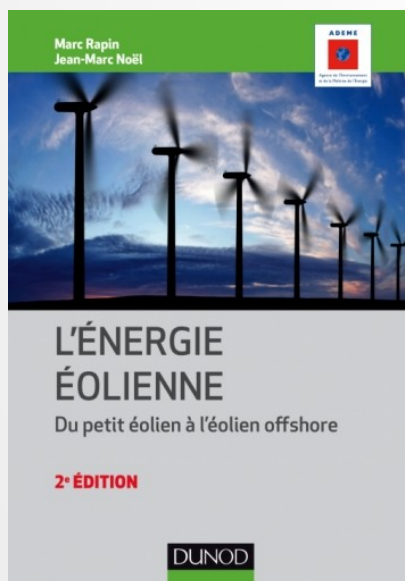


F. Ravelet
LIFSE
Arts et Metiers Institute of Technology

Cas d'étude Eoliennes des UEI semestre GIE2



D3900
D3960
BM4640
BE8400

Objectifs et organisation

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)

Projet :

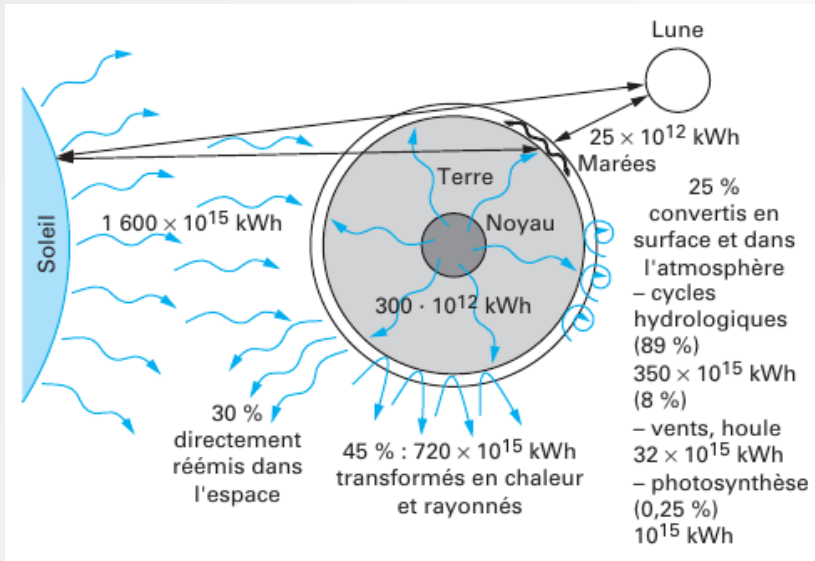
- 1) Dimensionnement d'une éolienne de 5 W avec 10 m/s de vent
- 2) CAO, impression 3D
- 3) Un TP de simulation numérique des écoulements
- 4) Essais en soufflerie

I) Eoliennes : vent, potentiel énergétique, évolution des concepts

Origines du vent

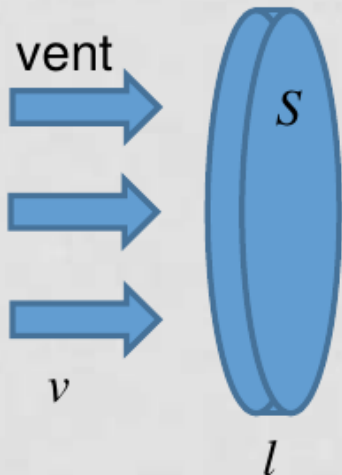
- L'énergie éolienne est une énergie solaire créée par le rayonnement solaire
- Elle résulte de la différence de rayonnement sur la surface de la terre en raison de:
 - Zones de jour et de nuit
 - Variation d'incidence par rapport à la surface de la terre
 - Différence de transparence de l'atmosphère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

Potentiel énergétique



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

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

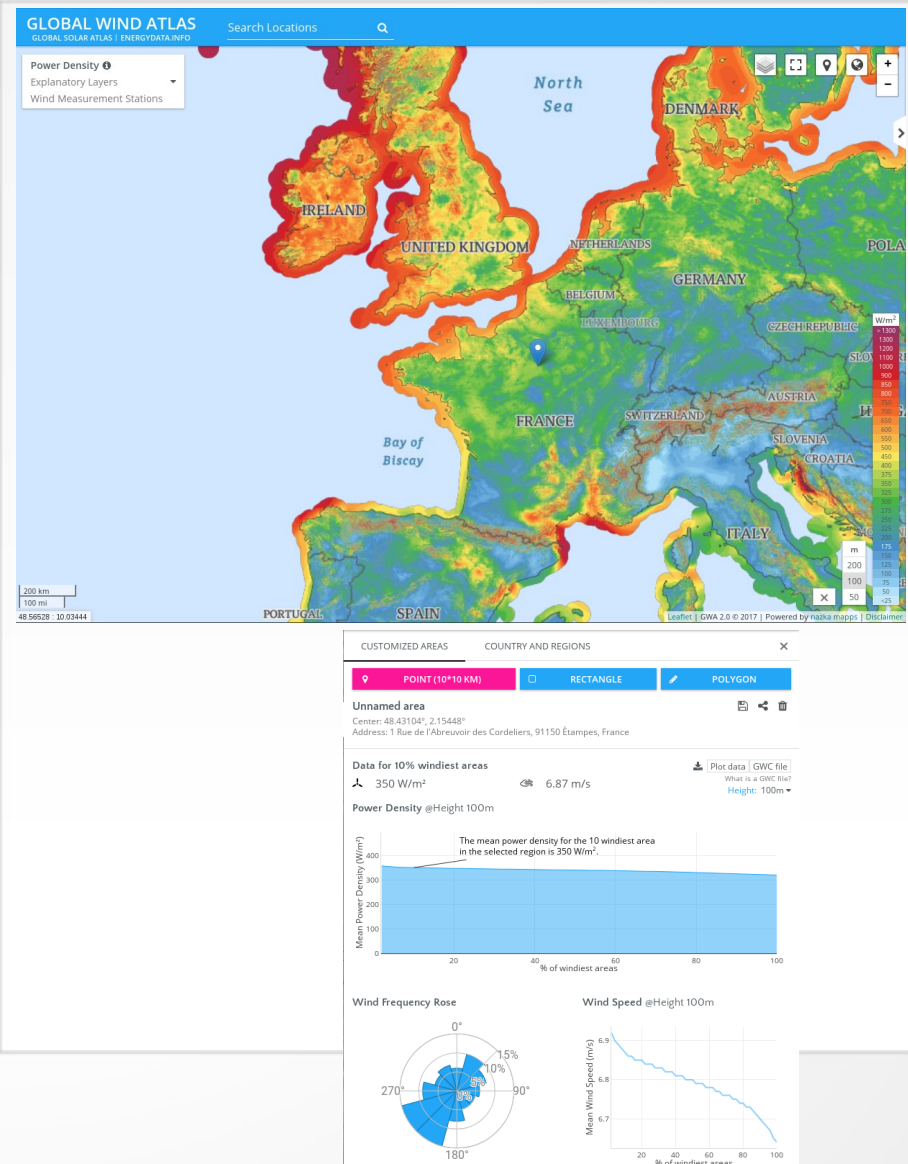


$$V = Sl \text{ et } l = vt \text{ d'où } E_c = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 t$$

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

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



Evolution des concepts d'éoliennes

Moulins à vents :

- Apparition en -700 en Perse
- En Europe en l'an mille
- XIX^e USA: pompage d'eau



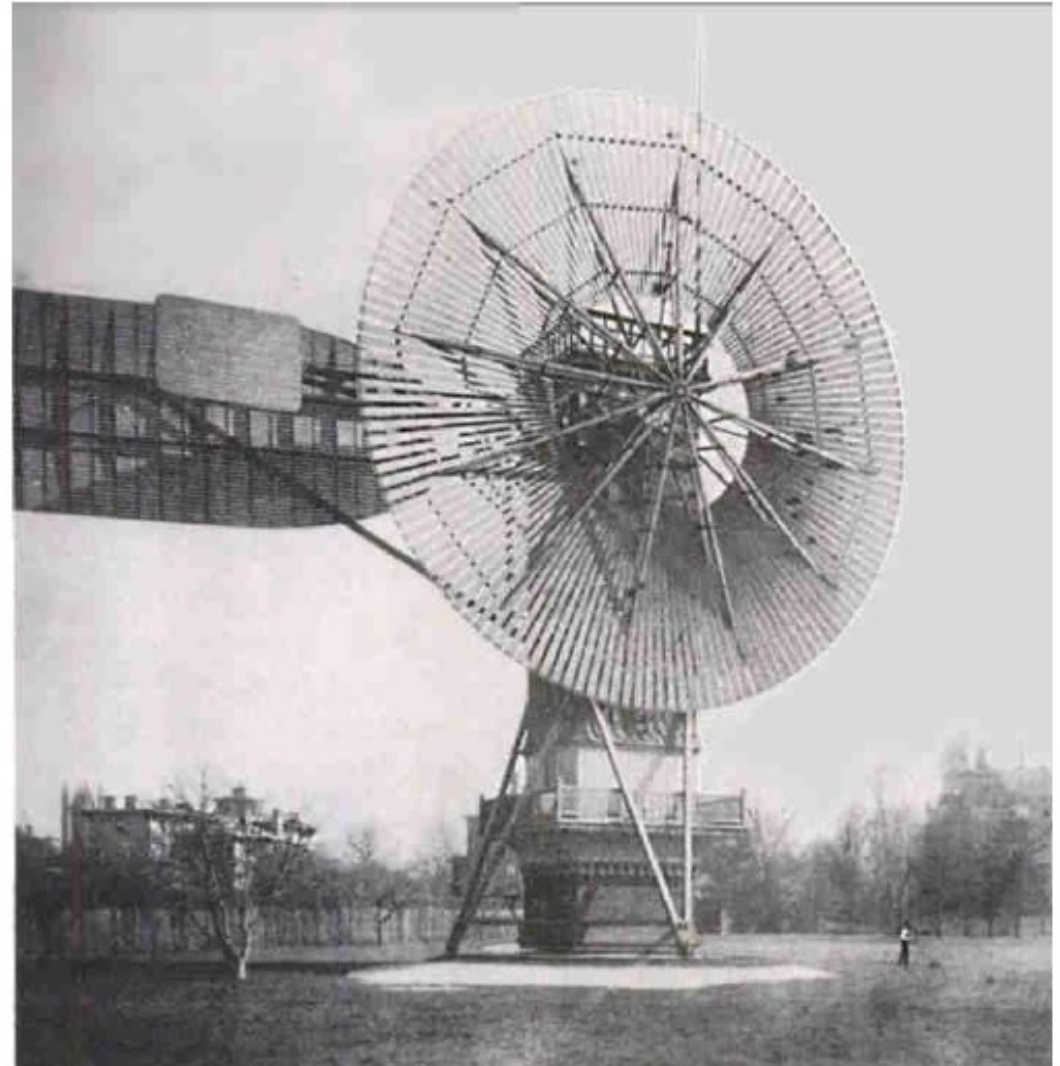
Evolution des concepts d'éoliennes

Pompage: le moulin "américain"



Western Windmills

1ère production d'électricité



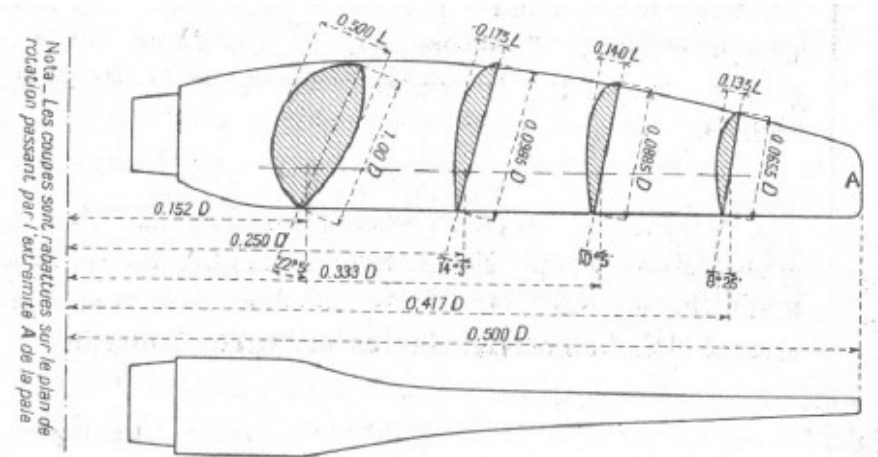
C. Brush, 17m diam., 12kW, Cleveland 1888

Evolution des concepts d'éoliennes

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

Evolution des concepts d'éoliennes

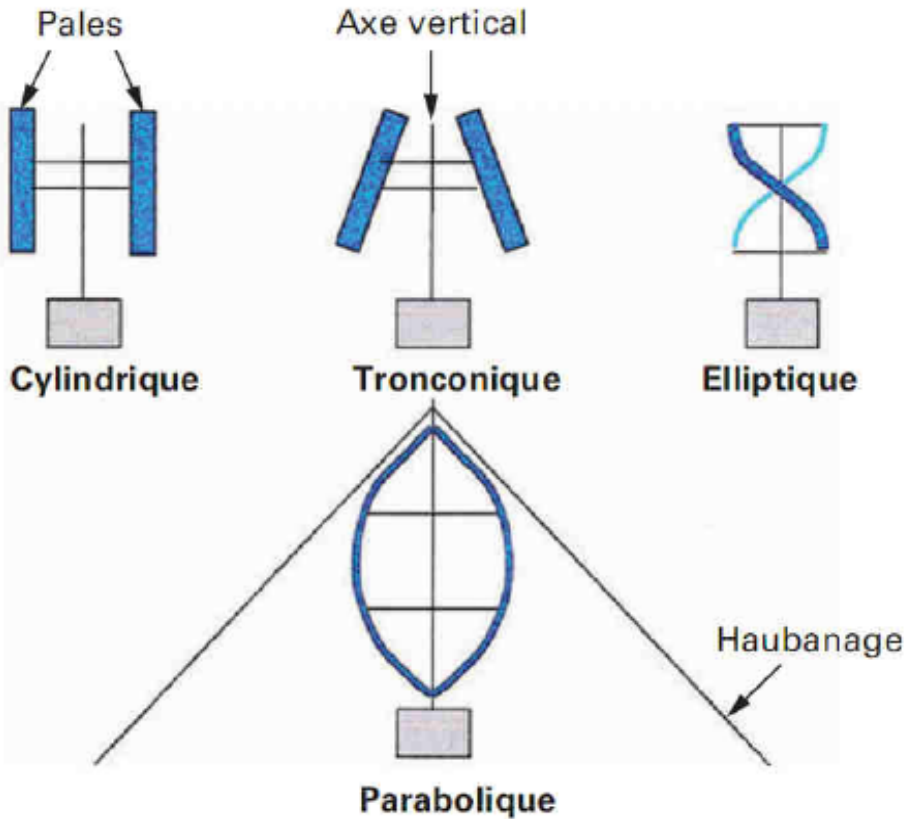
Axe vertical ou axe horizontal ?



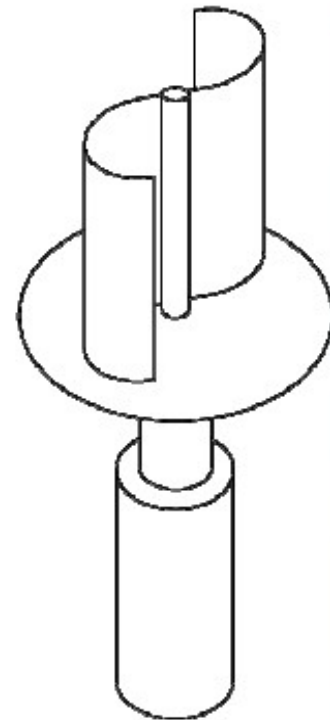
20's - G. Darrieus
1925 - VAWT Patent



1922 - Sigurd Savonius

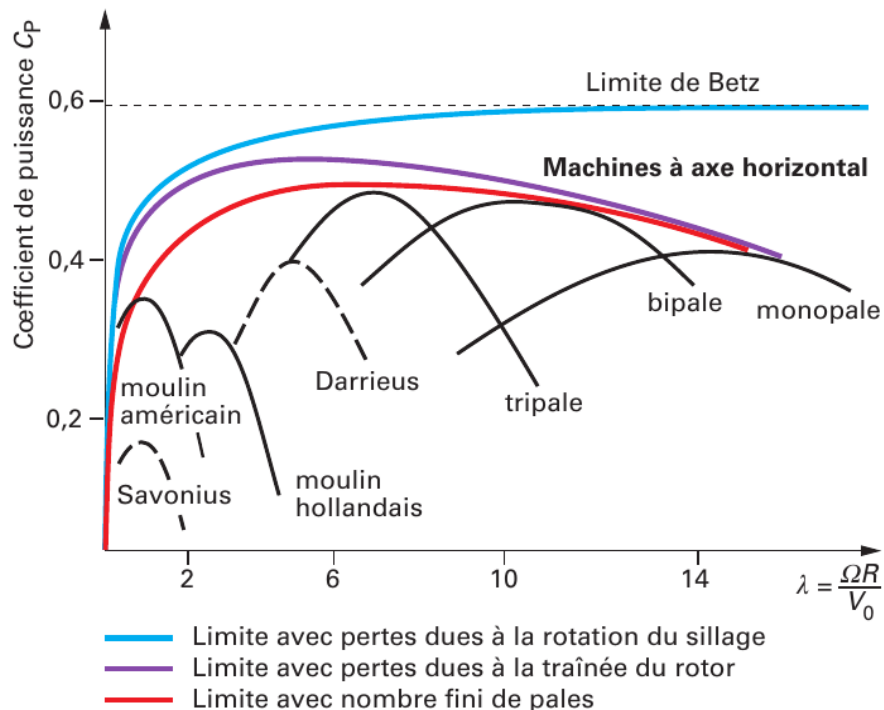


Savonius-Rotor



Evolution des concepts d'éoliennes

- 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



Rendement, et rapidité spécifique

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

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

Evolution des concepts d'éoliennes



Downwind turbines



Vertical Axis Wind Turbine VAWT

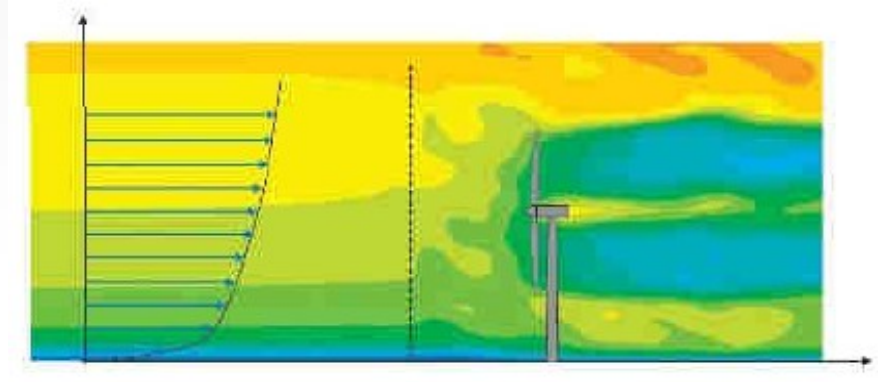


Renouveau du petit éolien

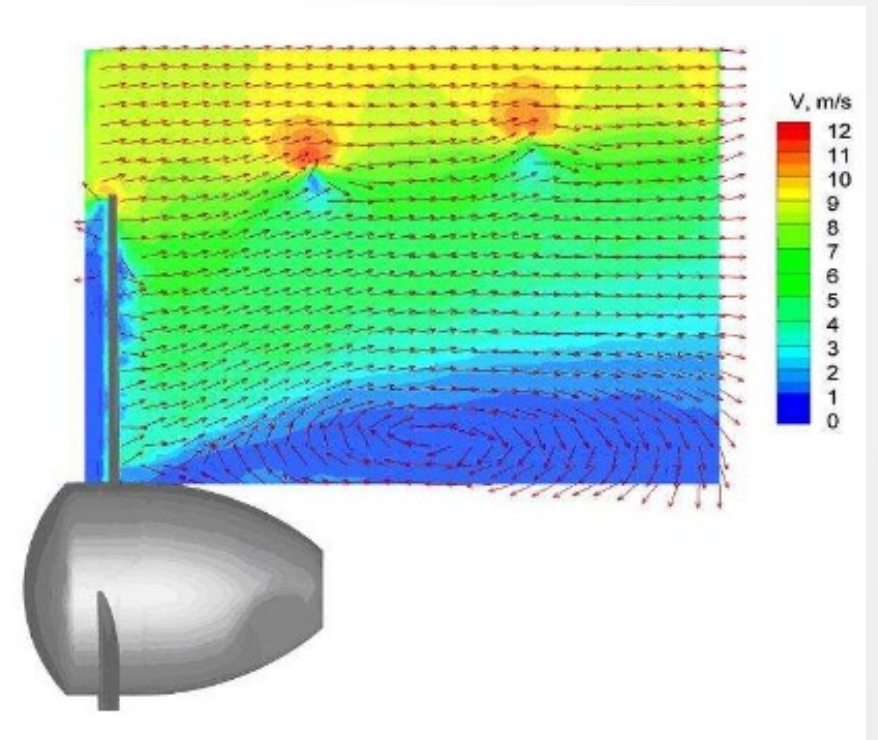
II) Eoliennes : théorie de Froude-Rankine

Théorie de Froude-Rankine

- L'éolienne récupère l'énergie cinétique du vent
- En raison de cette récupération l'éolienne ralentit le vent
- En conséquence, le tube de courant qui traverse l'éolienne augmente sa section afin de respecter le principe de conservation de la masse.



