

Conversion électro mécanique de l'énergie

Alexandre LABERGUE

alexandre.labergue@univ-lorraine.fr

Bureau 015 Jaune



Programme & Plan

1. CM n°1

- Introduction générale
- Théorie générale des machines tournantes – Partie 1: rappels
- Théorie générale des machines tournantes – Partie 2: applications aux turbomachines

2. CM n°2

- Turbopompes

3. CM n°3

- Turbines hydrauliques – Partie 1: généralités
- Turbines hydrauliques – Partie 2: turbines à action (Pelton)
- Turbines hydrauliques – Partie 3: turbines à action (Kaplan et Francis)

4. CM n°4

- L'énergie éolien – Partie 1
- L'énergie éolien – Partie 2

Cours → Focus sur éoliennes terrestres modernes



4. CM n°4

Partie 1

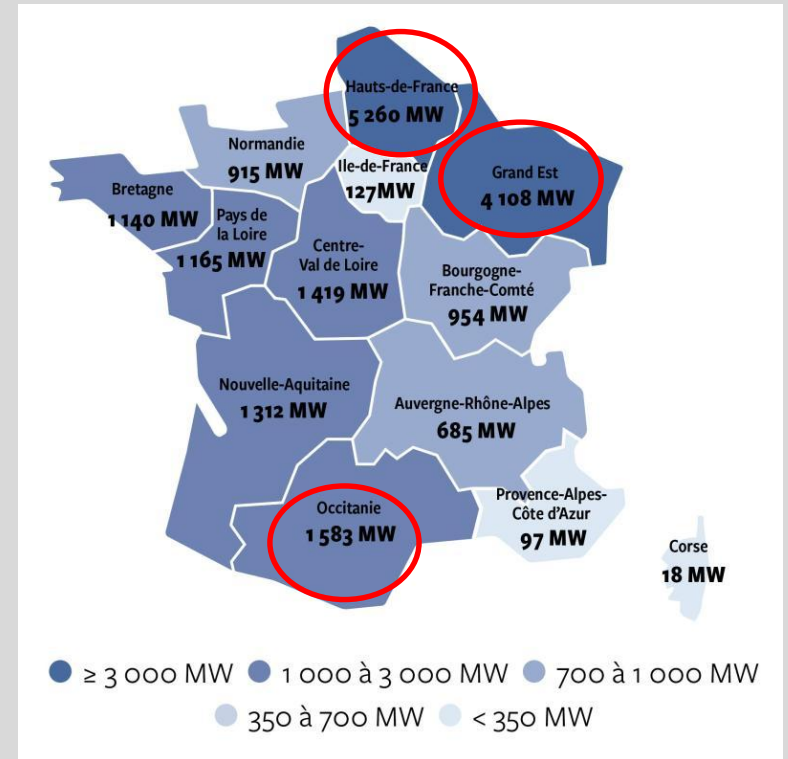
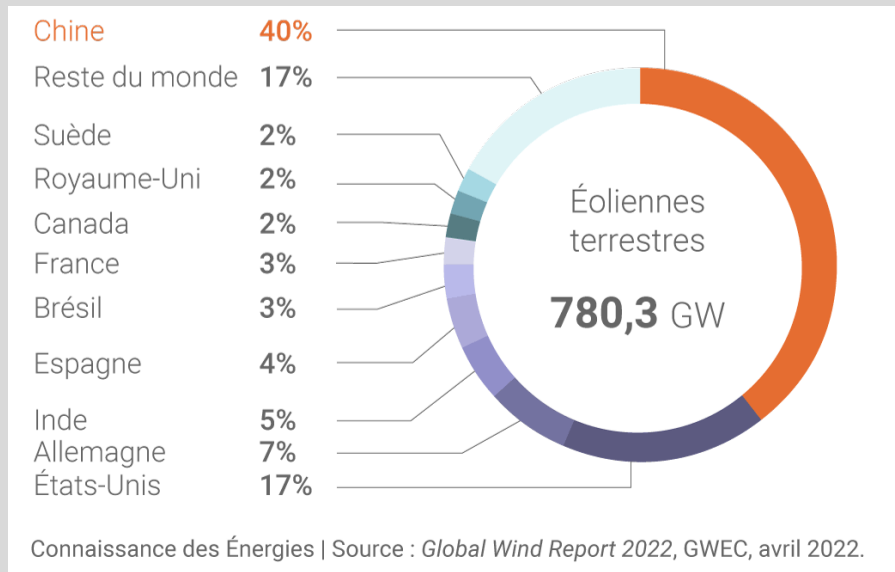
a. Généralités

L'énergie éolien

Répartition des capacités (ou puissance) des parcs éoliens

$P_{mondiale} \sim 1021 \text{ GW (2023)}$

$P_{france} \sim 23,4 \text{ GW (2024)}$



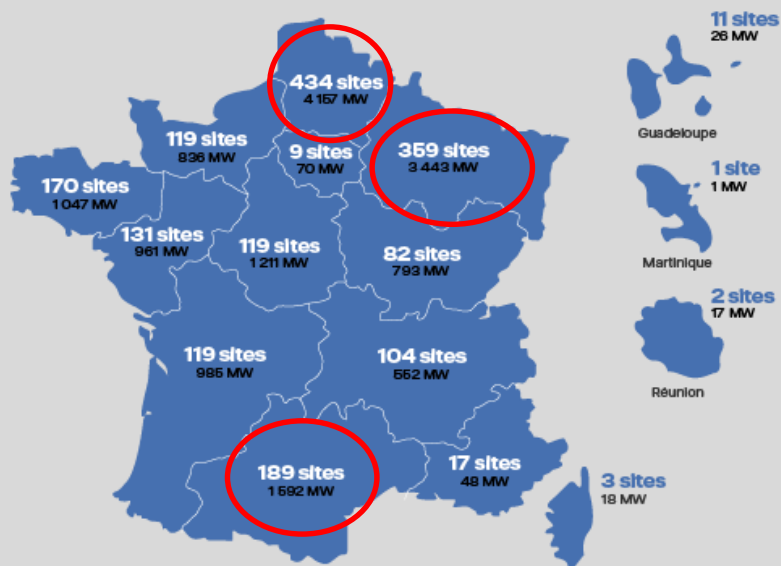
Rappel:

- 1 éolienne: 1 à 5 MW
- 1 réacteur nucléaire: 1000 à 1500 MW

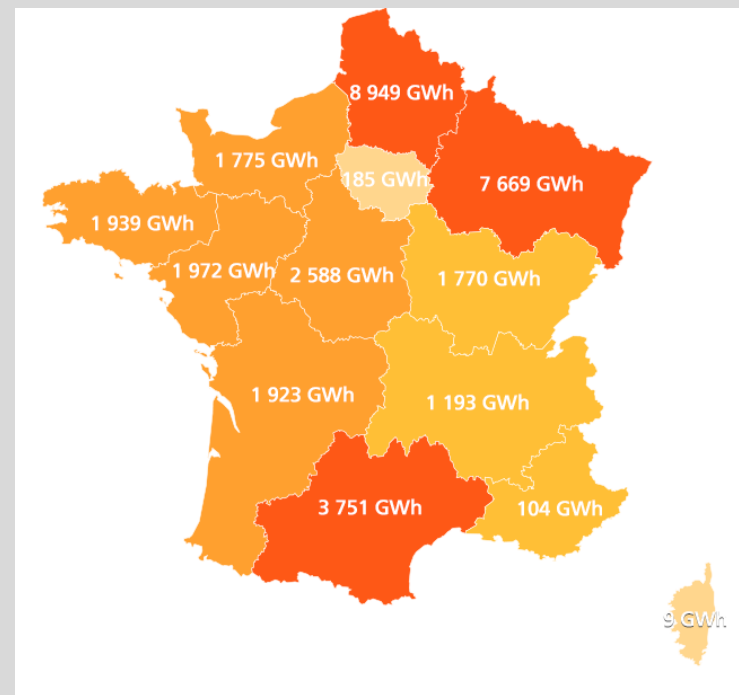
En 2022 (comme en 2017), 3 régions totalisent plus de 60 % de la production d'électricité d'origine éolienne nationale: Grand-Est (7,7 TWh), Hauts de France (9 TWh) et Occitanie (4 TWh).

Production en France

Puissance éolienne raccordée par région au 30 juin 2019



Sources : SDES tableau de bord de l'éolien



Éolien : production par région en 2019

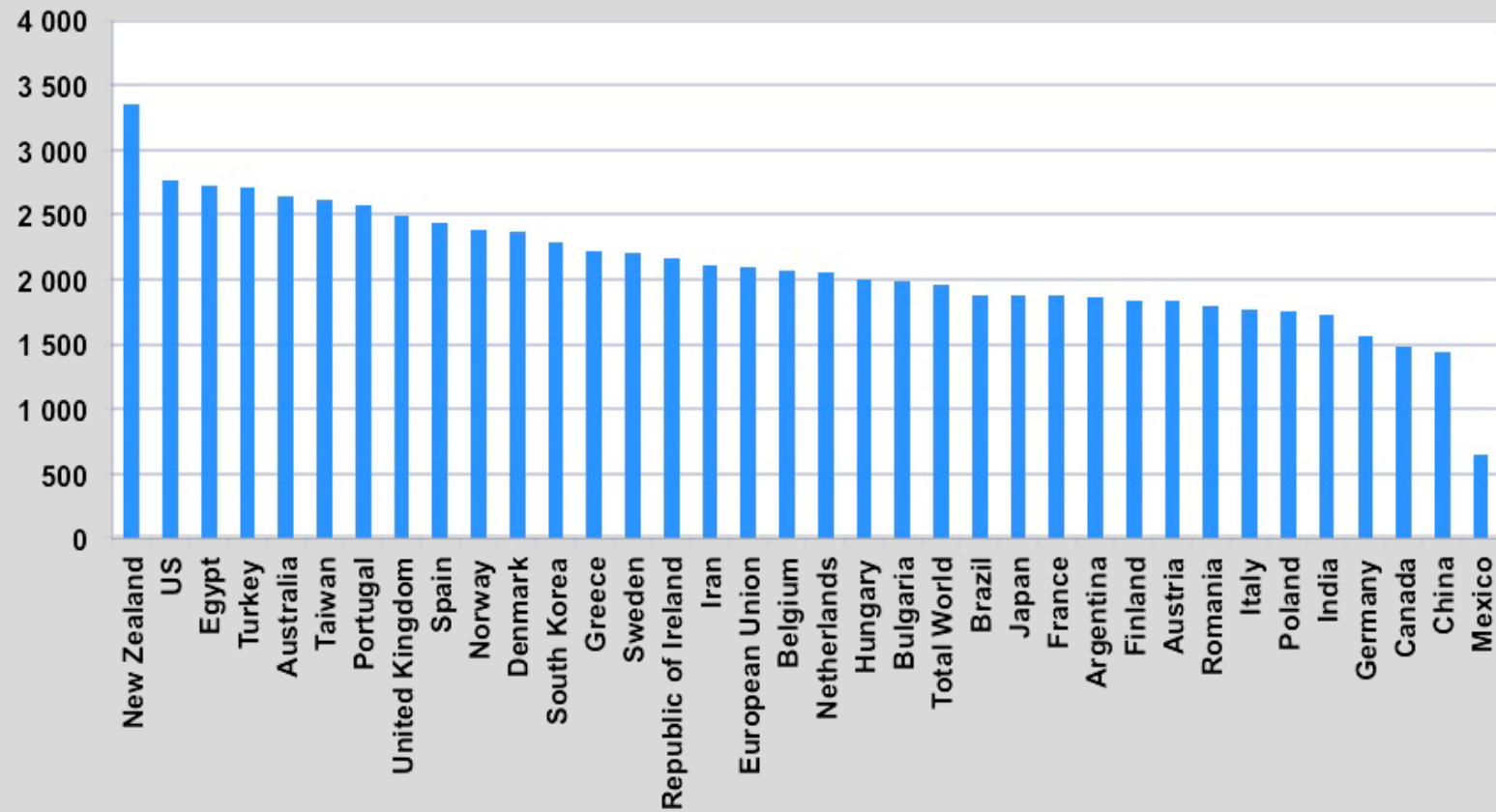
Source RTE - Bilan électrique 2019

Facteur de disponibilités

Dans le monde

→ Généralement pas de foisonnement

Nombre d'heures utiles



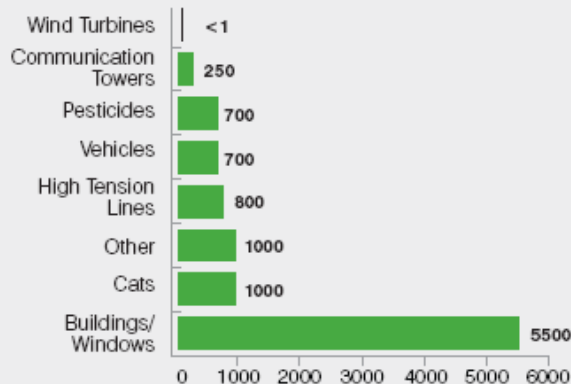
Principaux inconvénients et impacts négatifs

<https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/pourrait-on-alimenter-la-france-en-electricite-uniquement-avec-de-leolien/>

