

12. L'énergie éolienne

12.4 – Puissances et aérodynamique

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Antoine Brégaïnt, M.Sc.A.

Question



ENR2020

- La puissance d'une éolienne est proportionnelle à :
 - A. La racine carrée de la vitesse du vent
 - B. La vitesse du vent
 - C. La vitesse du vent au carré
 - D. La vitesse du vent au cube
 - E. Aucune de ces réponses

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Puissance éolienne
- Performance d'une éolienne
- Courbe de puissance
- Calcul de l'énergie produite
- Aérodynamique des éoliennes
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Puissance éolienne
- Performance d'une éolienne
- Courbe de puissance
- Calcul de l'énergie produite
- Aérodynamique des éoliennes
- Conclusion

Introduction et objectifs

- L'ingénierie des éoliennes pourrait être une science à part entière, certains phénomènes aérodynamiques sont très complexes à étudier.
- Cette capsule apporte les bases de calcul en technologie éolienne, permet d'appréhender les réflexions qui se posent lors de la conception ou du choix d'une technologie.
- Pour aller plus loin : le cours d'Hussein Ibrahim SYS847 *Technologie éolienne*

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Présenter les équations et formules de calculs des différentes grandeurs utilisées en développement de projet éolien;
 - Savoir calculer un potentiel éolien simple;
 - Connaître les paramètres impactant le dimensionnement ou le choix d'un emplacement;
 - Présenter les notions sur l'efficacité maximale d'un rotor;
 - Présenter les notions de design des éoliennes;
 - Présenter les paramètres dont dépend la performance.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Puissance éolienne***
- Performance d'une éolienne
- Courbe de puissance
- Calcul de l'énergie produite
- Aérodynamique des éoliennes
- Conclusion

Puissance éolienne

- Notion de débit massique :
 - Le **débit massique** d'air traversant la section A de la turbine. Cette section est définie perpendiculairement à l'écoulement et pour une éolienne à axe horizontale, elle correspond à l'aire balayée par le rotor en mouvement (figure).

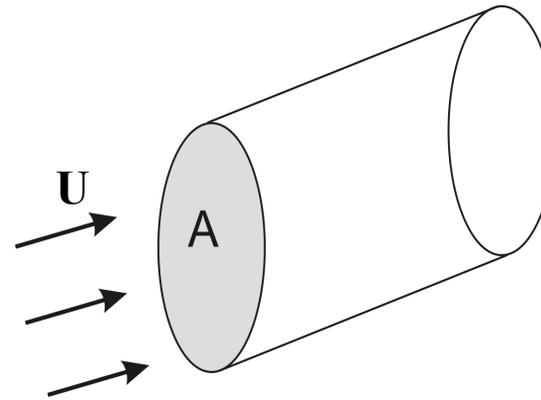
$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho_{air} A_{rotor} U \text{ [kg/s]}$$

\dot{m} , débit massique (kg/s)

ρ_{air} , masse volumique de l'air (kg/m^3)

A_{rotor} , aire du rotor (m^2)

U , vitesse moyenne de l'air (m/s)



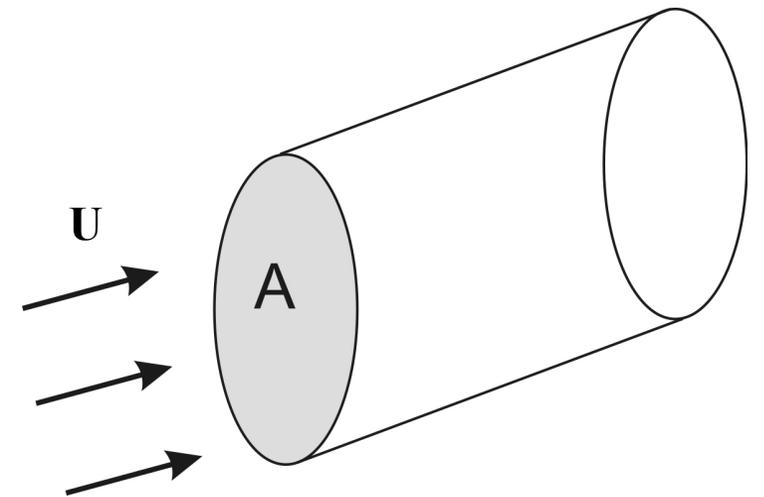
Puissance éolienne

- Notion de puissance cinétique disponible :
 - L'énergie cinétique par unité de temps ou la **puissance cinétique disponible** dans le vent, $P_{cin} = P_{wind}$ = puissance cinétique éolienne, [W]

$$P_{wind} = \frac{d(E_c)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho_{air} A_{rotor} U^3 \text{ [W]}$$

Lorsque l'éolienne est alignée avec la direction du vent \vec{U}

Cette puissance peut aussi être qualifiée d'éolienne. C'est la puissance « brute » disponible.



Puissance éolienne

- Notion de puissance cinétique unitaire :
 - La **puissance cinétique du vent par unité de section du rotor** est :

$$P_{cin}'' = \frac{P_{wind}}{A_{rotor}} = \frac{1}{2} \rho_{air} U^3 \quad [\text{W/m}^2]$$

- Et les variations de cette densité de puissance sont proportionnelles à la variation de la vitesse du vent au cube tel que:

$$\frac{\Delta P_{cin}'' + P_{cin}''}{P_{cin}''} = \left(\frac{\Delta U + U}{U} \right)^3$$

- Donc P_{cin}'' est très sensible à une légère variation de la vitesse du vent

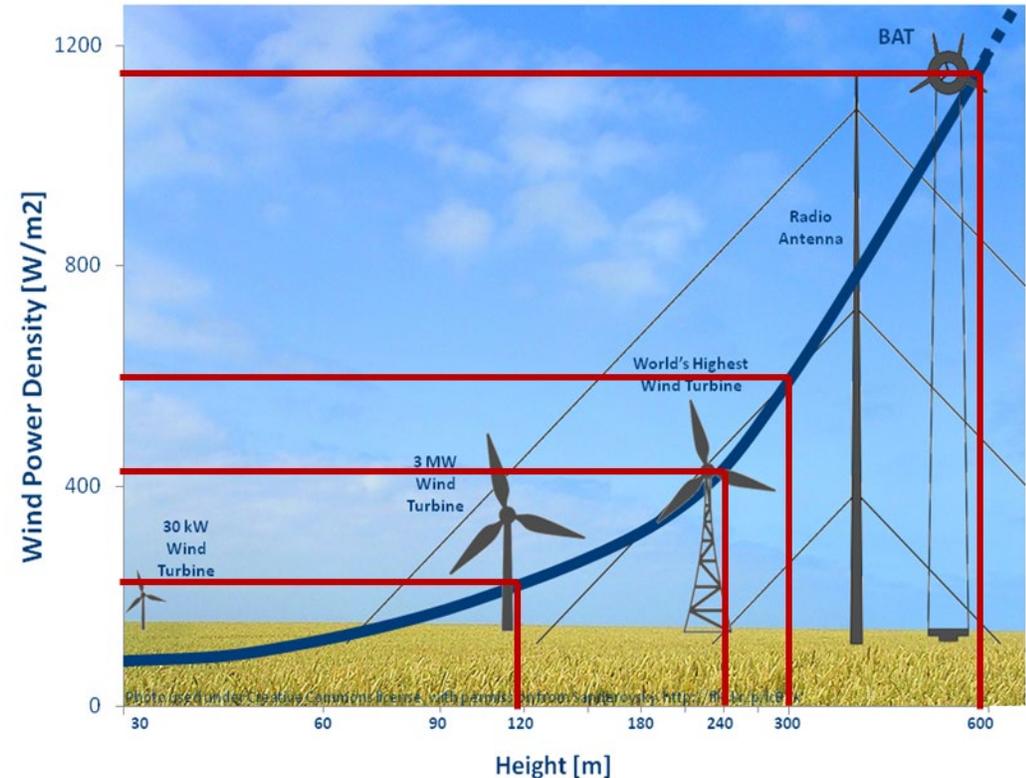
Puissance éolienne

- Estimation de la puissance cinétique unitaire :
 - La puissance cinétique unitaire dans le flux d'air pour un vent constant et $\rho_{air} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (masse volumique normalisée de l'air)

Vitesse du vent (m/s)	P_{wind}/A (W/m ²)
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550

Puissance éolienne

- Estimation de la puissance cinétique unitaire :
 - Mais la vitesse du vent **varie** avec la coordonnée verticale, z
 - Pour une vitesse de vent variable sur A_{rotor} , il faut recourir à une approche **différentielle** pour des éléments de surface ΔA
 - Intervient en présence de cisaillement le long du diamètre du disque du rotor de la turbine dU/dz
 - On obtient une valeur de P_{wind} en fonction de $U(z)$



Puissance éolienne

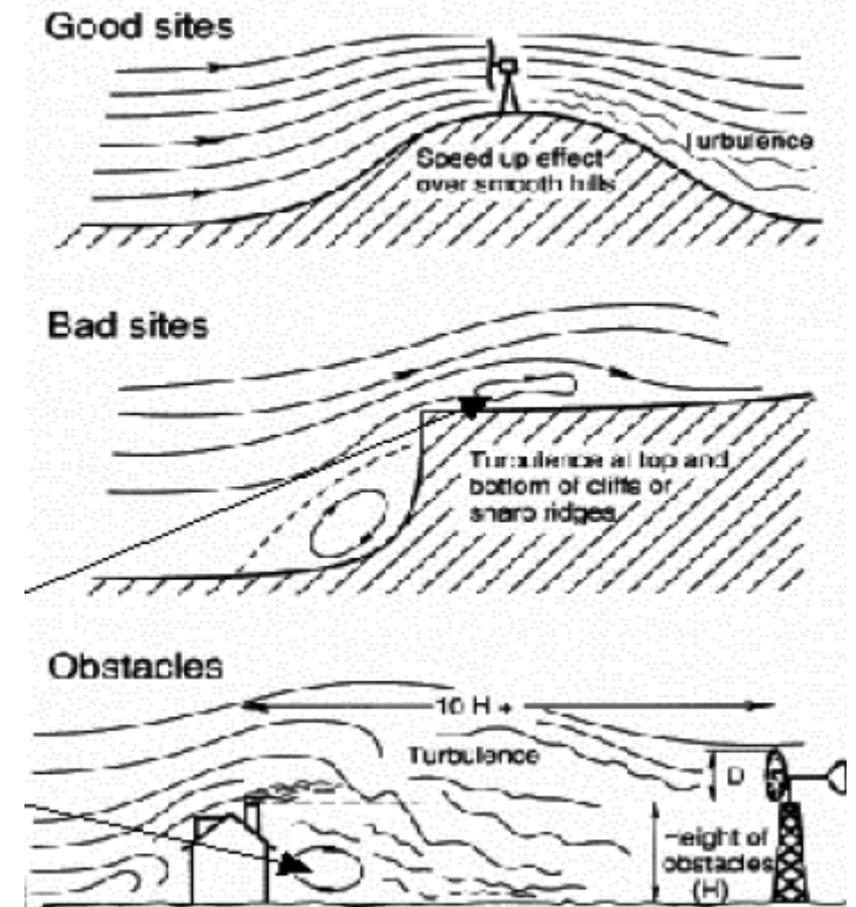
- Variation verticale de la vitesse du vent en fonction de l'altitude
 - Différents profils :

