

3. Aérodynamique des éoliennes

3.2 Aérodynamisme des pales



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- Conclusion

Introduction et objectifs

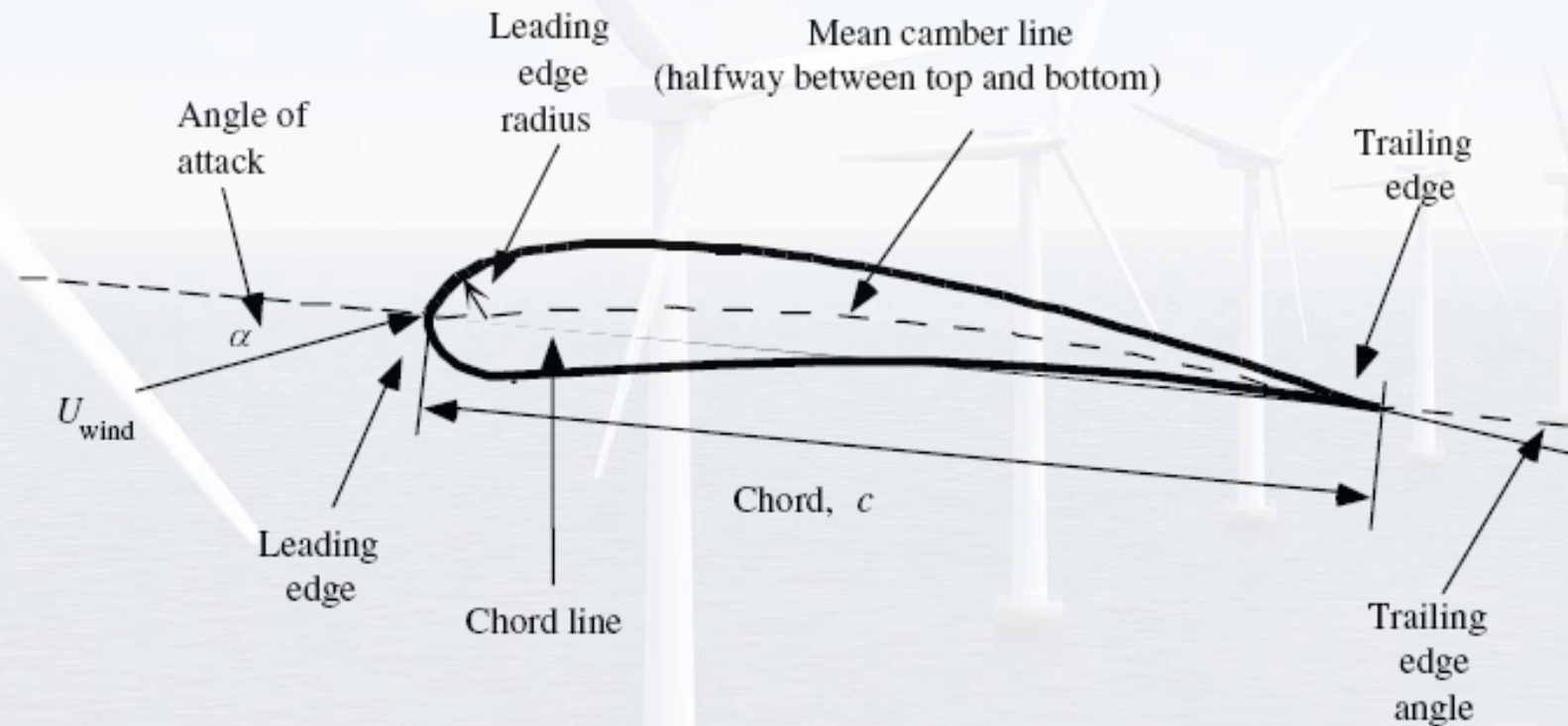
- Les pales d'une éolienne sont les composants clés de la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique. L'optimisation de leur forme est donc une étape importante du processus de conception d'une éolienne.
- L'optimisation de la forme des pales d'une éolienne passe par la connaissance des caractéristiques aérodynamiques d'une pale.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Aérodynamique des profils***
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- Conclusion

Aérodynamique des profils

❖ Caractéristiques géométriques



Aérodynamique des profils

❖ Variation du profil aérodynamique au long de la pale

Thin Airfoil Family for Medium Blades

Tip Region Airfoil (95% radius)



Primary Outboard Airfoil (75% radius)



Root Region Airfoil (40% radius)



Thick Airfoil Family for Large Blades

Tip Region Airfoil (95% radius)



Primary Outboard Airfoil (75% radius)



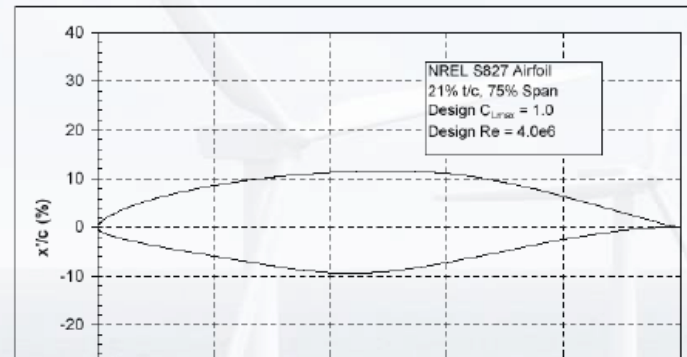
Root Region Airfoil (40% radius)