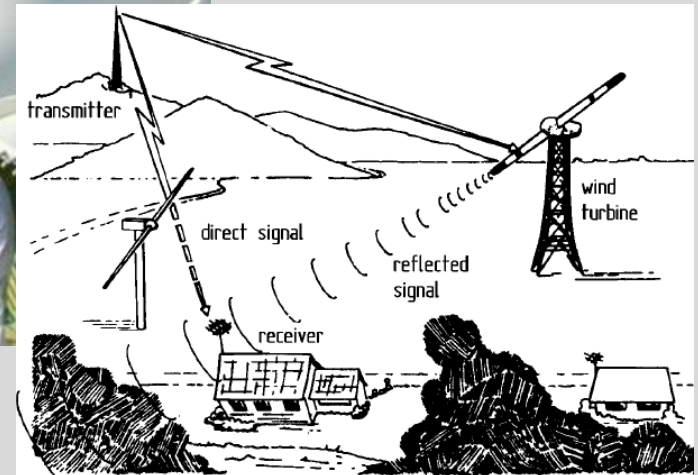
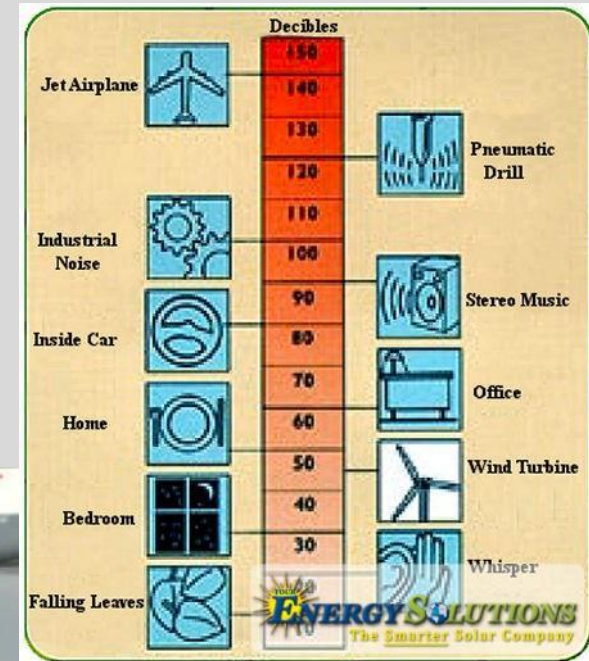
- Source diffuse ($10 \text{ MW/km}^2 \Rightarrow 5\% \text{ territoire national}$) et intermittente (*stockage + appoint*)
- Pollution visuelle et sonore
- Interaction avec vie sauvage (oiseaux)
- Interférences ondes radios, TV
- Recyclage, gestion fin de vie, effet rebond (bilan CO2?)



Causes of Bird Fatalities, Number per 10,000 fatalities



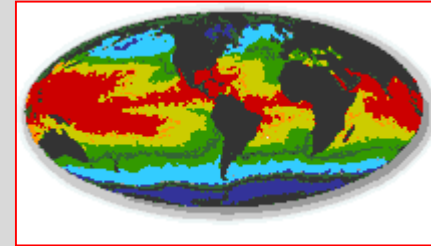
Data Sources: Erickson et al., 2002, Summary of Anthropogenic Causes of Bird Mortality.



L'énergie primaire : *le vent*

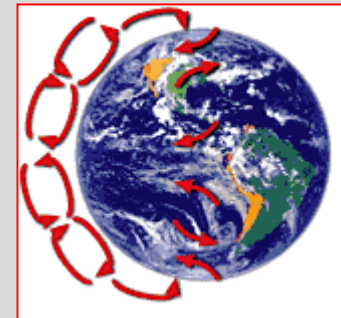
Origines et mécanismes du vent

Soleil (1 à 2% du flux solaire sert à l'éolien)
Echauffement différents entre les pôles et équateur $\Rightarrow \Delta T$



Archimède
Variation de masse volumique $\Rightarrow$ mise en mouvement des masses d'air: équateurs vers les pôles Nord et Sud

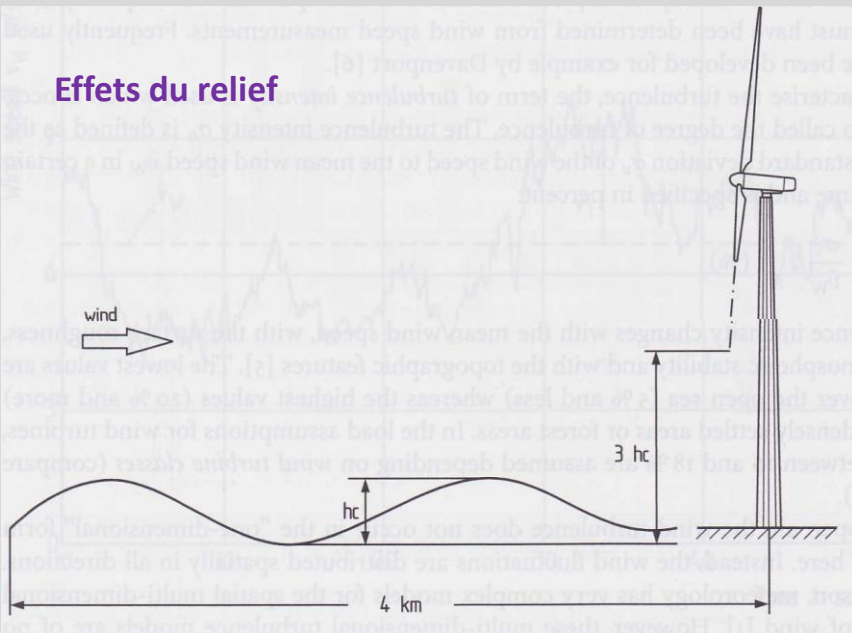
Rotation de la Terre
Force de Coriolis qui dévie les vents $\Rightarrow$ apparition de dépression (équateur) et anticyclones (pôles)



