



# **Aérodynamique des turbines éoliennes et méthodes du contrôle des vibrations**

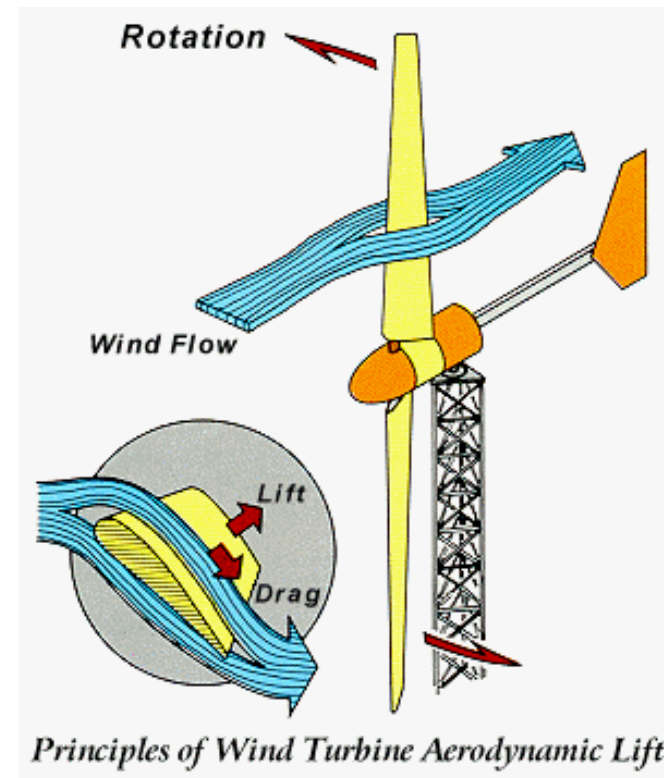
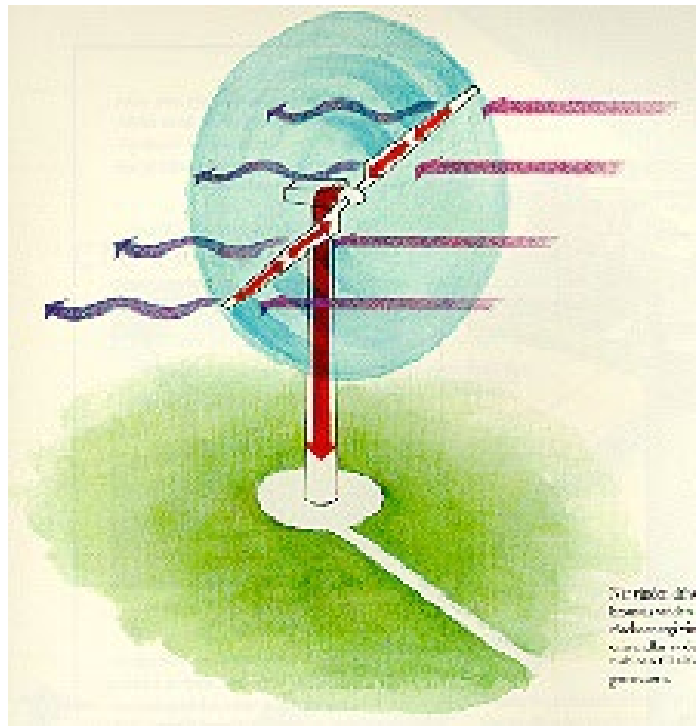
**Adrian ILINCA, Professeur  
Directeur, Laboratoire de recherche en énergie éolienne  
Université du Québec à Rimouski  
[adrian\\_ilinca@uqar.ca](mailto:adrian_ilinca@uqar.ca)**

# Plan de la présentation

- Concepts généraux
- Aérodynamique des turbines éoliennes
  - Théorie du disque et limite de Betz
  - Théorie du disque avec rotation du sillage
  - Aérodynamique des profils
  - Théorie de l'élément de pale (BEM)
  - Forme optimale de la pale
  - Courbe de puissance de la turbine éolienne
- Survol des méthodes de contrôle de la vibration des turbines éoliennes
- Conclusion

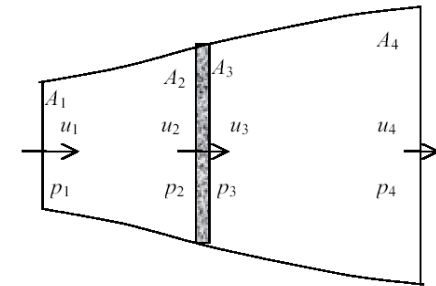
# Théories aérodynamiques

- Théorie du disque
- Théorie de l'élément de pale



# Théorie du disque et limite de Betz

- Image globale de la captation de l'énergie cinétique par le disque du rotor
- Hypothèses:
  - Pas de frottement
  - Écoulement homogène, incompressible, stationnaire
  - Nombre infini de pales (disque « plein »)
  - Poussée uniforme sur la surface du disque
  - Sillage sans rotation
  - Pressions statiques en amont et en aval du disque égales à la pression atmosphérique normale

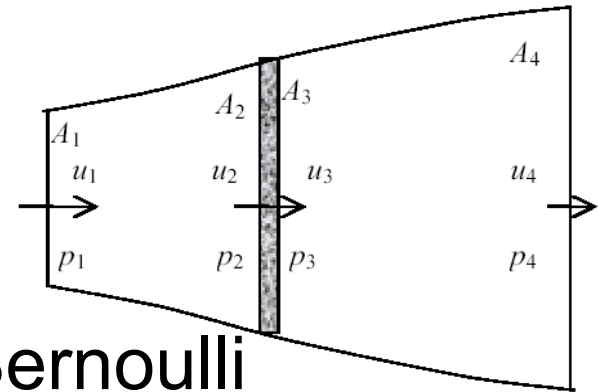


# Théorie du disque et limite de Betz

- Calcul de la poussée sur le disque:
  - Conservation de la quantité de mouvement

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4$$

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4)$$



- Différence de pression et Bernoulli

$$T = A_2(p_2 - p_3) = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2)$$

# Théorie du disque et limite de Betz

- Facteur d'induction axiale  $a$ :

$$U_2 = U_3 = \frac{1}{2}(U_1 + U_4)$$

$$a = \frac{(U_2 - U_1)}{U_1}$$

$$U_2 = U_3 = U_1(1 - a)$$

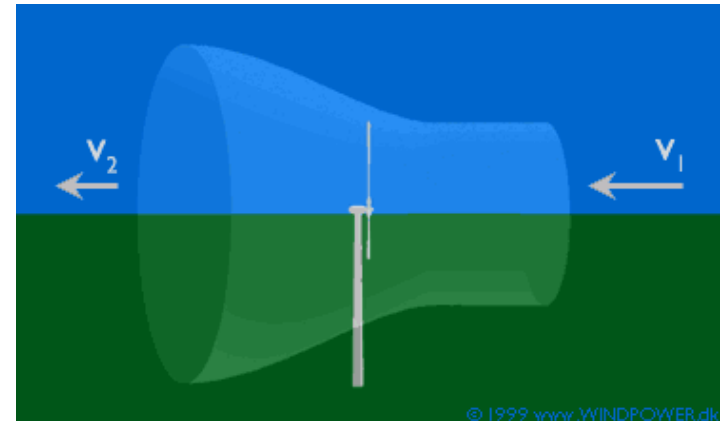
$$U_4 = U_1(1 - 2a)$$

# Théorie du disque et limite de Betz

- Calcul de la puissance comme la différence entre l'énergie cinétique du vent avant et après le disque du rotor:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_2^2) U_2$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3 \cdot 4a(1-a)^2$$