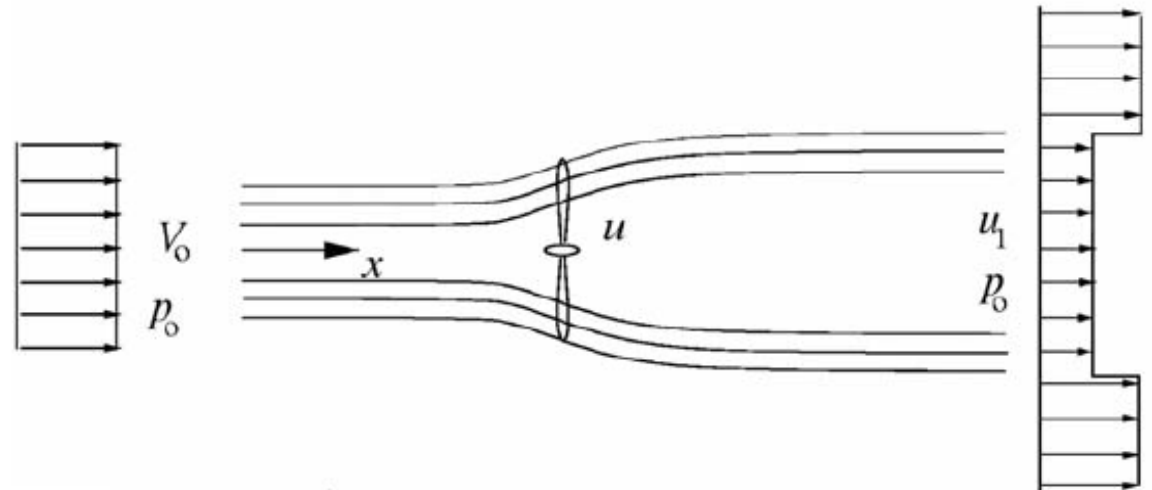
Calcul CFD



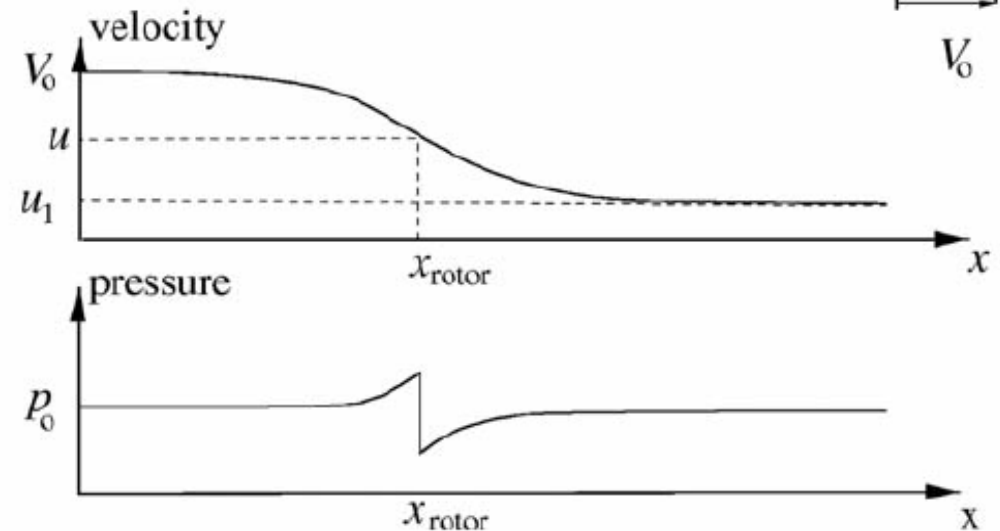
Mesures soufflerie LIFSE

Modèle 0D, fluide parfait, sans rotation

- Eolienne modélisée par un disque poreux actif
- Théorème de Bernoulli

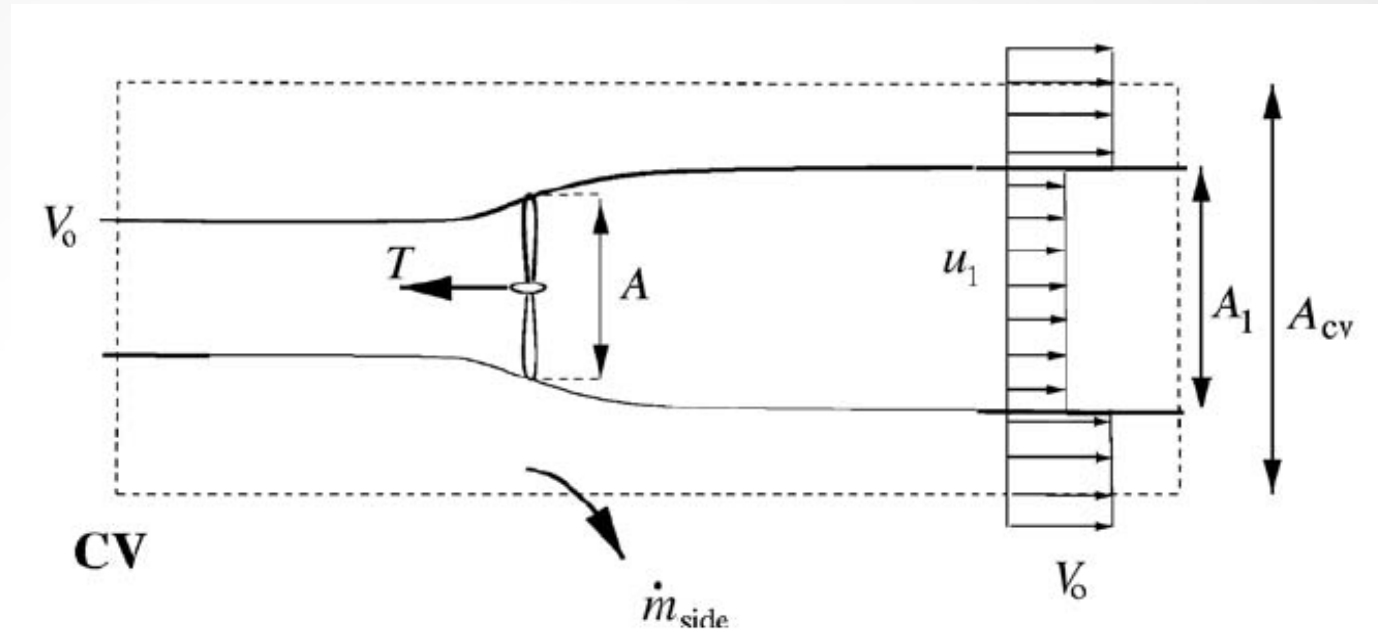


$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p^+ + \frac{1}{2}\rho u^2$$
$$p^- + \frac{1}{2}\rho u^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho u_1^2$$
$$(p^+ - p^-) = \frac{1}{2}\rho (V_0^2 - u_1^2)$$



Modèle 0D, fluide parfait, sans rotation

- Bilan de masse et
- Bilan de quantité de mouvement axiale :



$$(\rho u_1^2 A_1 + \rho V_0^2 (A_{CV} - A_1) + \dot{m}_{side} V_0) - \rho V_0^2 A_{CV} = -T$$

$$\dot{m}_{side} = \rho A_1 (V_0 - u_1)$$

$$\dot{m} = \rho u A = \rho u_1 A_1$$

$$T = \dot{m} (V_0 - u_1)$$

Modèle 0D, fluide parfait, sans rotation

- Deux expressions pour la poussée T

$$T = \dot{m} (V_0 - u_1)$$

$$T = (p^+ - p^-) A$$

$$\rho A u (V_0 - u_1) = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - u_1^2)$$

$$u = \frac{1}{2} (V_0 + u_1)$$

Modèle 0D, fluide parfait, sans rotation

- On exprime la poussée T et la puissance P en fonction du facteur d'induction axiale a

$$u = (1 - a) V_0$$

$$T = 2\rho V_0^2 a (1 - a) A$$

$$P = 2\rho V_0^3 a (1 - a)^2 A$$

- Introduction du coefficient de puissance C_p

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_0^3 A}$$

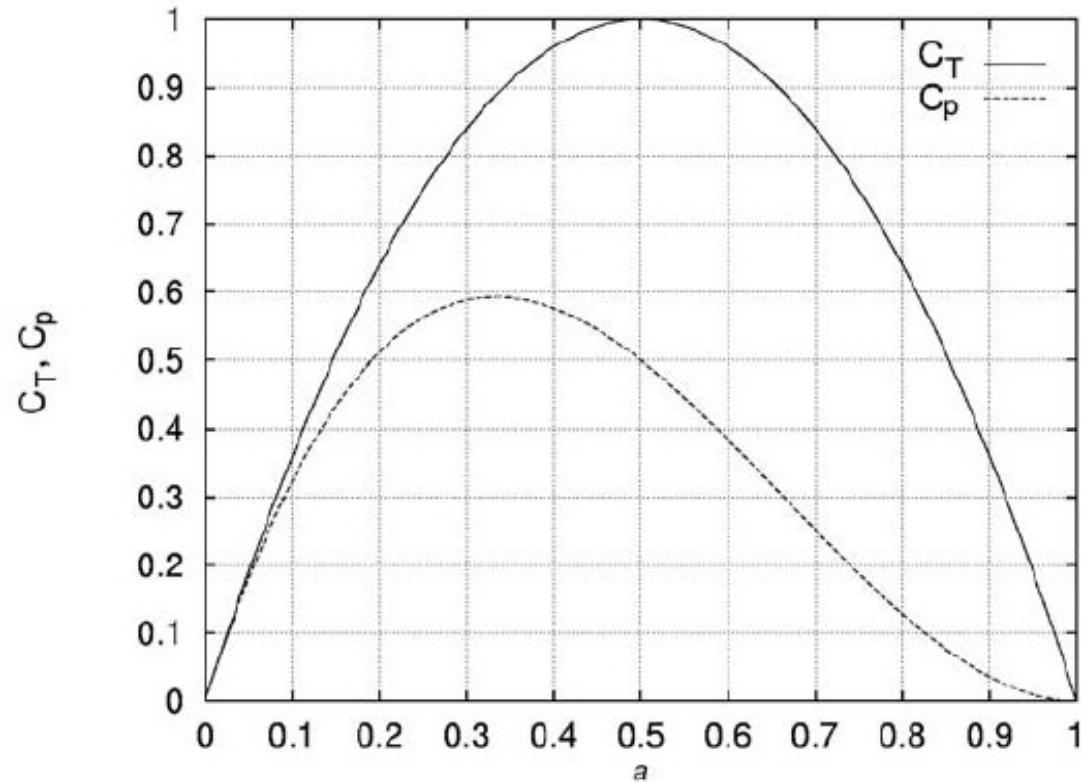
$$C_p = 4a (1 - a)^2$$

- Introduction du coefficient de poussée C_t

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 A}$$

$$C_t = 4a (1 - a)$$

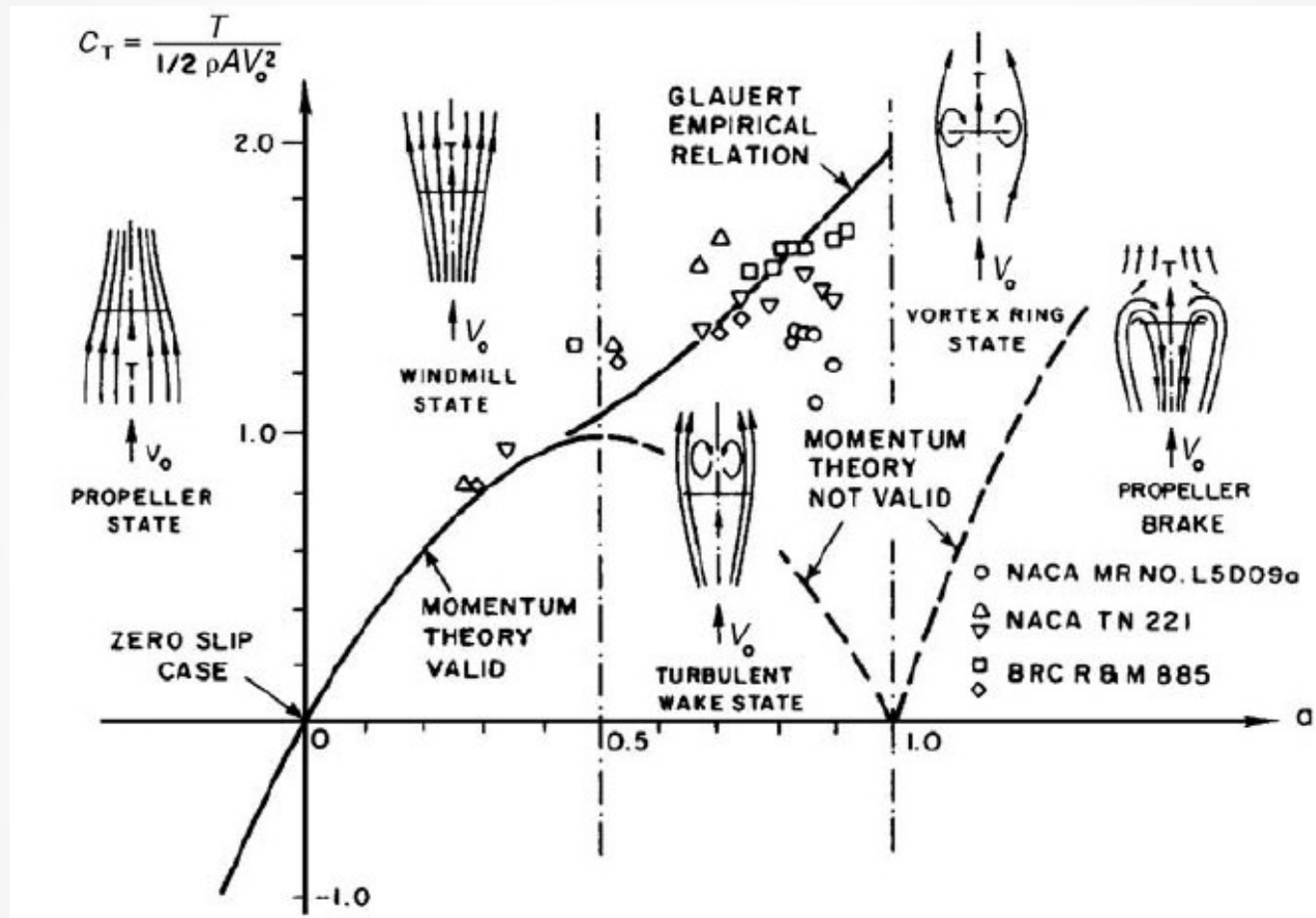
Modèle 0D, fluide parfait, sans rotation



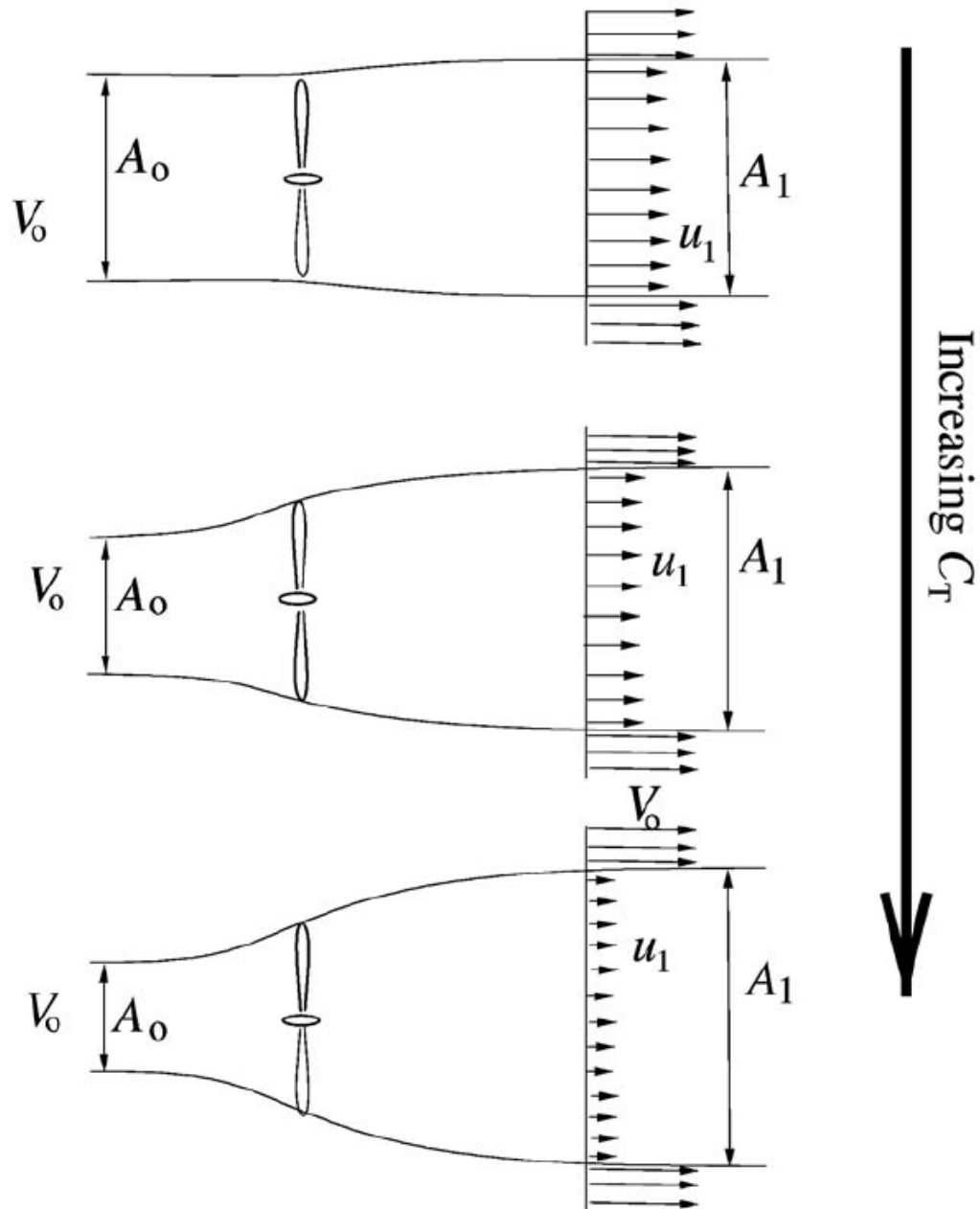
$$C_{p,max} = \frac{16}{27}$$
$$a = \frac{1}{3}$$