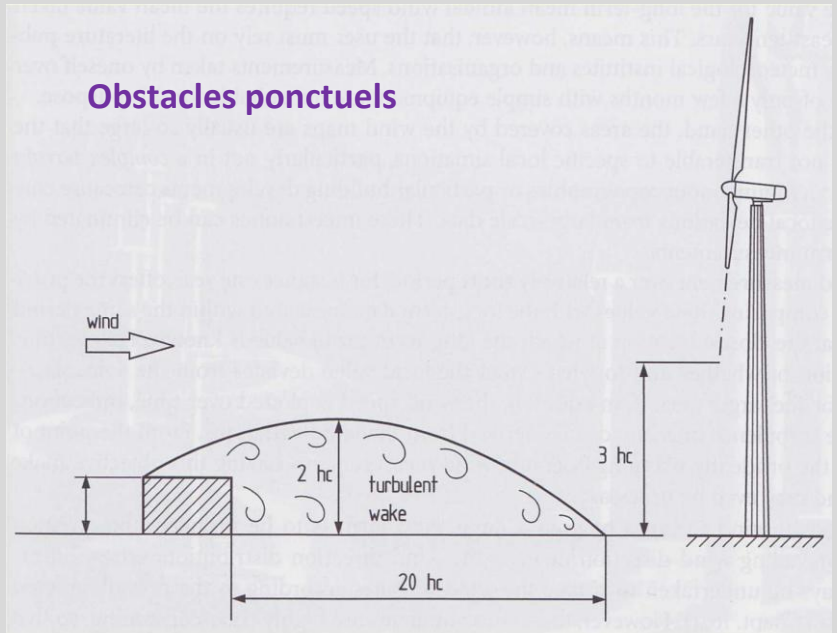
L'énergie primaire : le vent

➤ Influence du sol

Effets du relief



Obstacles ponctuels



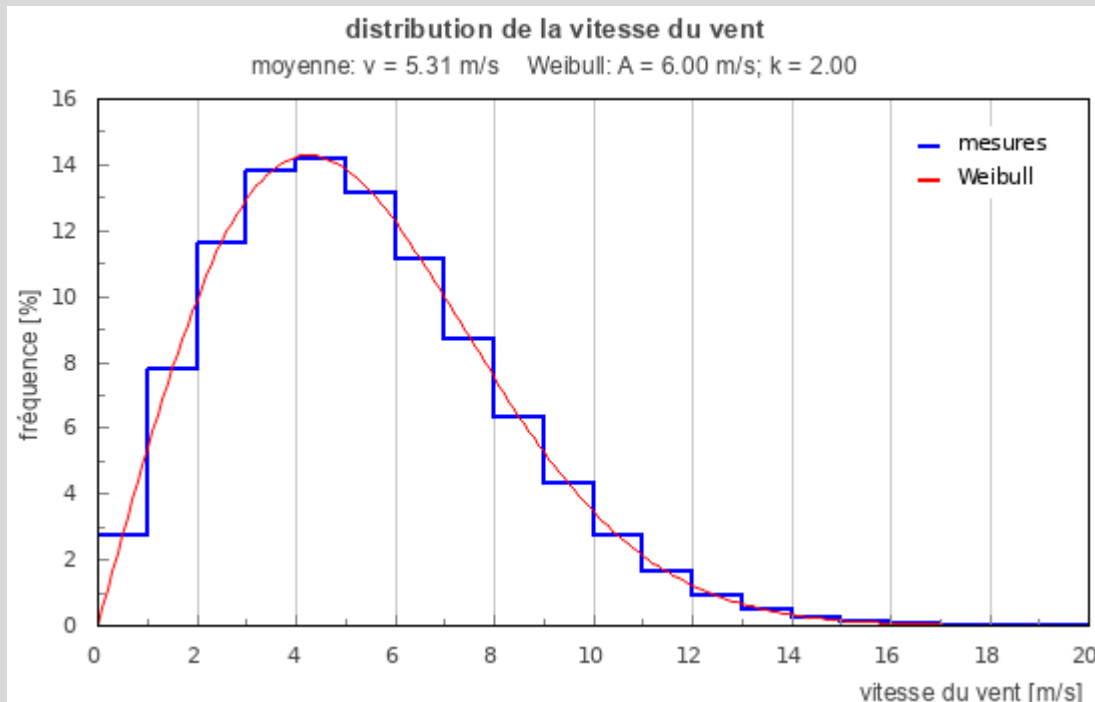
L'énergie primaire : le vent

➤ Les fonctions de distributions du vent

Donnent la répartition, ou fréquence, du vent par classe de vitesse et pour une vitesse moyenne du vent V_0

Faible relief ou littoraux, Rayleigh: $p(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{V_0^2} e^{\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{V_0}\right)^2\right)}$

Relief plus important ou présence de montagnes, Weibull: $p(v) = \frac{\beta}{v} \left(\frac{v}{\gamma}\right)^\beta e^{\left(-\left(\frac{v}{\gamma}\right)^\beta\right)}$



➤ Estimation de la densité d'énergie disponible

Energie maximale susceptible d'être captée sur un an pour une surface balayée de 1 m^2 (W/m^2):

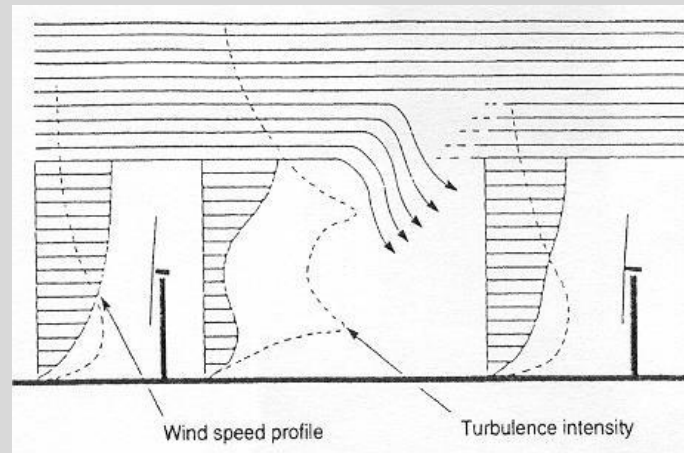
$$E = \int_0^{Nbh/an} P_{\text{élec}} dt$$

avec $P_{\text{élec}}$ puissance électrique de la classe de vent i

$$E = \sum_{v=0}^{25} P_{\text{élec}, i} \cdot p(v) \cdot Nbh/an$$

Les installations terrestres

- On parle de parcs éoliens, champs éoliens ou wind farm in english
- Considérations basiques pour choix du site: qualité du vent, proximité infrastructures (accès et lignes HT), acceptabilité sociétale
- Choix et pré-étude d'un site: minimum un an d'observation et de mesures du vent avant implémentation sur site (rose des vents)
- Deux catégories:
 - ✓ Petites installations autonomes alimentant un site isolé
 - ✓ Grandes installations (parcs éoliens actuels) connectées au réseau de distribution
- Aménagements des parcs éoliens
 - dépend si existe une direction du vent prédominante ou non
 - ✓ Si oui: éoliennes disposées le long d'une ligne perpendiculaire direction prédominante avec distance inter-éolienne de $4D$ et inter-ligne de $10D$
 - ✓ Si non: idem mais avec distance inter-éolienne de $5D$ et inter-ligne de $7D$

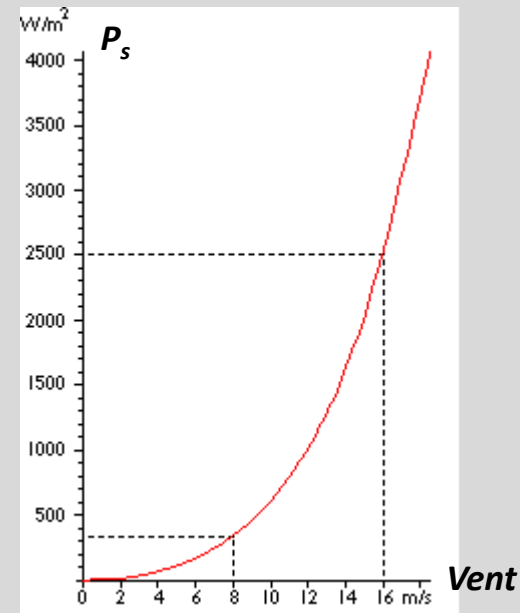
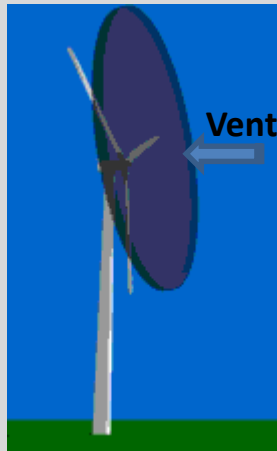
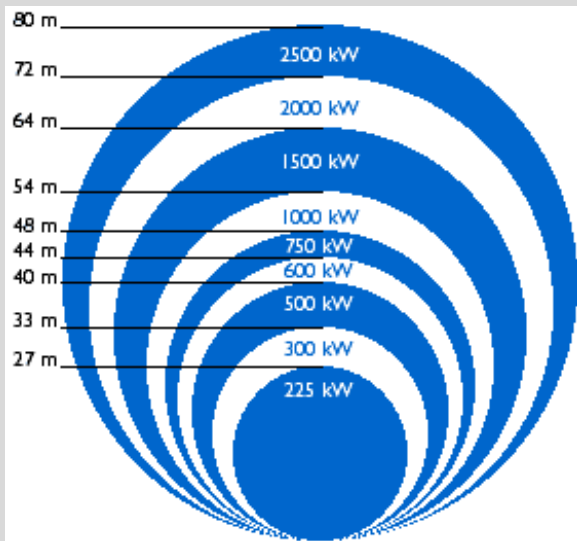