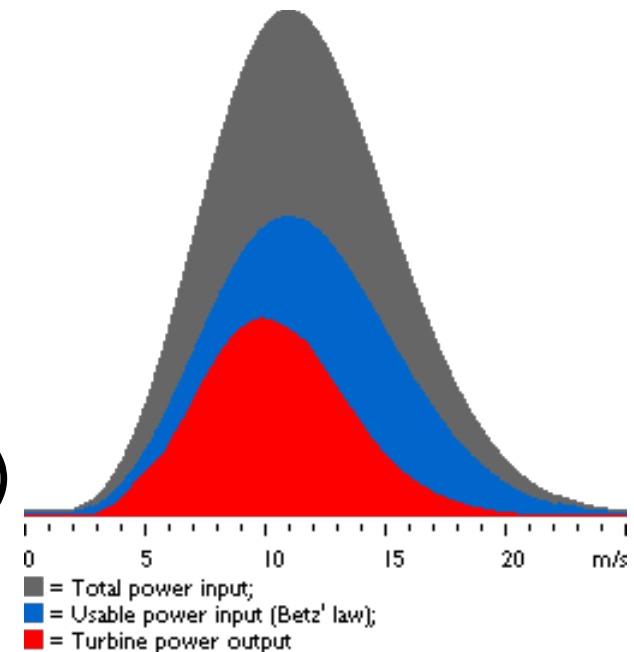
# Théorie du disque et limite de Betz

- Coefficient de puissance

$$c_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3} = 4a(1-a)^2$$

- La limite de Betz (pour  $a=1/3$ )

$$c_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$



© 1998 www.WINDPOWER.org

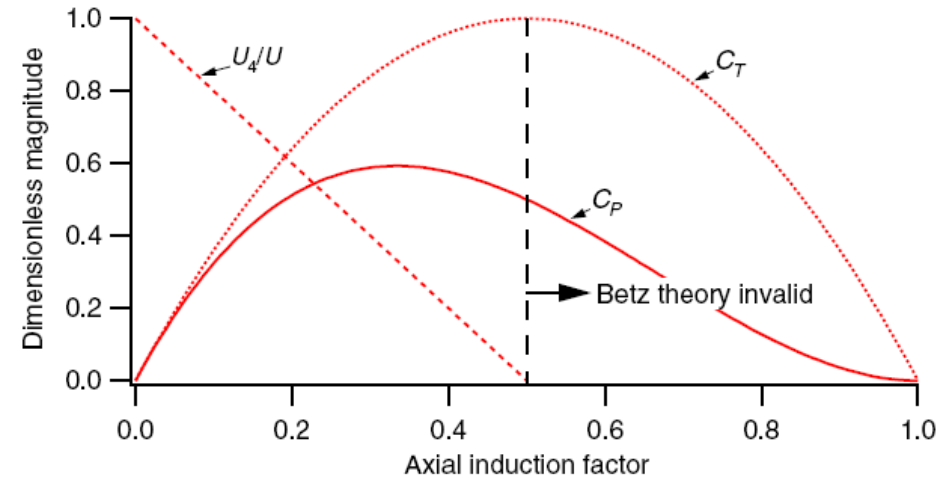


# Théorie du disque et limite de Betz

## ■ Calcul de la poussée :

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 [4a(1-a)]$$

$$c_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2} = 4a(1-a)$$



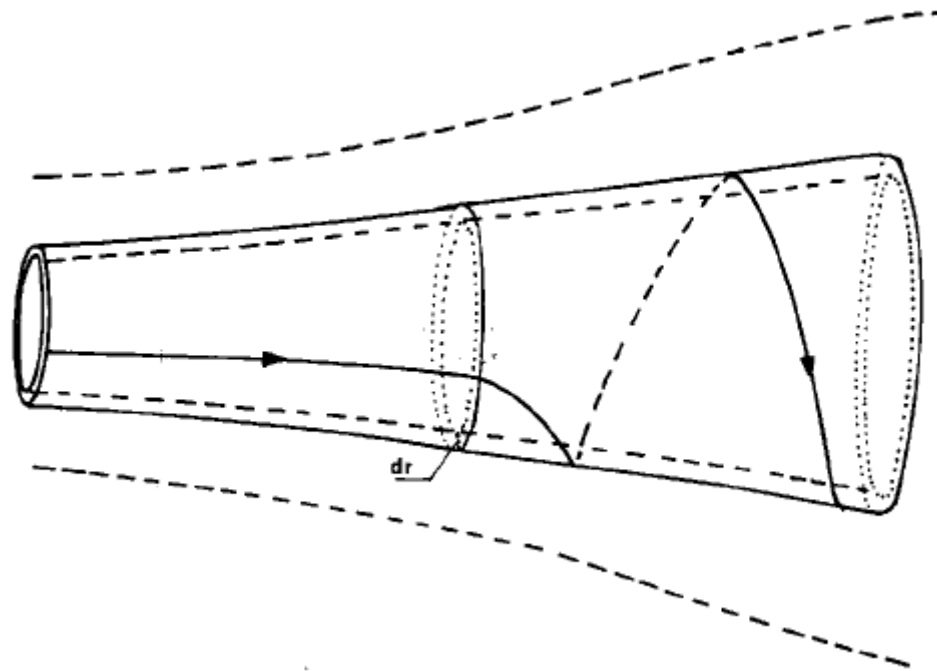
# Théorie du disque et limite de Betz

- La limite de Betz représente la limite théorique du coefficient de puissance du rotor
- En pratique, cette limite n'est jamais atteinte à cause des pertes suivantes:
  - La rotation du sillage en arrière du rotor
  - Nombre fini de pales et pertes associées en bout de pale
  - Traînée aérodynamique non-nulle

$$\eta_{total} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3} = \eta_{mécanique} C_P$$

# Théorie du disque avec rotation du sillage

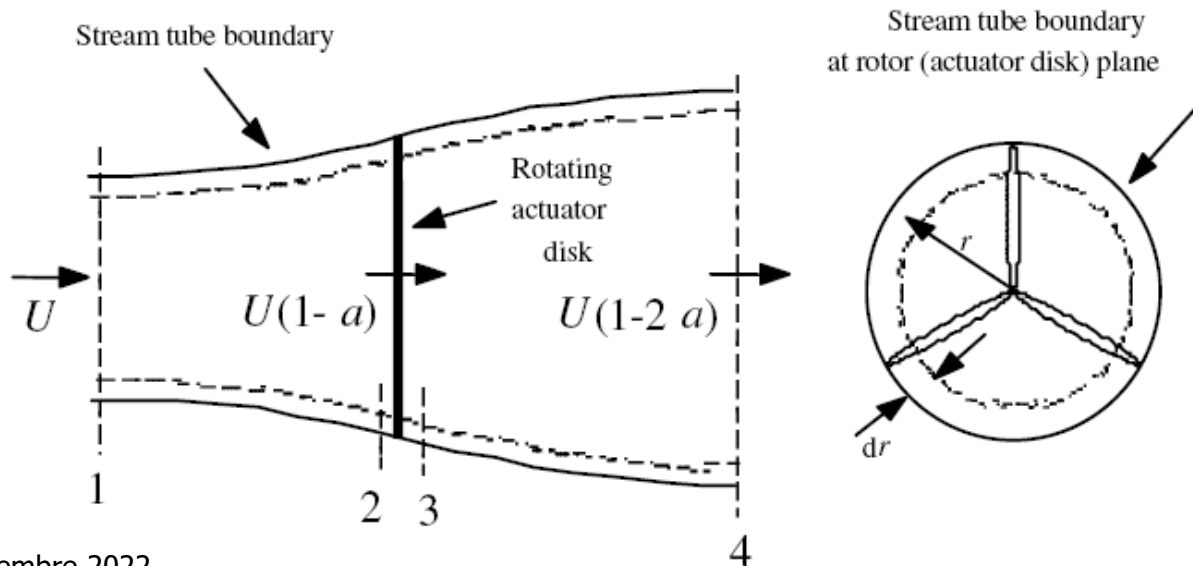
- Illustration du tube de courant en considérant la rotation du sillage:



# Théorie du disque avec rotation du sillage

- Vitesse de rotation du rotor  $\Omega$  et vitesse de rotation du sillage  $\omega$ . Facteur d'induction angulaire:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega}$$



# Théorie du disque avec rotation du sillage

- Le calcul de la poussée à travers le disque peut se faire en considérant la quantité de mouvement de rotation générée par les pales du disque:

$$dT = (p_2 - p_3)dA = \left[ \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] \cdot 2\pi r dr = 4a'(1+a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 \cdot 2\pi r dr$$

$$dT = 4a(1-a) \frac{1}{2} \rho U_1^2 \cdot 2\pi r dr$$

- Relation entre le facteur d'induction axiale  $a$  et le facteur d'induction angulaire  $a'$  ( $\lambda_r$  – ratio local des vitesses):

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a)} = \frac{\Omega^2 r^2}{U_1^2} = \lambda_r^2$$

# Théorie du disque avec rotation du sillage

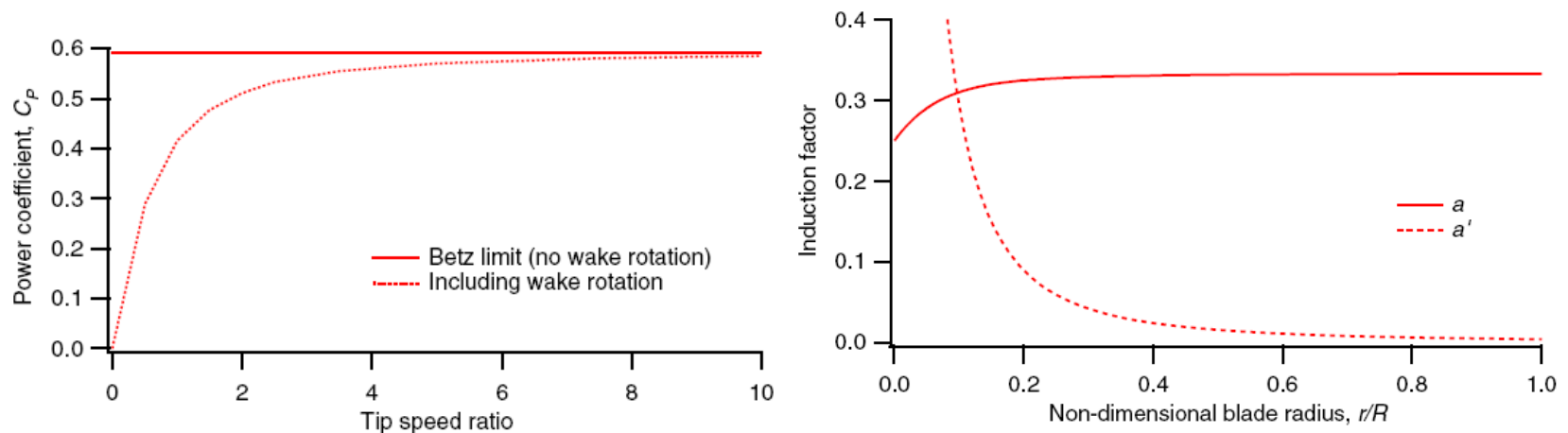
- Ratio global des vitesses pour le rotor  $\lambda = \frac{\Omega R}{U}$
- Calcul de la puissance et du coefficient de puissance en fonction des coefficients d'induction axiale et angulaire

$$dP = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3 \left[ \frac{8}{\lambda^2} a' (1-a) \lambda_r^3 \right] d\lambda_r$$

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

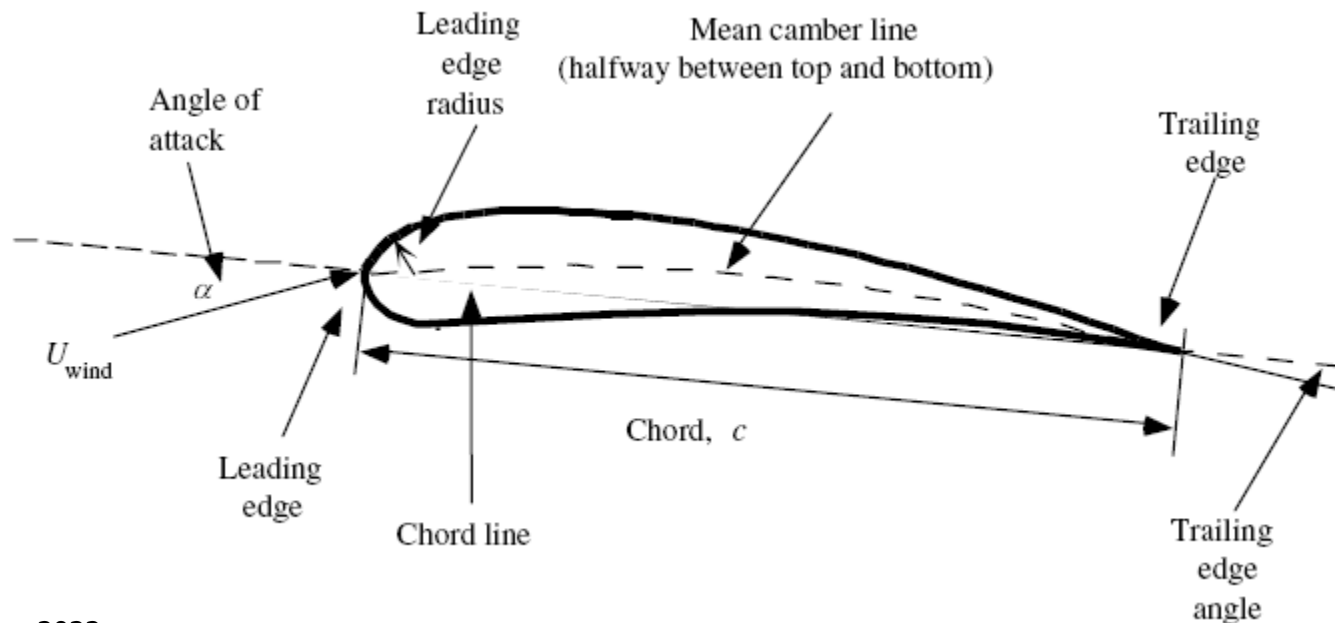
# Théorie du disque avec rotation du sillage

- Le calcul de la puissance par l'intégration de la relation précédente demande de relier les variables  $a$ ,  $a'$  et  $\lambda_r$
- Les valeurs maximales théoriques du coefficient de puissance et les coefficients d'induction:



# Les profils aérodynamiques

- Caractéristiques géométriques des profils aérodynamiques





# Les profils aérodynamiques

- 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)