Loi logarithmique (classes de rugosité) :

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}$$

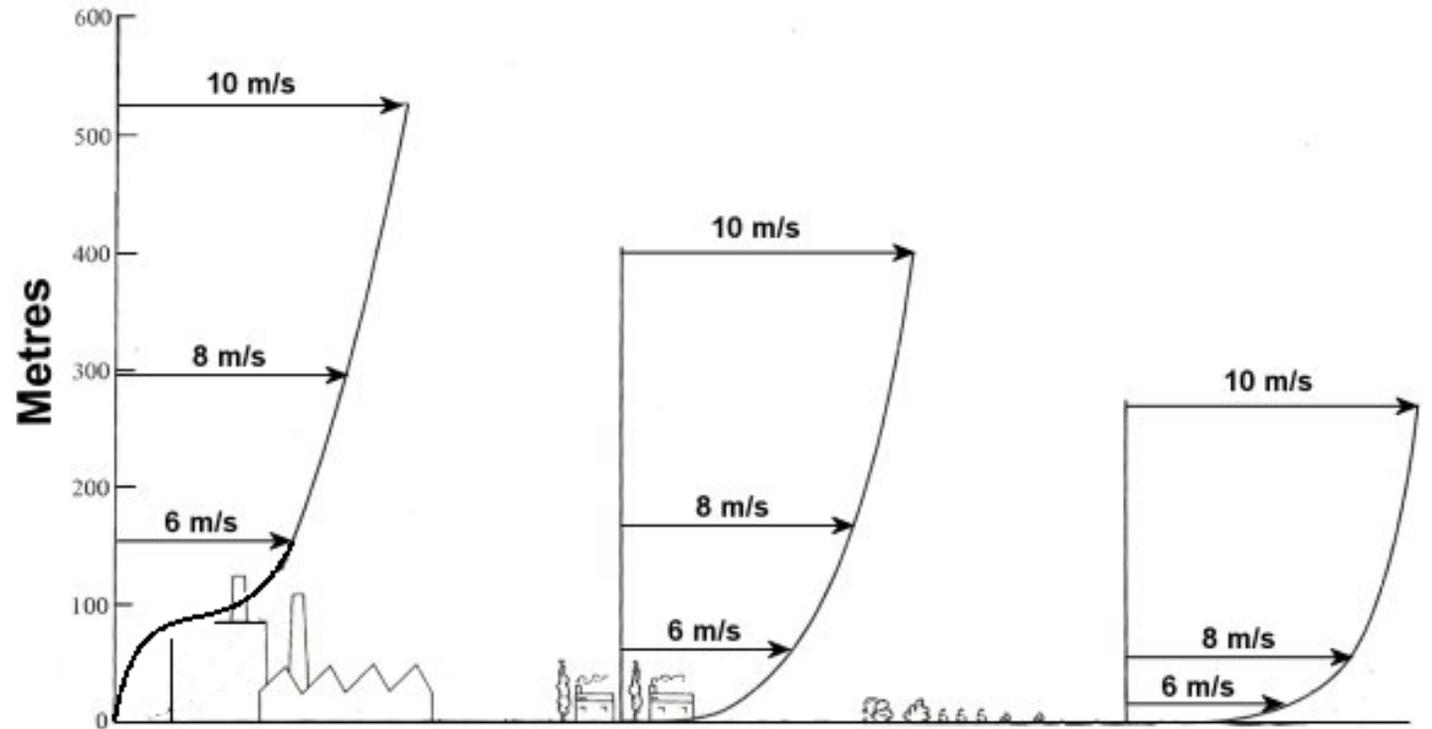
Loi de puissance

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha$$



Puissance éolienne

- Cisaillement du vent
 - Topographie, végétation, éoliennes à proximités
 - Couche limite terrestre
- Rugosité ET viscosité



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Puissance éolienne
- ***Performance d'une éolienne***
- Courbe de puissance
- Calcul de l'énergie produite
- Aérodynamique des éoliennes
- Conclusion

Question



ENR2020

- Quel est le rendement maximal théorique d'une éolienne (sans décimale, réponse la plus proche)?
 - A. 19%
 - B. 39%
 - C. 59%
 - D. 79%
 - E. 100%

Performance d'une éolienne

- Notion de **coefficient de puissance** du rotor C_P (aussi appelé rendement aérodynamique)

$$C_P = \frac{\text{rotor power}}{\text{power in the wind}} = \frac{P_{rotor}}{P_{wind}} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho_{ref} U^3 A_{rotor}}$$

- Limite de Betz ou **coefficient de puissance maximal**

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} = 59,3\%$$

- **Pourquoi ?** De manière simple, si on puise trop d'énergie dans l'écoulement incident, on stoppe ce dernier et on arrête ainsi le phénomène
- Puissance maximale théorique d'une éolienne ou **puissance récupérable**

$$P_{rotor,max} = C_{P,max} P_{wind} = \frac{16}{27} \left[\frac{1}{2} \rho_{ref} U^3 A_{rotor} \right]$$

Performance d'une éolienne

- Efficacité maximale

$$P = \frac{\rho A_t v_u^3}{2} \quad P^* = 2\rho A_t v_t^2 (v_u - v_t)$$

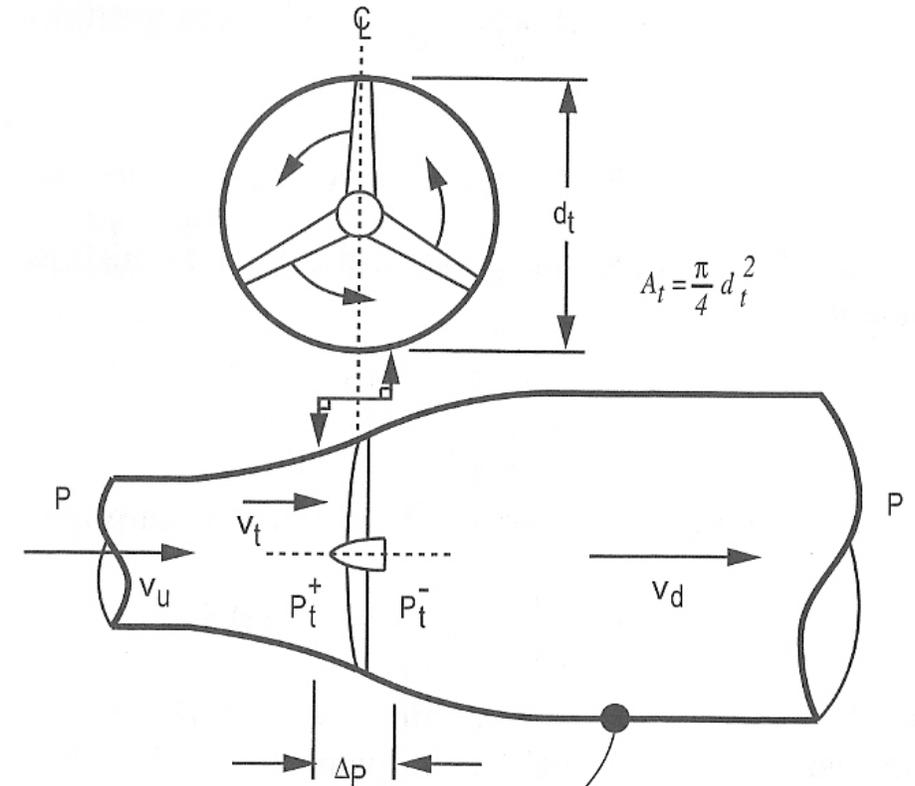
- Coefficient de puissance

$$\eta = \frac{P^*}{P} = 4 \left(\frac{v_t}{v_u} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{v_t}{v_u} \right) \right]$$

- Limite de Betz

$$\eta_{\max} = 4 \left(\frac{2}{3} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{2}{3} \right) \right] = \frac{16}{27} = 59,3\%$$

Se reporter à la définition de la limite de Betz dans la documentation complémentaire



Under Optimal Conditions:

$$v_t = 2/3 v_u$$

$$v_d = 1/3 v_u = 1/2 v_t$$

$$A_u = 2/3 A_t$$

$$A_d = 2 A_t$$

Enveloping flow tube boundary defining a fixed mass flow rate,
 $\dot{m} = \rho A v$
 Thus local $A \sim \frac{1}{v}$

Performance d'une éolienne

- Notion de **rendement global d'une éolienne**

$$\eta_{overall} = \frac{\text{puissance de sortie}}{\text{puissance éolienne}} = \frac{P_{out,éolienne}}{P_{wind}} = \frac{P_{out,éolienne}}{\frac{1}{2}\rho U^3 A_{rotor}} = C_P \eta_{mec} \eta_{elec}$$

- Notion de **puissance moyenne annuelle**

$$[\overline{P_{rotor}}]_{1an} = \frac{1}{N_{1an}} \sum_{N_i}^{N_{1an}} P_{rotor}(U_i)$$

Performance d'une éolienne

- Exemple

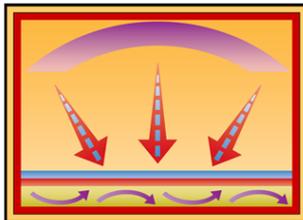
- Un site internet propose des éoliennes à raccorder sur votre résidence/chalet ou autre installation de petite dimension. On indique que l'éolienne fonctionnant au 24V peut fournir une puissance P_{ele} de 1,1 kW. Ses pales ont une longueur L de 0,7m. Dans les calculs que vous effectuerez, assumez que la densité (masse volumique) de l'air est de $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (condition standard) et que le rayon de l'éolienne égale la longueur des pales.

- Pour calculer la puissance maximale produite, veuillez considérer un rendement mécanique, h_{mec} , et un rendement électrique, h_{ele} , tels que : $h_{mec} = 0,92$ et $h_{ele} = 0,95$. On supposera que le maximum théorique peut être extrait de la veine d'air $C_D = C_{D,max}$



Performance d'une éolienne

- Exemple
 - Quel est le rendement global de cette éolienne (sans décimale, en %)?
- Solution
 - $h_{total} = h_{Betz} * h_{mec} * h_{ele} = 0,5179$.
 - Donc, RÉPONSE: 52% (pas 0,5179!)
- Pour obtenir une solution à ce problème, le logiciel Interactive Heat Transfer, V4.0 (gratuit) fut employé (disponible M3, T3.4)



Performance d'une éolienne

- Exemple

- Pour quelle vitesse de vent (en km/h, sans décimale) cette éolienne peut-elle fournir la puissance électrique, P_{ele} , annoncée?

```
Pele=1000*1.1 //Advertized power, [W] variable {A1}
r=0.70 //Turbine radius, [m], variable {B1}
eta_mec=0.92 //Mechanical efficiency, [-] variable {C}
eta_ele=0.95 //Electrical efficiency, [-] variable {D}

Pcin=0.5*rho*A*V^3 //Kinetic potential of the wind [W]
rho = 1.225 //Air density, [kg/m3]
A=pi*r^2 //Cross-section, [m2]
Vkmh=V*3.6 //Air velocity, [km/h]
eta_Betz=16/27 //Betz limit, [-]
Pele=eta_tot*Pcin //Electric power, [W]
eta_tot=eta_Betz*eta_mec*eta_ele //Overall efficiency, [-]
```