Puissance du flux d'air

Cas d'une éolienne tri pale axe de rotation horizontal

→ La puissance P_s du vent captée par le rotor varie avec la surface balayée A (carré du diamètre D^2 du rotor) et le cube de la vitesse du vent v^3 :

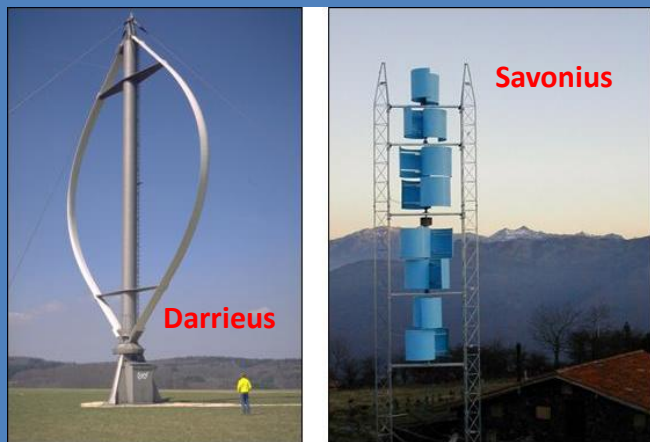
$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A v_{vent}^3$$



b. Classification

Les différents types d'éoliennes

Machines à axe de rotation vertical



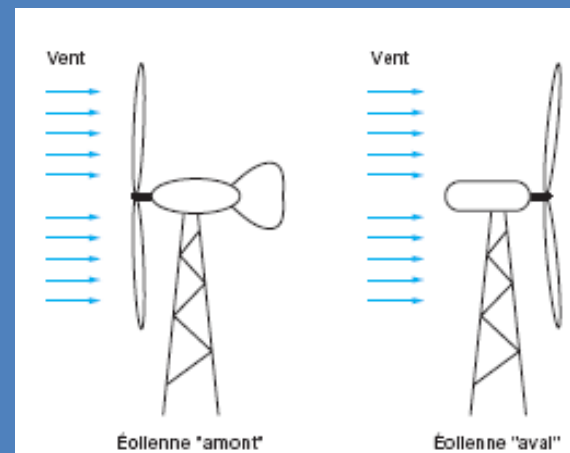
Principaux avantages

- Non sensible à la direction du vent
- Génératrice au sol

Principaux inconvénients

- Faibles rendements
- Occupation au sol
- Difficulté de démarrer seul
- Proximité du sol qui altère ses perfs

Machines à axe de rotation horizontal



Principal avantage

- Meilleurs rendements
- Plus robustes

Principal inconvénient

- Ecologique & nuisance: bruit, visuel, faunes, réflexion ondes
- Maintenance difficile du fait de la hauteur

Courbes caractéristiques

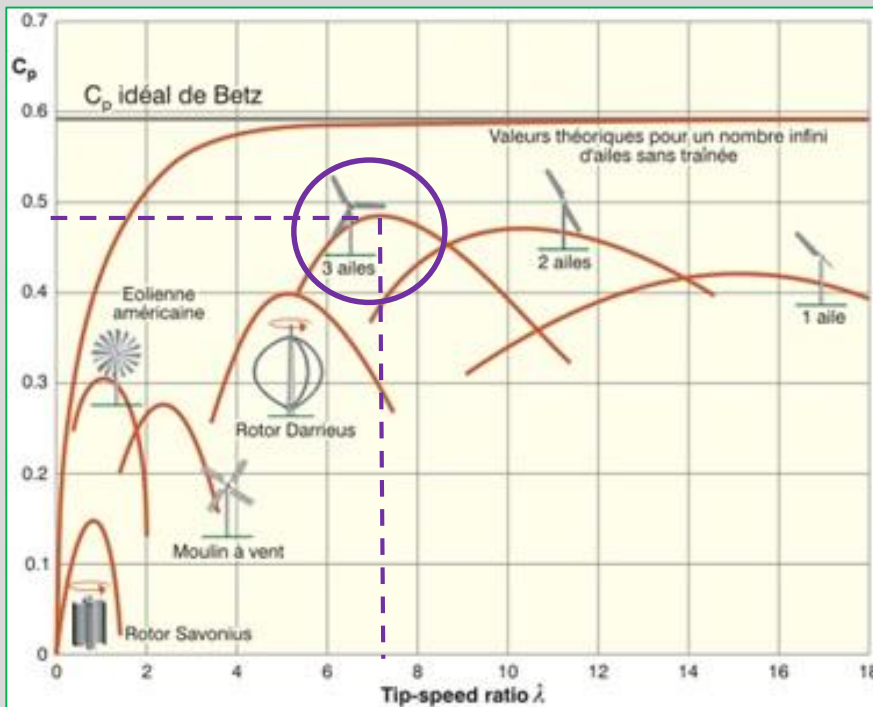
- Coefficient de puissance mécanique C_p ou électrique

$$C_{pm} = \frac{P_m}{P_{vent}} \quad C_{p\acute{e}lec} = \frac{P_{\acute{e}lec}}{P_{vent}}$$

- Vitesse spécifique λ

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_{vent}}$$

- La connaissance du C_{pmax} permet entre autre de classer les différents types d'éoliennes