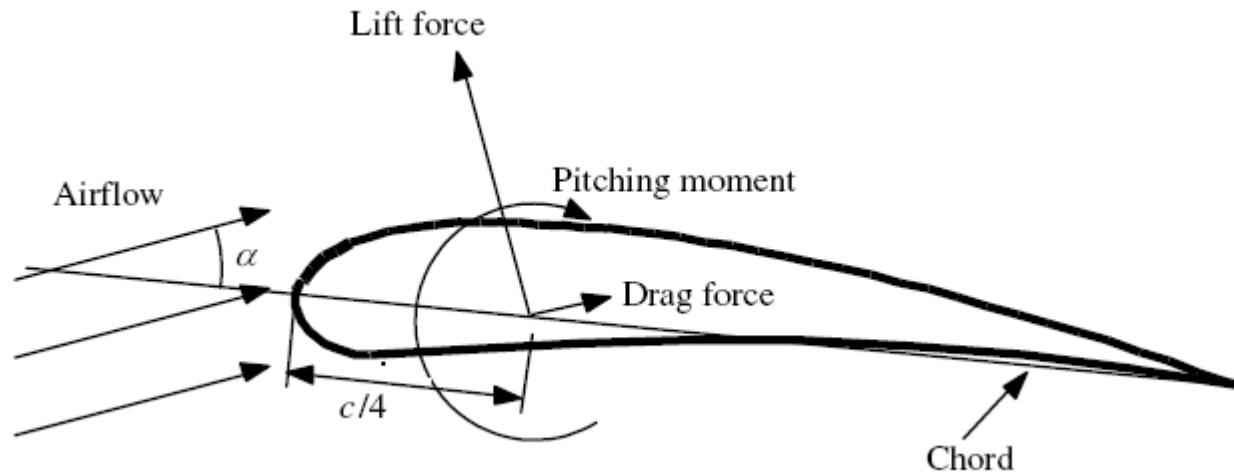


Root Region Airfoil (40% radius)



# Les profils aérodynamiques

- Forces (portance et traînée) et moments (de tangage) sur les profils aérodynamiques



# Les profils aérodynamiques

- Caractéristiques adimensionnelles de l'écoulement et coefficients aérodynamiques:

- Nombre de Reynolds  $Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu}$

- Coefficient de portance  $c_L = \frac{L/l}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot c}$

- Coefficient de traînée  $c_D = \frac{D/l}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot c}$

- Coefficient du moment (de tangage)  $c_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot Ac}$

# Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale

- Coefficient de portance  $c_L$  et coefficient de traînée  $c_D$
- Décrochage aérodynamique (voir film)



© 1998 www.WINDPOWER.dk



© 1998 www.WINDPOWER.dk

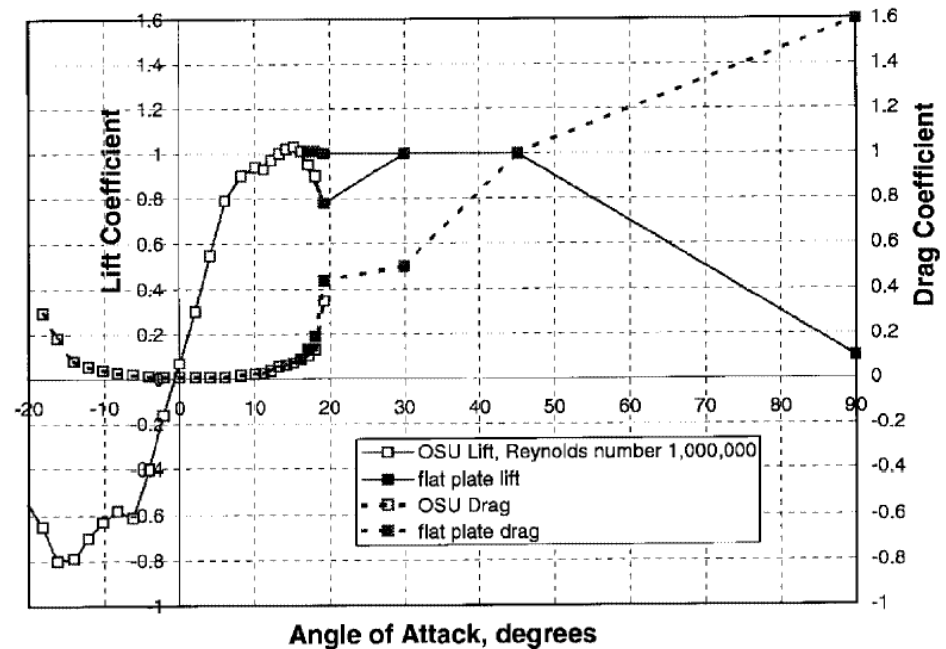


Figure 6. Post-stall airfoil data based on torque-weighted aspect-ratio

# Théorie de l'élément de pale

- La pale est divisée en une série d'éléments (profils aérodynamiques) que nous considérons qu'ils fonctionnent indépendamment les uns des autres

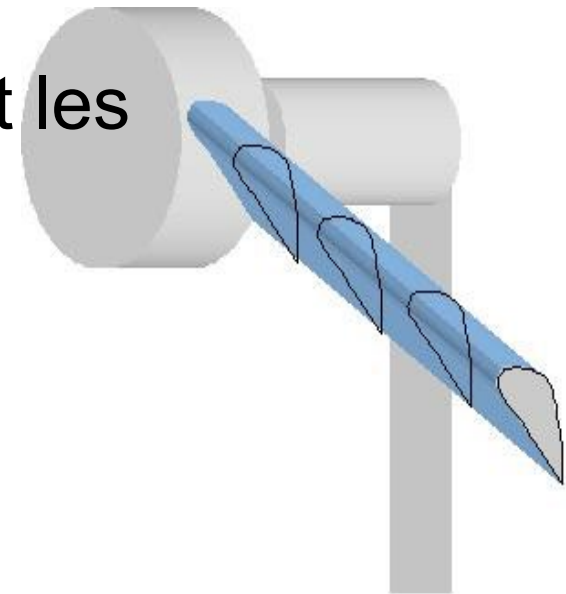


Fig. 1 - Division de la pale suivant la théorie des coupes

# Théorie de l'élément de pale

- Caractéristiques de la pale:
  - Les profils aérodynamiques
  - La longueur de la pale
  - La distribution de la largeur de corde de la pale
  - La distribution du « twist » de la pale

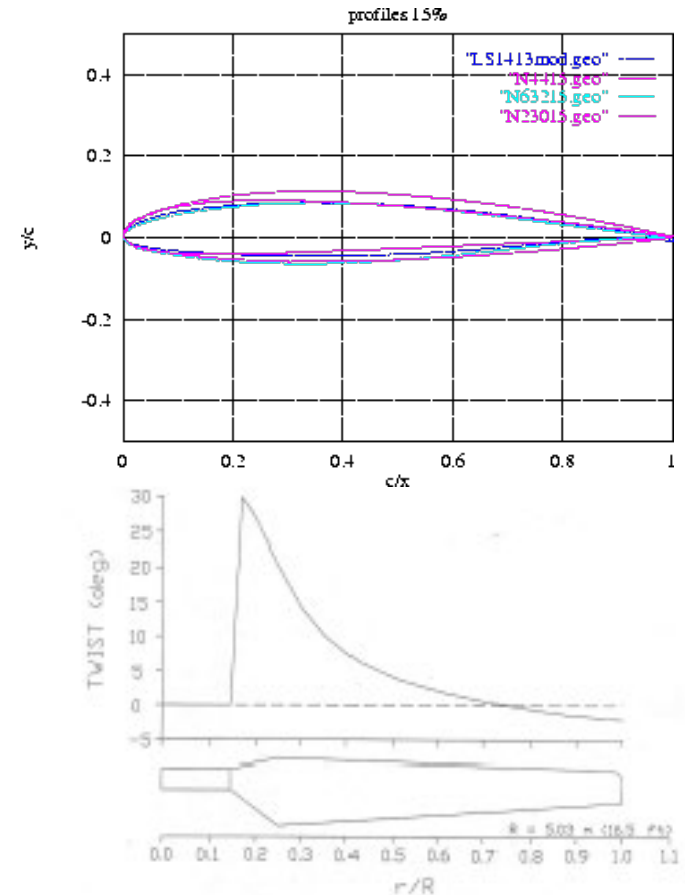


Fig. 2. Chord and twist distribution for the CER blade<sup>10</sup>.