Limites à la théorie

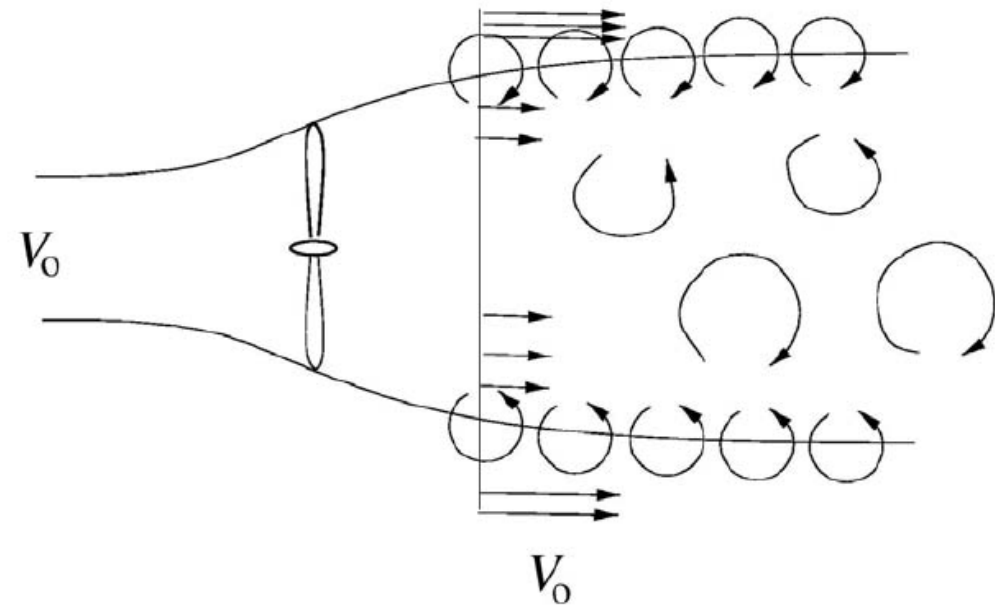
- La théorie devient invalide pour $a > 0.4$



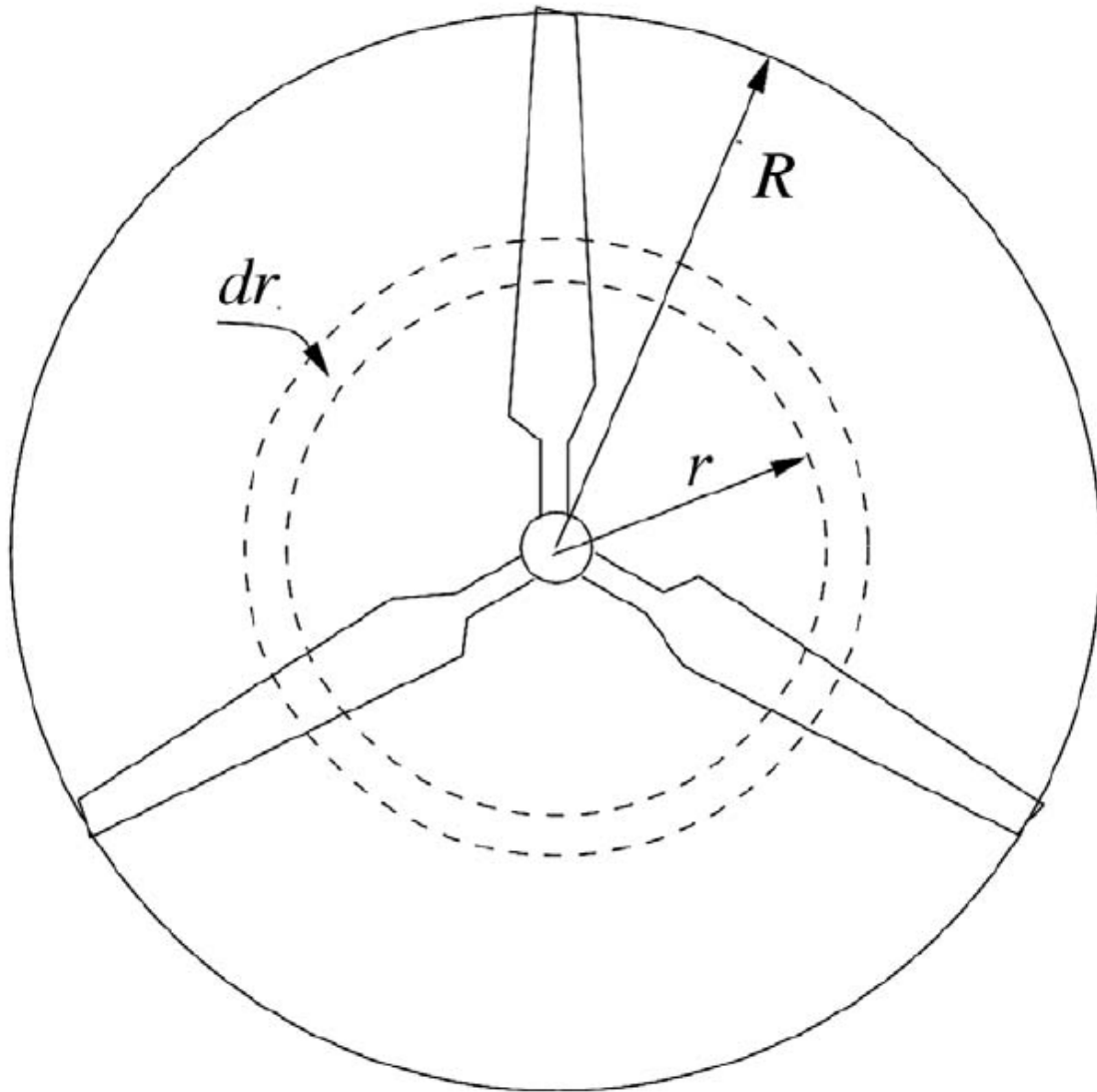
Limites à la théorie



- Pour les grands a : développement de turbulence dans le sillage



Modèle 1D, fluide parfait, rotation du sillage



- Bilans sur des tranches (modèle 1D)

$$d\dot{m} = 2\pi r dr (1 - a) V_0$$

$$dP = d\dot{m} \omega r C_\theta$$

$$= 2\pi r^2 \rho (1 - a) V_0 \omega C_\theta dr$$

Modèle 1D, fluide parfait, rotation du sillage

- Effet d'induction tangentielle: introduction du coefficient d'induction tangentielle a'

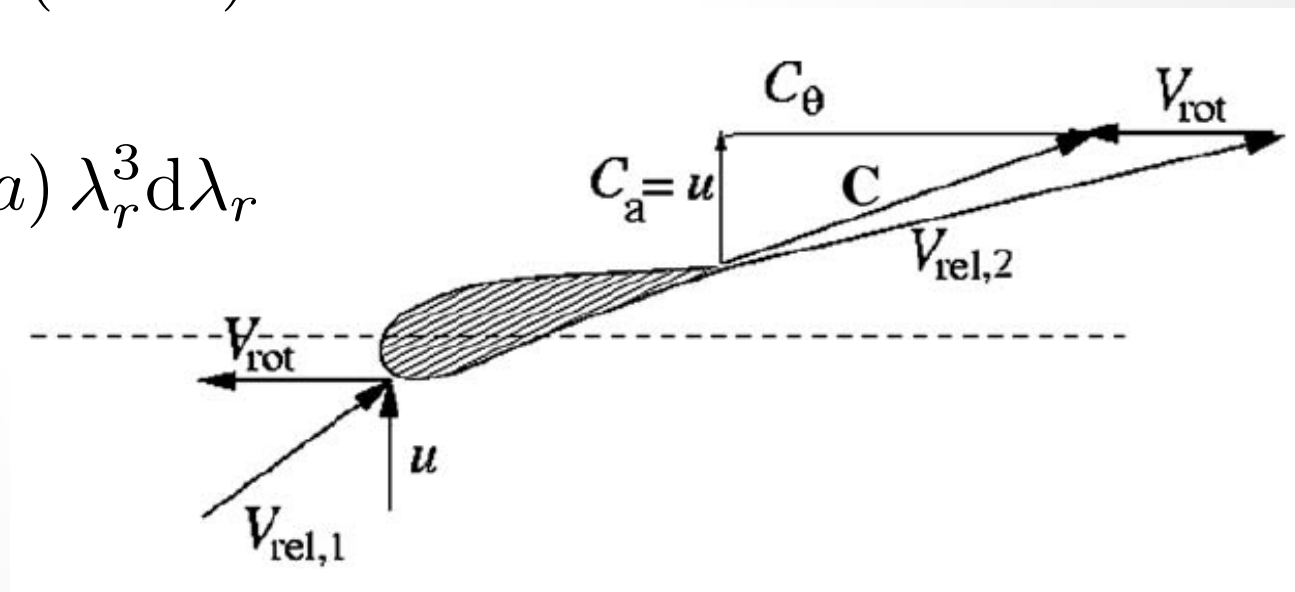
$$C_\theta = 2a'\omega r$$

$$dP = 4\pi\rho a' (1 - a) V_0\omega^2 r^3 dr$$

$$P = 4\pi\rho\omega^2 V_0 \int_0^R a' (1 - a) r^3 dr$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a' (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r$$

$$\text{Rappel : } \lambda = \frac{R\omega}{V_0}$$



Modèle 1D, fluide parfait, rotation du sillage

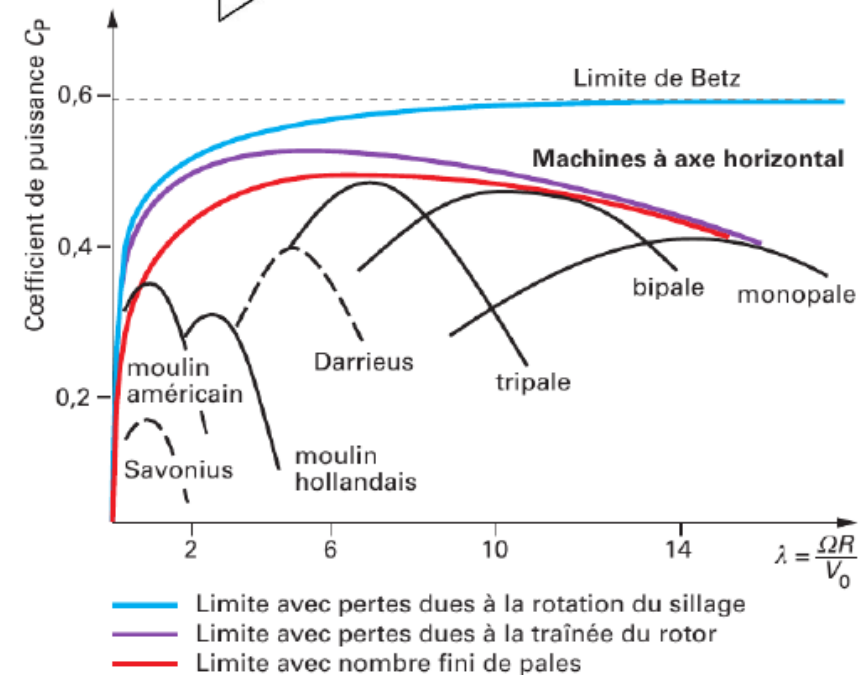
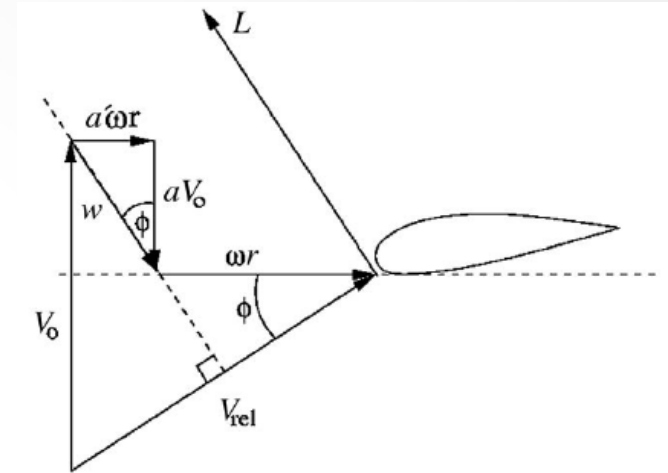
- On cherche l'optimum de puissance dans le cadre de ce modèle

- En fluide parfait, la vitesse induite, qui est parallèle à la force de portance L , est perpendiculaire à la vitesse relative.

- On en tire des relations entre

$$a, a' \text{ et } \lambda_r$$

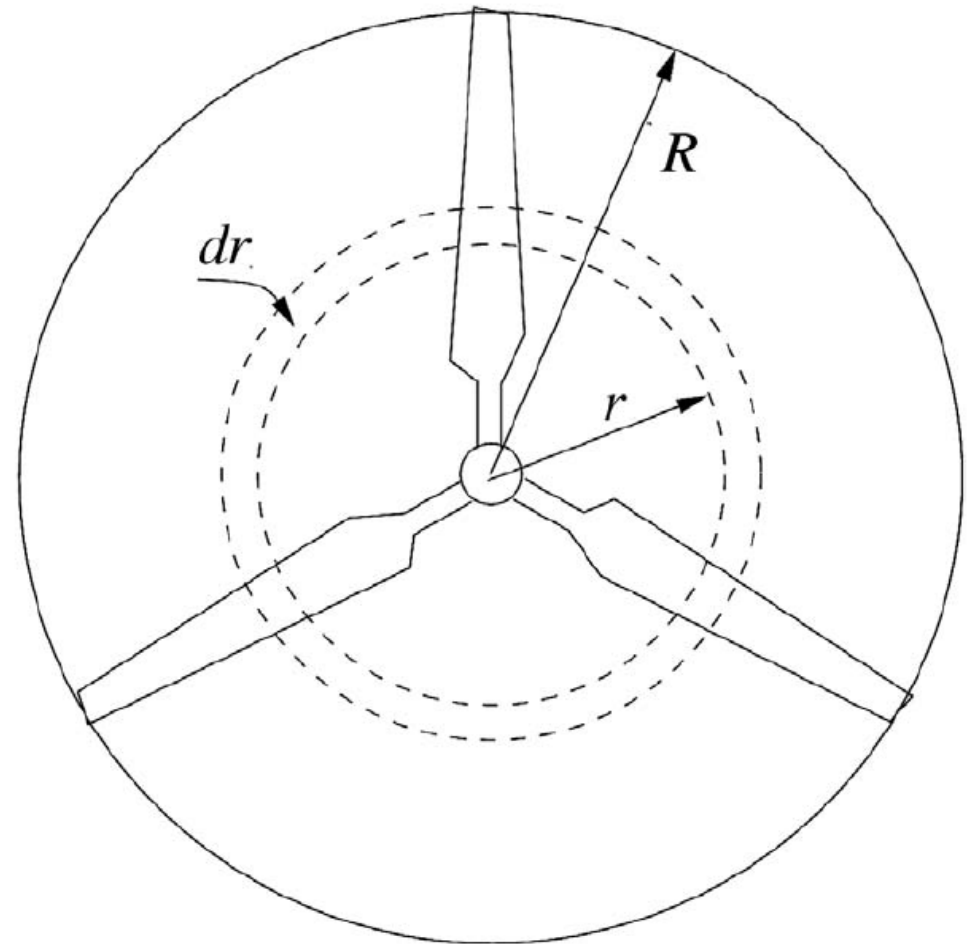
- Correction à la limite de Betz
- Correction due au nombre fini de pales : facteur de Prandtl



III) Eoliennes : théorie des éléments de pale

Théorie des éléments de pale

- Dans la théorie de Froude-Rankine, les détails de la géométrie du rotor (nombre de pales, type de profils, calage, corde) ne sont pas pris en compte.
- La théorie des éléments de pale relie les bilans de quantité de mouvement à la géométrie des pales.
- On découpe l'éolienne en portions de disque d'épaisseur dr : les *éléments de pale*.
- Hypothèses :
 - pas de dépendance radiale (autrement dit un élément n'est pas influencé par la présence des autres),
 - les forces appliquées par les pales sur le fluide sont réparties de manière régulière sur le disque.



Théorie des éléments de pale

Bilan de quantité de mouvement : *Poussée*

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1-a) dr$$

Bilan de moment cinétique : *Couple*

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1-a) a' dr$$

Angle de calage

$$\theta$$

Angle du vent relatif

$$\phi = \arctan \left(\frac{1-a}{1+a'} \frac{V_0}{\omega r} \right)$$

Angle d'attaque

$$\alpha = \phi - \theta$$

Portance (*Lift*)

$$L$$

Trainée (*Drag*)

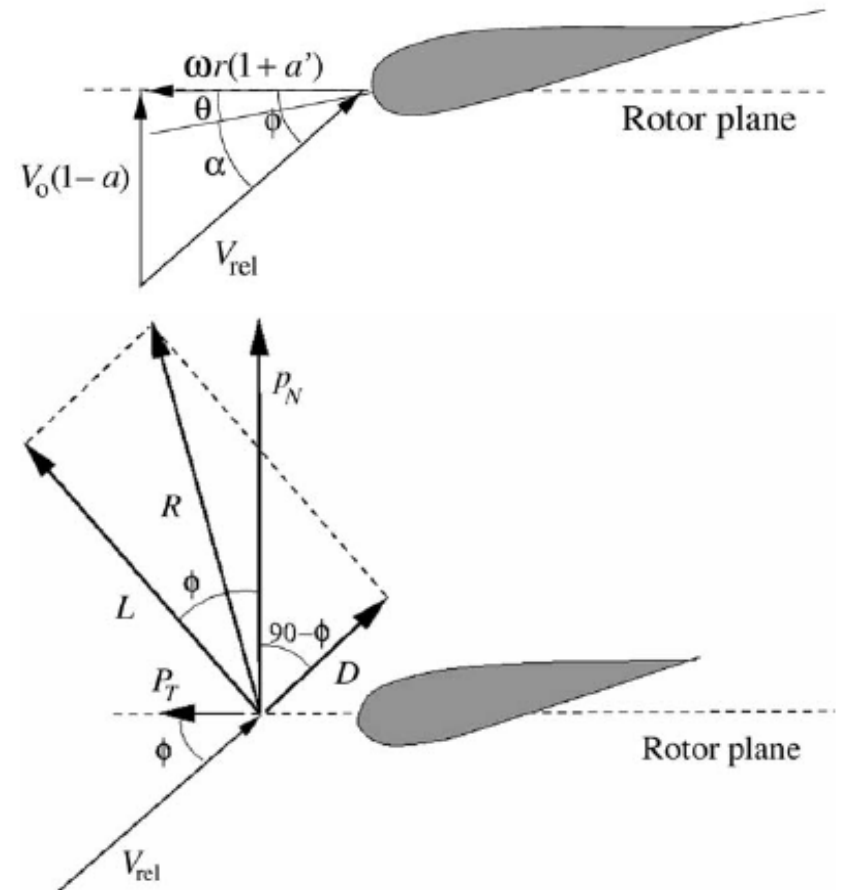
$$D$$

Force normale

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi$$

Force tangentielle

$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi$$



Utilisation des coefficients de portance (*Lift*) et de trainée (*Drag*)

$$L = C_l \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c_{dr}$$

$$D = C_d \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c_{dr}$$

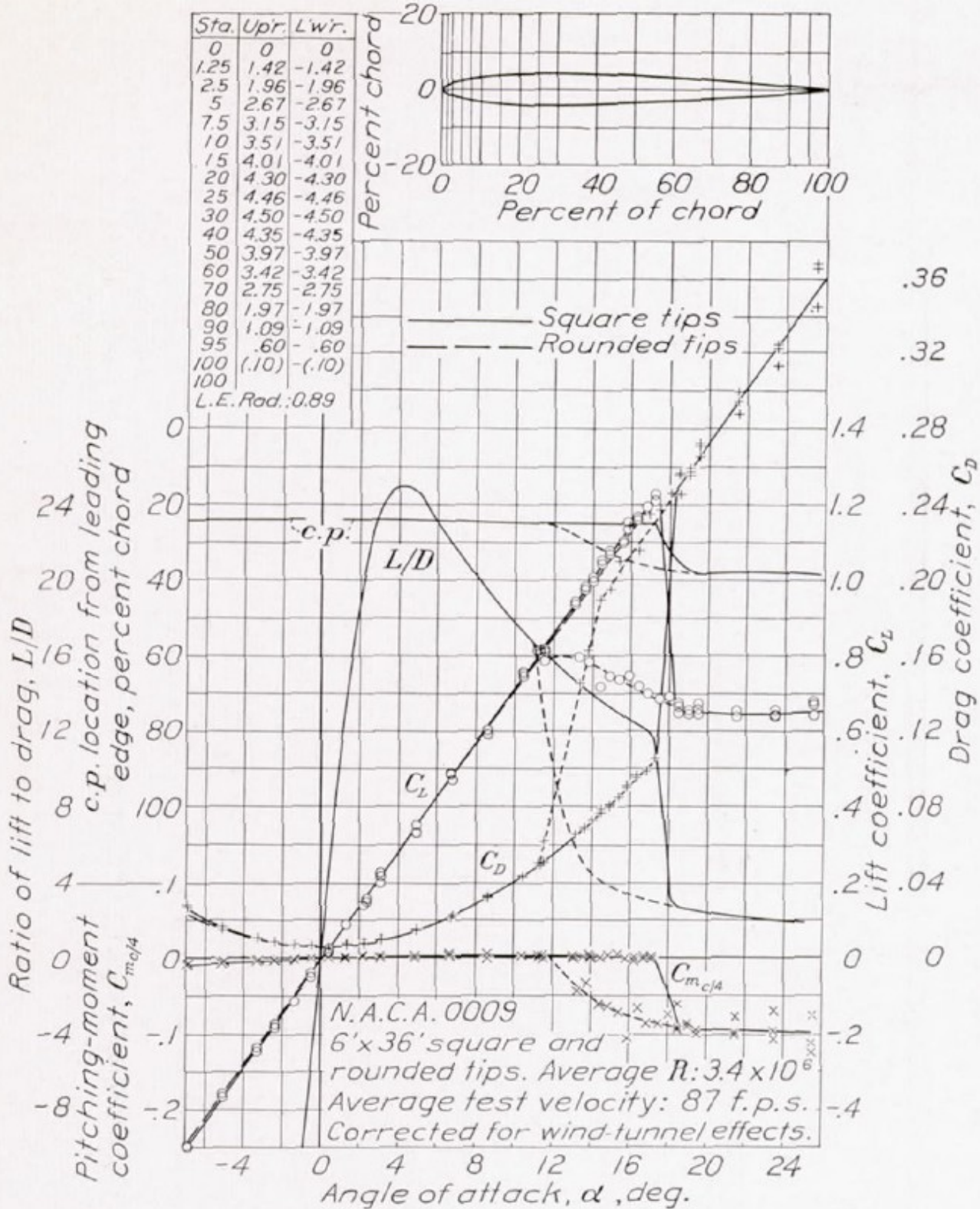
c : longueur de la corde
 B : nombre de pales