Classement des éoliennes

➤ Eoliennes lentes

- λ de 0.9 à ~ 1.5
- $C_p \sim 0.3$

➤ Eoliennes rapides

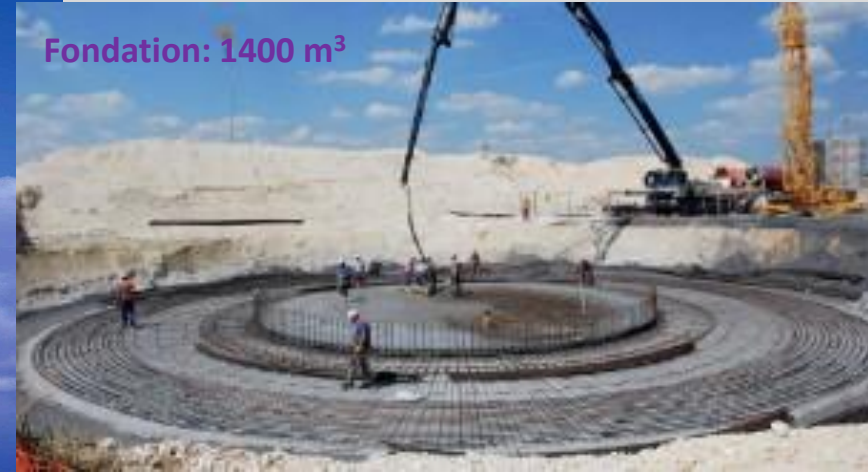
- λ de 5 à ~ 12 (augmente avec nombre de pales)
- $C_p \sim 0.45$ (diminue avec le nombre de pales)

Partie 2

a. Les éoliennes tripales, axe de rotation horizontal

➤ **Exemple 1**

- ✓ Fabricant: *Enercon*; Modèle E126
- ✓ Mise en service en 2011
- ✓ Masse: 1600 tonnes
- ✓ Puissance nom.: 7.5 MW
- ✓ Diamètre rotor: 127 m
- ✓ Hauteur mât: 135 m



➤ **Exemple 2**

- ✓ Fabricant: *Vestas*; Modèle V164
- ✓ Mise en service en 2014
- ✓ Masse: 1300 tonnes
- ✓ Puissance nom.: 8 MW
- ✓ Diamètre rotor: 164 m
- ✓ Hauteur mât: 220 m



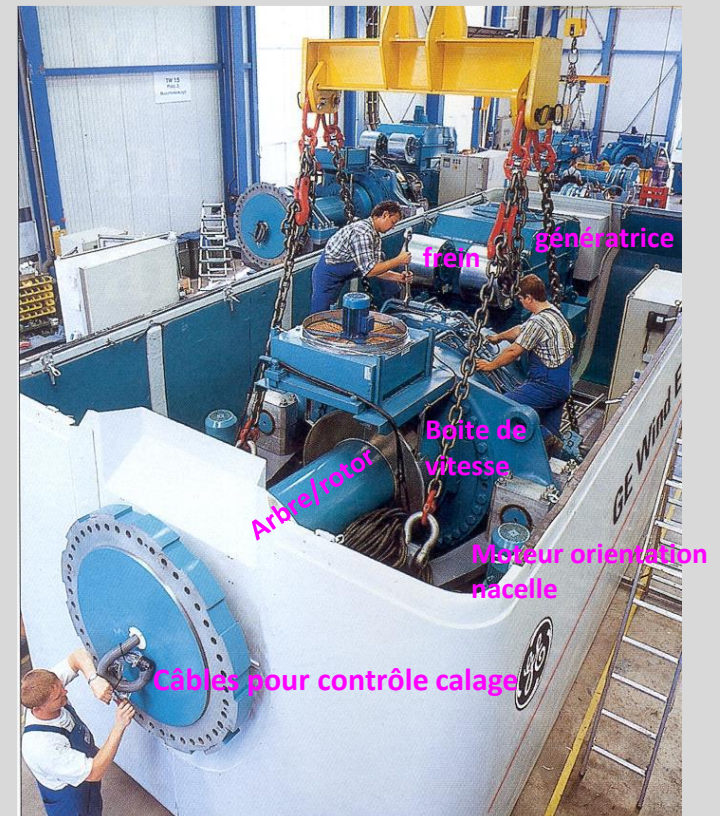
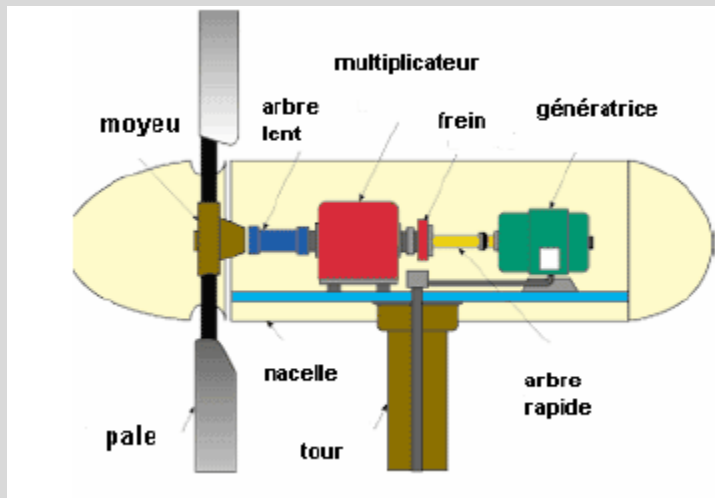
➤ Conception et réalisation d'une éolienne moderne est multi-disciplinaire:

- ✓ Aérodynamique: pales et super structure
- ✓ Mécanique/structurel: contraintes sur les pales et mécanismes de transmission
(*cf cours IFS en S8 de l'UE Mécanique des fluides pour l'ingénieur*)
- ✓ Génie électrique et électronique: génératrice, électronique de puissance, connexion au réseau, gestion de la charge et demande,...
- ✓ Contrôle et instrumentation
- ✓ Génie civil: fondation, lignes HT
- ✓ Transport des composants (parfois sites inaccessibles) et montage/assemblage
- ✓ Economique, politique, environnemental, sociétal, etc...



➤ Constitution

- Fondation
- Mât ou pylône
- Rotor → *pales* (calage fixe ou variable)
- Nacelle:
 - ✓ Boite de vitesse= maillon majeur de la chaîne de transmission pour avoir N faible extrémités pales mais lourd, bruyant et 55 % des pannes
 - ✓ génératrice électrique : générateur synchrones ou a-
 - ✓ Mais aussi instrumentations