- Calcul de $V = 13,11$ m/s. Donc, RÉPONSE 47km/h

Performance d'une éolienne

- Exemple

- Quelle est la puissance cinétique du vent qui correspond à cette puissance (en kW, avec 1 décimale)?

```
Pele=1000*1.1           //Advertized power, [W] variable {A1}
r=0.70                 //Turbine radius, [m] , variable {B1}
eta_mec=0.92           //Mechanical efficiency, [-] variable {C}
eta_ele=0.95           //Electrical efficiency, [-] variable {D}

Pcin=0.5*rho*A*V^3     //Kinetic potential of the wind [W]
rho = 1.225            //Air density, [kg/m3]
A=pi*r^2              //Cross-section, [m2]
Vkmh=V*3.6            //Air velocity, [km/h]
eta_Betz=16/27        //Betz limit, [-]
Pele=eta_tot*Pcin     //Electric power, [W]
eta_tot=eta_Betz*eta_mec*eta_ele //Overall efficiency, [-]
```

- Calcul $P_{cin} = 2124$ W. Donc, RÉPONSE $P_{cin} = 2,1$ kW

Performance d'une éolienne

- Notion de **facteur d'utilisation** (FU) de l'éolienne :

$$FU = \frac{[\overline{P_{rotor}}]_{sur\ période}}{P_{rotor, nominal}}$$

- Facteur d'utilisation (FU) de l'énergie (utilisé pour la consommation) :
 - Rapport entre l'énergie effectivement **consommée** et l'énergie qu'il serait **possible** de consommer en utilisant la totalité de la puissance maximale appelée pendant toute la période de consommation. Ce facteur indique la fraction d'utilisation de la puissance maximale appelée pour une période de consommation donnée. Employée par les fournisseurs d'énergie, surveillé par les consommateurs qui payent une puissance souscrite (M1, 1.2)!
 - Le FU d'une éolienne (rapport de puissance) est donc semblable mais différent du FU de consommation (rapport d'énergie).

Performance d'une éolienne

- Taux de pénétration (pour la production d'énergie renouvelable) :
 - Part de la consommation pour laquelle l'énergie provient de la source considérée (éolienne, solaire, fossile, nucléaire) pendant toute la période de consommation. Généralement, une année. Parfois, pendant quelques heures ce taux atteint 100% au Danemark pour les ER.

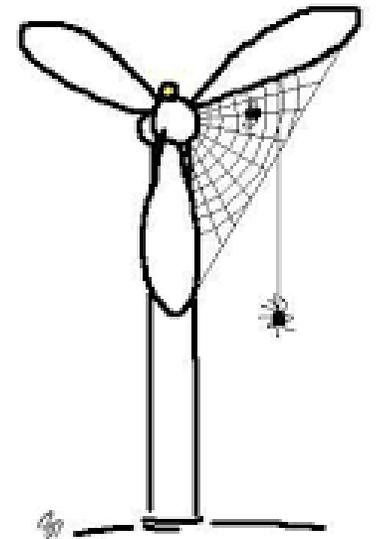
$$\text{Taux pénétration} = \frac{E_{\text{Renouvelable sur période}}}{E_{\text{Totale sur période}}}$$

Performance d'une éolienne

- Facteur de charge (FC) d'une source d'énergie (production) :
 - Rapport entre l'énergie **effectivement** produite durant un laps de temps donné et l'énergie qu'elle aurait pu générer à sa puissance nominale pendant la même période, $E_{produite\ sur\ période} / E_{Pnominale\ sur\ période}$;
 - Rapport entre le nombre d'heures équivalent de fonctionnement à puissance nominale (nombre d'heures utiles) et le nombre d'heures de la période. Entre 800 et 3 800 heures par année (8760) heures, $N_{eq,Pnominale} / 8760$;
 - Rapport entre la puissance moyenne observée pendant une période et la puissance nominale, $P_{moy} / P_{nominale}$;
 - Donc, par extension... $FC = FU$ pour une éolienne ou un collecteur solaire, pour une éolienne, $P_{moy} / P_{nominale} = \frac{[P_{rotor}]_{sur\ période}}{P_{rotor, nominal}}$

Performance d'une éolienne

- Facteur de charge (FC), facteur d'utilisation d'une source d'énergie (production)
 - Qu'est ce qu'un facteur d'utilisation minimal pour une éolienne?
 - Qu'est-ce qu'un facteur d'utilisation normal pour une éolienne?
 - Qu'est-ce qu'un facteur d'utilisation souhaité pour une éolienne?
 - Qu'est-ce qu'un facteur d'utilisation idéal pour une éolienne?



Si les éoliennes ne fonctionnaient vraiment qu'un quart du temps, on pourrait s'en servir d'anti-moustiques. Mais comme elles tournent 80% du temps, on est obligé de faire de l'électricité avec.

Performance d'une éolienne

- Vitesse spécifique (tip speed ratio, λ) = vitesse en bout de pale (vitesse de rotation * rayon) par rapport à la vitesse du vent, U .

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U}$$

Ω , la vitesse de rotation de la pale, [rad/s]

R , le rayon de la pale, [m]

U , vitesse de vent, [m/s]

Les éoliennes peuvent être classées en fonction de la vitesse spécifique :

si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente (type Savonius),

si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide (tripale).

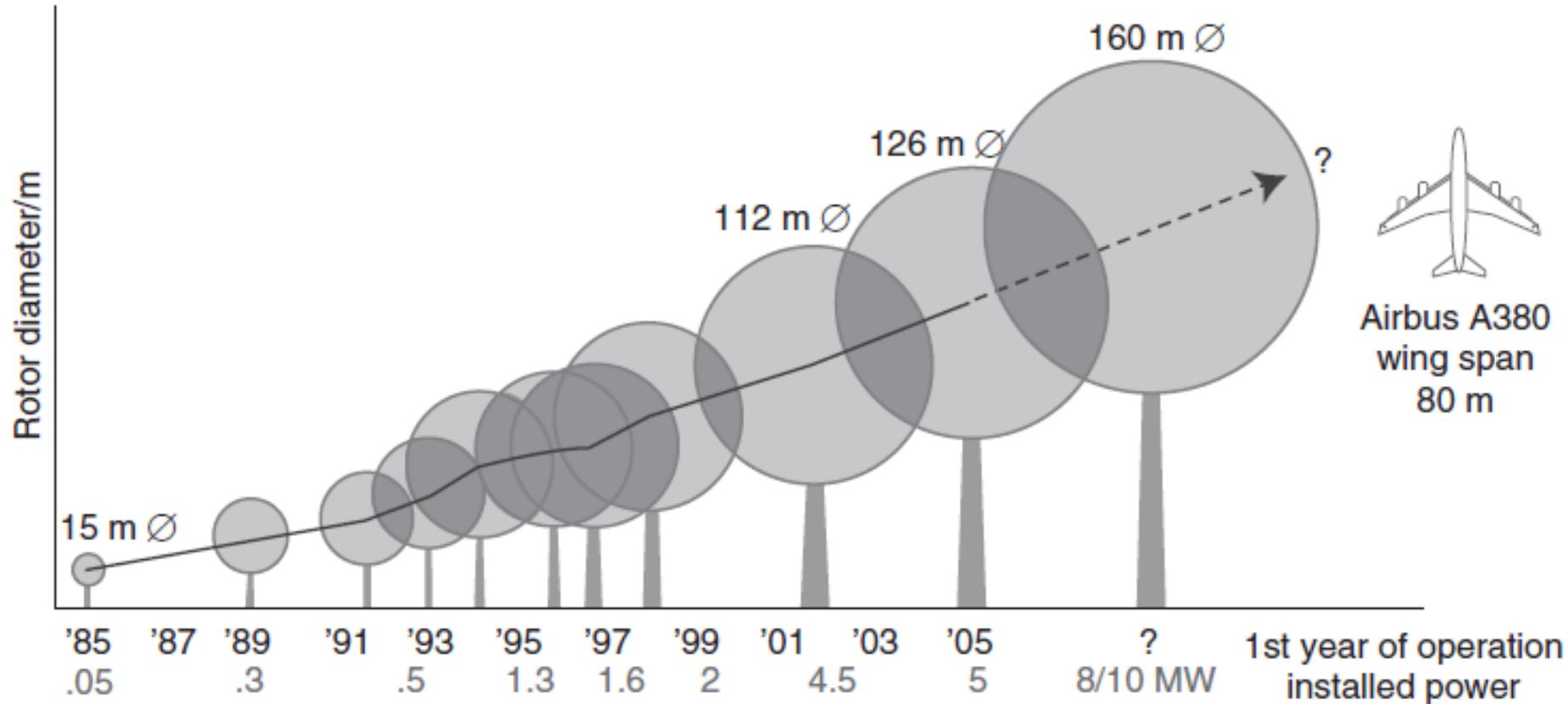
-> ΩR atteint facilement 0,6 Mach (1 Mach = 342 m/s)

$C_P = C_P(\lambda)$ lorsque $\beta = cte$ (angle de calage de la pale)

Le rendement est directement lié à cette vitesse.