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_n dr$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0 (1-a) \omega r (1+a')}{\sin \phi \cos \phi} c C_t r dr$$



Théorie des éléments de pale

On a deux expressions pour la poussée, et deux expressions pour le couple.
On écrit l'égalité des deux:

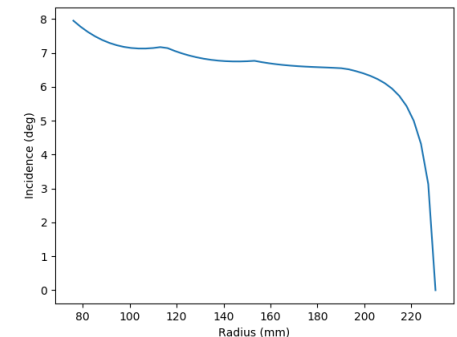
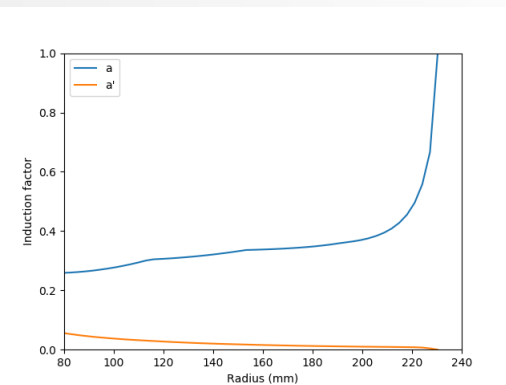
$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1}$$

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} : \text{le serrage}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1}$$

Connaissant la géométrie de la pale, cette méthode permet de calculer les facteurs d'induction locaux, puis la poussée totale et le coefficient de puissance. On peut résoudre le problème de manière itérative :

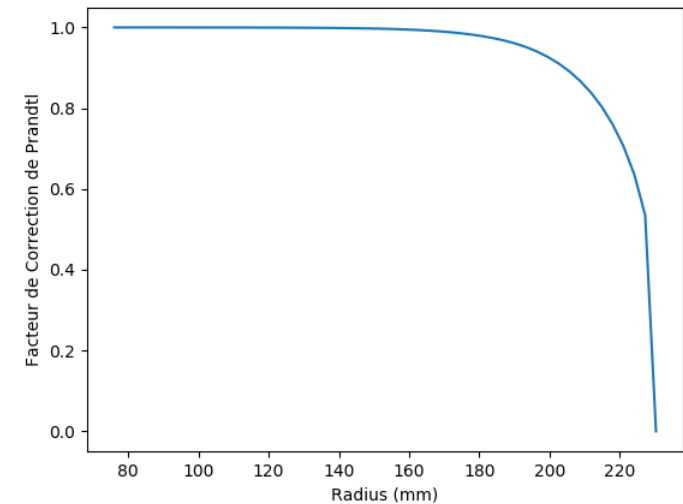
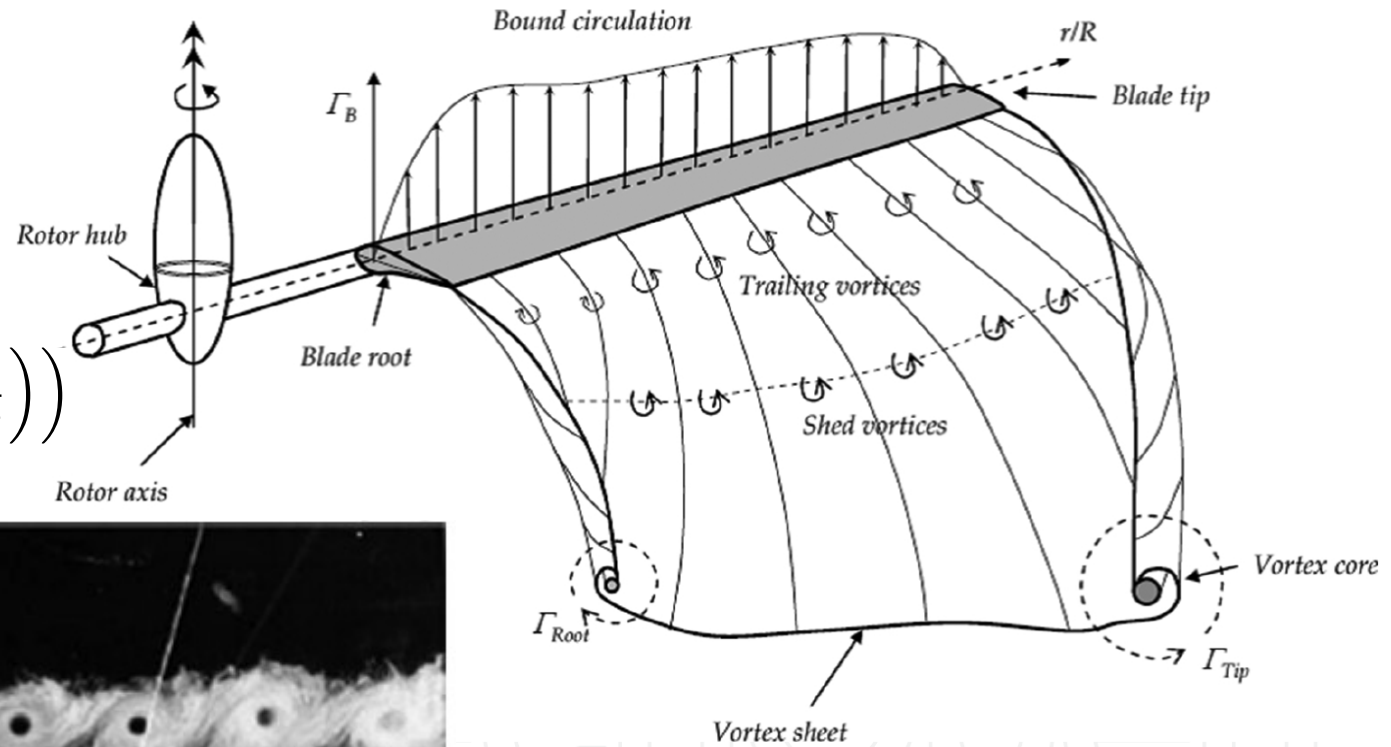
- (1) : Initialiser $a_i = 0$ et $a'_i = 0$
- (2) : Calculer $\phi = \arctan \left(\frac{1 - a_i V_0}{1 + a'_i \omega r} \right)$
- (3) : Calculer $\alpha = \phi - \theta$
- (4) : Lire $C_l(\alpha)$ et $C_d(\alpha)$
- (5) : Calculer $C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$ et $C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$
- (6) : Calculer a et a'
- (7) : Si $|a - a_i| \leq tol$ et $|a' - a'_i| \leq tol$ passer à (8)
: Sinon : $a_i = a$ et $a'_i = a'$ et aller à (2)
- (8) : Calculer $C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a' (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r$



Théorie des éléments de pale

Prise en compte des effets de bord:
Facteur de correction de Prandtl

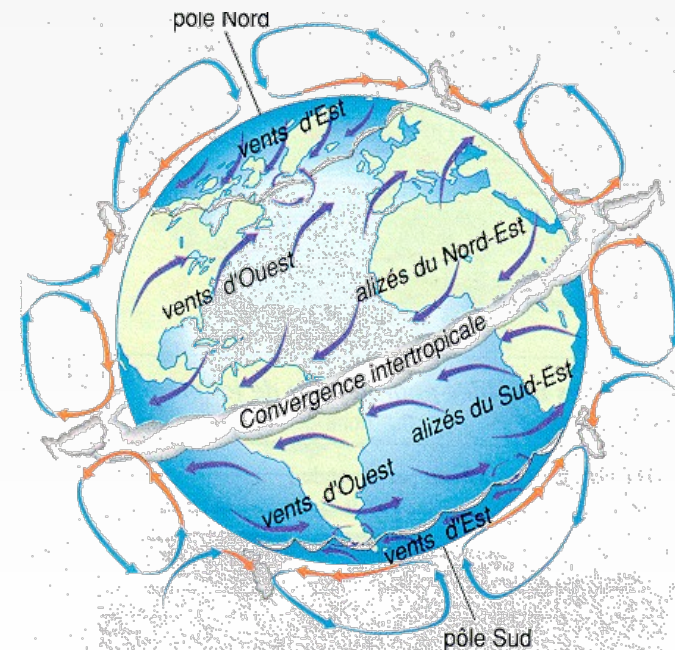
$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left(\exp \left(-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \right) \right)$$



Annexes

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

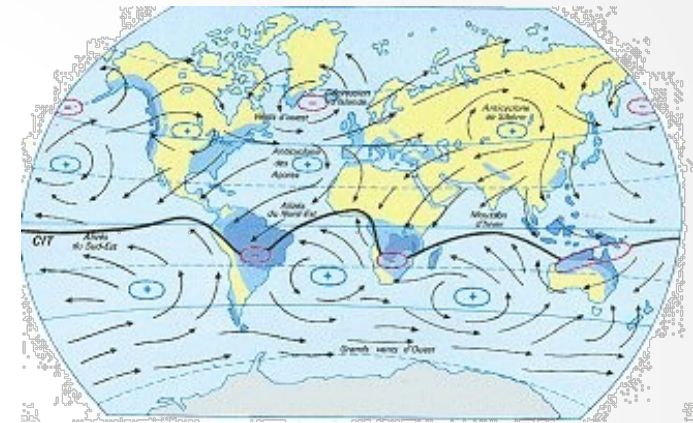


Origines du vent

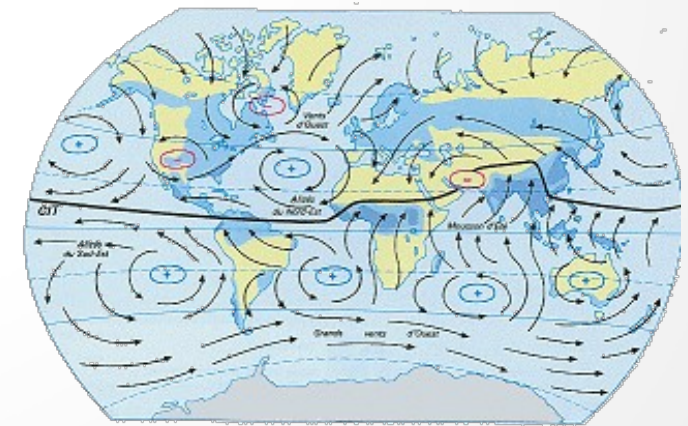
- Effet de la rotation de la terre (forces de Coriolis): au sol on observe une déviation vers la droite dans l'hémisphère nord
- Vents dominants:
 - Alizés d'est (tropiques)
 - Vents d'ouest (régions tempérées)
 - Vents d'est (régions polaires)
- Variations saisonnières
- Variations locales journalières

Variations saisonnières

janvier

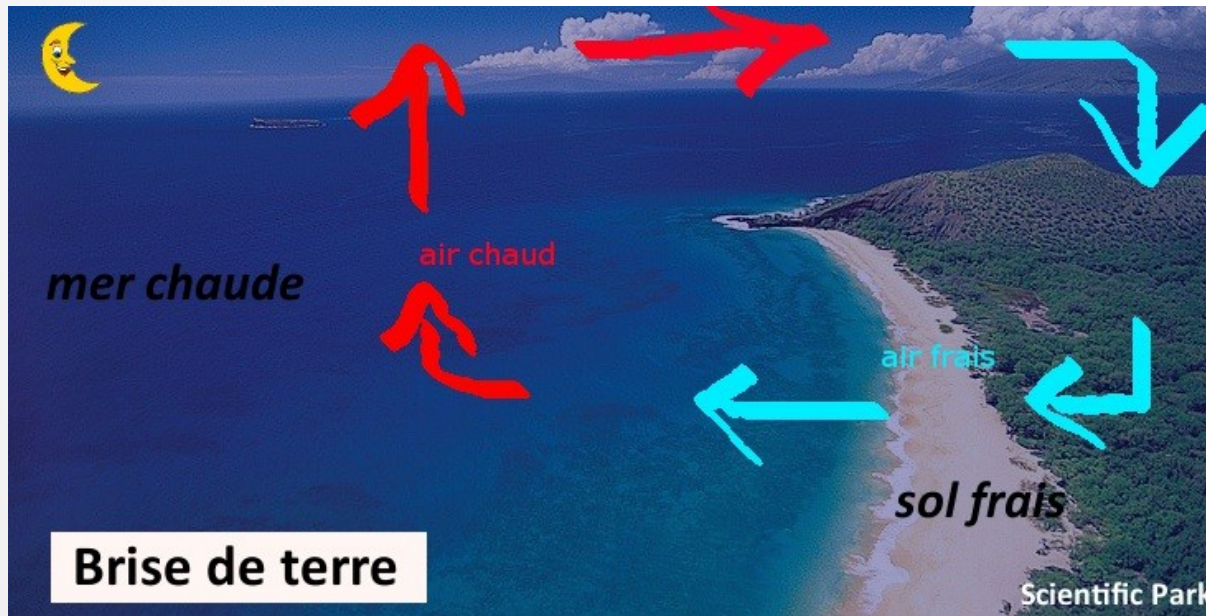
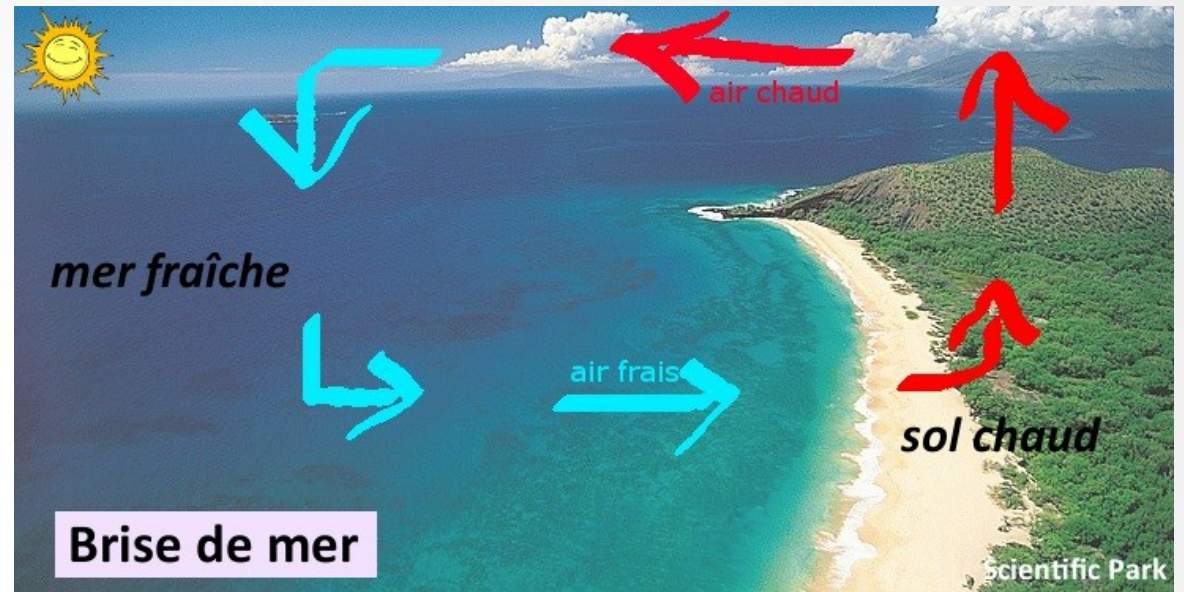