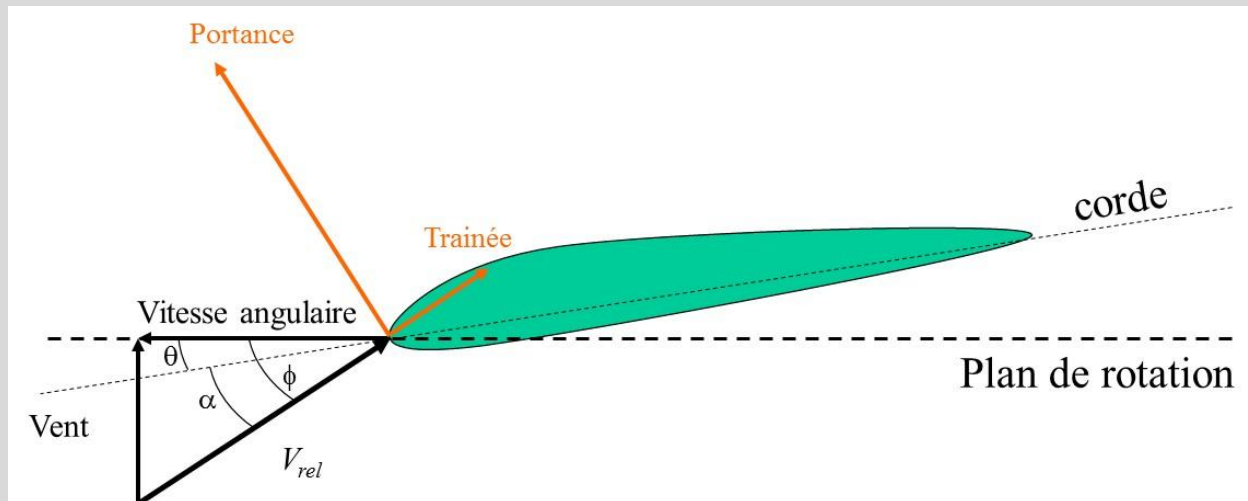


Aérodynamique de la pale

👉 *Approfondissement en S8 : UE Transfert et conversion d'énergie*

Une pale d'éolienne = Aile portante; profils d'ailes d'avions

- géométrie:
 - ✓ Bord d'attaque et bord de fuite
 - ✓ Corde: ligne rejoignant les 2 bords et de longueur l
 - ✓ Angle incidence: angle entre direction du vent et la corde
 - ✓ Extradados et intrados
 - ✓ Vrillage des pales (*à suivre*)
- Efforts aérodynamiques (champ de pression): Portance ($\perp$ vent) et Trainée ($//$ vent)



3 angles:

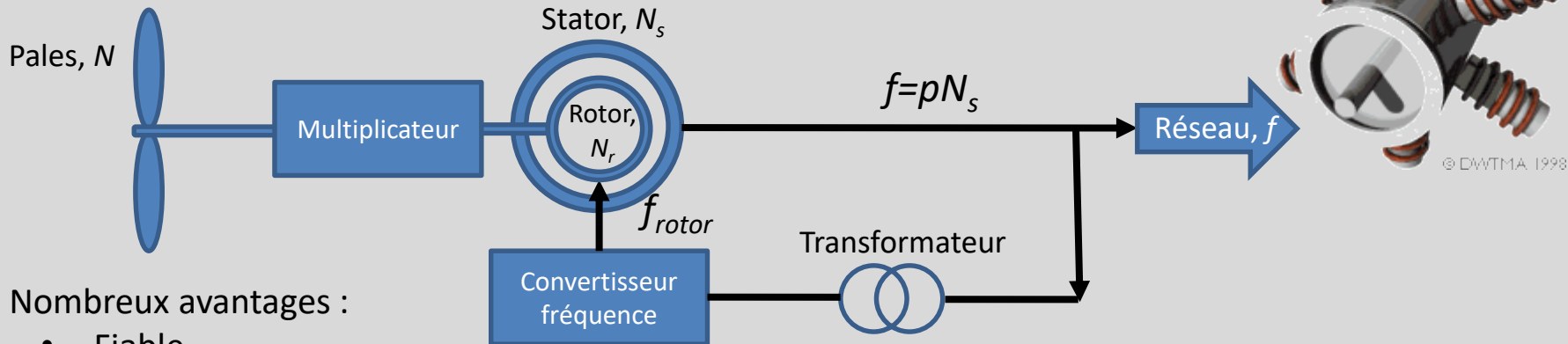
- ✓ θ : angle de calage (pitch) ou de vrillage; variable
- ✓ α : angle d'incidence
- ✓ ϕ : angle d'inclinaison

C'est la portance qui induit la rotation et donc le couple C

Machine Electrique des éoliennes modernes

- Composant qui transfère la puissance mécanique P_m en puissance électrique P_{elec}
- Principalement des machines asynchrones triphasées (induction) de type MADA (rotor bobiné) : *Machine Electrique Asynchrone à Double Alimentation*, pour application moteur à l'origine

- Connexion directe au réseau triphasé possible



- Nombreux avantages :

- Fiable
- peu onéreux (pas d'aimants permanents comme synchrones)
- Glissement g (ajustable $\rightarrow$ fluctuation vent + facilité contrôle/régulation) au point nominal

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = n(r_e - R_e)$$

Avec:

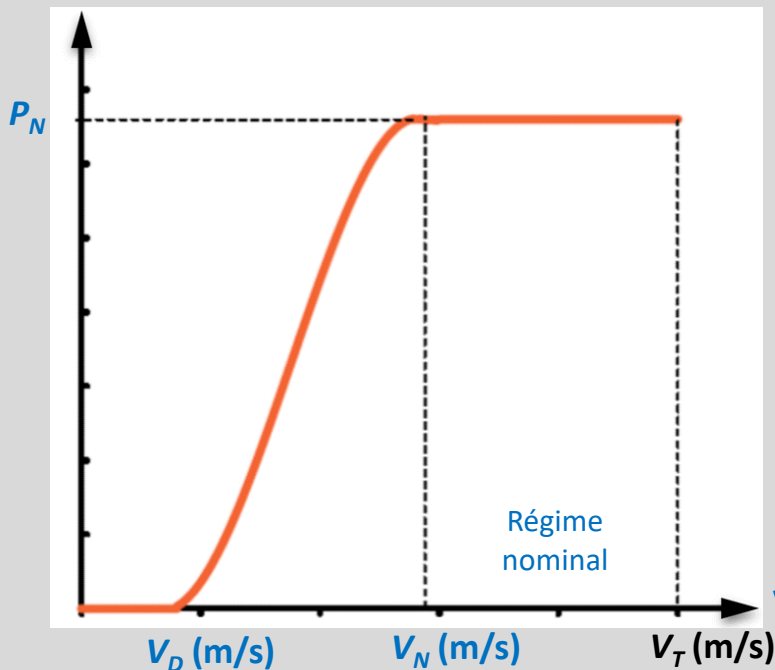
N_s vitesse de synchronisme (vitesse théorique du champ magnétique tournant et toujours supérieure à N_r), n constante, r_e résistance élec du rotor et R_e résistance élec variable

Courbe typique de puissance électrique

Evolution de la puissance électrique en fonction de la vitesse du vent

Régime nominal: correspond au régime où la puissance électrique max. est atteinte

Puissance électrique (W)