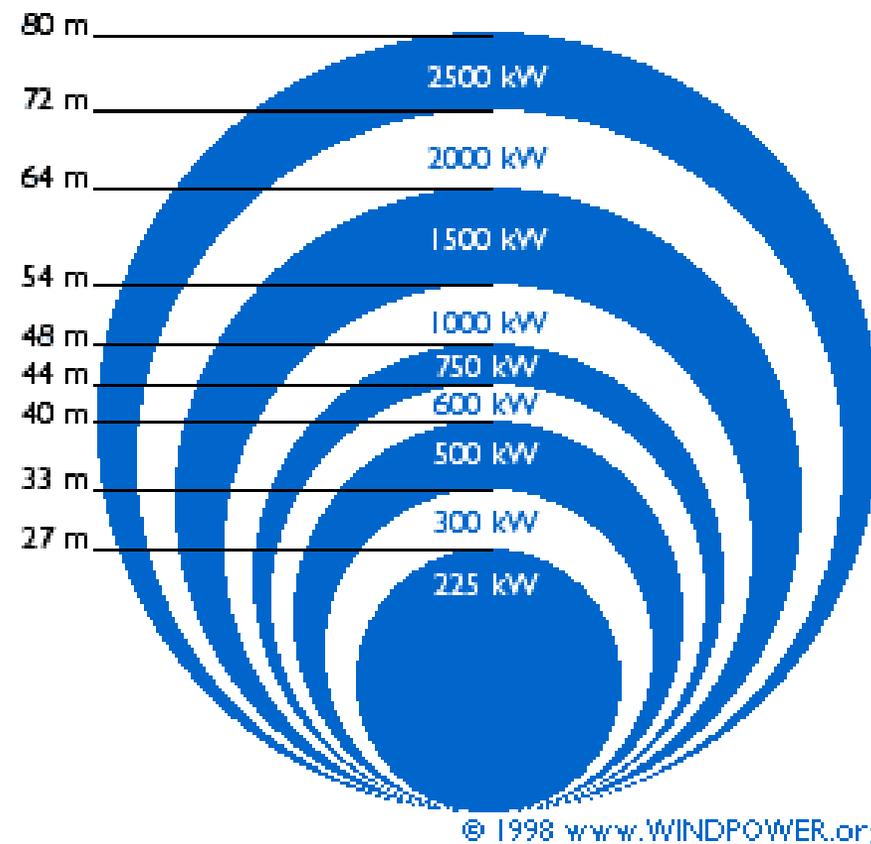
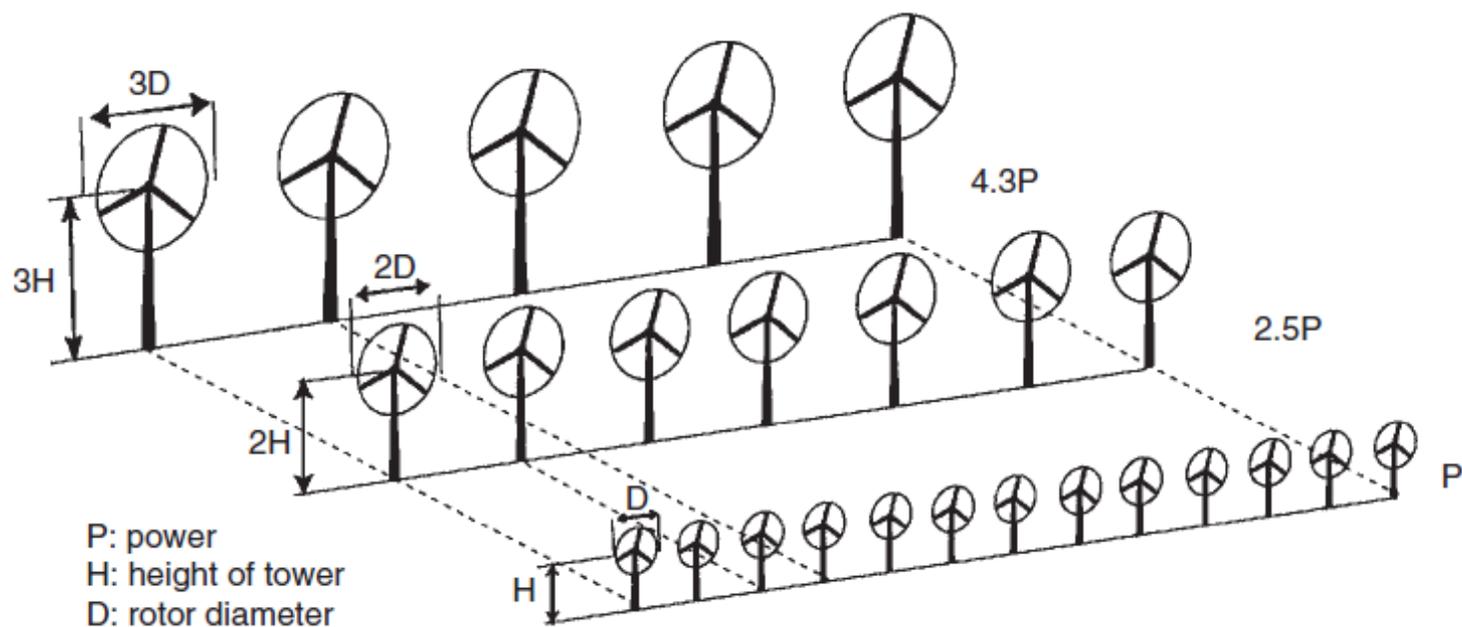
Performance d'une éolienne

- Relation puissance – diamètre du rotor



Performance d'une éolienne

- Relation puissance – taille de l'éolienne



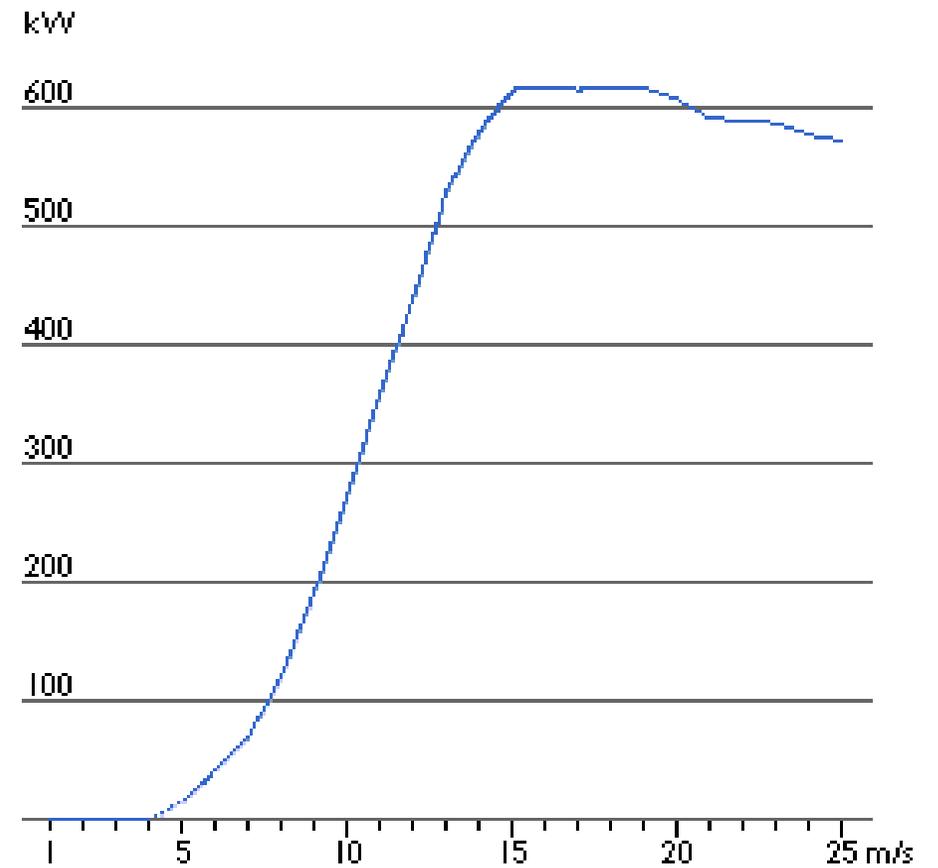
Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Puissance éolienne
- Performance d'une éolienne
- ***Courbe de puissance***
- Calcul de l'énergie produite
- Aérodynamique des éoliennes
- Conclusion

Courbe de puissance

- La courbe de puissance est influencée par :
 - La géométrie de la pale dans le plan (longueur, largeur, distribution de la torsion de la pale)
 - L'angle de pitch de la pale
 - La vitesse de rotation

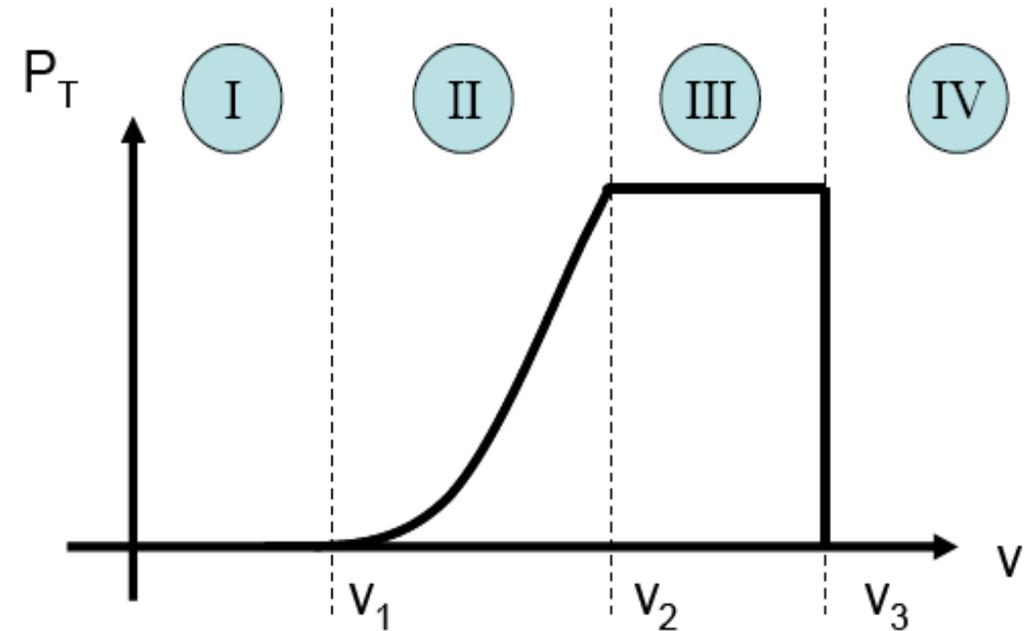
C'est la puissance fournie par la turbine P_{rotor} , toujours inférieure à la puissance cinétique éolienne P_{wind} multiplié par la limite de Betz (0,593).



© 1998 www.WINDPOWER.org

Courbe de puissance

- Zone I : $v < v_1$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- Zone II : $v_1 \leq v < v_2$: Quand la vitesse du vent devient suffisante, l'éolienne démarre. Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle (CP).
- Zone III : $v_2 \leq v < v_3$: la puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (PC).
- Zone IV : $v > v_3$: La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée via les systèmes de freinage et la puissance extraite est nulle.



Courbe de puissance

- Normalement, les éoliennes sont conçues pour démarrer à des vitesses de vent de 3 à 5 m/s. On appelle cette vitesse la **vitesse de démarrage**.
- L'éolienne est normalement programmée pour s'arrêter automatiquement lorsque le vent souffle à plus de 25 m/s afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne ou de son entourage. La vitesse à laquelle l'éolienne s'arrête est appelée **la vitesse de coupure**.

Courbe de puissance

- Normalisation des puissances et des vitesses à la densité de référence
 - On ajuste les mesures de puissance et de vitesse vers des valeurs normalisées : $U^{mes} \rightarrow U^n$; $P^{mes} \rightarrow P^n$ pour obtenir la courbe de puissance normalisée $P^n(U^n)$

- Machine à contrôle par décrochage

$$U^n = U^{mes} \qquad P_{rotor}^n(U^n) = P_{rotor}^{mes} \left(\frac{\rho_{ref}}{\rho_{mes}} \right)$$

- Machine à contrôle actif

$$U^n = U^{mes} \left(\frac{\rho_{mes}}{\rho_{ref}} \right)^{1/3} \qquad P_{rotor}^n(U^n) = P_{rotor}^{mes}$$

En général on prend $\rho_{ref} = 1,225 \text{ kg/m}^3$, la valeur au niveau de la mer à 15°C