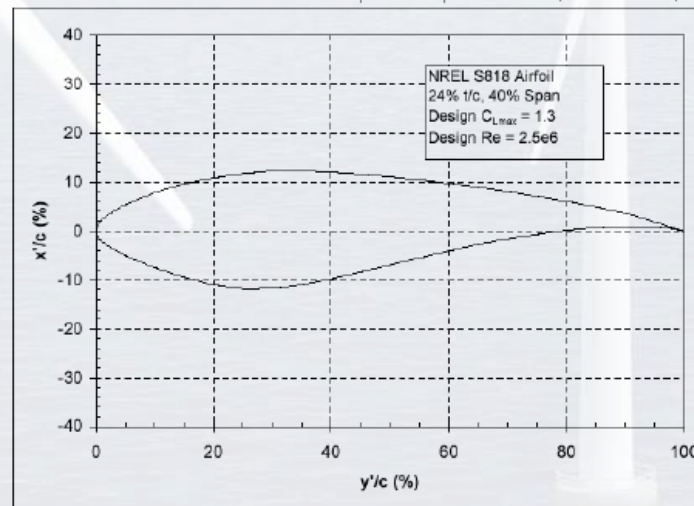
Aérodynamique des profils

❖ Variation du profil aérodynamique au long de la pale

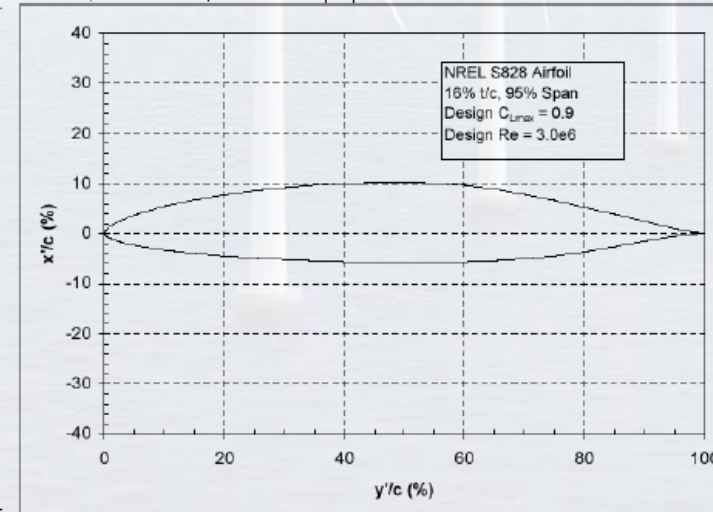
Profil de base



Pied de pale

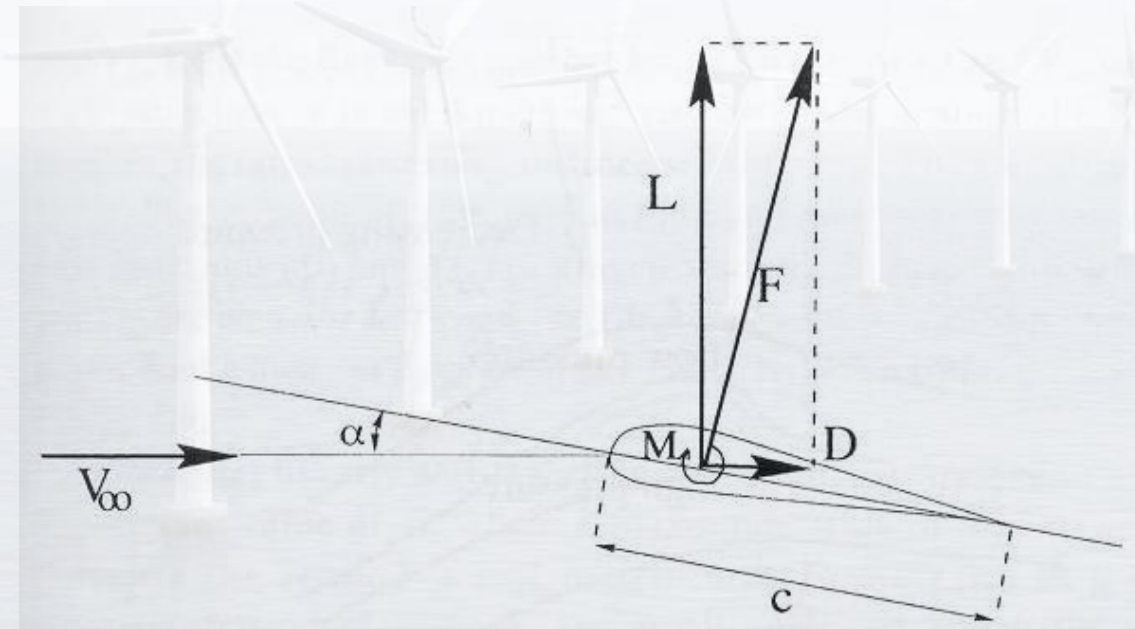
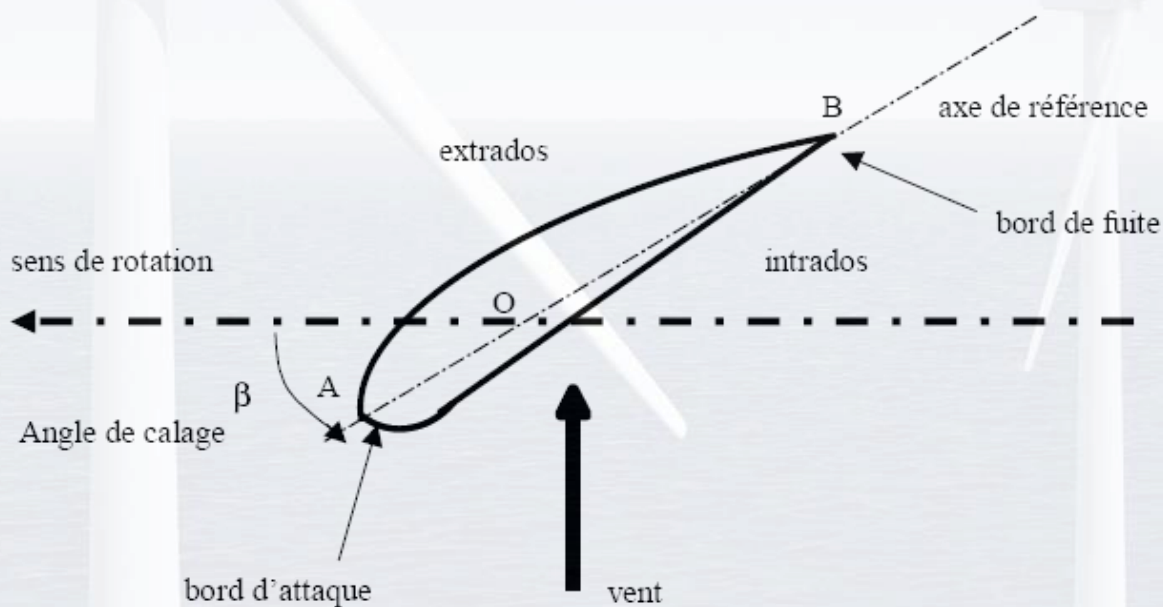