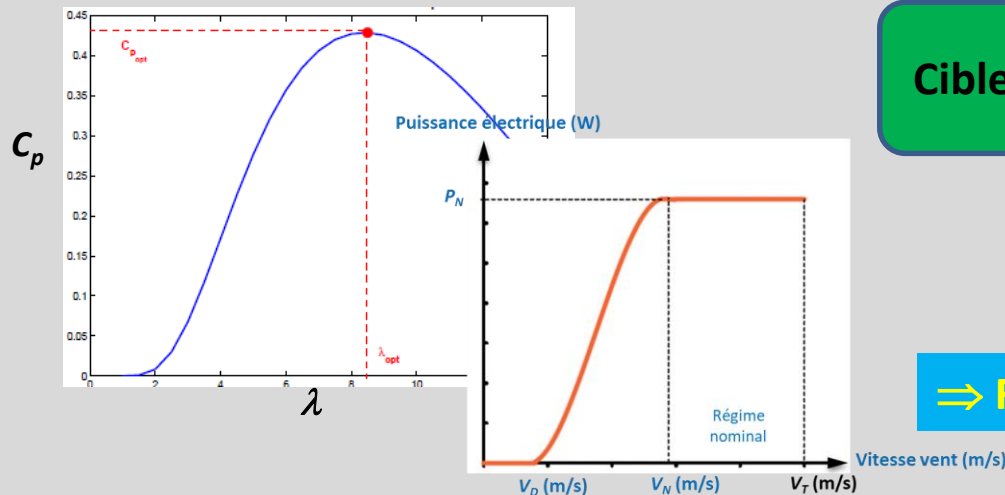
Vitesse vent (m/s)

- V_D : vitesse de démarrage (~ 4 à 5 m/s)
- V_N : vitesse nominale (~ 10 à 13 m/s)
- V_T : vitesse d'arrêt (~ 25 m/s)

Contrôle et régulation des éoliennes modernes

Le cœur du problème: vent qui fluctue, vite et fort

- Par le passé: N = cste mais trop d'inconvénients: faible rendement + durée de vie, et génération de fortes fluctuations tension et puissance
- Eoliennes actuelles: N variable $\Rightarrow$ ($\nearrow$ production de +5 à +10%)
- Objectifs recherchés:
 - $\rightarrow$ Maintenir des conditions optimales ($C_{p,max}$) ou nominales
 - $\rightarrow$ Protéger l'éolienne quand vitesse vent dépasse V_T
 - $\rightarrow$ Mais aussi minimiser les efforts sur pales et chaîne de transmission



$$\text{Cible: } \lambda = \frac{R\omega}{V_{vent}} = \lambda_{opt} \quad \text{ou} \quad P = C\omega = P_N$$

$\Rightarrow$ Faut donc agir sur la vitesse de rotation N

➤ Paramètres ajustables

- Calage des pales → mécanisme dans l'arbre primaire (vérins hydrauliques)
- Couple → courant du rotor si génératrice synchrone
- Fréquence f_r ou résistance du rotor R_e si génératrice asynchrone

➤ Les 2 stratégies principales de régulation

→ Selon la vitesse du vent

- Vent faible ($V < V_N$) : optimiser capture vent pour maximiser la puissance en dessous de P_N en jouant sur le couple
- Vent fort ($V > V_N$) : réguler puissance et vitesse rotation autour du point nominal en jouant sur le calage
- Principe général de la régulation:
 - Eolienne dispose de nombreux capteurs: tension, fréquences, vitesses de rotation N, etc..
 - Utilisation d'un microprocesseur qui pilote des actionneurs (courant rotor, vérins ou R_e)

b. Théorie de Betz

Structure de l'écoulement autour de l'éolienne

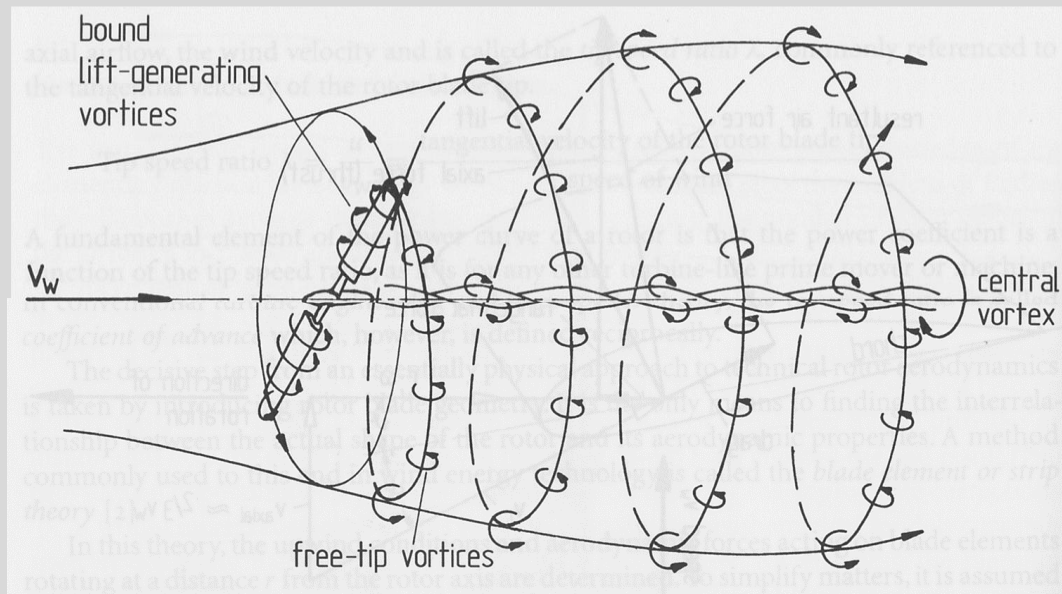
- Amont:

Écoulement uniforme 1D

- Aval:

Sillage = écoulement 3D et caractérisé par 3 principales structures tourbillonnaires:

- i. Circulation autour de la pale (génération de la portance/théorie de Prandtl)
- ii. Tourbillons marginaux à l'extrémités des pales
- iii. Tourbillons générés au niveau du moyeu



Modélisation aérodynamique

Différentes approches théoriques et degrés de modélisation

Fluide parfait et régime permanent

Du plus simple ou plus complexe:

- i. Théorie 2D de Betz (à suivre): écoulement irrotationnel $\rightarrow C_{pmax_Betz}$
- ii. Théorie 2D de l'élément de pale BEMT (non présentée):
 - Raisonnement sur une tranche de pale de largeur dr
 - Prise en compte de l'effet de rotation et de la géométrie de la pale
 - Prise en compte de l'interaction des pales
 - Calcul d'optimisation qui permet de déterminer la loi de vrillage et de corde
 - $C_{pmax} \sim 0.5$ et $< C_{pmax_Betz}$
- iii. Théorie 3D
 - Modélisation et prise en compte des tourbillons: marginaux, moyeux et circulation

Théorie de Betz

➤ Objectif:

- Déterminer le coefficient de puissance « mécanique » d'une éolienne:

$$C_{pm} = \frac{P_m}{P_s} = \frac{C\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_1^3}$$

Avec ω vitesse de rotation du rotor, A surface balayée par le rotor et V_1 vitesse amont du vent

- C_p est donc le rendement de la machine défini de manière équivalente à celui des turbines
- C_p est fonction du nombre et géométrie des pales, de λ et θ

➤ Théorie 2D de Betz

- Bien adaptée aux machines à axes horizontal
- Rappel des hypothèses: fluide parfait, régime permanent, écoulement incompressible et 2D (pas effet de rotation dans le sillage)