juillet



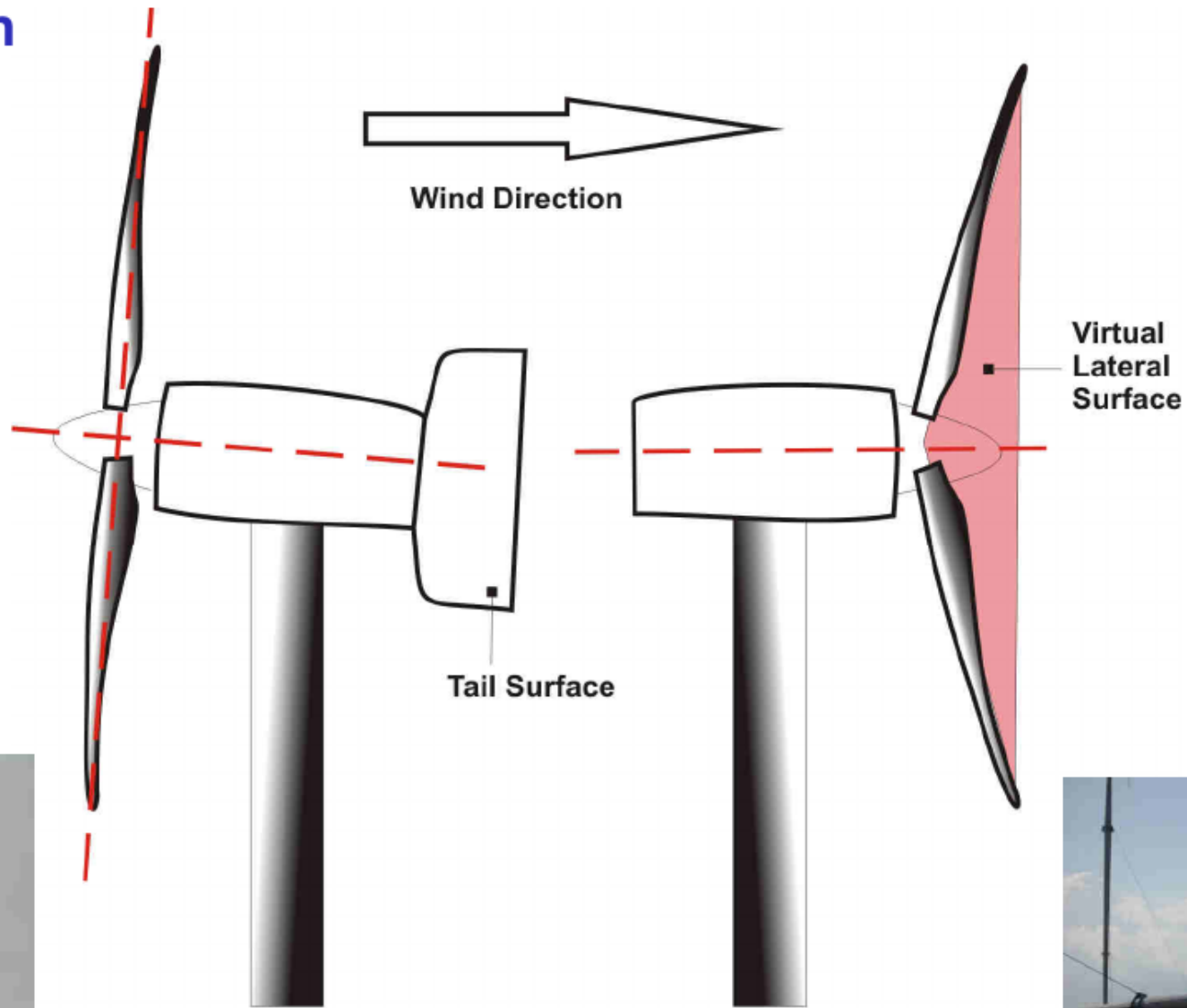
Origines du vent

Variations locales journalières



Evolution des concepts d'éoliennes

WT orientation



Upwind Configuration

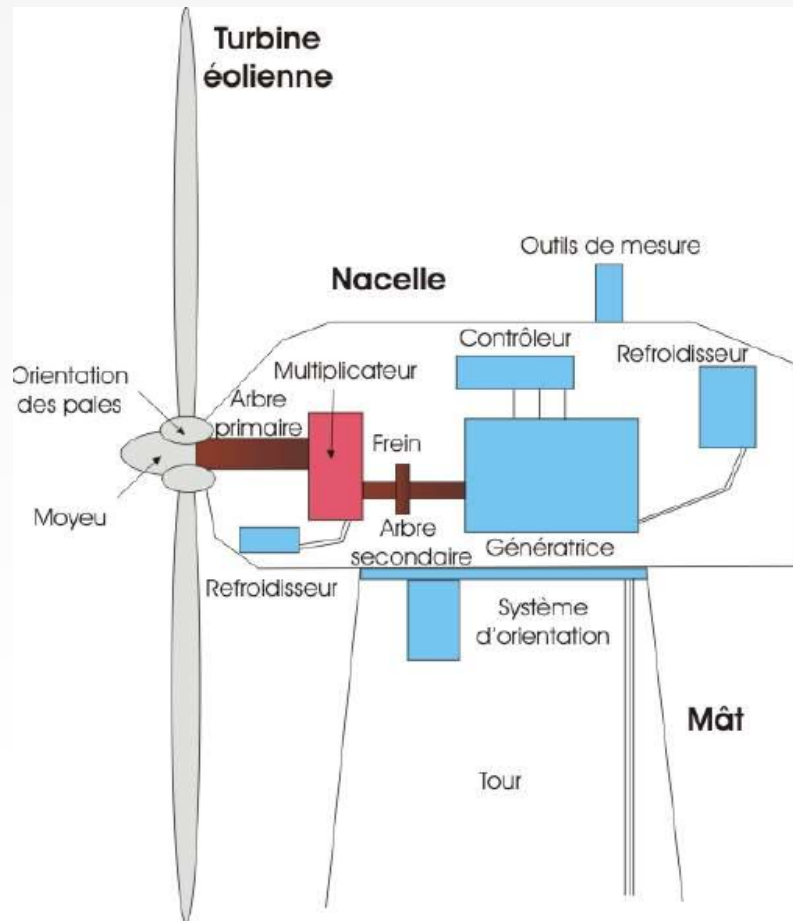
Downwind Configuration



S'oriente naturellement
Mais perturbation du mât

Evolution des concepts d'éoliennes

Problématique de génération de courant avec génératrice à 50 Hz

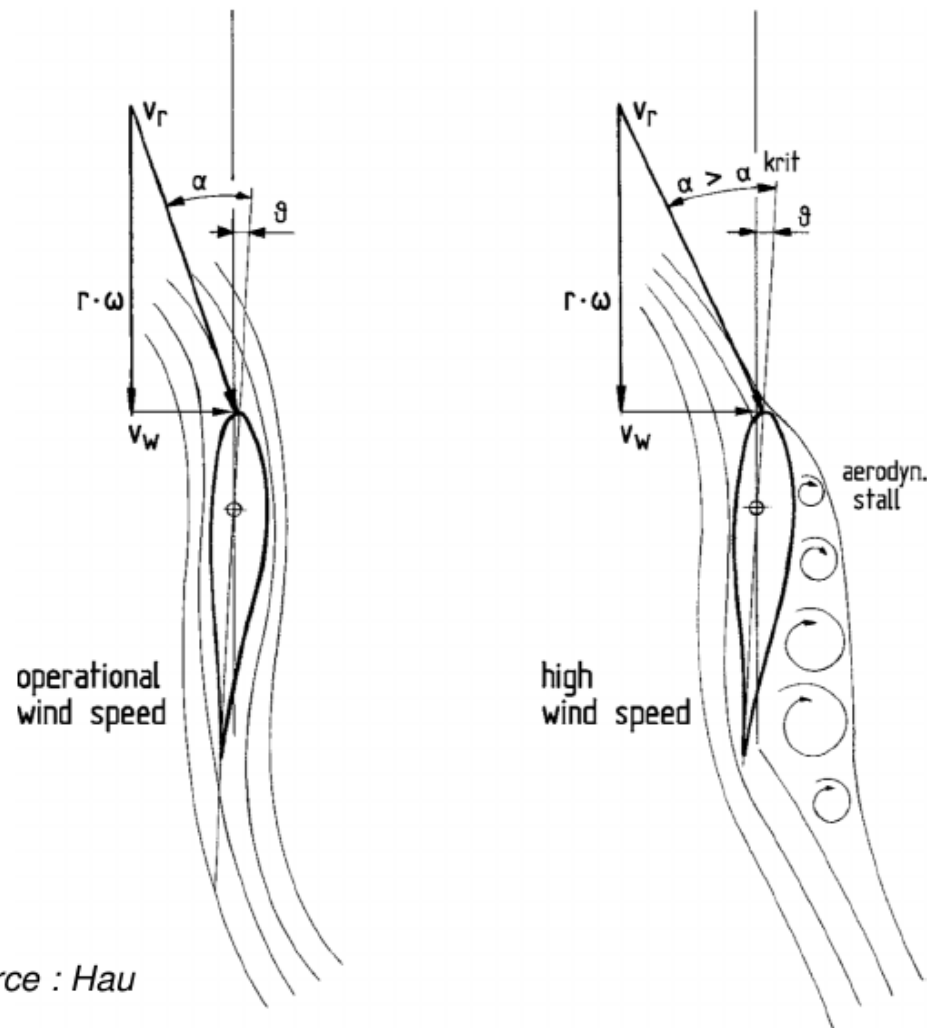


- Turbine, **calage** fixe ou **réglable**
- Arbre primaire (10-40 rpm)
- **Multiplicateur** pour passer à 1500 rpm si **génératrice asynchrone**
- Frein à disque
- Génératrice
 - Asynchrone 1000 ou 1500 rpm
 - **Synchrone annulaire sans multiplicateur**
- Contrôleur
- Mesures
- Refroidissement
- Orientation

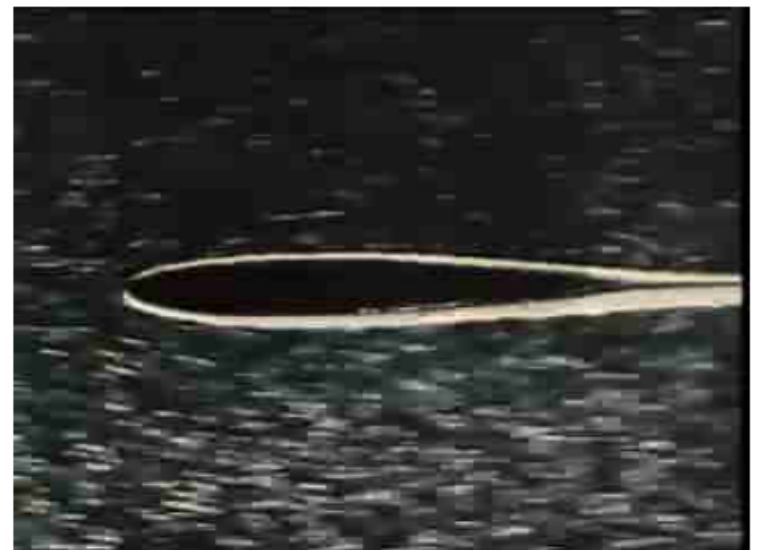


Evolution des concepts d'éoliennes

Blade Control : **Stall** (Décrochage)



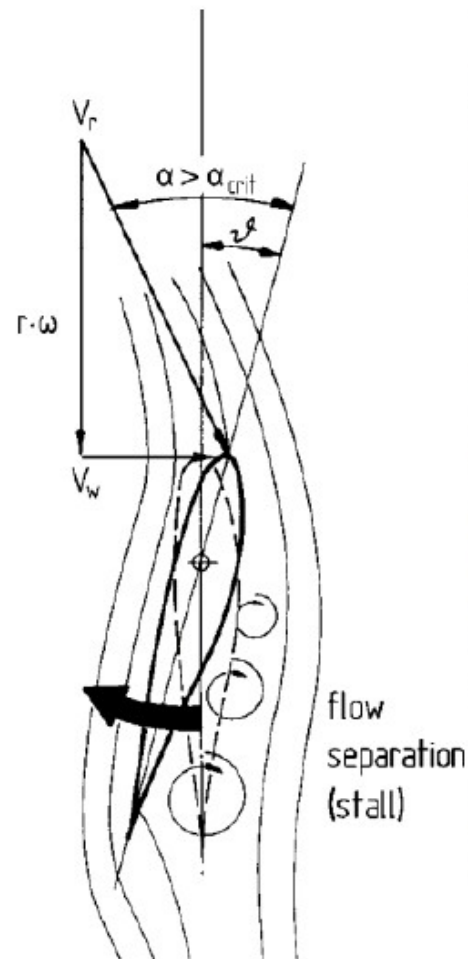
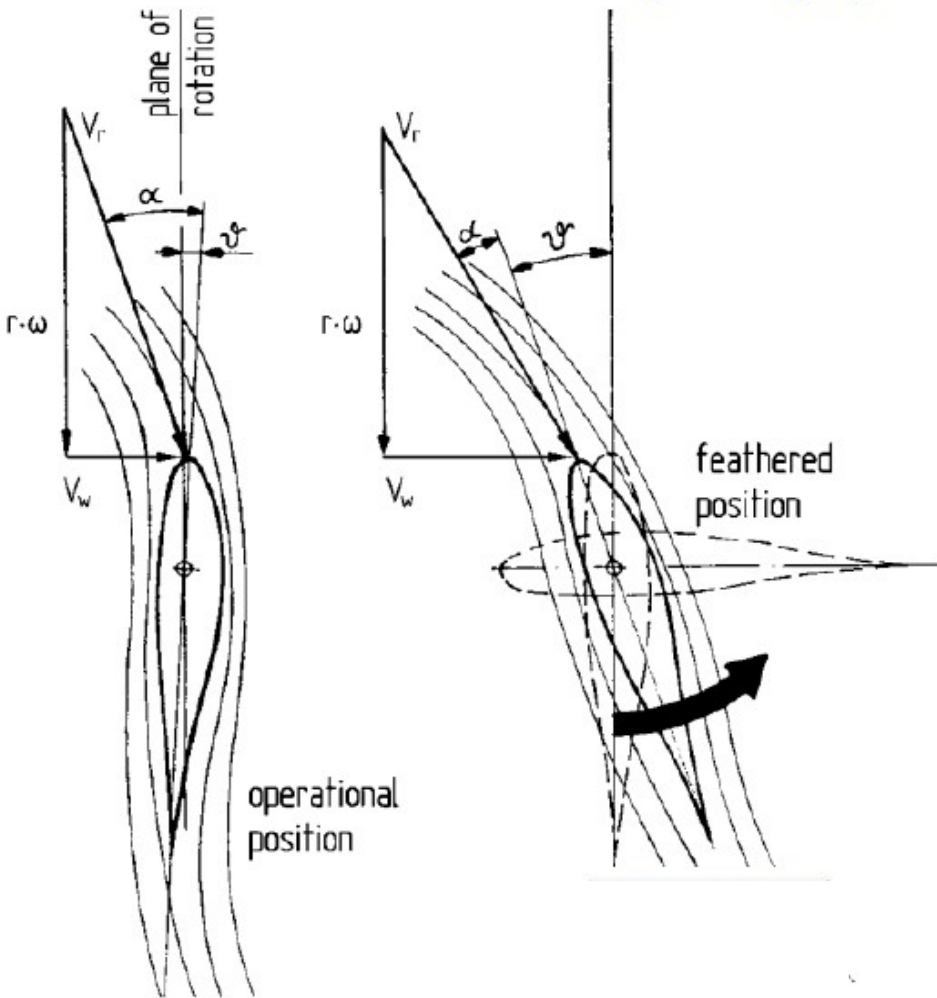
Source : Hau



Evolution des concepts d'éoliennes

Blade Control : Pitch (Calage)

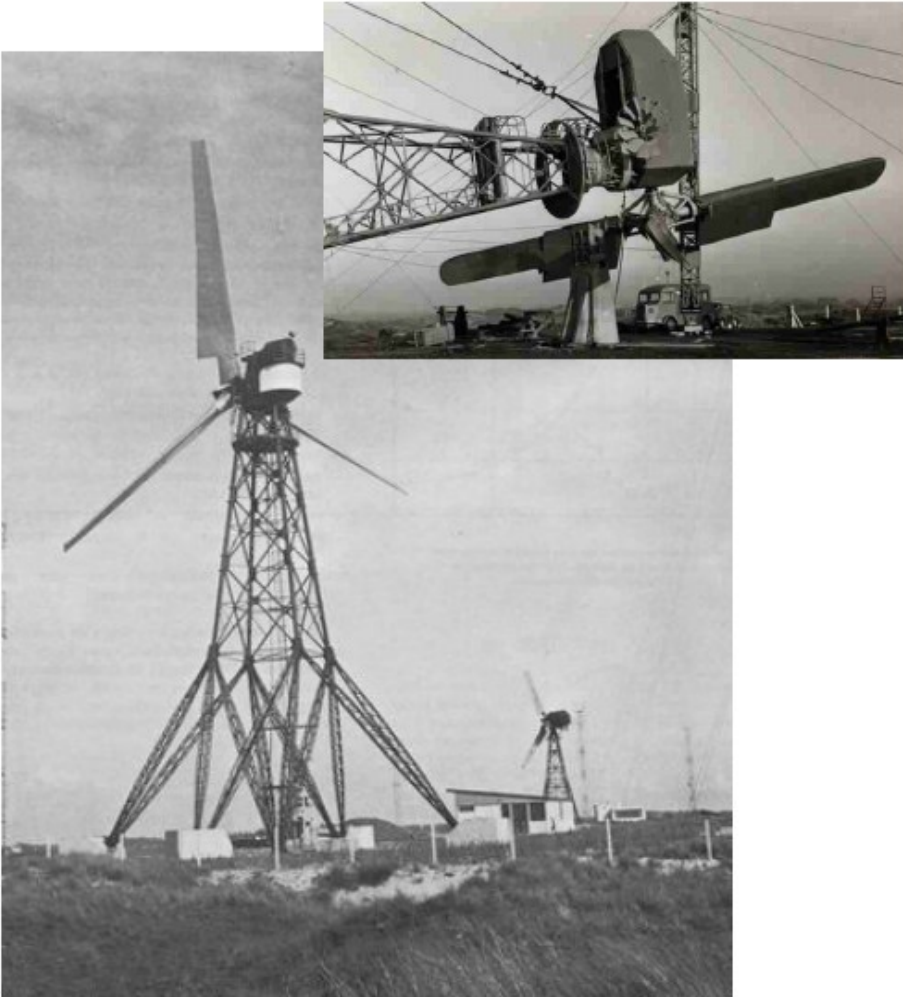
100% of medium/big machines



Source : [Hau_06]

Evolution des concepts d'éoliennes

60's in France : EDF...

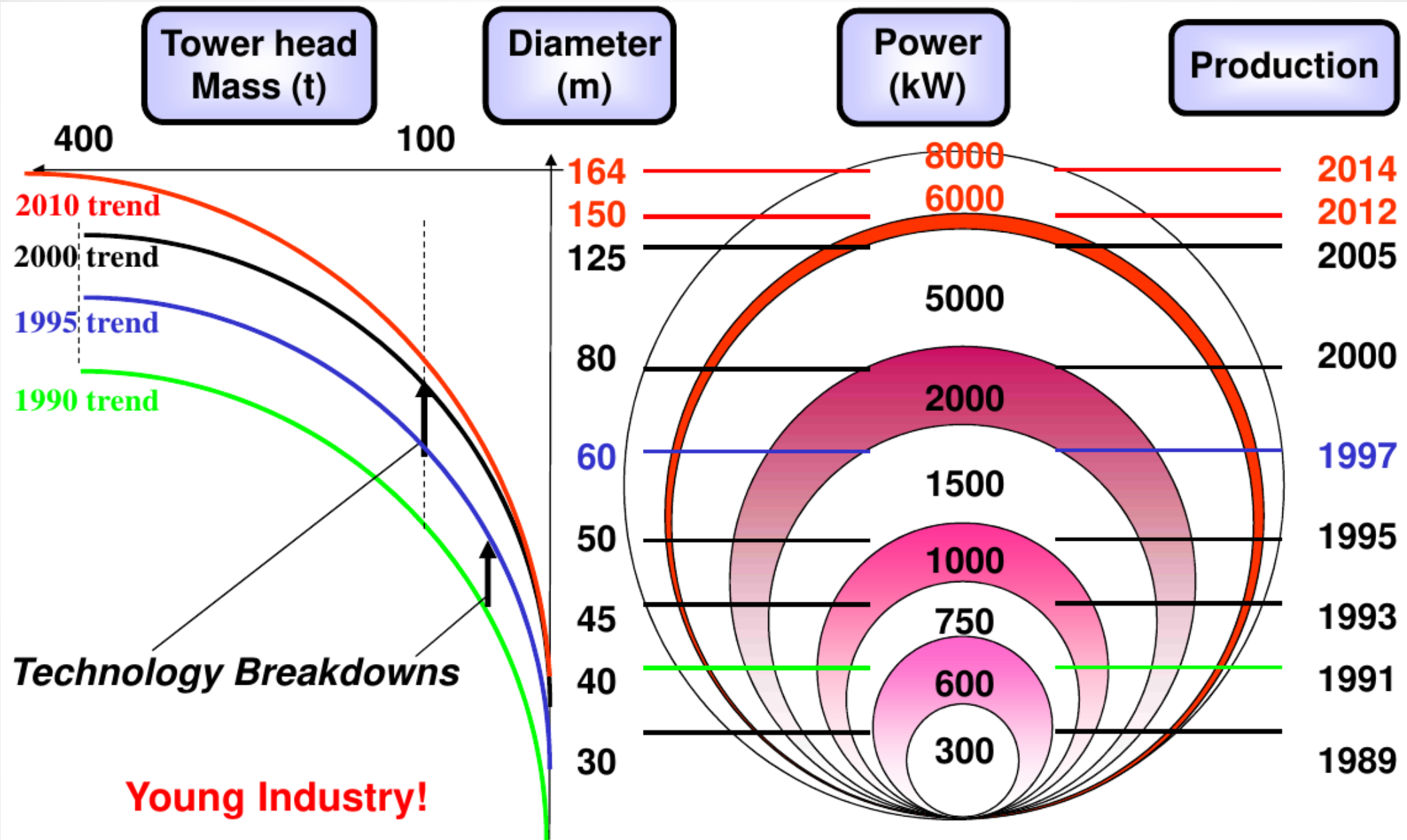


Neyrpic : 130kW - Ø21 (1962-66) & 1000 kW – Ø35 (63)
Asynchronous generator + gearbox + Pitch regulation