Bout de pale



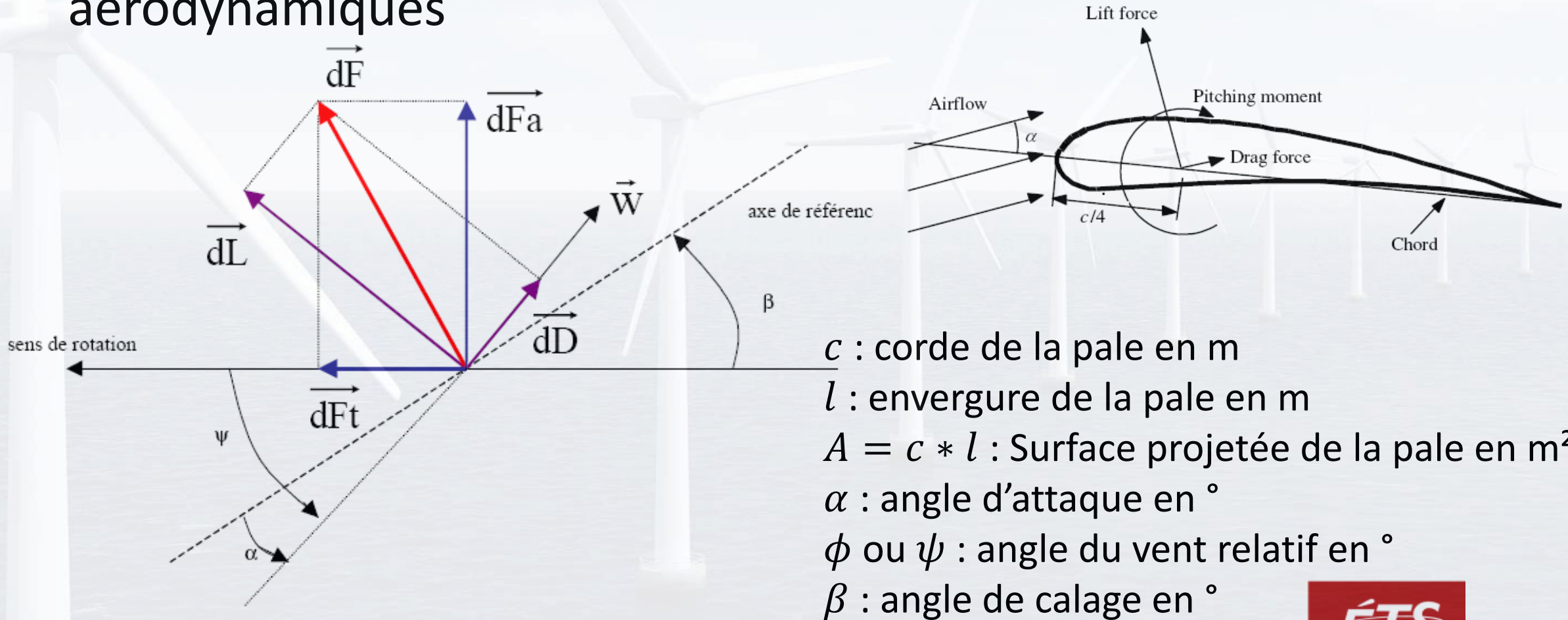
Aérodynamique des profils

- ❖ Forces (portance et trainée) et moments (tangage) aérodynamiques



Aérodynamique des profils

- ❖ Forces (portance et trainée) et moments (tangage) aérodynamiques



- c : corde de la pale en m
- l : envergure de la pale en m
- $A = c * l$: Surface projetée de la pale en m^2
- α : angle d'attaque en $^\circ$
- ϕ ou ψ : angle du vent relatif en $^\circ$
- β : angle de calage en $^\circ$

Question

- De quoi dépendent directement les coefficients de traînée et de portance ?
 - A. La longueur de la corde
 - B. La vitesse du vent
 - C. La viscosité de l'air
 - D. La masse volumique de l'air
 - E. L'envergure de l'aile

Aérodynamique des profils

❖ Caractéristiques adimensionnelles de l'écoulement et coefficient aérodynamiques :

- Coefficient de portance :

$$C_L = \frac{\frac{L}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\frac{\text{Portance}}{l}}{\frac{\text{Force dynamique}}{l}}$$

- Coefficient de traînée :

$$C_D = \frac{\frac{D}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\frac{\text{Traînée}}{l}}{\frac{\text{Force dynamique}}{l}}$$

- Coefficient du moment de tangage :

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 c * l} = \frac{\text{Moment de tangage}}{\text{Moment dynamique}}$$

- Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{Ul}{\nu} = \frac{\rho Ul}{\eta} \text{ car } \mu = \rho * \nu$$

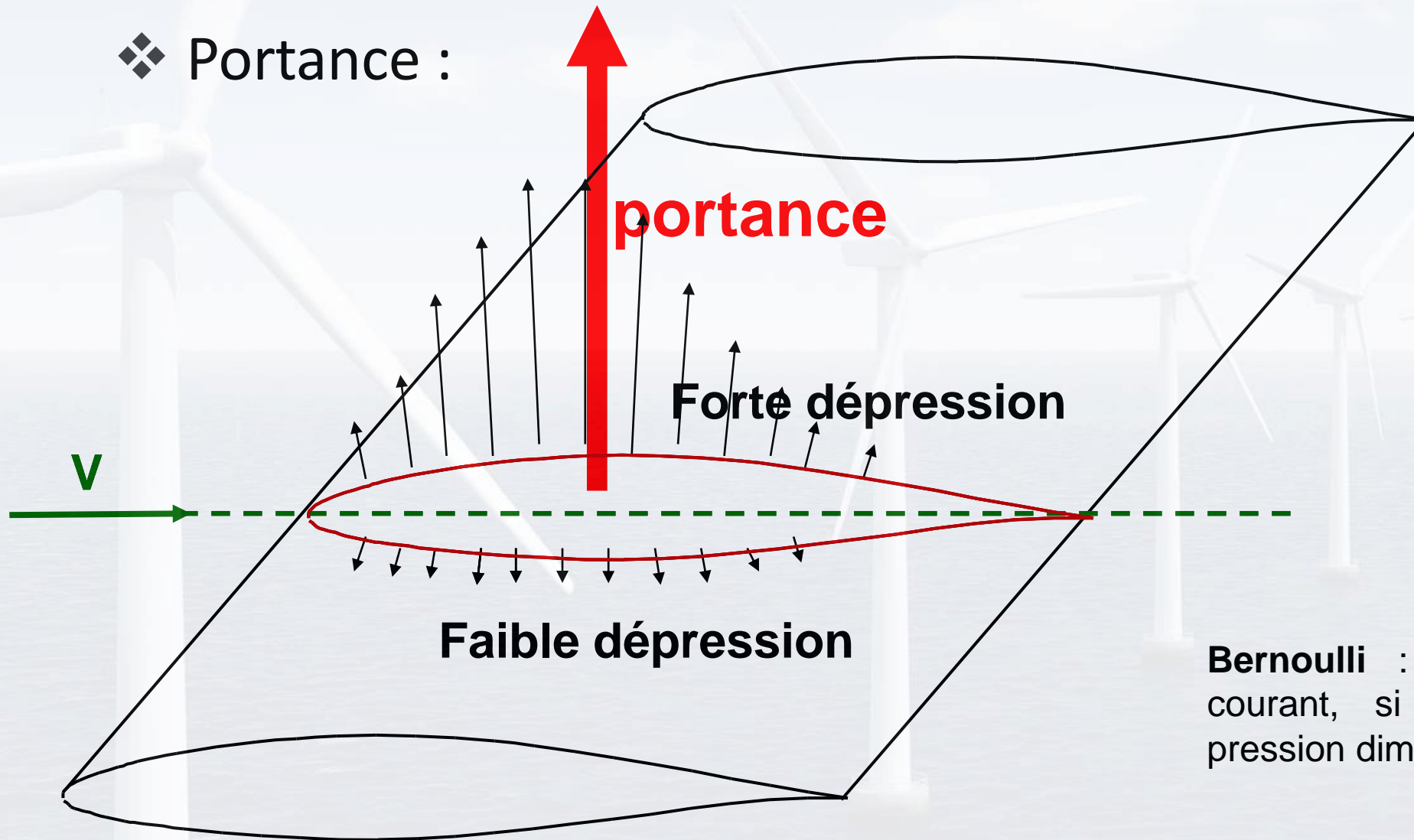
l : envergure en m ; U : vitesse du vent incident en m/s ; ρ : densité de l'air en kg/m^3 ; c : corde en m ; ν : viscosité cinématique de l'air en m^2/s ; μ : viscosité dynamique de l'air en Pa.s