# Théorie de l'élément de pale

## ■ Vitesses et forces sur l'élément de pale

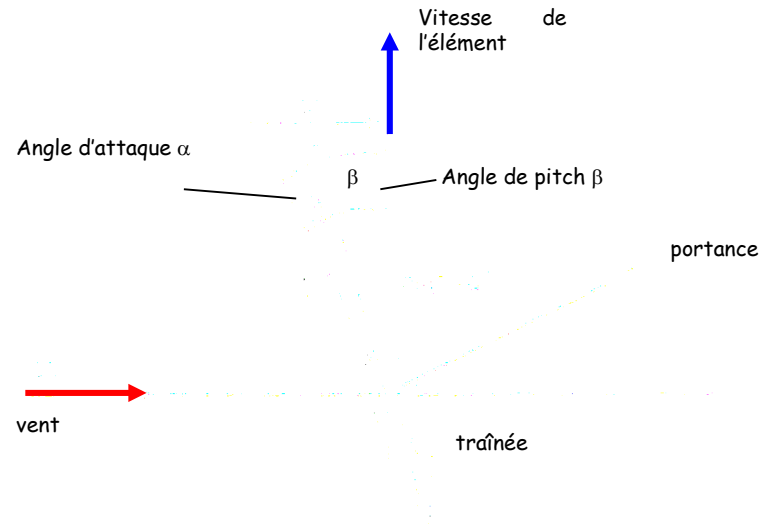
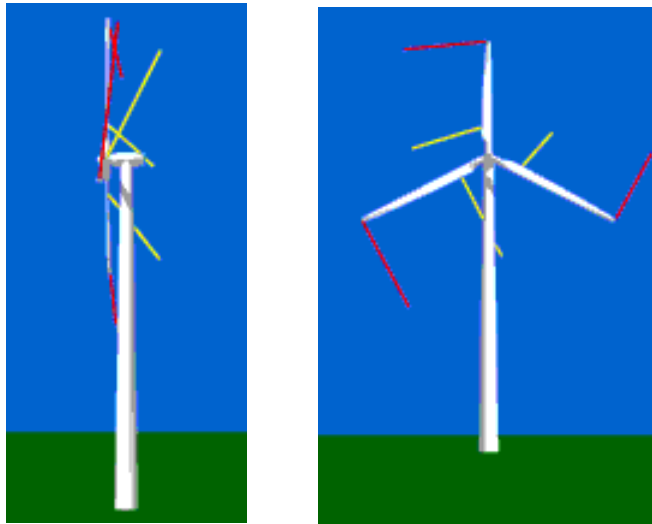


Fig. 2 - Illustration des différentes données

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

# Théorie de l'élément de pale

- Calcul du couple (torque) généré par l'élément de pale:

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) B c dr$$

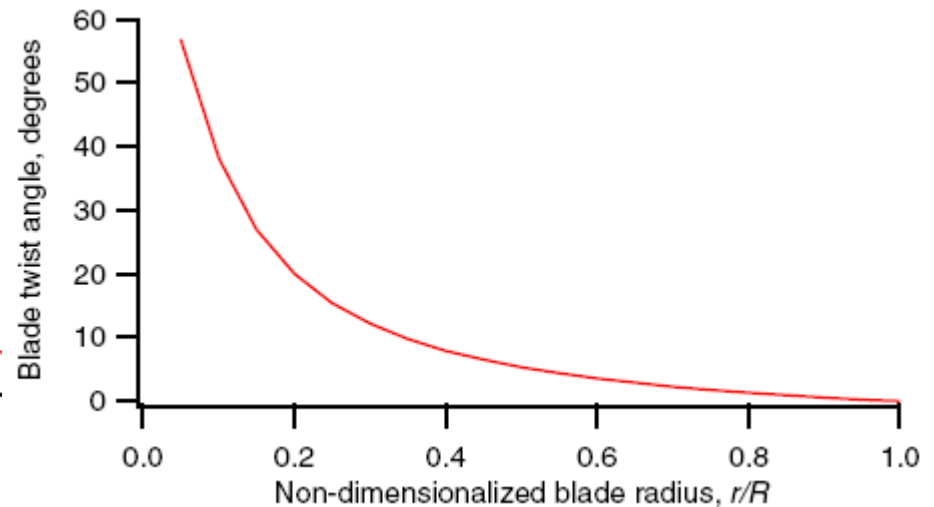
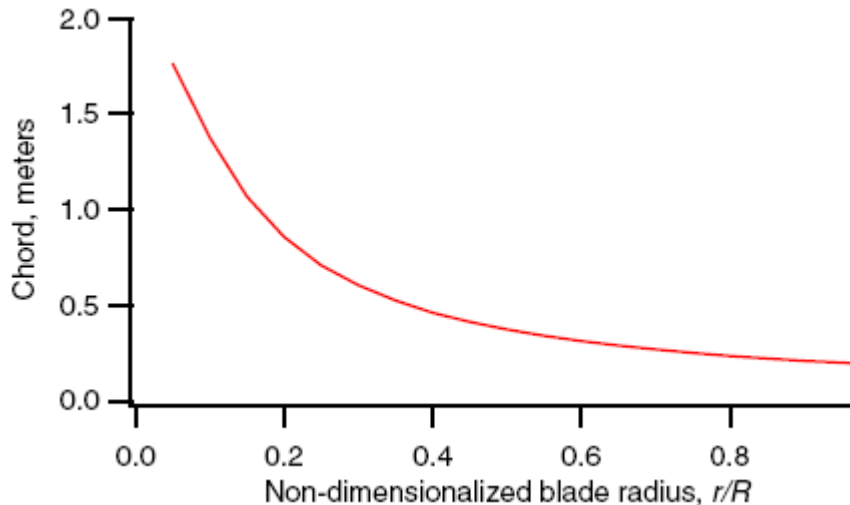
- Le couple (torque) total de la pale :

$$T = \int_0^R dT$$



# Forme idéale de la pale sans rotation du sillage

- Pas de rotation du sillage  $a'=0$ ;
- Pas de traînée  $c_d=0$ ;
- Pas de pertes dues au nombre fini de pales;
- Condition optimale de Betz –  $a=1/3$  à chaque  $r$