Plan de la présentation

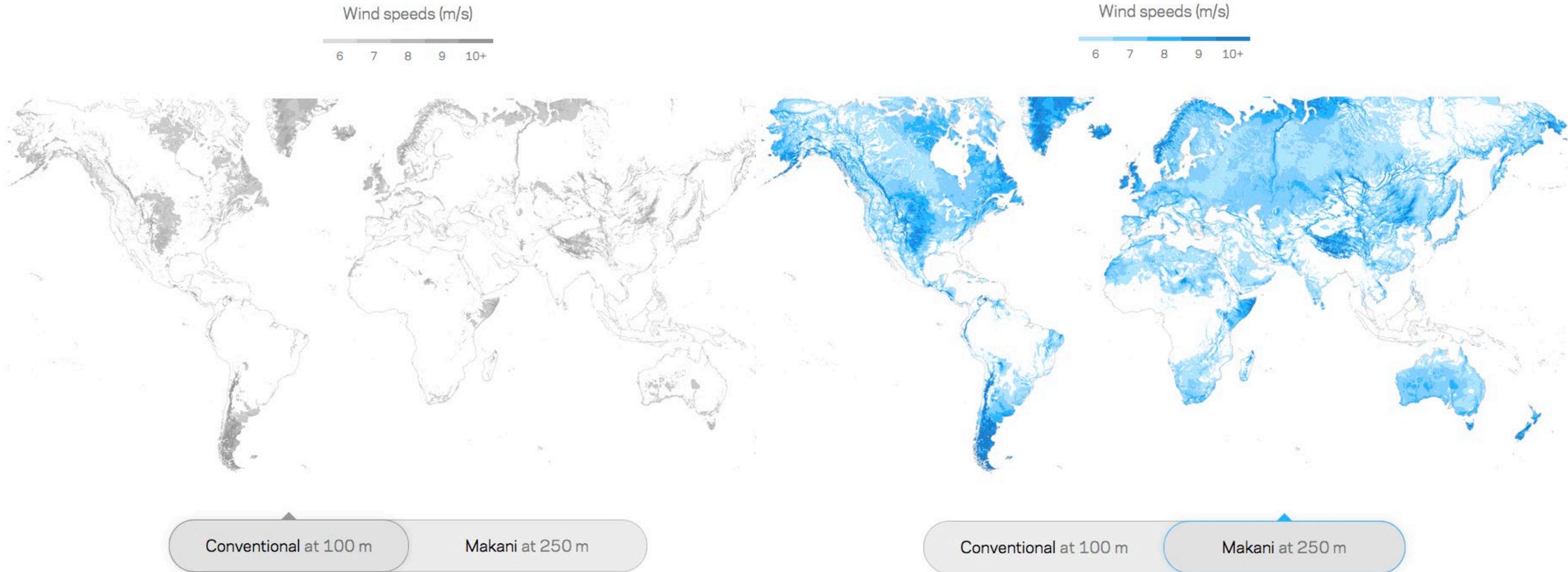
- Introduction et objectifs de la capsule
- Puissance éolienne
- Performance d'une éolienne
- Courbe de puissance
- ***Calcul de l'énergie produite***
- Aérodynamique des éoliennes
- Conclusion

Calcul de l'énergie produite

- Notion de densité de puissance:
 - Le **potentiel éolien** est défini pour un territoire et il s'exprime en unités de puissance [W];
 - Ce potentiel est exprimé en puissance électrique potentielle;
 - Il est calculé de manière à cumuler la production électrique de l'ensemble des éoliennes qui pourraient être installées sur un territoire donné.

$$P_{out,éolienne} = \eta_{overall} \frac{1}{2} \rho U^3 A_{rotor} = C_P \eta_{mec} \eta_{elec} \frac{1}{2} \rho U^3 A_{rotor}$$

Calcul de l'énergie produite



Sites avec un potentiel éolien à 100m d'altitude

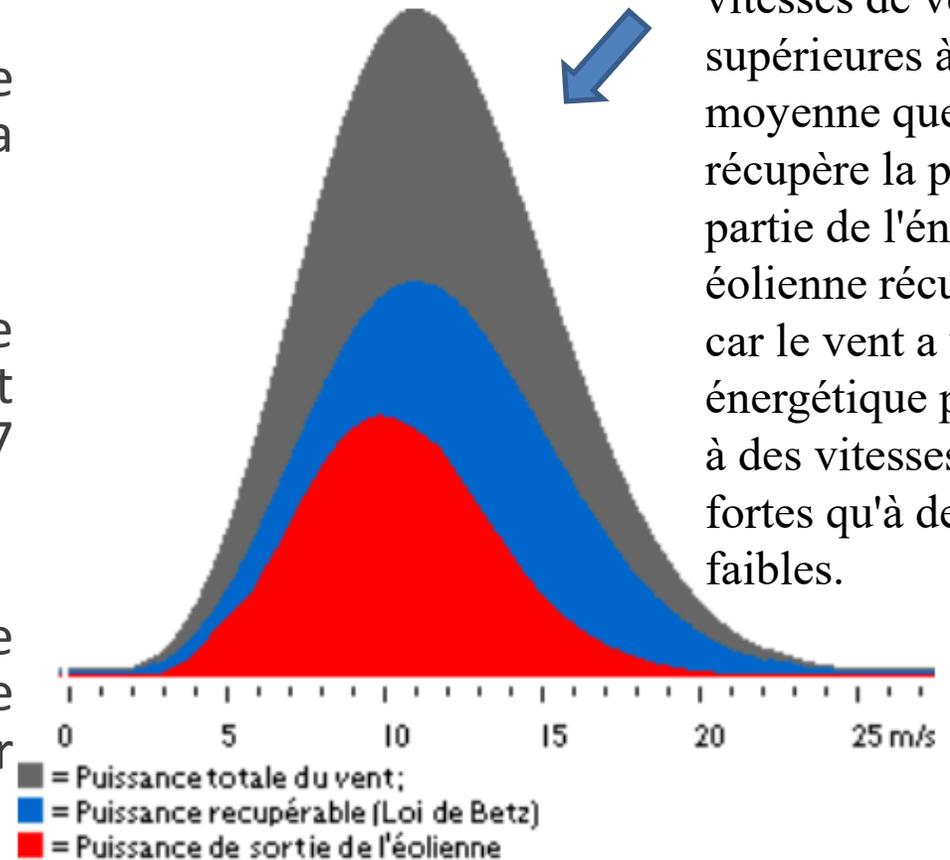
Sites avec un potentiel éolien à 250m d'altitude

Calcul de l'énergie produite

- Notion de densité de puissance :
 - La **densité de puissance** est obtenue en multipliant la puissance associée à chaque vitesse de vent par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse selon la distribution établie par un graphe de Weibull (le plus souvent utilisé);
 - Le graphe consiste en un certain nombre de colonnes verticales, une pour chaque intervalle de 0,1 m/s de vitesse de vent. La hauteur de chaque colonne correspond à la puissance (watts par mètre carré) avec laquelle cette vitesse de vent particulière contribue à la puissance totale de sortie par mètre carré;
 - Cette **densité de puissance** permet de calculer la distribution de l'énergie éolienne à des vitesses de vent différentes;

Calcul de l'énergie produite

- Notion de densité de puissance:
 - La zone au-dessous de la courbe grise (jusqu'à l'axe horizontal en bas) indique la puissance cinétique unitaire (p. 10);
 - La zone au-dessous de la courbe bleue indique la puissance unitaire théoriquement convertible en puissance mécanique (16/27 de la puissance cinétique unitaire);
 - L'entière zone au-dessous de la courbe rouge, indique la puissance électrique $P_{out,éolienne}$ que produira une éolienne sur le site en question.

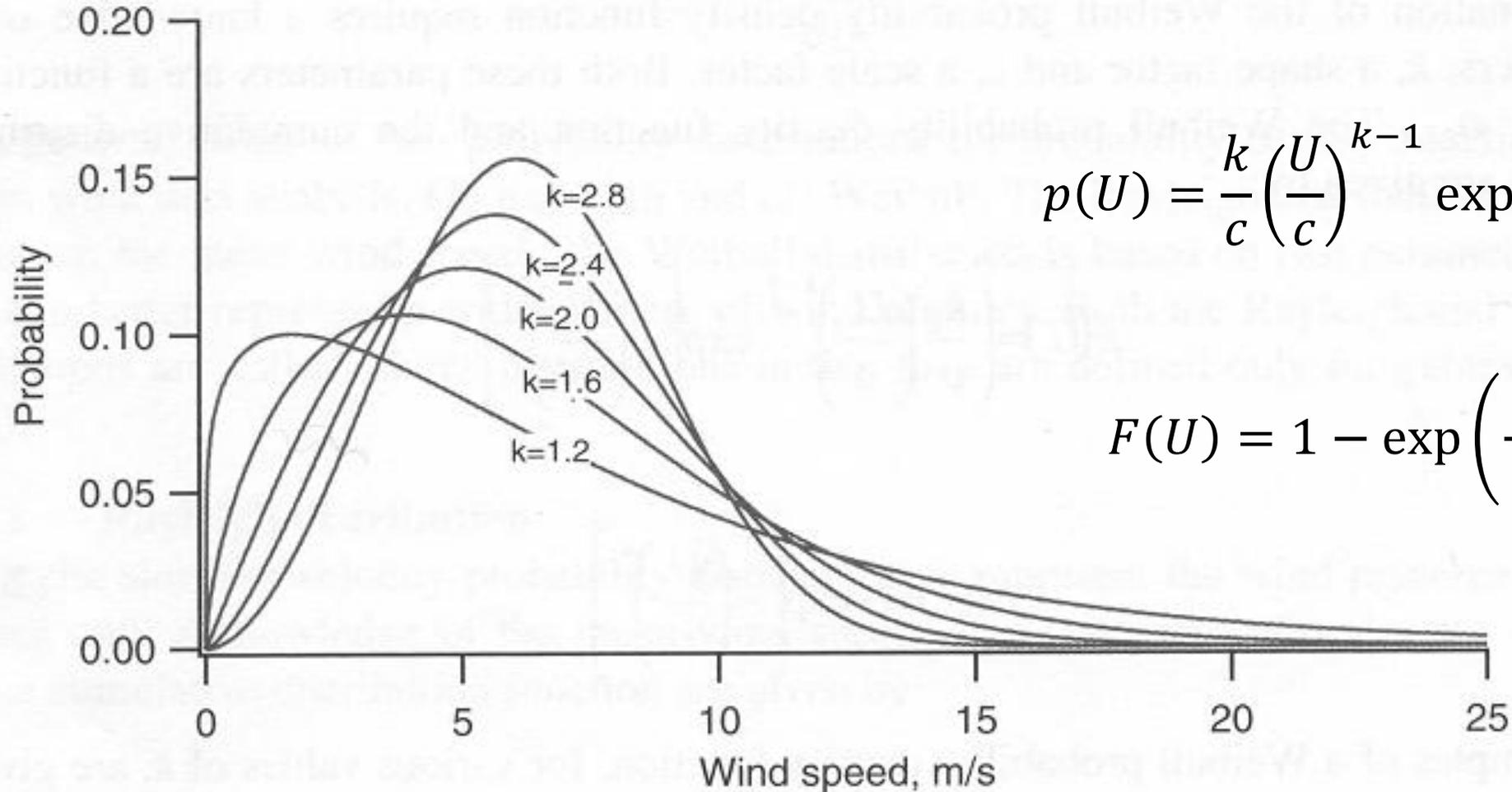


Note: c'est à des vitesses de vent supérieures à la vitesse moyenne que l'on récupère la plus grande partie de l'énergie éolienne récupérable car le vent a un contenu énergétique plus élevé à des vitesses de vent fortes qu'à des vitesses faibles.