BEST-Romani : 800 kW - Ø30 (1958-62)
**Synchronous generator + coupling +
gearbox + Stall regulation**



Evolution des concepts d'éoliennes



Evolution des concepts d'éoliennes



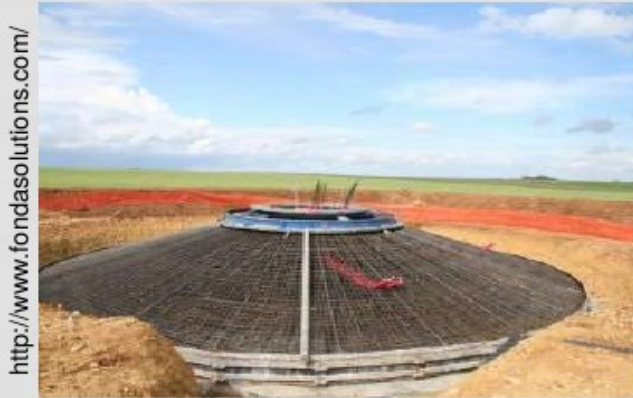
Enercon : pionnier du
"direct drive"



2009: E126 6 - 7.5 MW

Evolution des concepts d'éoliennes

Ordre de grandeur de la masse des différents éléments constitutifs



Fondation : 3000 tonnes
(Diam : 20 m, prof : 3,5 m)



Mât acier : 100 tonnes - Mât béton : 250 tonnes

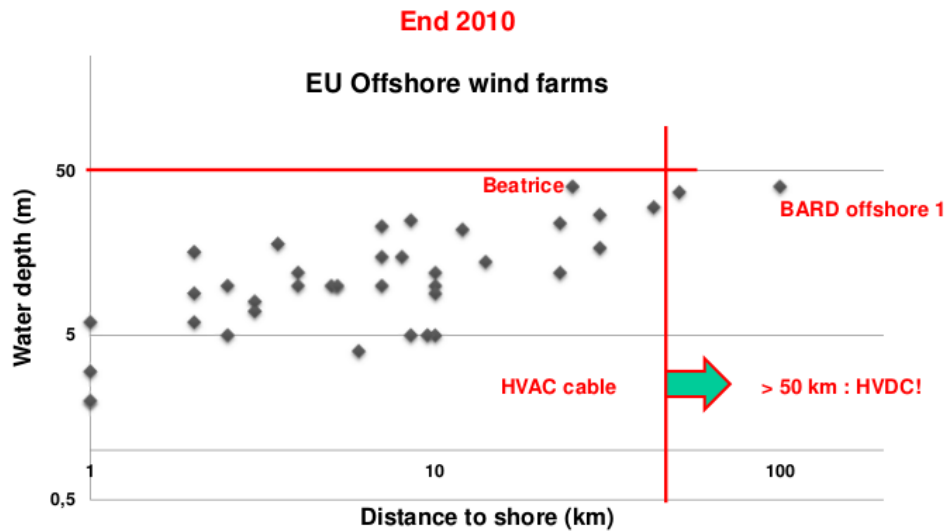


Nacelle : 300 à 500 tonnes

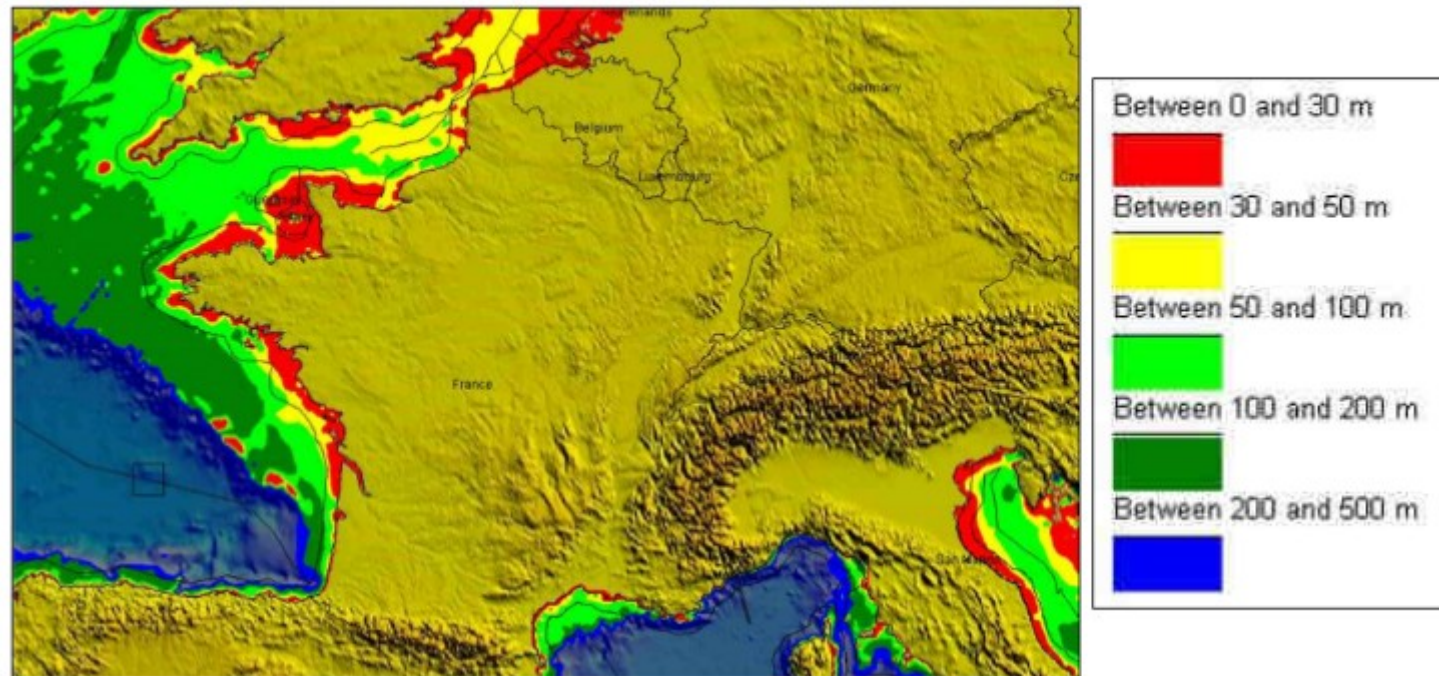


Pale : 6 à 25 tonnes

Evolution des concepts d'éoliennes



Main challenge: use Large marine areas with depth > 50 m



Application

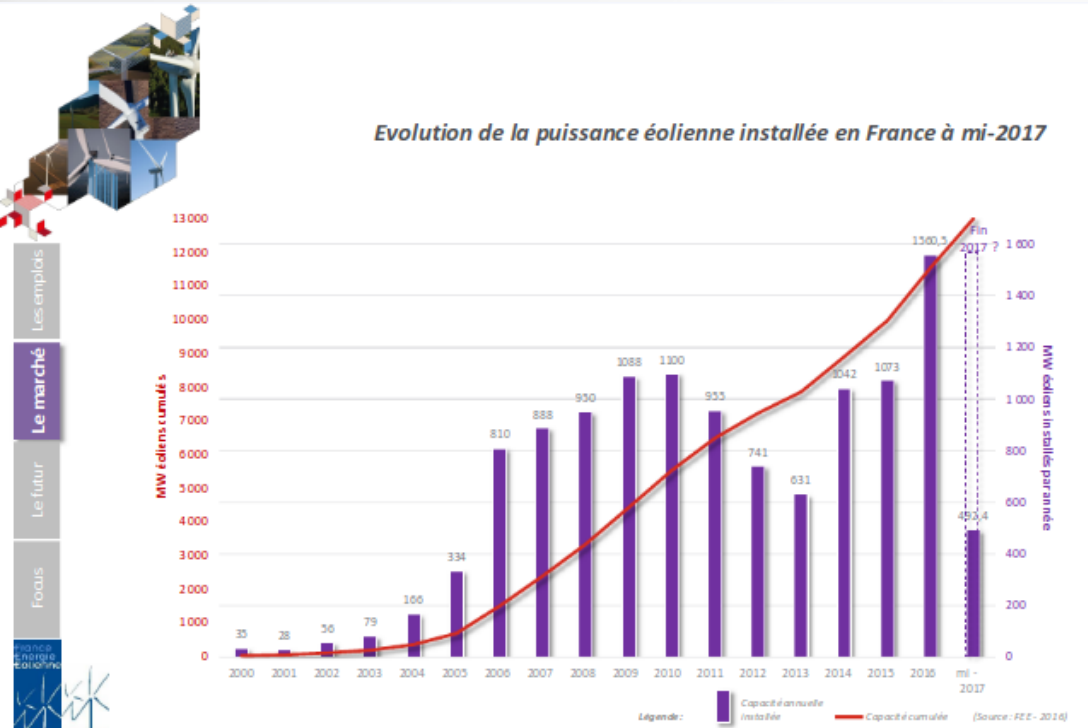
Un rotor éolien $D= 40$ m est supposé fonctionner dans les conditions de la théorie de Froude-Rankine avec le rendement maximum de Betz . La vitesse à l'infini amont est $V_{\infty} = 12$ m/s et la vitesse de rotation 30 rpm.

On vous demande de calculer :

- 1- La force axiale exercée par le vent sur le rotor
- 2- Le diamètre de sillage à l'infini aval du tube de courant qui passe par le rotor éolien
- 3- la vitesse spécifique λ de l'éolienne
- 4- La vitesse du vent relatif au profil en extrémité de pale
- 5- avec l'hypothèse d'un $C_p=0,35$, veuillez calculer alors le coefficient d'induction axiale a .

Prendre pour l'air $\rho = 1.225$ kg/m³

Aspects économiques



Les chiffres clés de l'Observatoire de l'Eolien 2017

- 12 065 MW** installés sur le territoire
- 15 870 emplois** éoliens localisés en France, dont...
 - 1 400** emplois éoliens supplémentaires en 2016 répartis sur...
 - 800** sociétés actives dans l'éolien

Chiffres au 31/12/2016

Observatoire de l'Eolien. © 2017 BearingPoint France SAS | 13

BearingPoint.

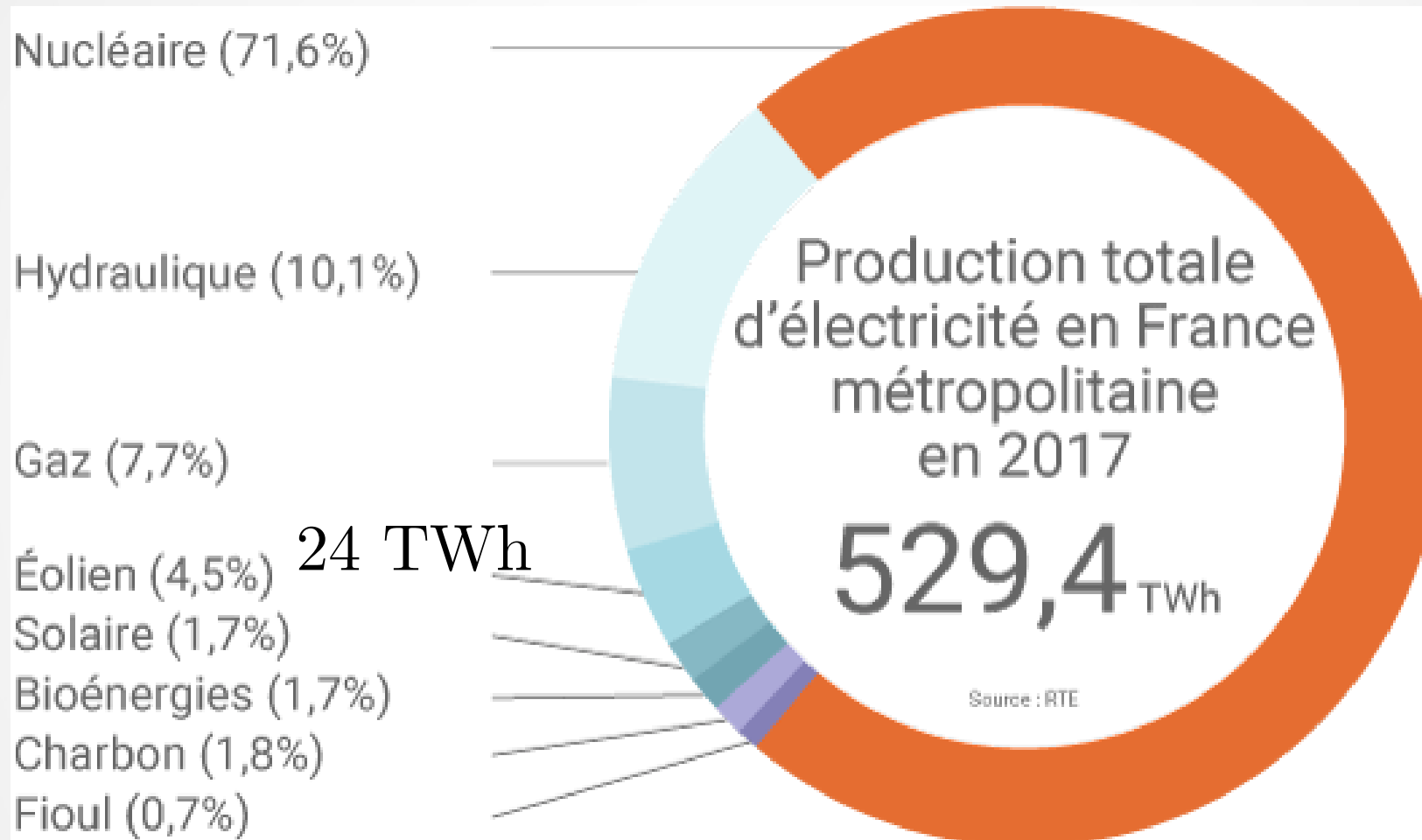
Avec 3 500 km de côtes, la France est le 2ème gisement éolien d'Europe, derrière la Grande-Bretagne et devant l'Allemagne.

Grenelle de la mer : objectif 6 GW d'éolien en mer à l'horizon 2020

Objectif du GB: plus de 20 GW.

Allemagne dépasse son objectif 2020 (6,5 GW) et table sur 15 GW à horizon 2030.

Aspects économiques



Aspects économiques

Puissance installée (onshore et offshore) à fin 2016 en Europe

Zoom sur les 15 pays avec les plus grandes puissances installées à fin 2016

	Pays	Puissance installée 2015 (MW)	Puissance installée 2016 (MW)	Puissance à fin 2016 (MW)	dont puissance offshore à fin 2016 (MW)
1	Allemagne	6 013	5 443	50 019	4 108
2	Espagne	49	–	23 075	5
3	Royaume-Uni	975	736	14 542	5 156
4	France	1 073	1 561	12 065	0
5	Italie	295	282	9 256	0
6	Suède	615	493	6 519	202
7	Turquie	956	1 387	6 081	0
8	Pologne	1 266	682	5 782	0
9	Portugal	132	268	5 316	0
10	Danemark	217	220	5 227	1 271
11	Pays-Bas	621	887	4 328	1 118
12	Irlande	224	384	2 830	25
13	Autriche	319	228	2 632	0
14	Grèce	156	239	2 374	0
15	Finlande	379	570	1 539	32

Légende :

Puissance totale des parcs éoliens installés – en MW



Variation de la puissance installée en 2016 – en %



Sources :

WindEurope - 2016



Les emplois

Le marché

Le futur

Focus



Aspects économiques

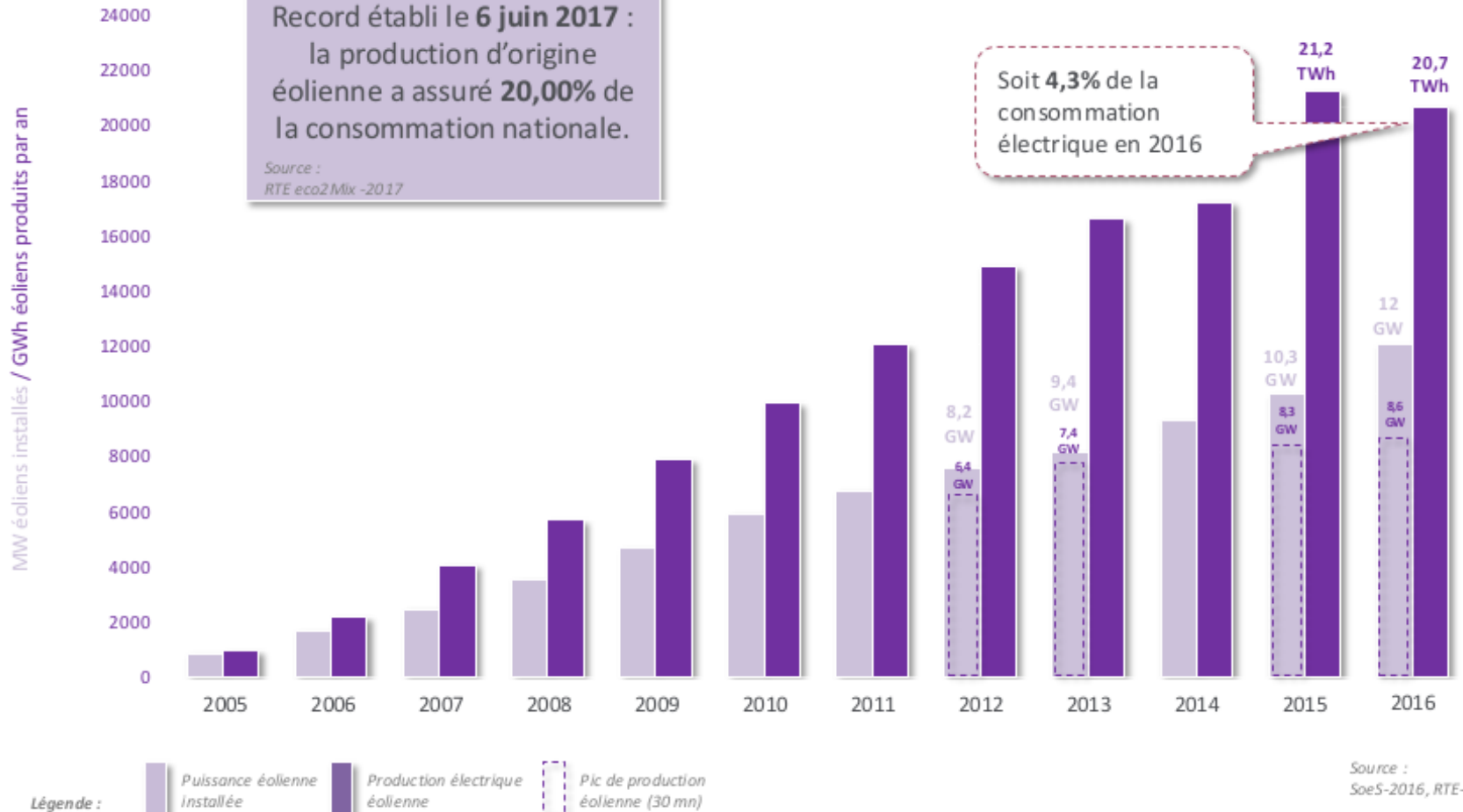


Evolution historique de la production éolienne française

Record établi le 6 juin 2017 :
la production d'origine
éolienne a assuré **20,00%** de
la consommation nationale.