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- ***Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale***
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- Conclusion

Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale

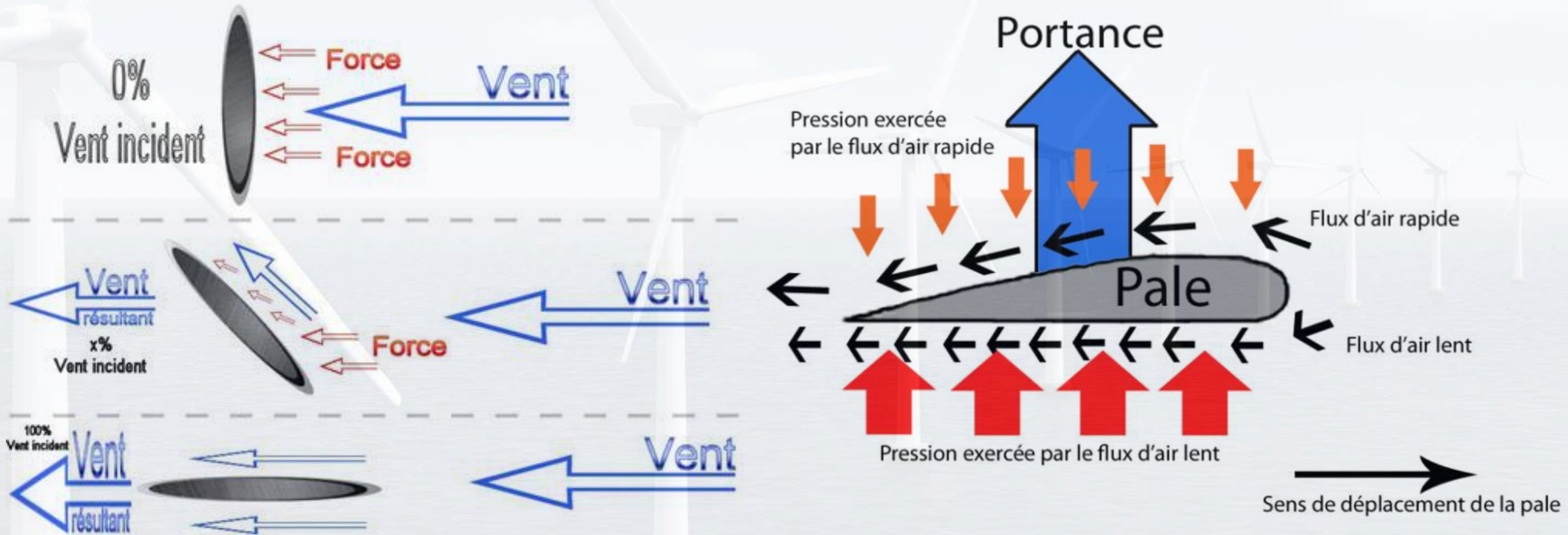
❖ Portance :



Bernoulli : le long d'une ligne de courant, si la vitesse augmente, la pression diminue

Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale

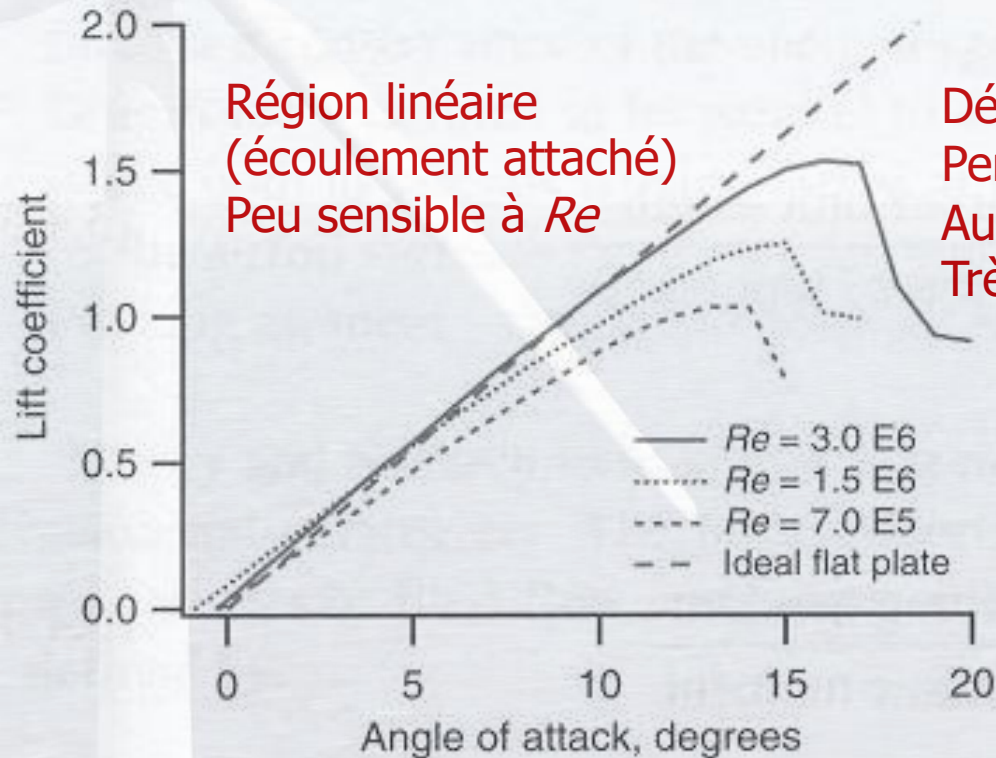
❖ Portance :



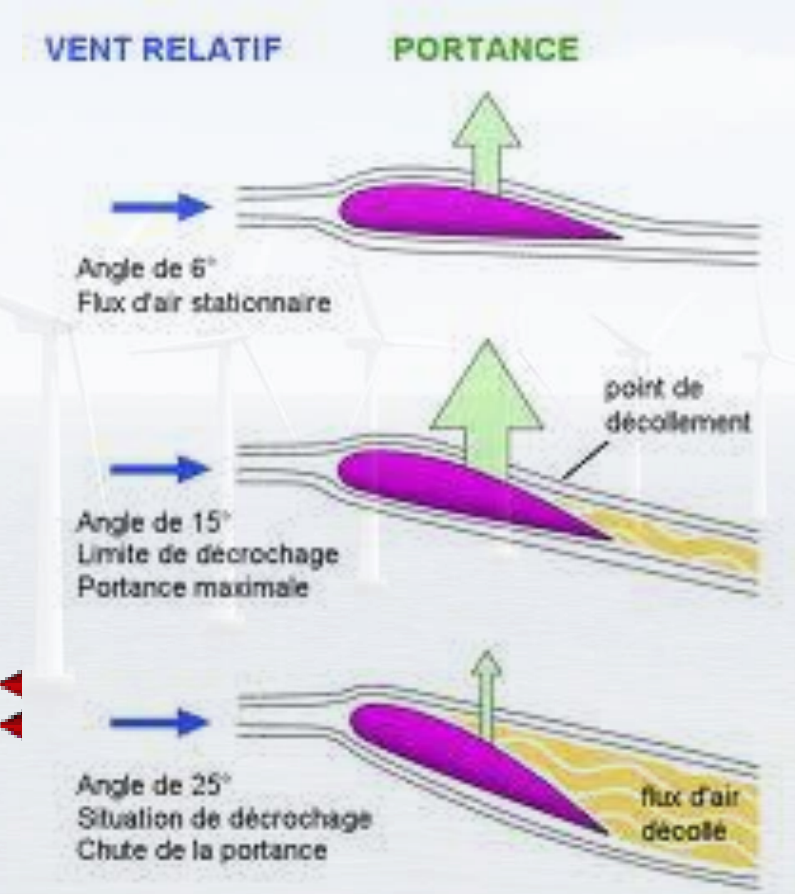
Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale

❖ Portance :

$$c_L \left(Re, \alpha, \frac{\epsilon}{c} \right) = \frac{\text{Portance}}{\frac{1}{2} \rho U^2 c}$$



998 www.WINDPOWER.dk

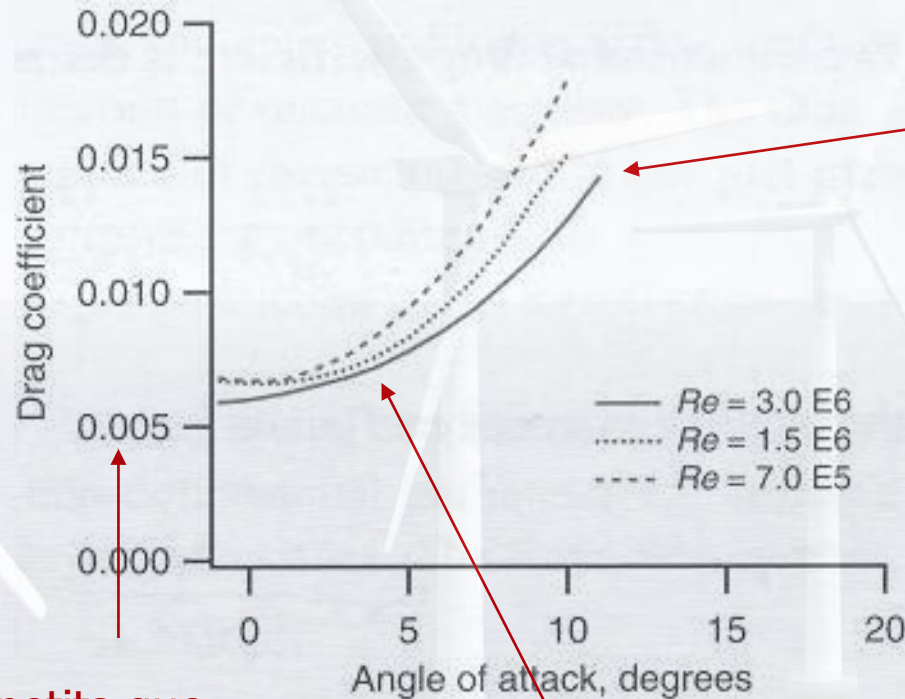


Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale

❖ Traînée :

$$c_D(Re, \alpha, \frac{\epsilon}{c}) = \frac{\frac{Trainée}{l}}{\frac{1}{2} \rho U^2 c}$$

Deux ordres plus petits que le coefficient de portance



Dépend du nombre de Re
(la traînée étant un effet visqueux)

À fort angle d'attaque, la distribution de pression est plus importante.

À faible angle d'attaque, la traînée est principalement à cause du frottement à la paroi.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- ***Théorie de la quantité de mouvement***
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la trainée et du nombre de pales
- Conclusion

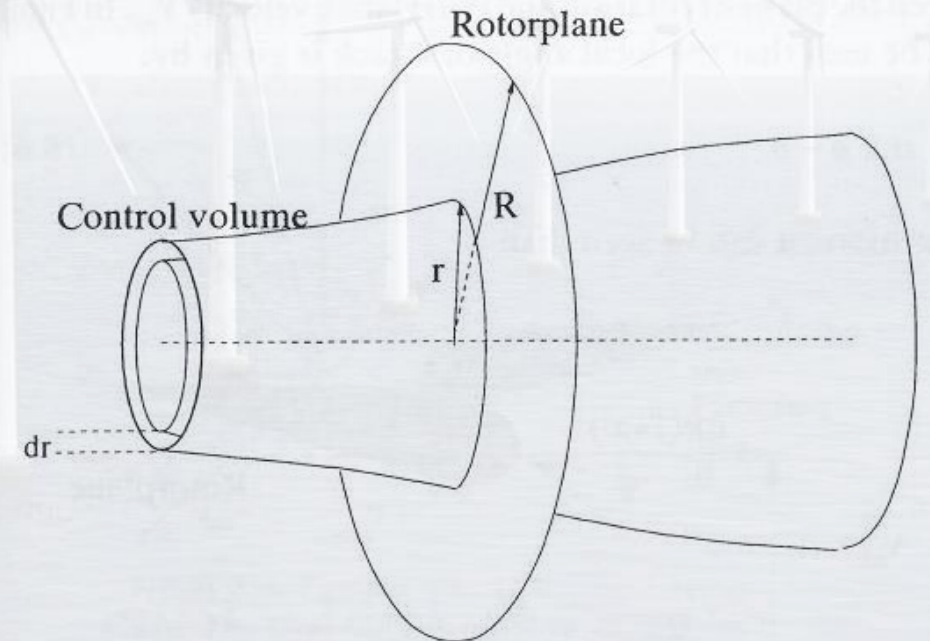
Théorie de la quantité de mouvement

- Hypothèses :
 - Rotor avec un nombre infini de pales (mais solidité finie)
 - Indépendance entre les tubes de courant annulaires

$$dQ = 4a'(1 - a)\rho U\pi\Omega r^3 dr \quad (1)$$

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

Avec Q le couple et T la poussée.