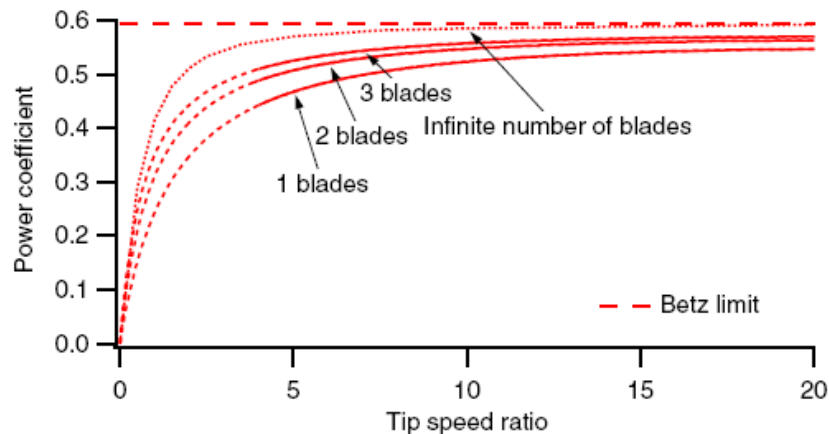


# Forme idéale de la pale dans des conditions générales

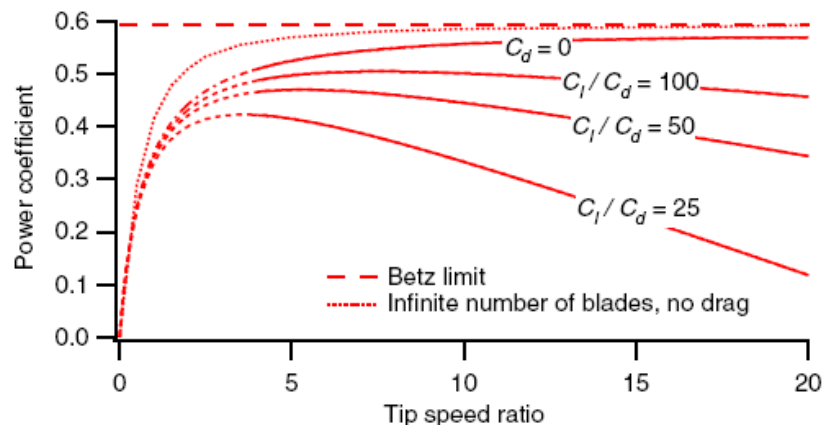
- Systèmes d'équations ayant comme inconnues  $a$ ,  $a'$  et  $\varphi$  dont les équations proviennent de:
  - Théorie du disque (quantité de mouvement et quantité de mouvement de rotation);
  - Théorie de l'élément de pale
- Méthode de résolution graphique (possibilité de solutions multiples) ou itérative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

# Effet de la traînée et du nombre de pales

## Effet du nombre de pales



## Effet de la traînée



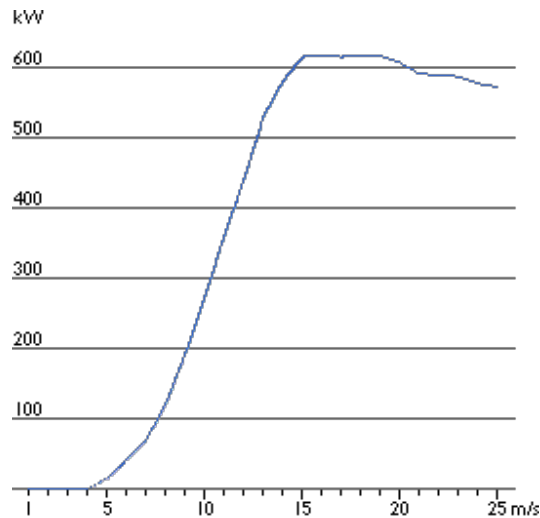
# Recherche et développement en aérodynamique des pales

- CFD – (Computational Fluid Dynamics) pour l'optimisation des profils et le contrôle du décrochage aérodynamique
- Dispositifs de contrôle du décrochage (générateurs de vortex installés sur la pale afin de retarder le décrochage à faible vitesses)



# Performances aérodynamiques de l'éolienne

- Construction de la courbe de puissance théorique – dépendance de la puissance produite en fonction de la vitesse du vent