Source :
RTE eco2Mix -2017

Soit **4,3%** de la
consommation
électrique en 2016



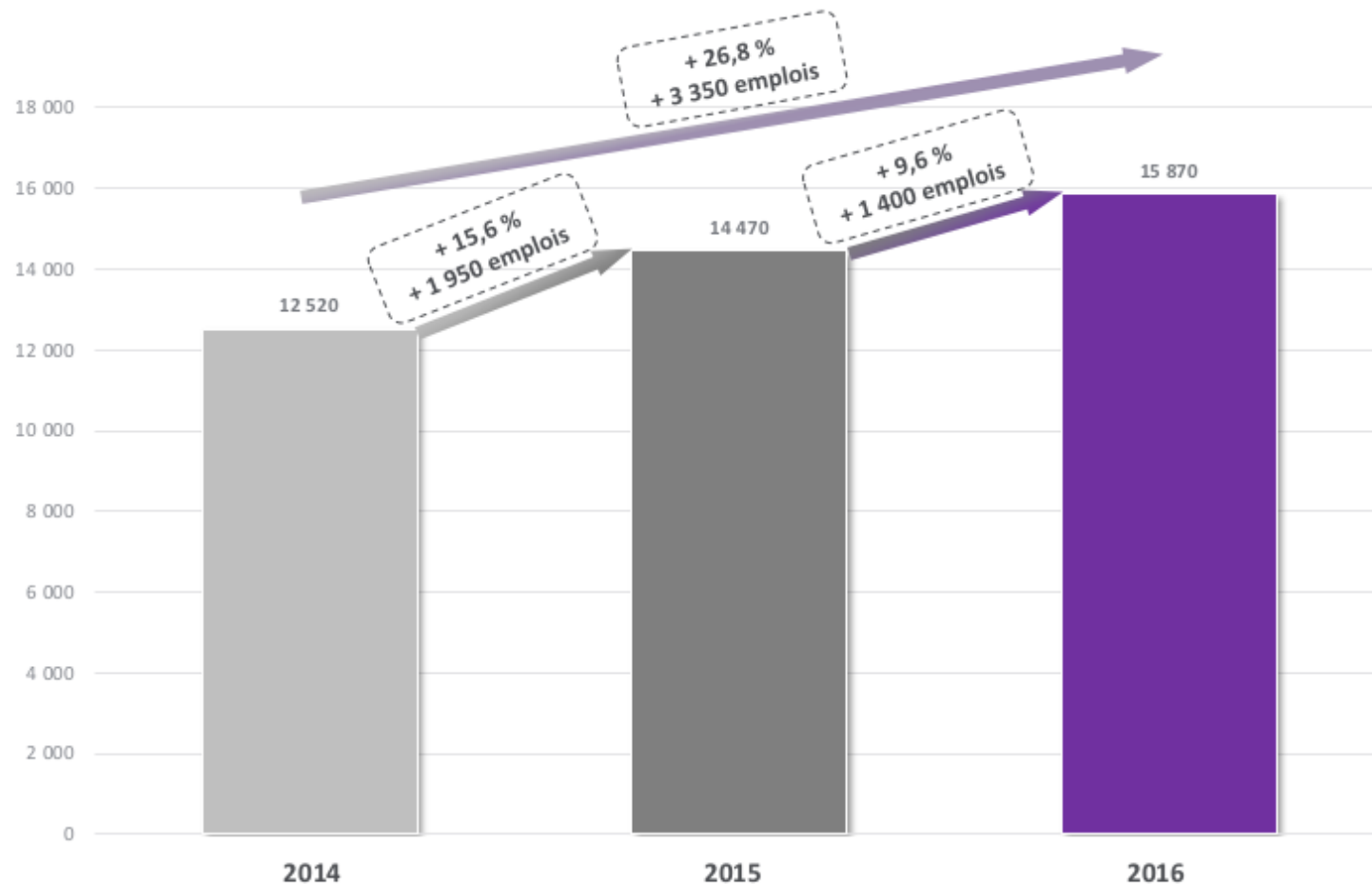
Source :
SoeS-2016, RTE-2017



Les emplois
Le marché
Le futur
Focus

Aspects économiques

Dynamique de l'évolution des emplois éoliens entre 2014 et 2016



Les emplois

Le marché

Le futur

Focus



Aspects économiques



Dynamique de l'emploi éolien sur la chaîne de valeur : évolution des emplois éoliens depuis 2014

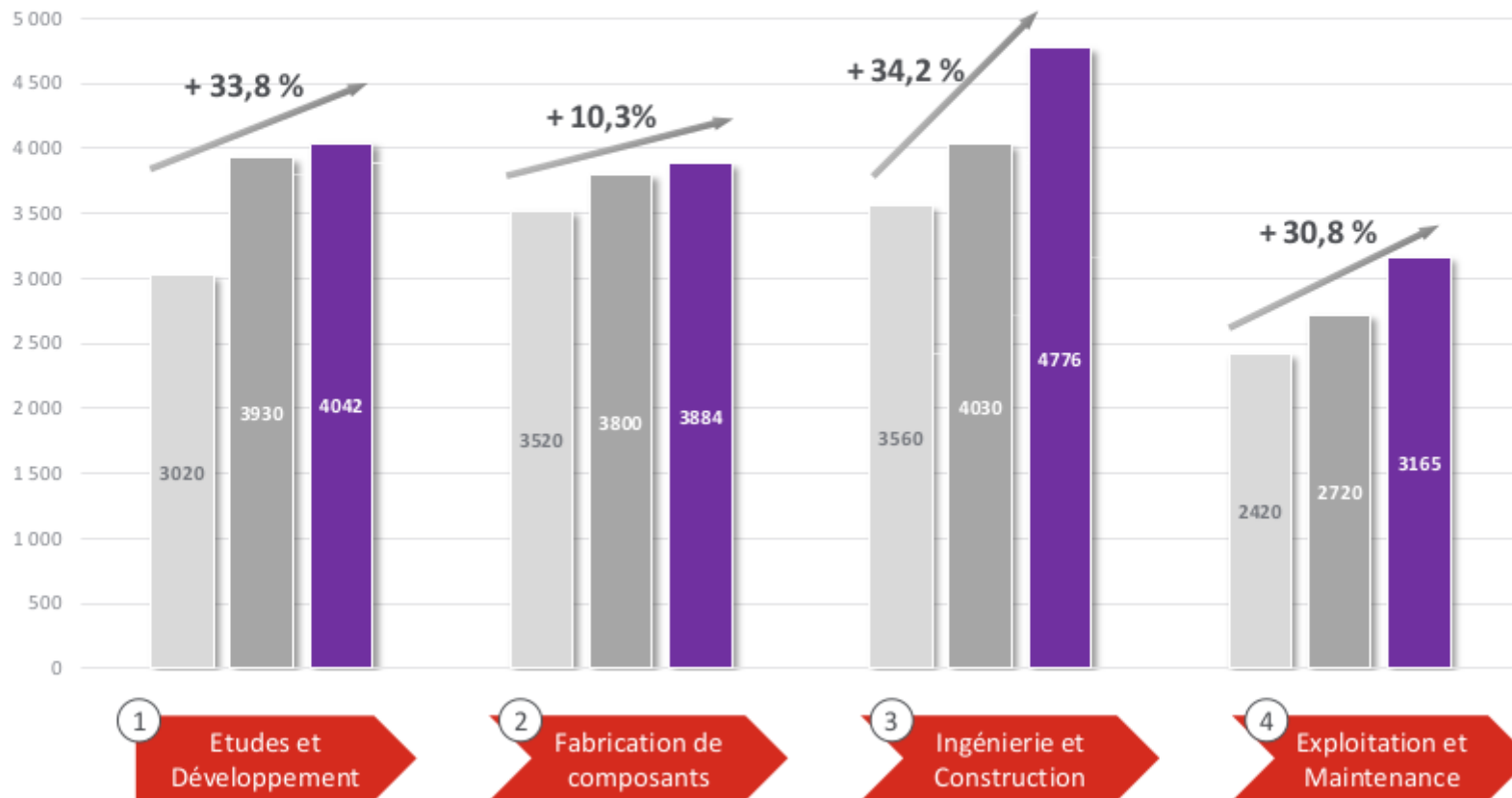
Les emplois

Le marché

Le futur

Focus

France
Énergie
Éolienne

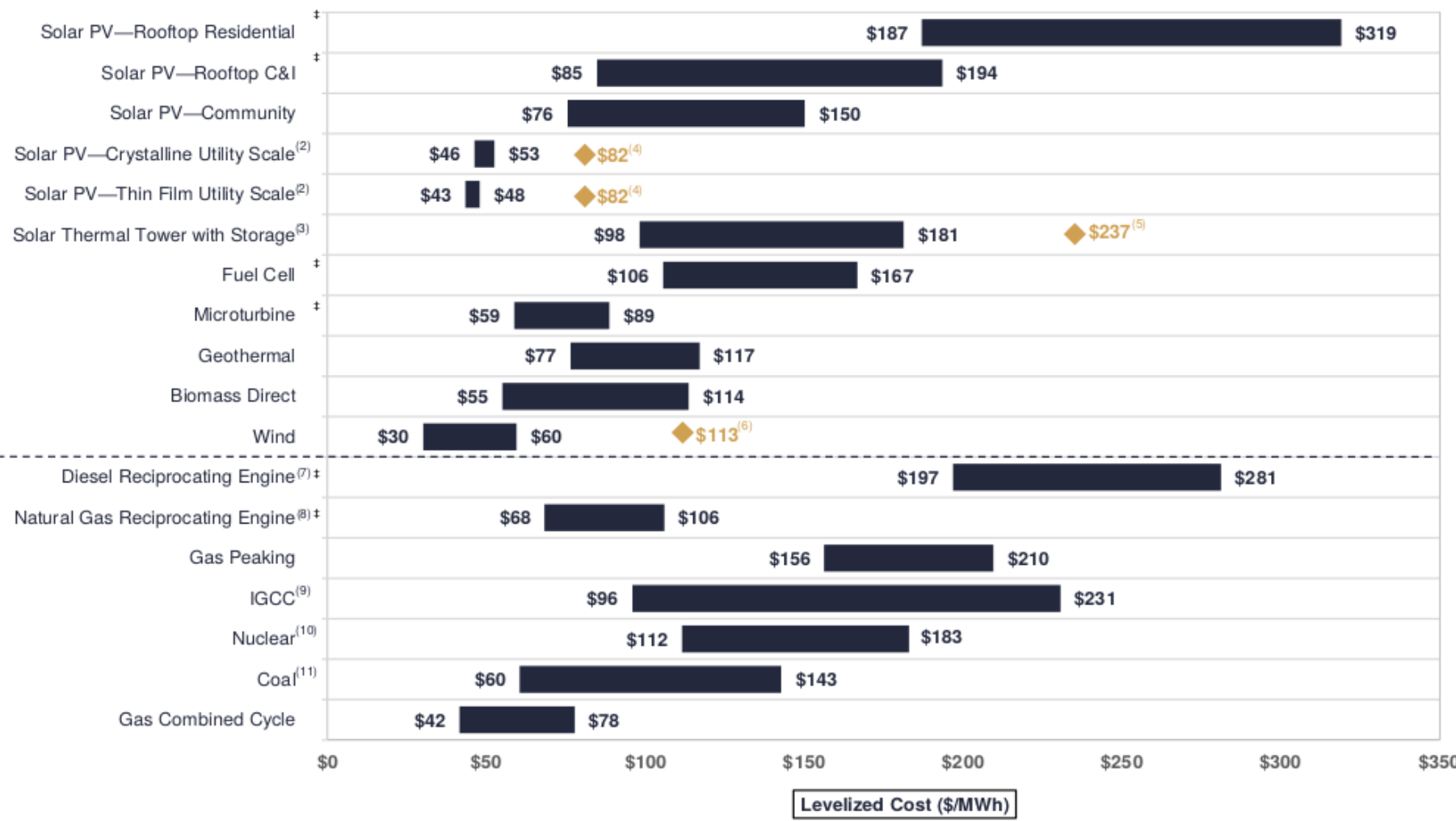


Légende : 2014 2015 2016 Evolution des effectifs éoliens 2014-2016

Aspects économiques

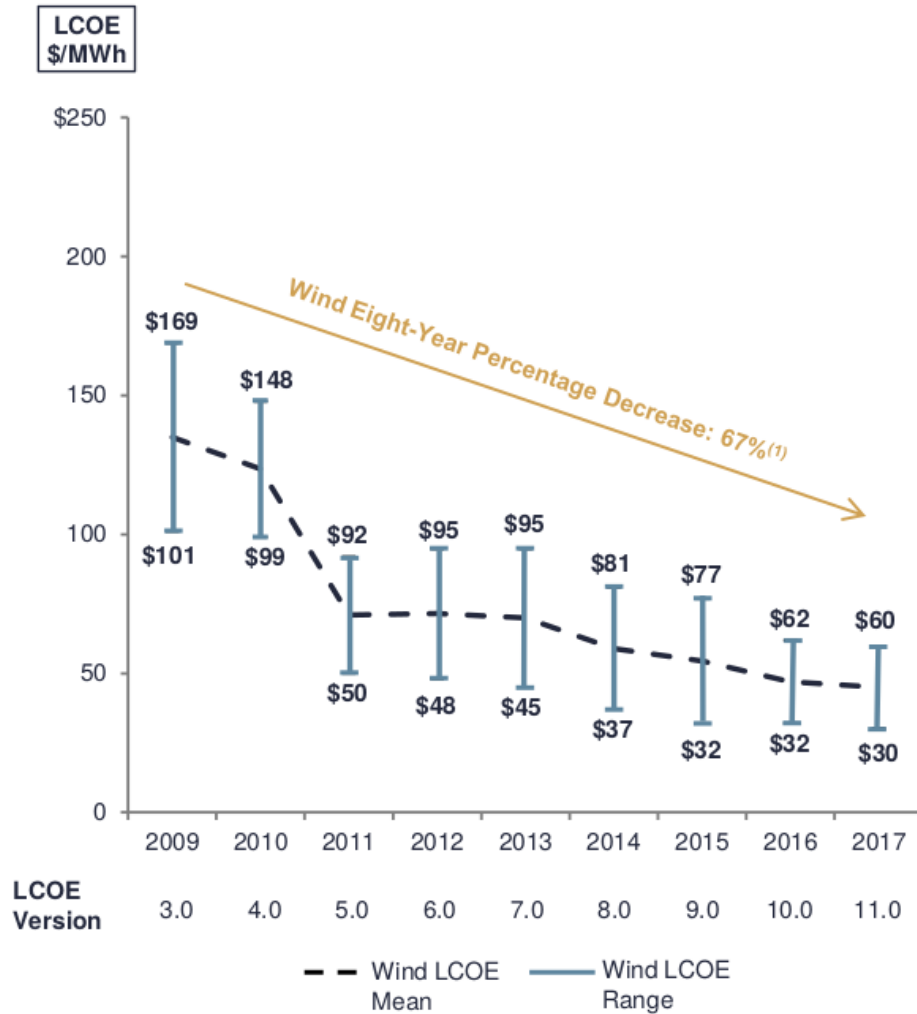
Alternative Energy ⁽¹⁾

Conventional



Aspects économiques

Wind LCOE



Pour $P \geq 600kW$

Installation $\simeq 1 k\text{€}.kW^{-1}$

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

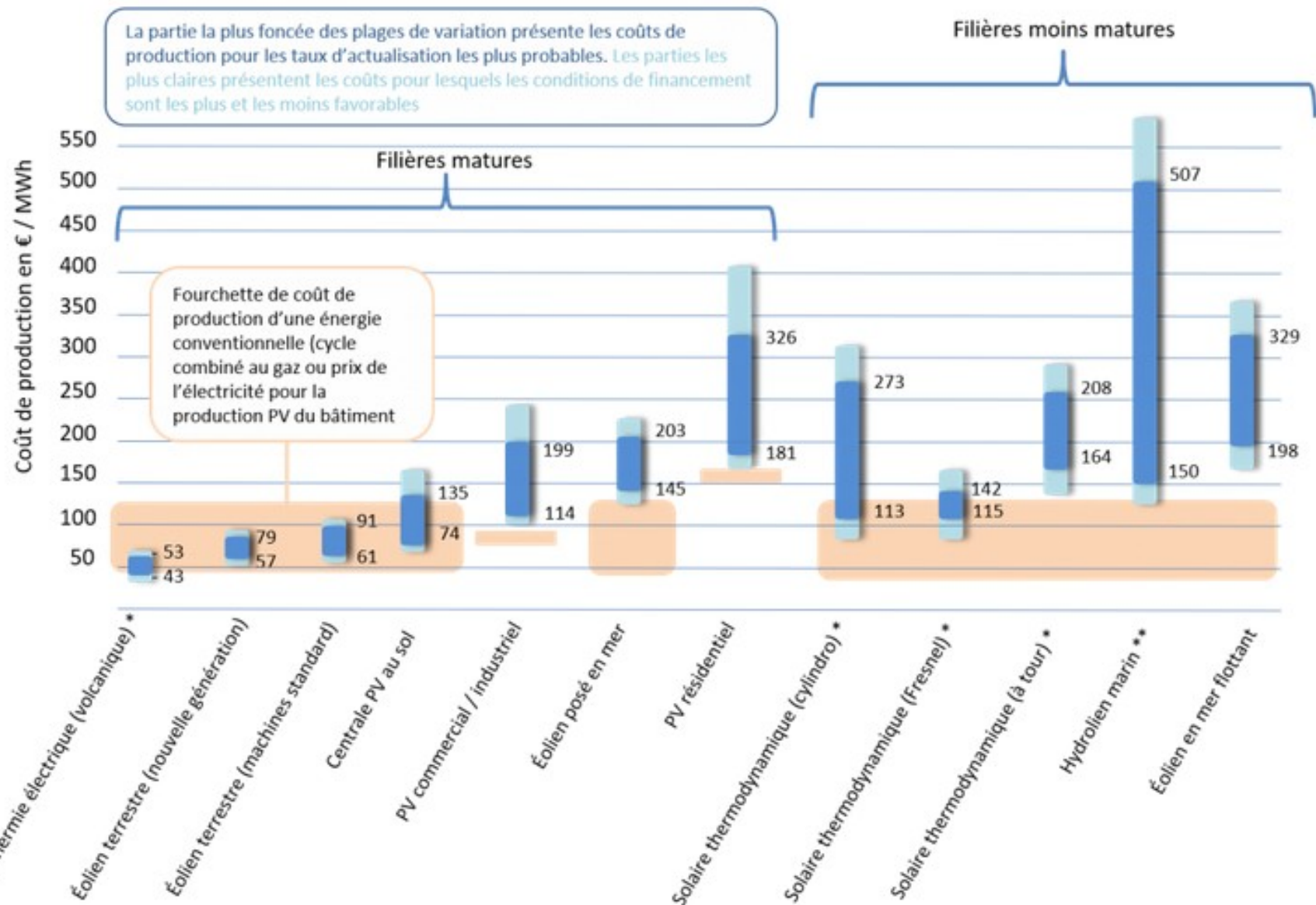
- Environ 3000 d'après le SEPEN

Combien ça coûte ?