© 1998 www.WINDPOWER.org

Calcul de l'énergie produite

- Distribution de Weibull



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

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

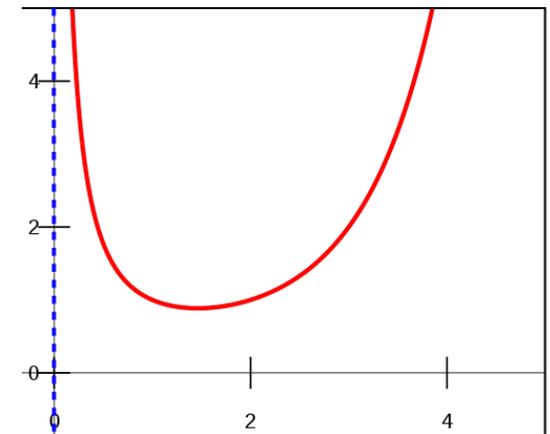
Calcul de l'énergie produite

- Distribution de Weibull
 - k et c sont des facteurs dépendants de \bar{U} et de σ_U .

$$\bar{U} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \text{ et } \sigma_U^2 = \bar{U}^2 \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right)$$

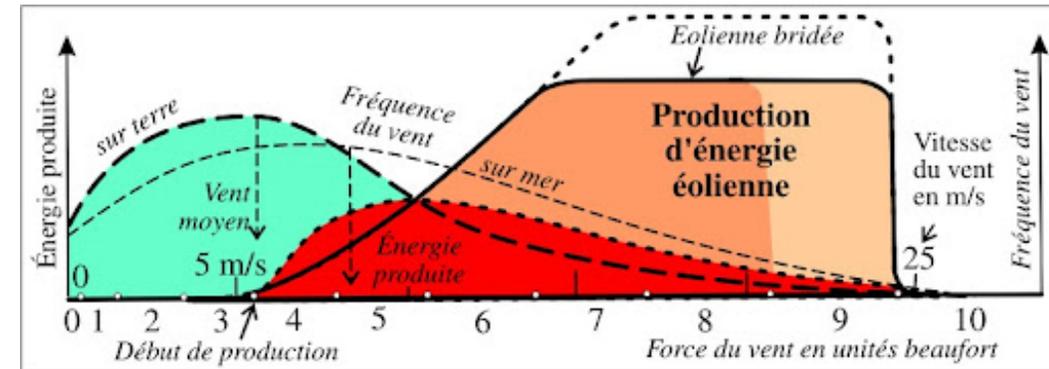
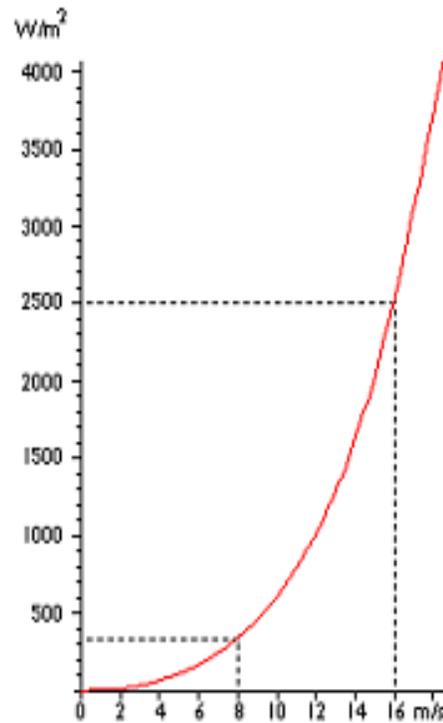
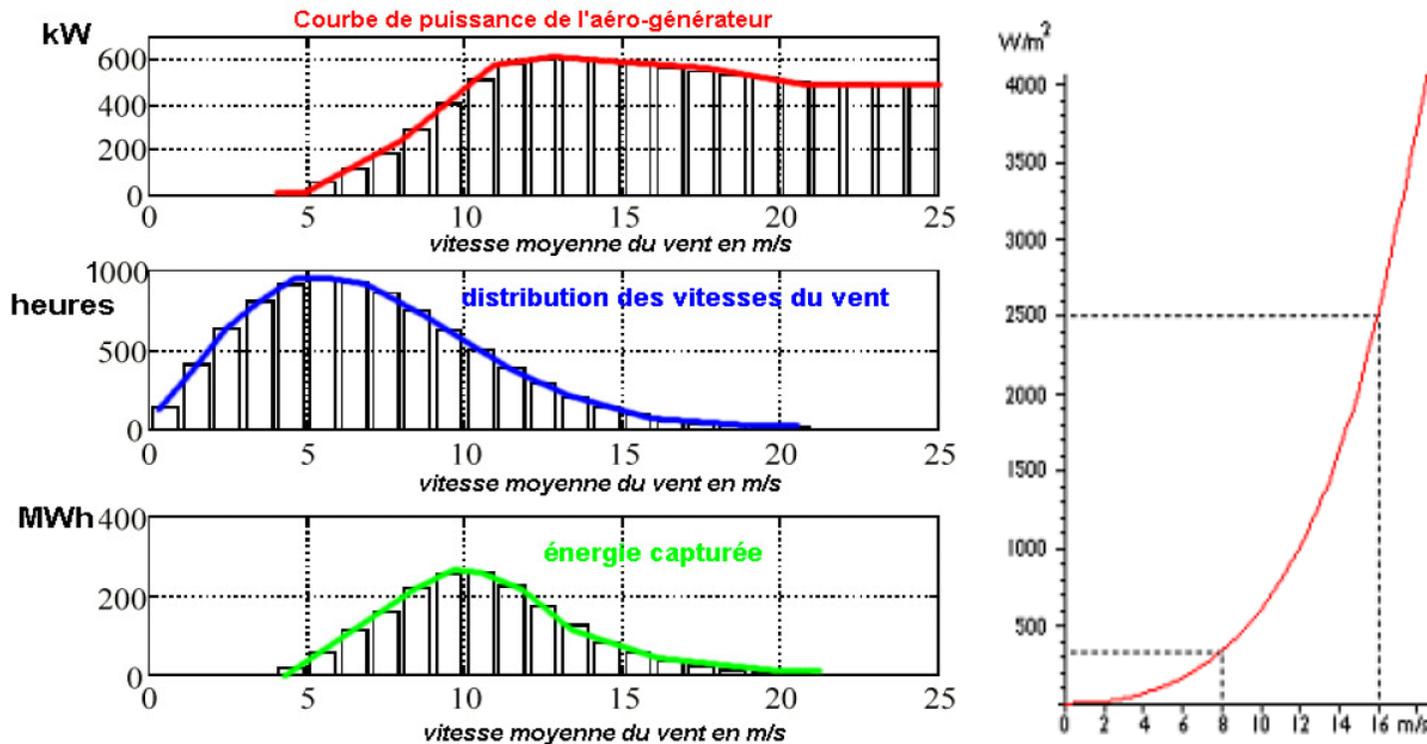
- $\Gamma(x)$ est la fonction gamma hypergéométrique :

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



Calcul de l'énergie produite

- La connaissance de la courbe de puissance de la turbine éolienne et de la distribution du vent permet d'en déduire l'énergie capturée par l'éolienne :

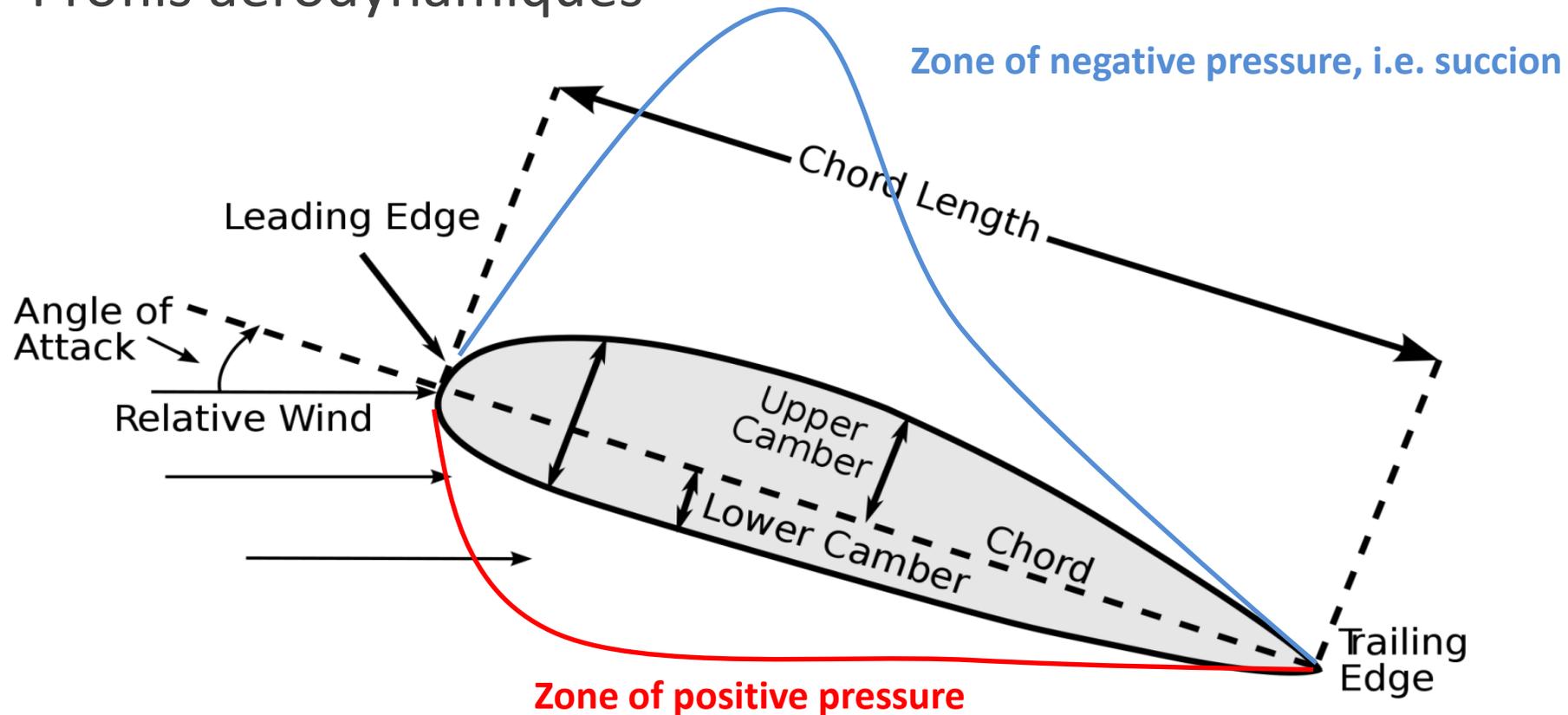


Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Puissance éolienne
- Performance d'une éolienne
- Courbe de puissance
- Calcul de l'énergie produite
- ***Aérodynamique des éoliennes***
- Conclusion