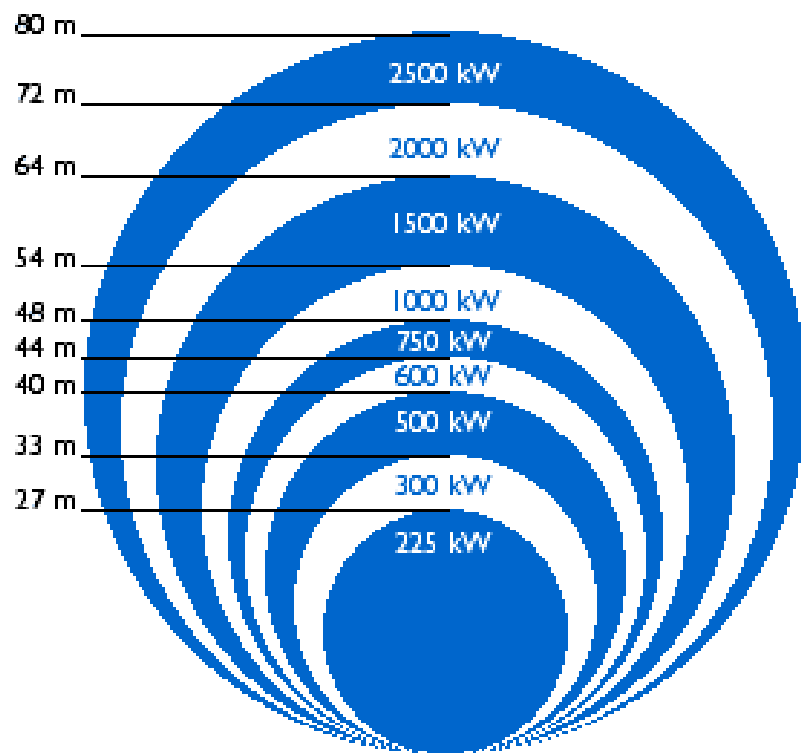
© 1998 www.WINDPOWER.org

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) B c dr$$

$$P = \int_0^R r dT$$

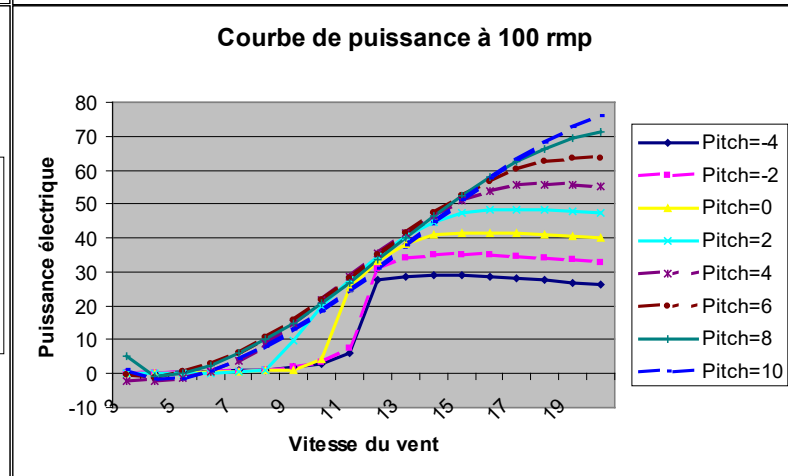
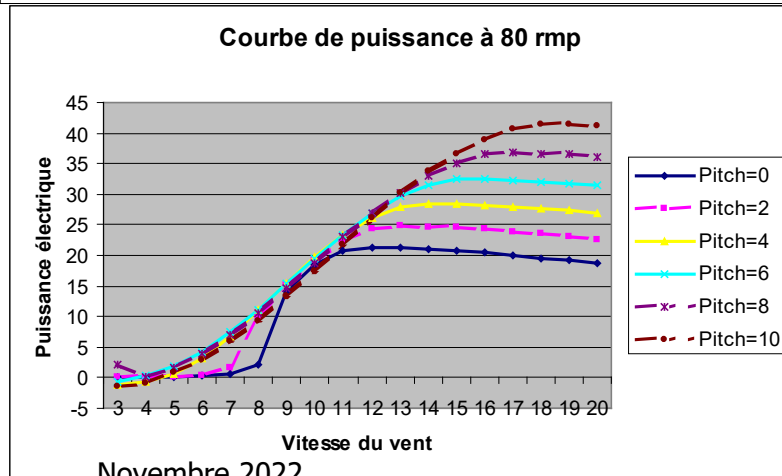
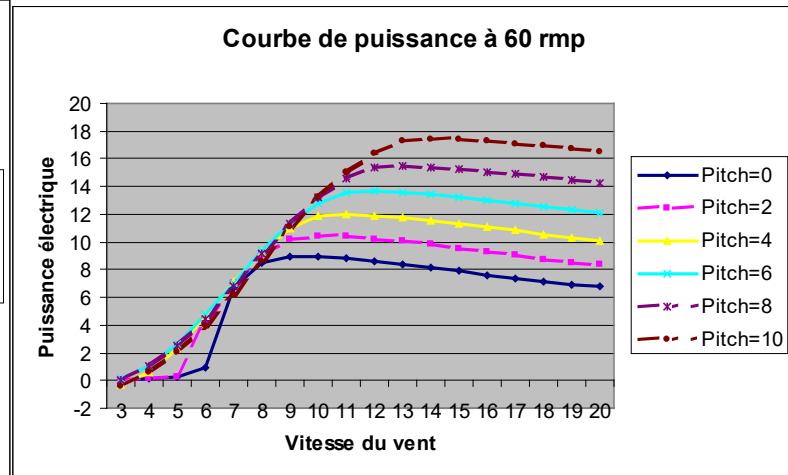
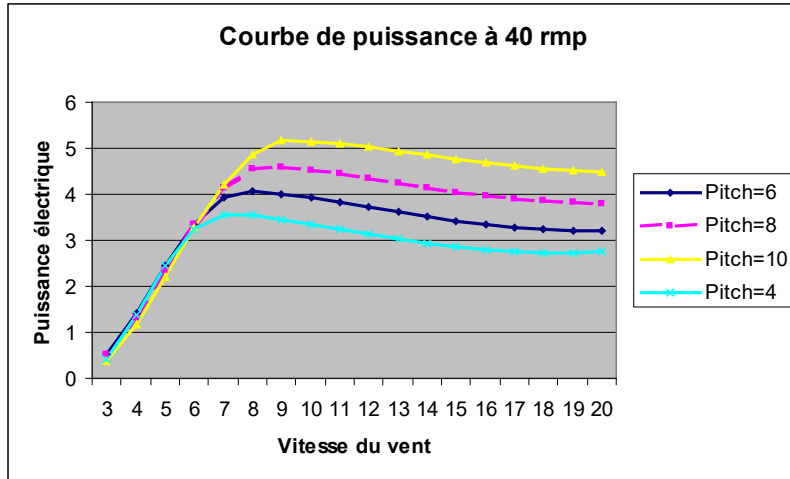
# Performances de l'éolienne

- Facteurs qui influencent la courbe de puissance :
  - La géométrie de la pale dans le plan (longueur, largeur, distribution du torsion de la pale)
  - L'angle de pitch de la pale
  - La vitesse de rotation
- Exemple de résultats pour la turbine PGI



© 1998 www.WINDPOWER.org

# Courbes théoriques pour la turbine PGI de 35kW



Novembre 2022

# Puissance de l'éolienne théorique vs. mesurée

- Courbes de puissance obtenues en utilisant le modèle théorique comparées à des simulations en soufflerie

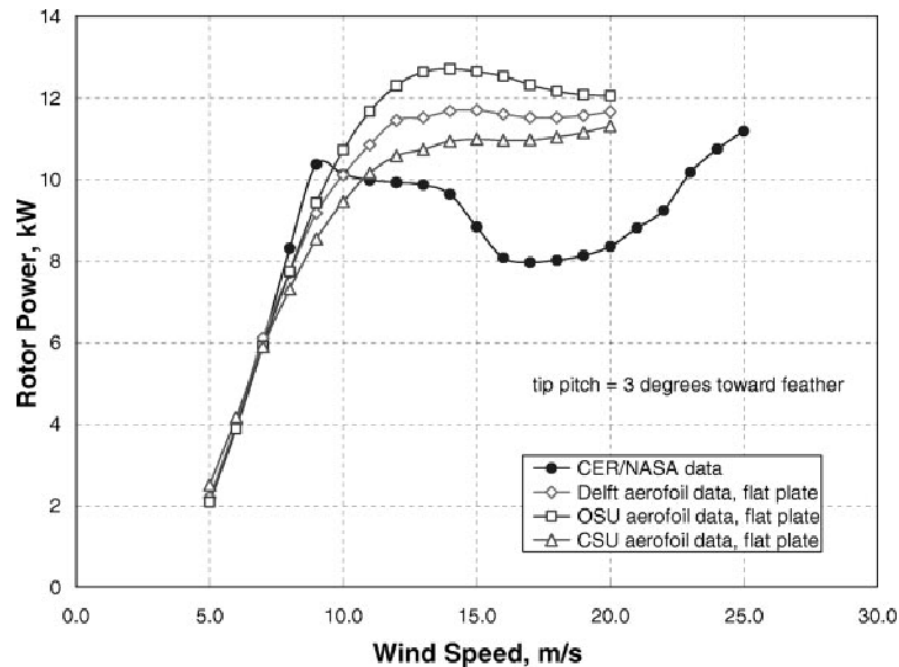
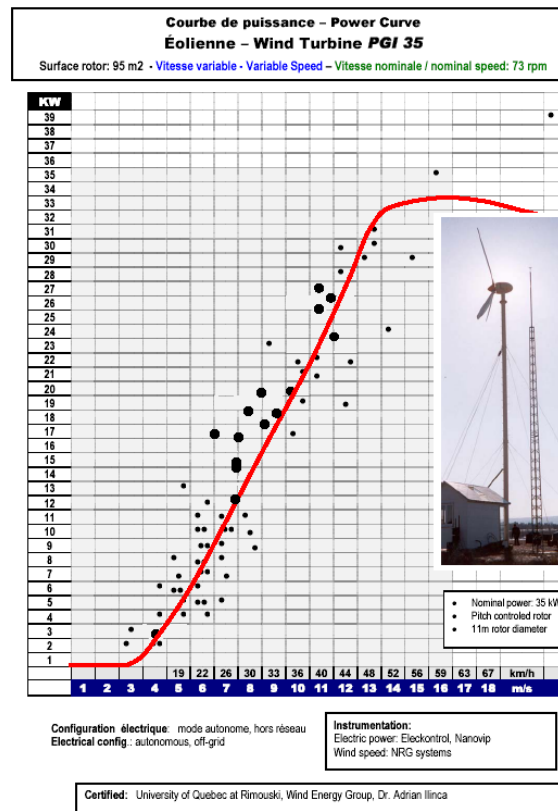
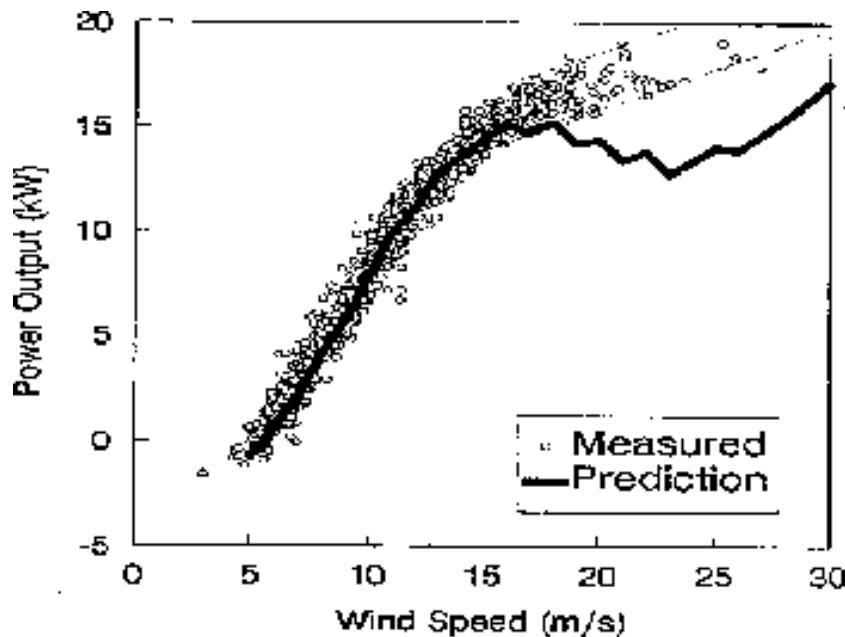