- Environ 10 k€/kW pour les petites machines ($P < 100 kW$)
- Environ 4 k€/kW pour les machines de 10 à 50 kW

Aspects économiques

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

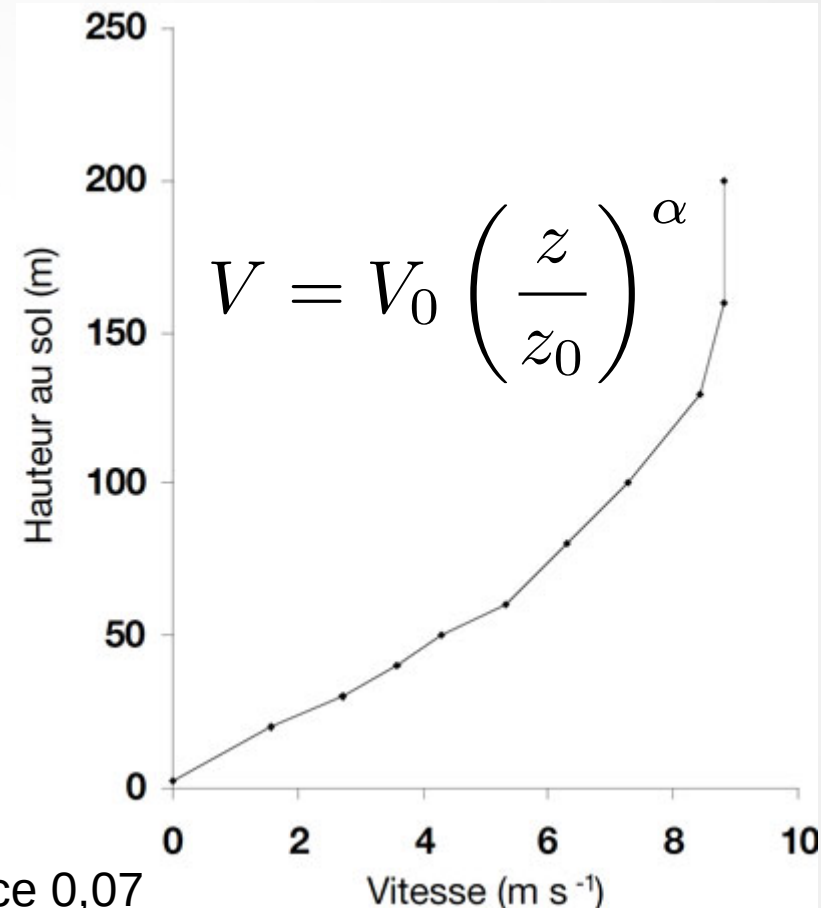
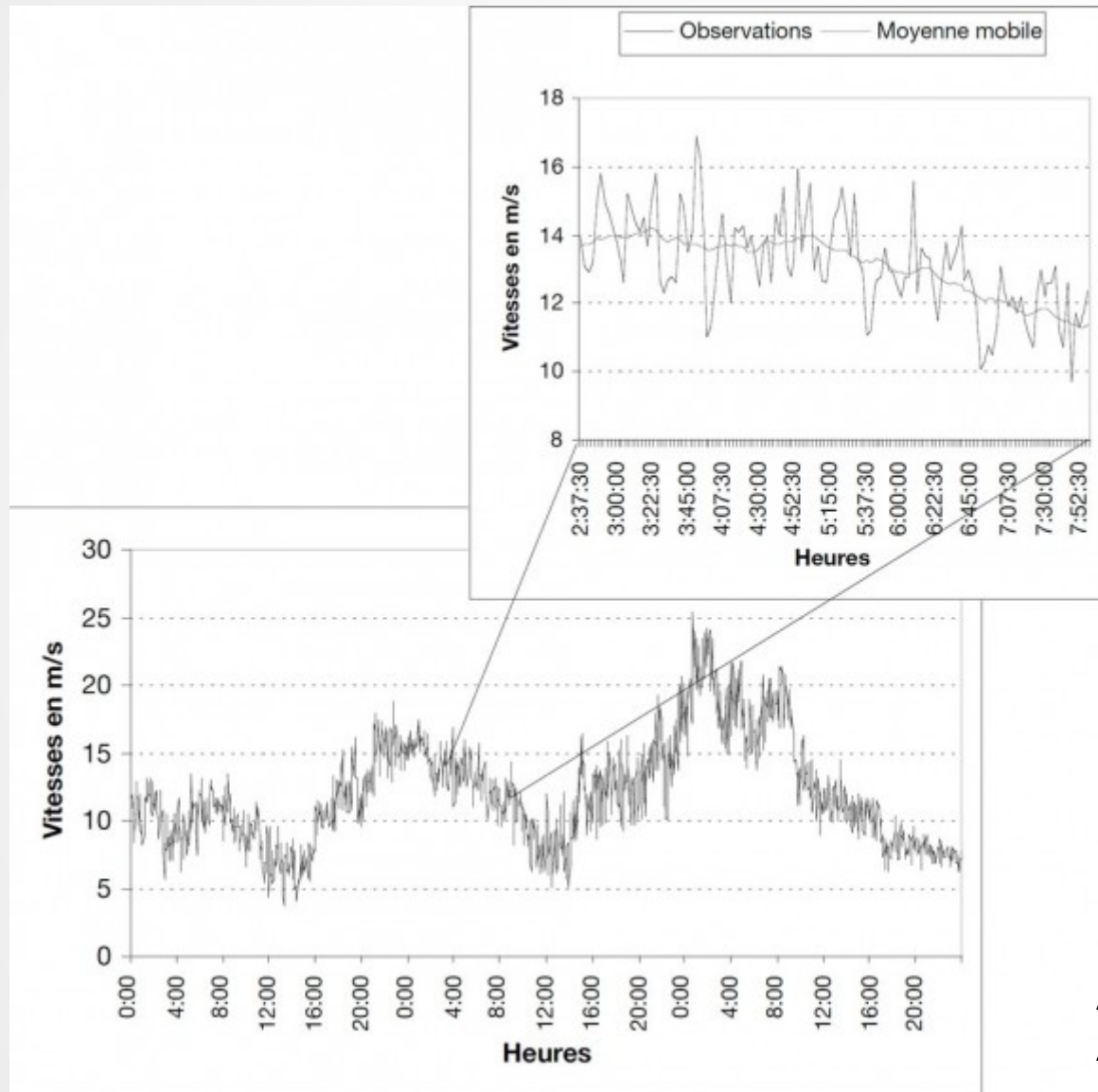


* Données internationales

** Données françaises et internationales

Comment prédire la production ?

Une éolienne fonctionne dans une couche limite turbulente



Glace 0,07

Mer calme 0,09

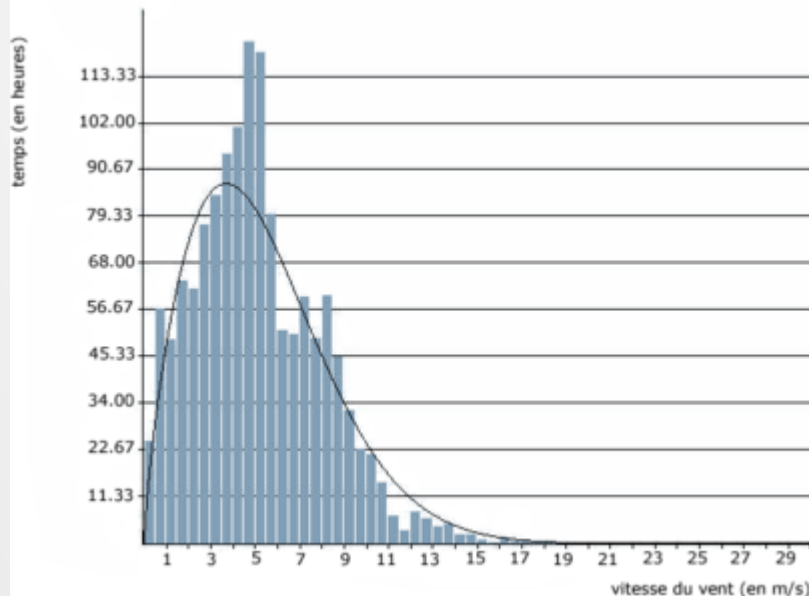
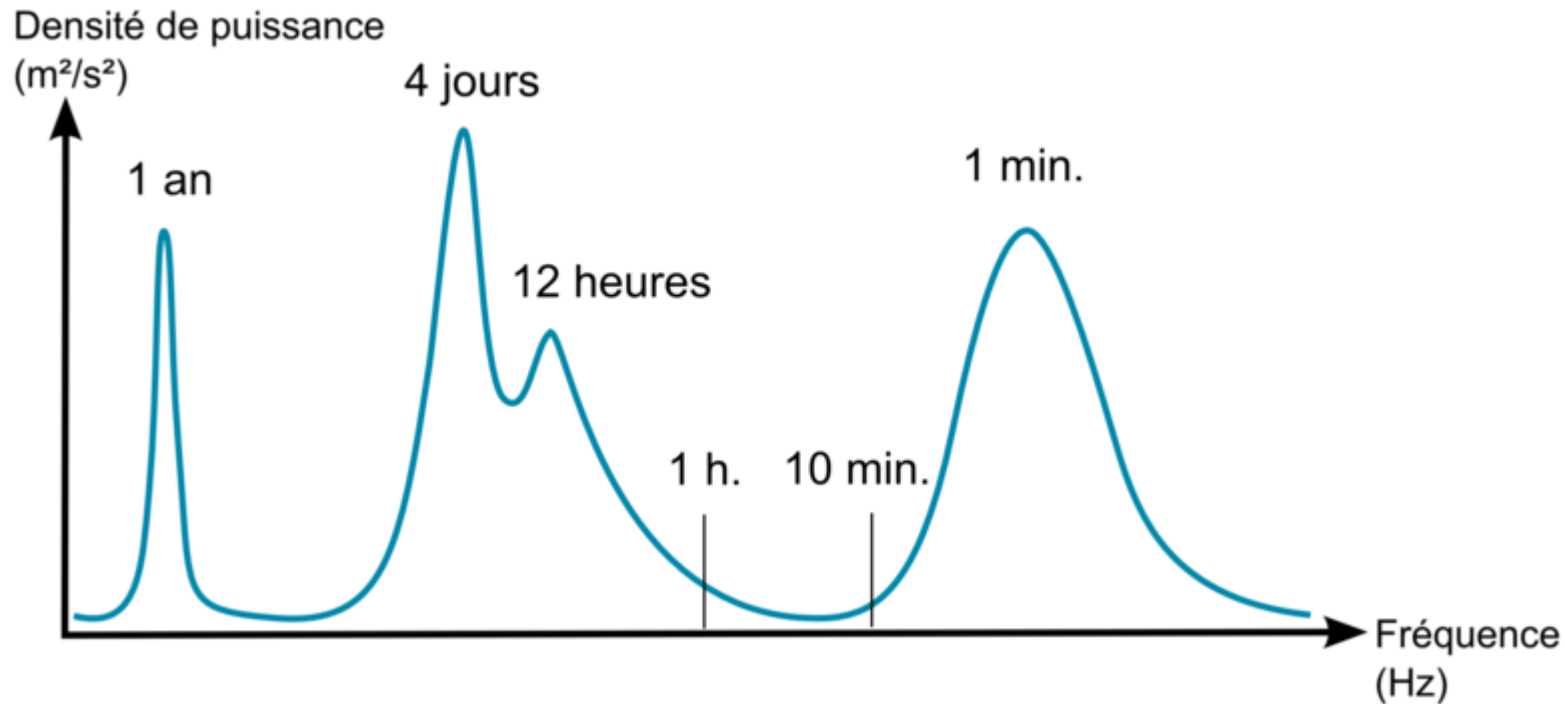
Cultures, prairie à herbe haute 0,19

Arbres et haies épars 0,24

Arbres, haies, quelques bâtiments 0,29

Bois 0,43

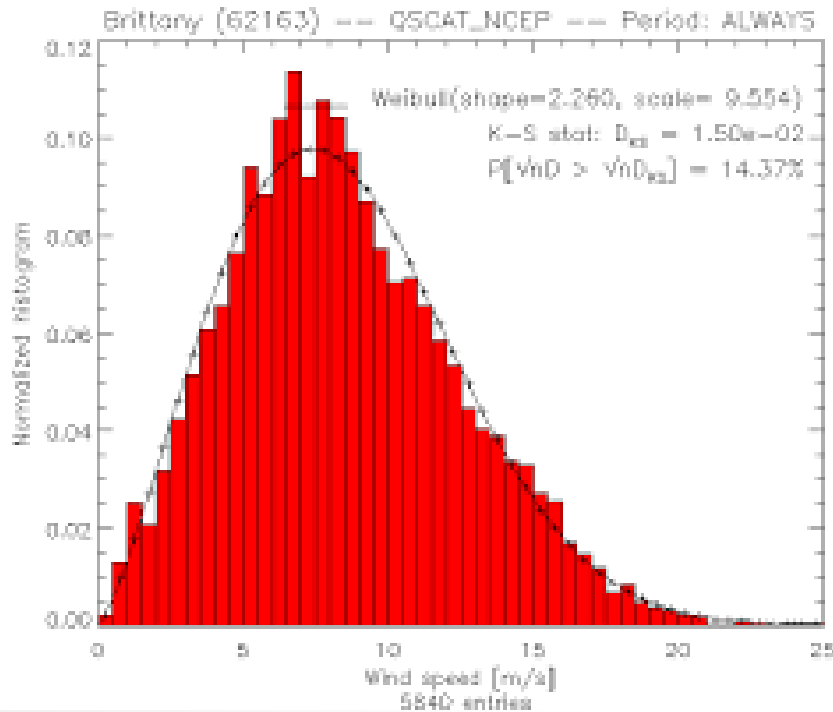
Comment prédire la production ?



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)

Comment prédire la production ?



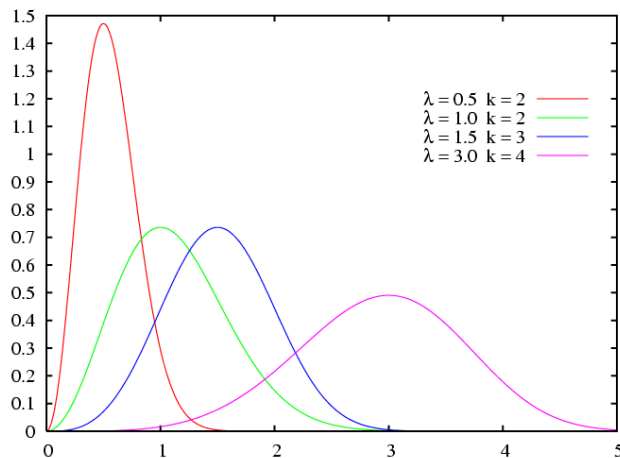
Fonction de répartition cumulative:
Sur un signal temporel de vent de durée T
On compte le temps pendant lequel $v < v_0$
Divisé par le temps d'observation, il donne
la probabilité d'observer $v < v_0$

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

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)

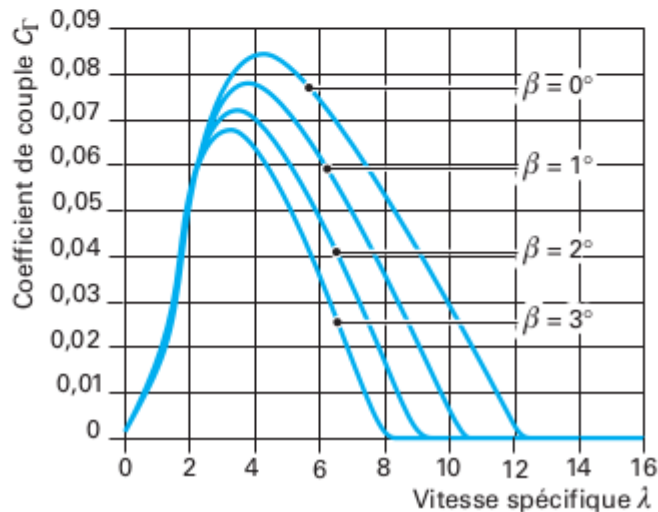
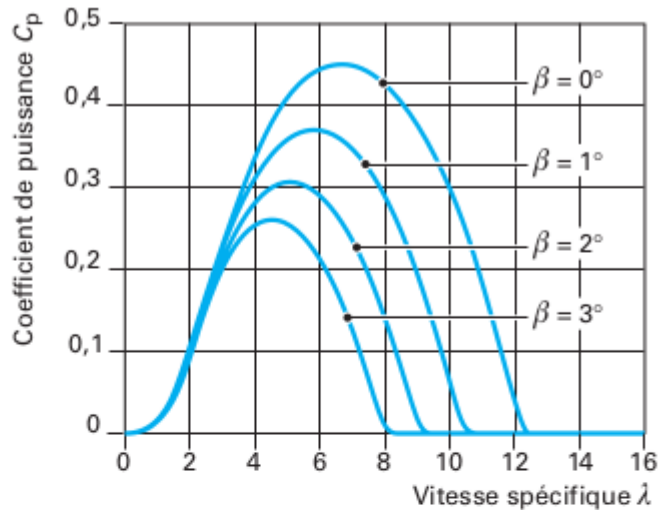
$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$



Comment prédire la production ?

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

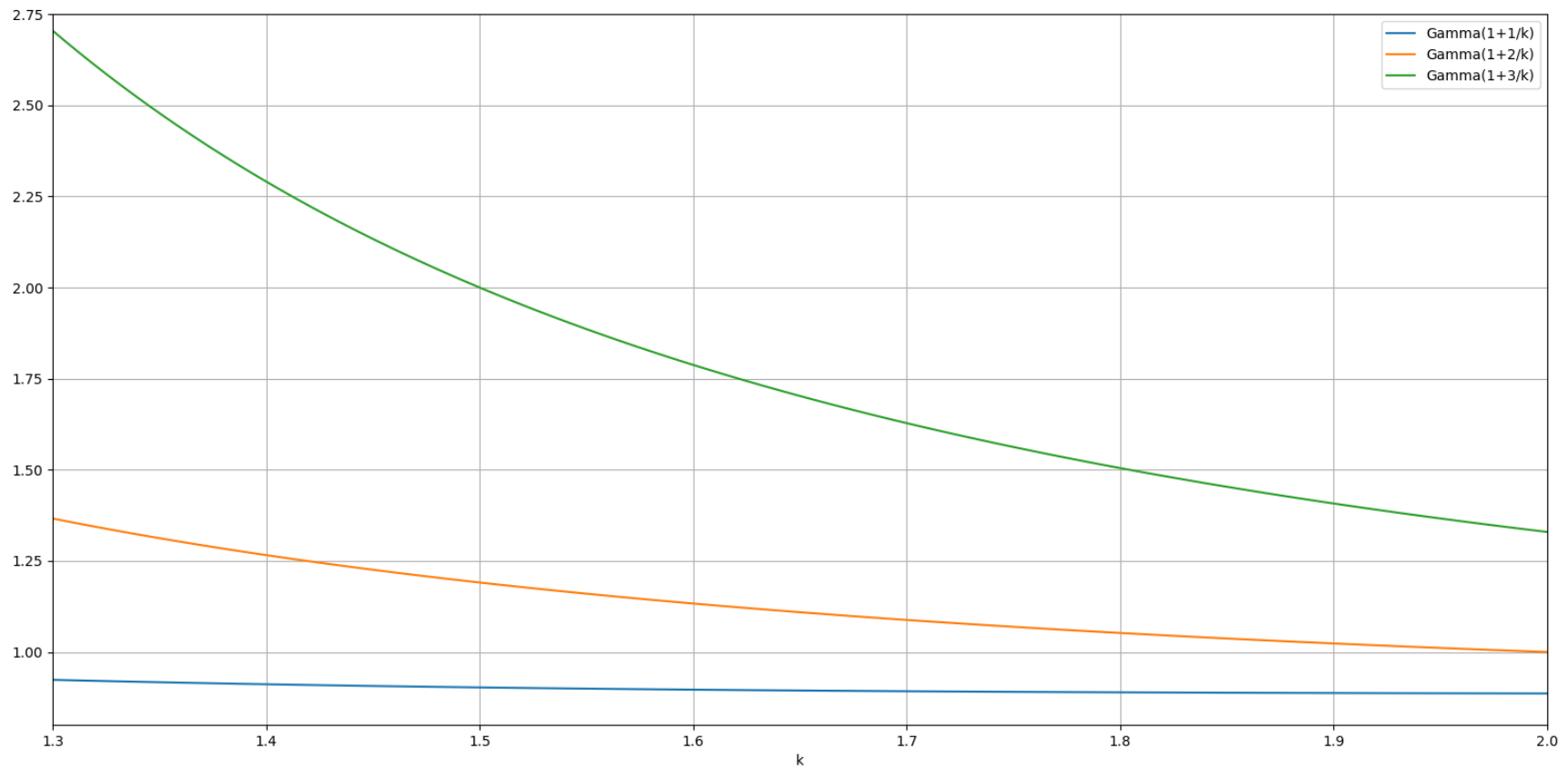
$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} \exp(-t) dt$$

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

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

Application

La fonction Gamma d'Euler est connue et disponible dans les paquets de nombreux outils de calcul numérique (python, ...)



Application

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 $\text{kWh/m}^2/\text{an}$ (avec une masse volumique de 1.225 kg/m^3)

Application

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.