Aérodynamique des éoliennes

- Profils aérodynamiques



Nomenclature d'un profil

Aérodynamique des éoliennes

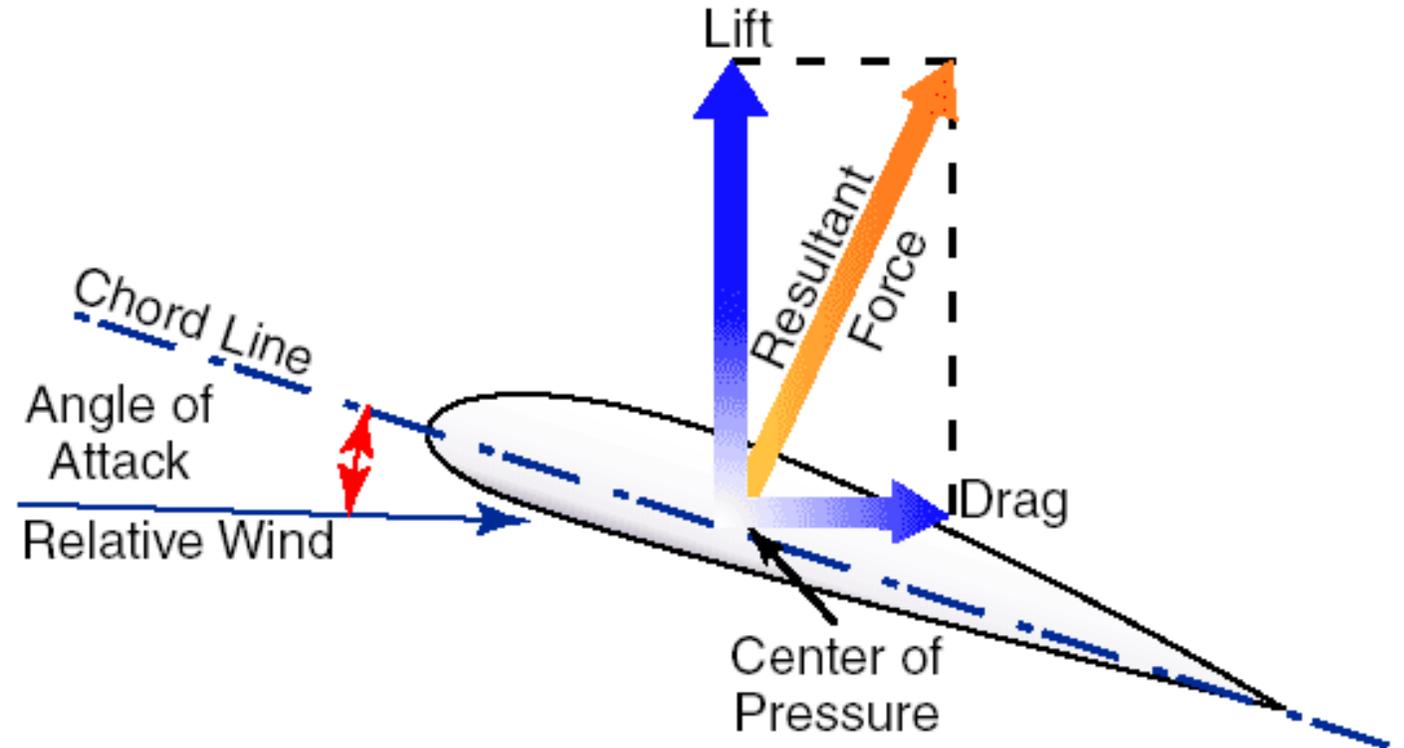
- Forces en présence (N) et leur coefficient (sans dimension)

– Force de portance (Lift)

$$C_L = \frac{L}{0,5\rho V^2 A_b}$$

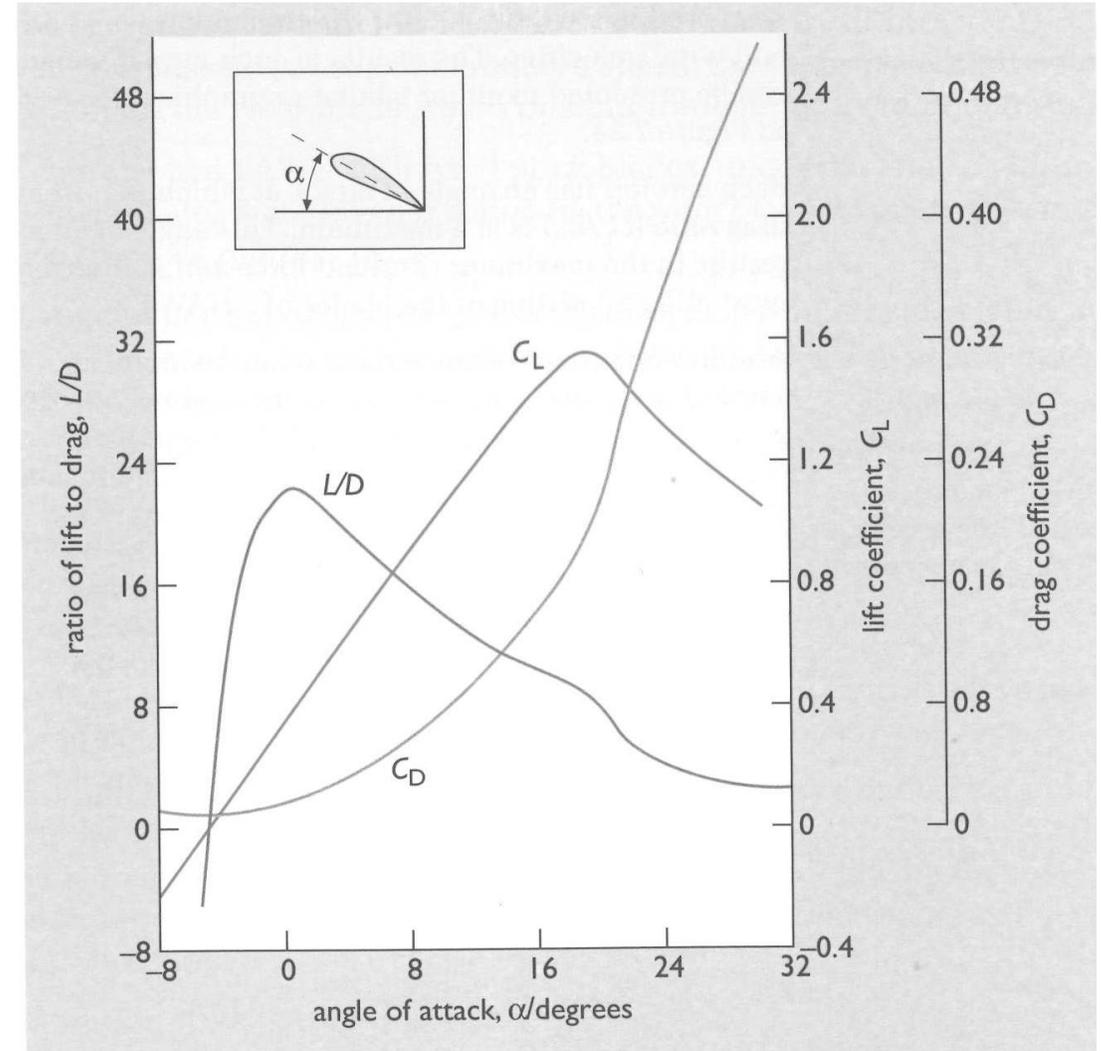
– Force de traînée (Drag)

$$C_D = \frac{D}{0,5\rho V^2 A_b}$$



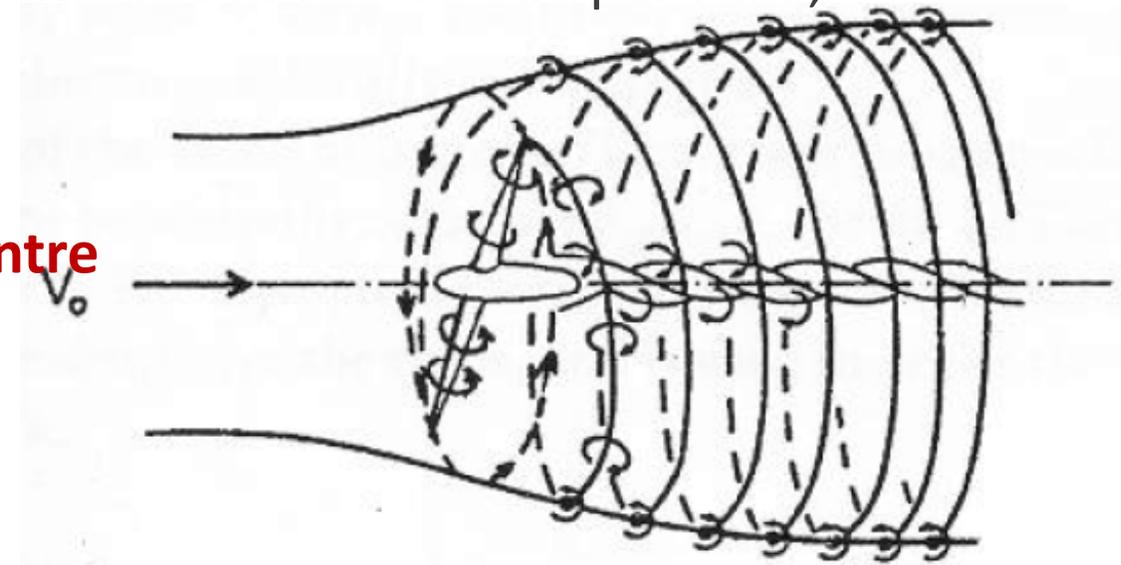
Aérodynamique des éoliennes

- Pour la traînée :
 - C_D plus petit que C_L d'un ordre de grandeur;
 - Etant un effet visqueux, la traînée dépend du nombre de Reynolds Re ;
 - A fort angle d'attaque, la distribution de pression est plus importante, à faible angle ce sont les frottements à la parois qui prédominent.
- Pour la portance :
 - Décrochage : séparation graduelle ou brusque au bord de fuite selon le profil.



Aérodynamique des éoliennes

- La différence de pression induit une vitesse transversale et des tourbillons en aval de l'aile.
 - Formations de systèmes tourbillonnaires qui ralentit la vitesse du rotor;
 - Cette interaction entre l'aile et le vent modifie la vitesse vue par l'aile;
 - On définit une vitesse induite W et une trainée induite correspondante;
 - **Plus il y a de pales, plus la distance entre deux tourbillons est faible et plus on ralentit la vitesse du rotor.**



Aérodynamique des éoliennes

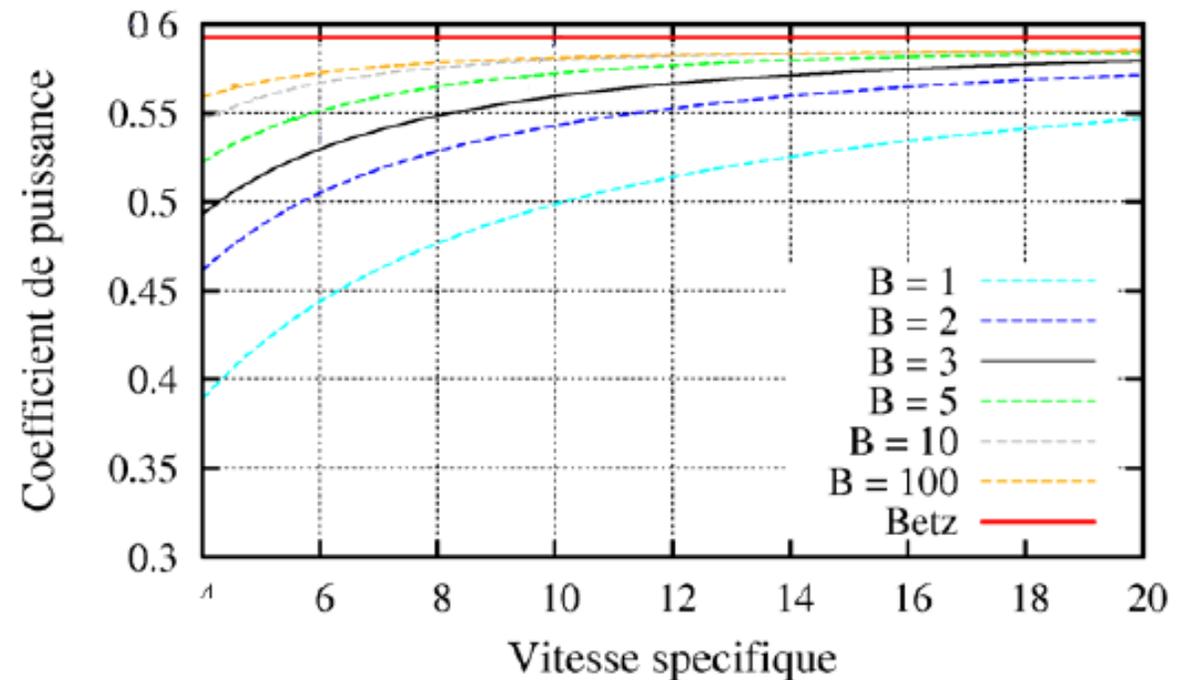
- Effet du nombre de pales

Sans entrer dans les théories de quantité de mouvement et de l'élément de pale :

– Plus il a de pales, plus on peut théoriquement se rapprocher de la limite de Betz pour une même vitesse spécifique λ .