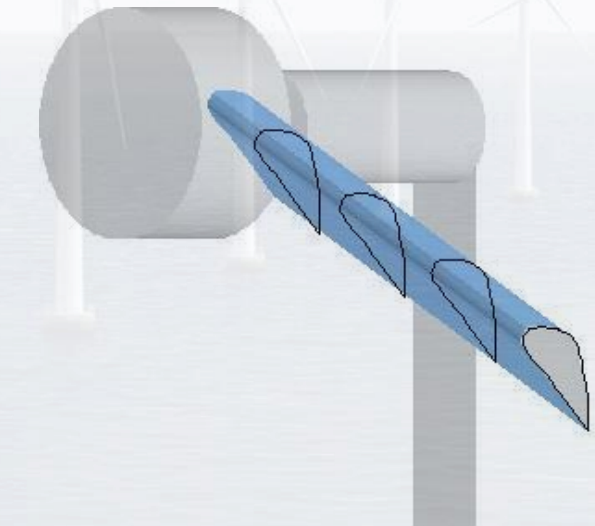
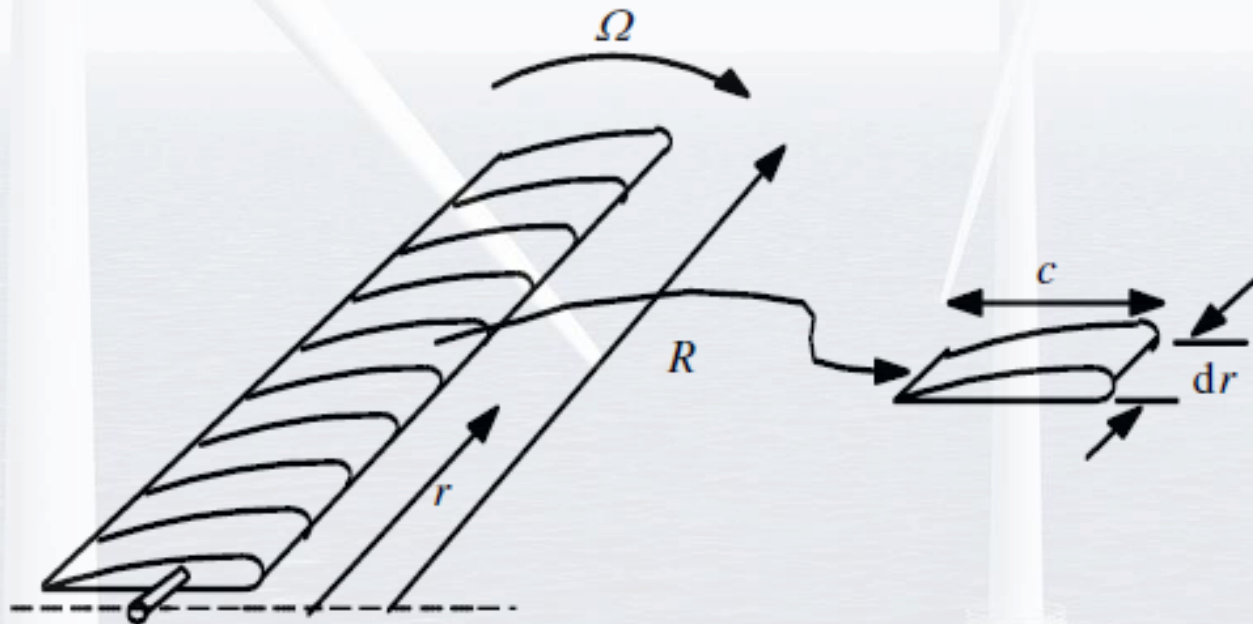


Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- ***Théorie de l'élément de pale***
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- Conclusion

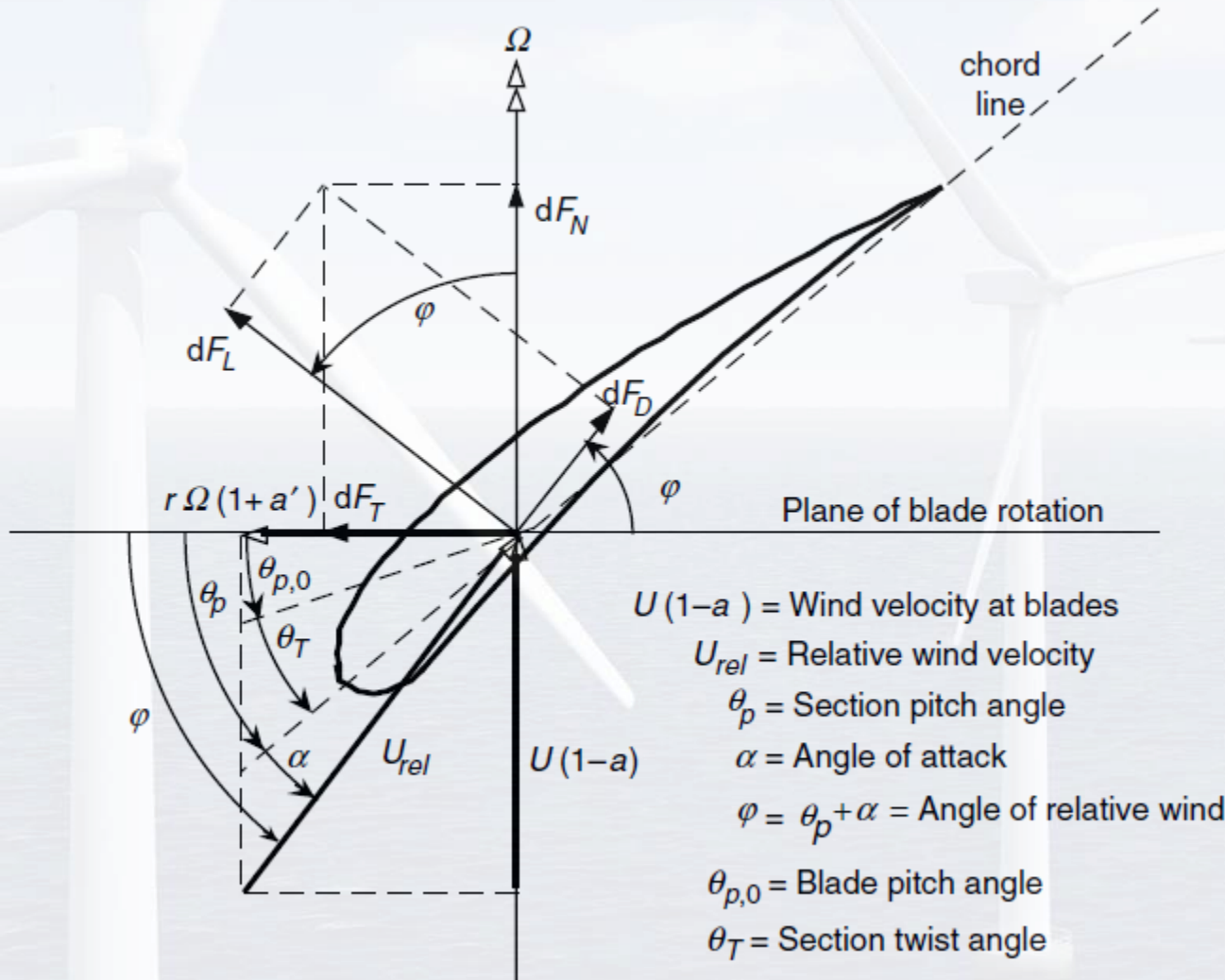
Théorie de l'élément de pale

- La pale est divisée en une série de N éléments (profils aérodynamiques). On considère qu'ils fonctionnent indépendamment les uns des autres.