– Et pour un même nombre de pâles, plus on augmente la vitesse spécifique (vitesse du rotor) meilleure est la performance.

– L'augmentation en efficacité avec le nombre de pales est faible après $B = 3$



Aérodynamique des éoliennes

Pour avoir une éolienne efficace dans les vents faibles (quelques m/s), il faut un couple élevé au démarrage.

On privilégie donc en général des vitesses spécifiques, λ , de design faible.

Ainsi, même si le rendement est plus faible, on maximise la plage d'utilisation sur la vitesse du vent et donc le facteur d'utilisation (FU).

Question



ENR2020

- Pourquoi la majorité des grandes éoliennes n'ont que 3 pales?
 - A. Pour diminuer le coût;
 - B. Pour rendre l'éolienne plus esthétique;
 - C. Pour augmenter le rendement;
 - D. Parce que l'aérodynamique des pales est mal comprise par les ingénieurs au-delà de 3 pales;
 - E. Pour équilibrer les charges.

Aérodynamique des éoliennes

Pourquoi pas 1 ou 2 pales ?

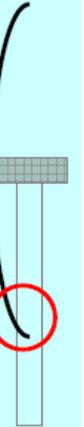
- 1 pale : problème d'équilibrage dynamique;
- 2 pales : phénomène de torsion sur le mât due à la différence des forces entre la pale du haut et la pale du bas (car la vitesse de l'air augmente avec l'altitude).

Effet de battement visuel

B (nombres de pales) :	1	2	3	4	5
Equilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Rigidité à la flexion	+	+	=	-	-
Bruit - fatigue	-	-	+	+	+

Charge trop importante par pale
 λ plus élevé => plus de bruit

Corde trop petite,
 trop de flexion
 (sauf petites tailles)



Aérodynamique des éoliennes

Pourquoi 3 pales ?

À vitesse spécifique de design peu élevée (pour les grandes éoliennes), c'est le meilleur compromis entre :

- Maximisation du C_P ,
- Minimisation des effets des systèmes tourbillonnaires et des turbulences,
- Minimisation de la complexité,
- Minimisation du coût de l'ensemble,
- Maximisation de la plage d'utilisation en vitesse de vent,
- Minimisation des nuisances sonores.

Aérodynamique des éoliennes

- Introduction à la procédure de design d'une éolienne :
 - Sélectionner la vitesse spécifique λ ;
 - Déterminer le nombre de pales;
 - Évaluer le rayon de la pale;
 - Sélectionner un ou des profils aérodynamiques;
 - Obtenir les caractéristiques aérodynamiques des profils composant la pale;
 - Diviser la pale en éléments;
 - Déterminer les paramètres de forme selon la forme optimale avec rotation;
 - Utiliser une méthode de quantité de mouvement couplée à la théorie de l'élément de pale pour évaluer les performances;
 - Vérifier les performances par rapport aux attentes.

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente
 - Un étudiant du cours nous a transmis en 2020 une nouvelle ayant trait à une innovation formidable pour les pales d'éoliennes.

En observant des [baleines à bosses](#), des [chercheurs](#) on essayé de comprendre pourquoi les bosses sur leurs nageoires leur permettent de mieux nager. Après avoir fait des expériences en laboratoires sur des modèles, cette technique de bosses permet maintenant de fabriquer des pales d'éoliennes qui ont un rendement de 20% supérieur aux modèles habituels et sont plus résistantes. (Voir le fabricant [Whale Power](#))

Cette innovation inspirée d'un être vivant pourrait aussi être utilisée sur des ailes d'avion, des ventilateurs, etc..

<https://www.domsweb.org/ecolo/eolien.php>

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente
 - Cette nouvelle nous permet de porter un jugement sur ce que l'on trouve sur le web et ailleurs, et de vous partager notre réflexion à ce sujet:
 - D'abord, notre sens logique nous dit que si les bosses de la dite baleine lui permettent d'améliorer (de diminuer) sa résistance à la friction, il devrait en être ainsi pour les pales d'une éolienne. *L'évolution est un puissant outil d'optimisation.*
 - Nous sommes donc accrochés par le texte, car nous croyons aux innovations.

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente

- Ensuite, notre raisonnement entre en action:

- On note d'abord dans le communiqué une faute d'orthographe.
- On constate que c'est un fabricant du produit qui l'affirme.
 - Donc, il faut tenter de rechercher une publication scientifique (et ensuite une seconde, une troisième, etc.) qui s'intéresse à cette forme particulière de pales ou de nageoire.
 - Il faut parallèlement tenter de dénicher des tiers indépendants pour confirmer que la baleine à bosses dispose d'un avantage sur les autres baleines à ce chapitre particulier.
- Puis, des questions se bousculent:
 - Pourquoi la baleine à bosses a-t-elle évolué dans ce sens et que les autres espèces ne l'ont pas fait?
 - Pourquoi (regardez la photo) cette forme de nageoire n'est-elle pas généralisée dans la nature?
 - Darwin aurait-il oublié les poissons et mammifères marins autres que la b-à-b?
 - Etc., etc.

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente

- Ensuite, notre raisonnement entre en action:

- Mais, on s'est attardé à l'affirmation suivante : « permet maintenant de fabriquer des pales d'éoliennes qui ont un rendement de 20% supérieur aux modèles habituels et sont plus résistantes ».
 - Aujourd'hui, avec l'évolution des technologies, le rendement total d'une éolienne peut dépasser les 50%. Elle peut retirer 50% de l'énergie contenue dans la veine d'air (notes du cours ENR, M12). Et sans doute un peu plus aujourd'hui.
 - Augmenter la performance de 20% de 50% reviendrait à produire des éoliennes dont l'efficacité est de 60%. Formidable, n'est ce pas?
 - Qu'est-ce qui cloche dans ça? La réponse se trouve dans vos notes.

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente

- Enfin, cliquez sur lien, c'est un bon indice de potentielle fumisterie.

- Ce n'est pas ce que nous affirmons. Il ne s'agit pas absolument d'une fumisterie.
 - Ce serait présomptueux de l'affirmer.
 - Ce que nous disons est que nous aimerions y croire mais que le raisonnement ne permet pas de penser que ce soit possible suite à une analyse sommaire.
 - Il faut poursuivre la recherche.

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente

- Épilogue.

- En recherchant sur le web, on trouve effectivement une Whale Power Corporation (<https://whalepowercorp.wordpress.com/>) basée à Toronto;
 - 406 likes sur Facebook en 2020, établie en 2005;
 - On parle au futur « *Turbines, compressors, pumps and fans will never be the same again* »;
 - Une section réfère aux articles publiés;
 - La liste est exhaustive
 - Le premier lien sur lequel on a cliqué n'a pas fonctionné;
 - Le second non plus;
 - Parmi la liste publiée, un article existe mais il y a une erreur dans le titre.

Aérodynamique des éoliennes

- Innovation récente

- Épilogue.

- Nous avons finalement consulté « l'abstract » de l'article cité malgré une erreur dans le titre
 - L'article conclut que: *Overall, the thrusts of VAWT with modified turbine blades were lower than the ones with straight blade. The values of the thrust decreased with increasing amplitudes and decreasing wavelengths, mainly due to the structure of the vortices generated at the leading edge of the turbine blade*

 No Access . May 2015

**Computational fluid dynamics analysis of the vertical axis
wind turbine blade with tubercle leading edge**

Chi-Jeng Bai, Yang-You Lin, San-Yih Lin and Wei-Cheng Wang

Journal of Renewable and Sustainable Energy **7**, 033124 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4922192>

- Nous avons aussi trouvé d'autres articles sur le sujet qui démontrent que parfois ça fonctionne, d'autres non. Bref, la technologie est en vogue depuis 2005 environ. À explorer...

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Puissance éolienne
- Performance d'une éolienne
- Courbe de puissance
- Calcul de l'énergie produite
- Aérodynamique des éoliennes
- ***Conclusion***

Conclusion

- Caractéristiques d'une éolienne à axe horizontal : exemples

Données Éolienne Vestas V39

Puissance	500 kWe
Diamètre du rotor	39 m (1195 m ²)
Vent (fourniture, nominale, arrêt)	4 m/s, 15 m/s, 25 m/s
Vitesse de rotation	30 RPM (max)
Vitesse périphérique ($\Omega \times R$)	61 m/s
Rotor	3 pales en fibres de verre
Générateur	Asynchrone, 690 V, 50 Hz, 1522 RPM
Tour	Acier, tubulaire, hauteur 53 m
Énergie totale	1,03×10 ⁶ kWe h/an

Un autre exemple, les caractéristiques de la Senvion MM92 : <https://www.senvion.com/senvion-france/fr/les-solutions-eoliennes/les-eoliennes/mm92/>

Conclusion

- Il existe une puissance éolienne (PE) qui est la puissance cinétique disponible dans le vent;
- Mais on ne peut récupérer au maximum que 59,3% de cette puissance : limite de Betz = limite physique;
- La performance de l'éolienne dépend alors de la géométrie de la pale, de la vitesse du rotor (vitesse du vent, vitesse spécifique de design, altitude), des rendements mécanique et électrique et du facteur d'utilisation.

Conclusion

- Ces considérations ont fait évoluer le marché des éoliennes conventionnelles vers le choix des tripales;
- Aujourd'hui, les éoliennes à axe horizontal atteignent facilement 50% de rendement;
- Le défi actuel consiste à aller toujours plus haut chercher les vents forts et stables : on atteint la limite de résistance des matériaux et les limites de rentabilité économique des projets;
- On recherche alors le meilleur compromis efficacité/coût de revient (coût du kWh).

Pour en voir plus...

- Quelques vidéos présentant les éoliennes et leur montage
 - Vidéo de EDF qui résume le fonctionnement d'une éolienne
<https://www.youtube.com/watch?v=v6ZNDQ80ELE>
 - Vidéo de ENGIE qui présente l'intérieur d'une éolienne
<https://www.youtube.com/watch?v=dnBijnpYBHQ>
 - Montage d'une éolienne sur site (Warisoulx, Belgique, près de Namur)
<https://www.youtube.com/watch?v=QOUQcVbprm4>
 - Montage d'une éolienne JUVENT sur site (Mont-Crosin, Suisse, près de Berne)
<https://www.youtube.com/watch?v=iceJfv58bAQ>



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