Division de la pale suivant la théorie des coupes

Théorie de l'élément de pale



- L'angle du vent relatif s'exprime à l'aide de ceux de tangage et d'attaque :

$$\phi = \Theta_p + \alpha \quad (3)$$

- Il est possible de relier cet angle aux facteurs d'induction axial et angulaire :

$$\tan(\phi) = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{\lambda_r(1+a')} \quad (4)$$

- Vitesse du vent relatif :

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin(\phi)} \quad (5)$$

Théorie de l'élément de pale

- Les forces de trainée et de portance dépendent de cette vitesse relative :

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (6)$$

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (7)$$

- Les composantes normales et tangentielles de la force s'exerçant sur l'élément de pale dépendent de ces dernières :

$$dF_N = dF_L \cos\phi + dF_D \sin\phi \quad (8)$$

$$dF_T = dF_L \sin\phi - dF_D \cos\phi \quad (9)$$

Théorie de l'élément de pale

- Si le rotor est composé de B pales, la composante normale de la force s'appliquant sur la section située à une distance r du centre s'exprime par :

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr \quad (10)$$

- Le couple résultant de la composante tangentielle est donné par :

$$dQ = BrdF_T \quad (11)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c r dr \quad (12)$$

- Ces deux équations permettent de relier la force normale et le couple tangentielle sur une section élémentaire du rotor à l'angle d'écoulement et aux caractéristiques de la pale. Ces équations seront utilisées par la suite pour déterminer la forme idéale des pales.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- ***Forme optimale de la pale sans effet de sillage***
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- Conclusion

Forme optimale de la pale sans effet de sillage

- Les équations obtenues lors de la théorie du disque et de celle de l'élément de pale sont utilisées pour déterminer la forme optimale des pales.
- Sans effet de sillage, les hypothèses utilisées sont les suivantes :
 - Pas de sillage $\rightarrow a' = 0$
 - Pas de traînée $\rightarrow C_d = 0$
 - Pas de pertes dues au nombre fini de pales
 - Condition optimale de Betz $\rightarrow a = \frac{1}{3}$ à chaque r

Forme optimale de la pale sans effet de sillage

- En prenant $a = \frac{1}{3}$ dans l'équation (1) obtenue dans la théorie de la quantité de mouvement, il vient :

$$dT = \rho U^2 \left(\frac{8}{9}\right) \pi r dr \quad (13)$$

- Et en prenant $C_d = 0$ dans l'équation (10) obtenue dans la théorie de l'élément de pale, il vient :

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \phi) c dr \quad (14)$$

- La troisième équation nécessaire à l'optimisation de la forme de la pale provient de l'expression de la vitesse relative obtenue dans la théorie de l'élément de pale (5) :

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \phi} = \frac{2U}{3 \sin \phi} \quad (15)$$

Forme optimale de la pale sans effet de sillage

- Les trois équations précédentes permettent de lier les paramètres de design entre eux :

$$\frac{C_{lBc}}{4\pi r} = \tan\phi \sin\phi \quad (16)$$

- En prenant $a = \frac{1}{3}$ et $a' = 0$ dans (4) :

$$\tan\phi = \frac{2}{3\lambda_r} \quad (17)$$

- D'où, avec (16) et (17) :

$$\frac{C_{lBc}}{4\pi r} = \left(\frac{2}{3\lambda_r}\right) \sin\phi \quad (18)$$

Forme optimale de la pale sans effet de sillage

- Toutes ces équations permettent d'exprimer l'angle du vent relatif aux autres paramètres :

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda \left(\frac{r}{R} \right)} \right) \quad (19)$$

- Il est alors possible de relier la corde avec les autres paramètres :

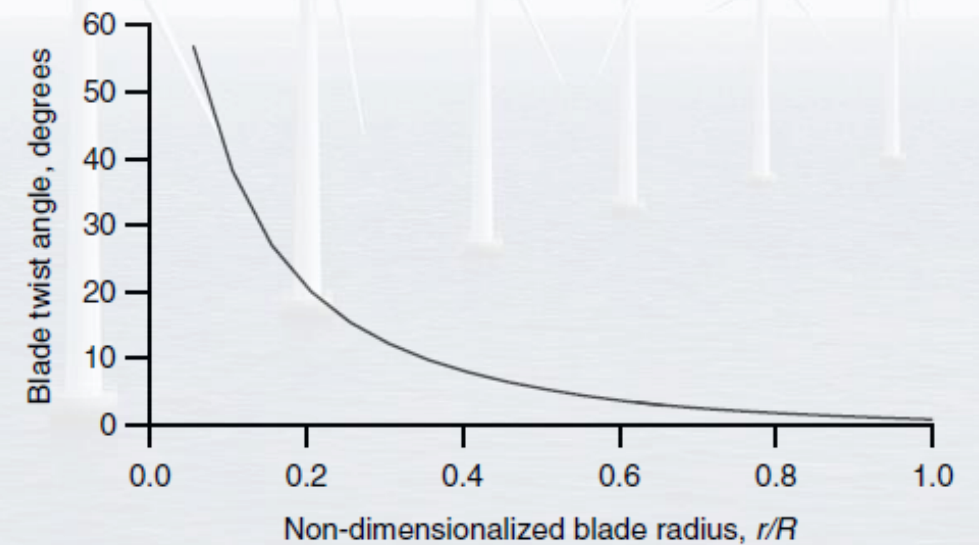
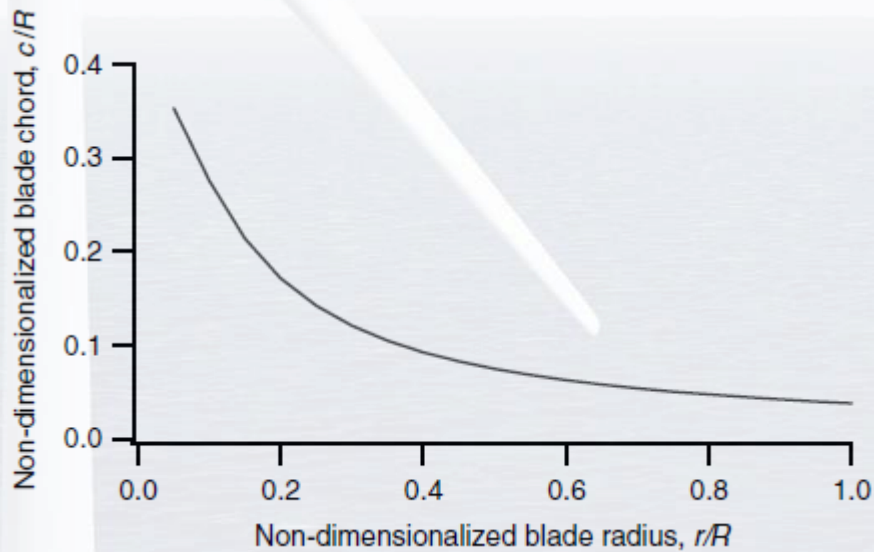
$$c = \frac{8\pi r \sin\phi}{3BC_l \lambda_r} = \frac{8\pi r \sin\phi}{3BC_l \lambda \left(\frac{r}{R} \right)} \quad (20)$$

- Ces deux relations permettent de déterminer la corde et l'angle du vent relatif aux conditions optimales de Betz.

Forme optimale de la pale sans effet de sillage

- Il est alors possible de définir les paramètres de conception dans le cas où le sillage n'existe pas.
- Les courbes suivantes sont obtenues pour les paramètres initiaux suivants :

$$\lambda = 7 ; C_l = 1 ; C_d = 0 ; \alpha = 7^\circ ; B = 3$$



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- ***Forme optimale de la pale dans des conditions générales***
- Effet de la trainée et du nombre de pales
- Conclusion

Forme optimale de la pale dans des conditions générales

- Systèmes d'équations ayant comme inconnues a , a' et ϕ et dont les équations proviennent de :
 - Théorie du disque (quantité de mouvement et quantité de mouvement de rotation)
 - Théorie de l'élément de pale
- Méthode de résolution graphique (possibilité de solutions multiples) ou itérative (recommandée)

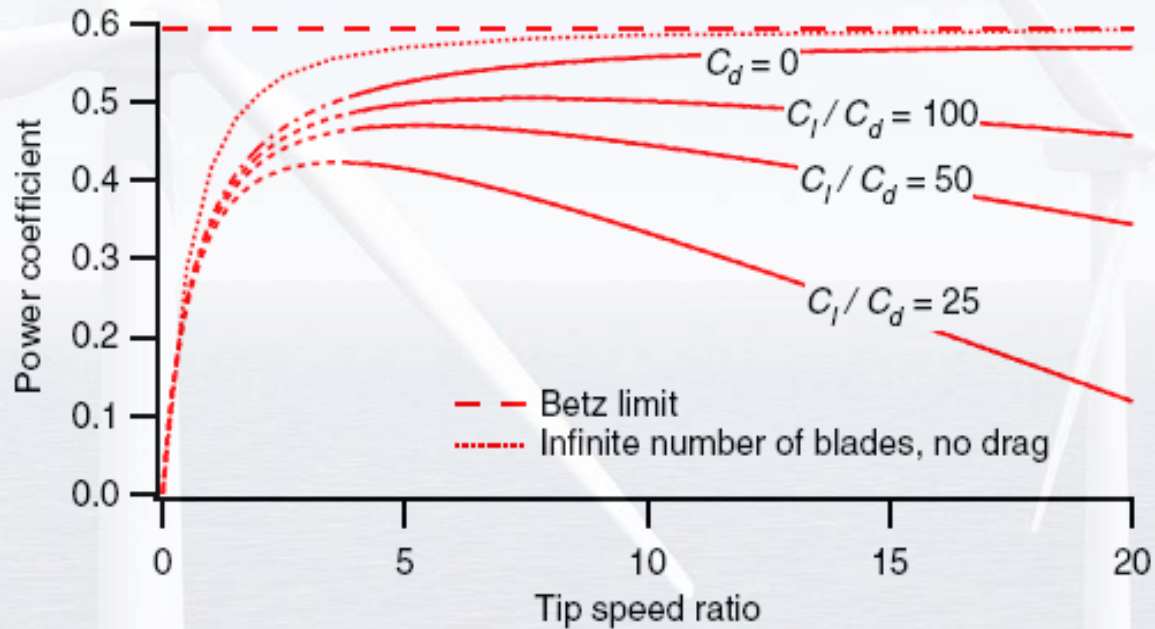
Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- ***Effet de la trainée et du nombre de pales***
- Conclusion

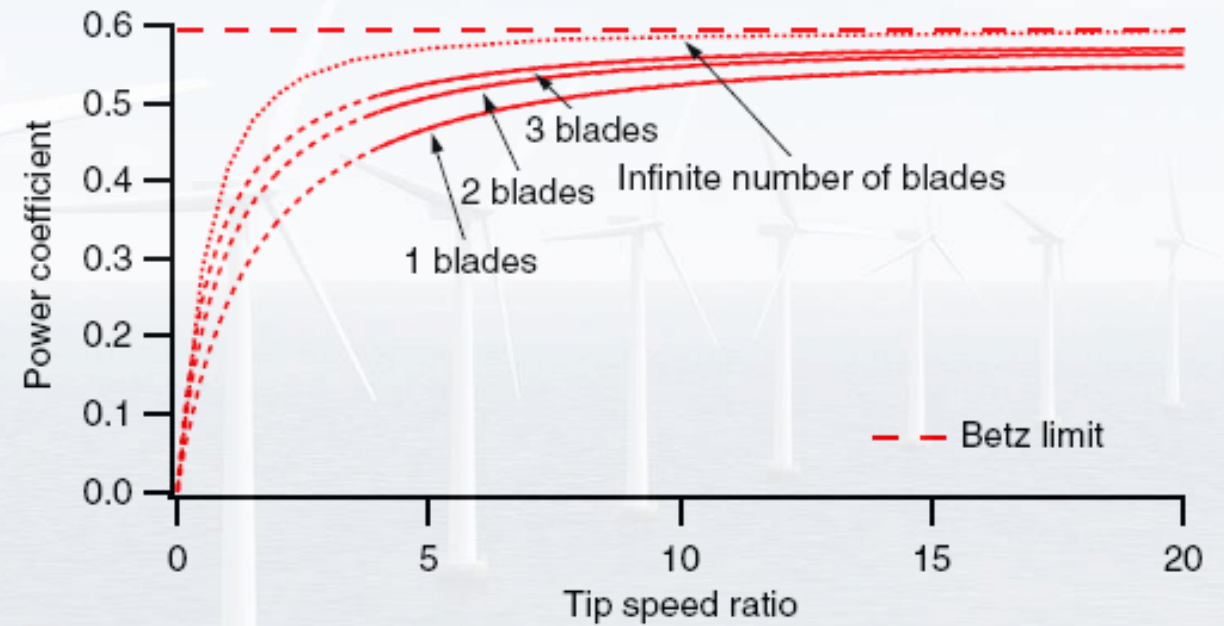
Question

- Pour un ratio local des vitesses égal, quel nombre de pales permet le coefficient de puissance le plus élevé ?
 - A. 1 pale
 - B. 2 pales
 - C. 3 pales
 - D. 4 pales
 - E. 5 pales

Effet de la traînée et du nombre de pales



Effet de la traînée



Effet du nombre de pales

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Aérodynamique des profils
- Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale
- Théorie de la quantité de mouvement
- Théorie de l'élément de pale
- Forme optimale de la pale sans effet de sillage
- Forme optimale de la pale dans des conditions générales
- Effet de la traînée et du nombre de pales
- **Conclusion**

Conclusion

- L'optimisation du profil des pales d'éolienne dépend des différentes équations issues des principes de l'aérodynamisme et peut s'avérer complexe.
- Cette optimisation est un facteur technologique et économique clé d'un projet éolien.
- Pour visualiser le principe de fonctionnement d'une éolienne et l'importance de l'optimisation des profils de pales :

https://www.youtube.com/watch?v=5Cs_U8DncMU (jusqu'à 1'55'')

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !



MERCI



Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D
Tél: 418-962-9848 # 340
cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca
Hussein_ibrahim01@uqar.ca
Hussein.ibrahim@itmi.ca