Figure 4. Predicted performance using WTPERF and different wind-tunnel data sets



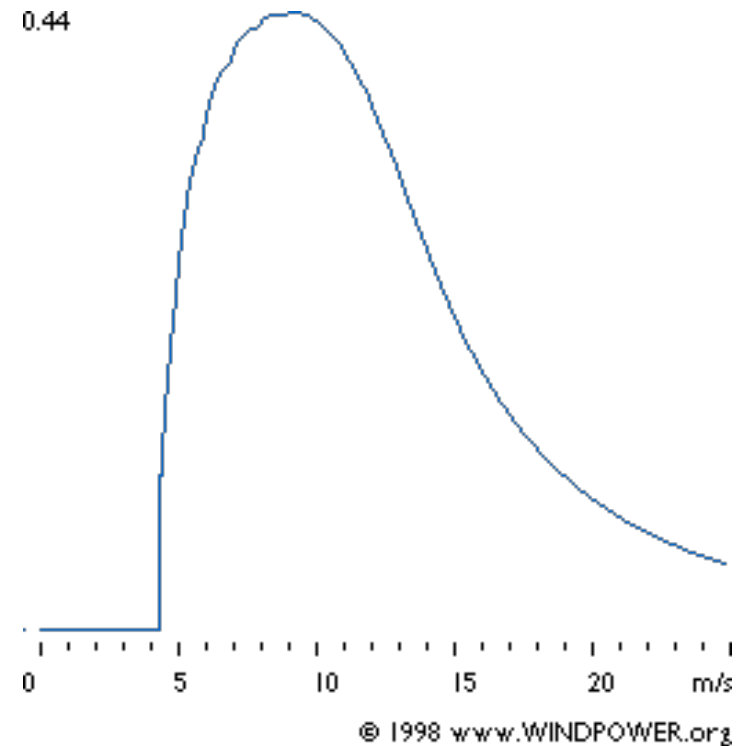
# Puissance de l'éolienne théorique vs. mesurée

- Réalisation de la courbe de puissance réelle d'une éolienne



# Performances de l'éolienne

- Paramètres de performance très importants qui sont fournis par la courbe de puissance:
  - La vitesse de démarrage
  - La vitesse de coupure
  - Le coefficient de puissance – l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie disponible du vent

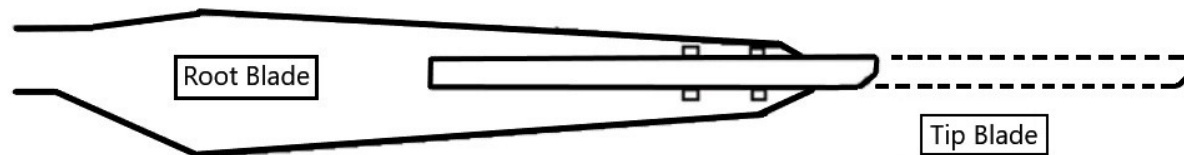


# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Advanced blade pitch control
- Variable rotor diameter
- Flow control
- Tuned dampers
- Active tendons
- Piezoelectric actuators

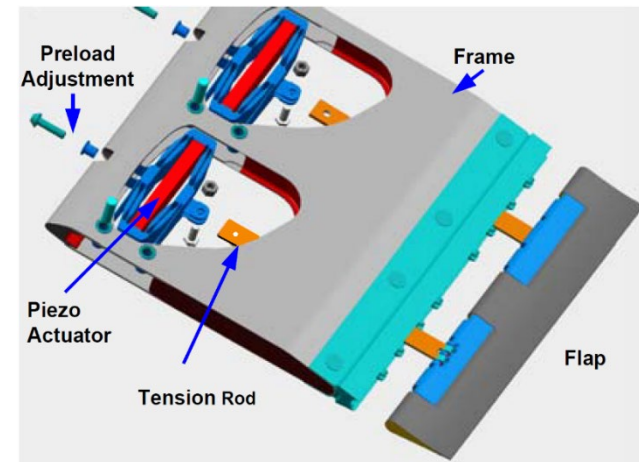
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Advanced blade pitch control
  - Cyclic pitch control
  - Individual pitch control
- Variable rotor diameter



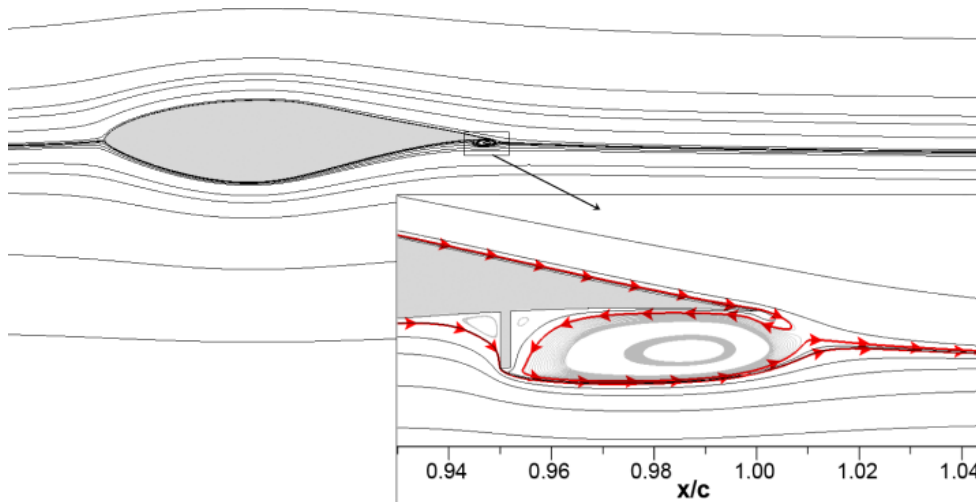
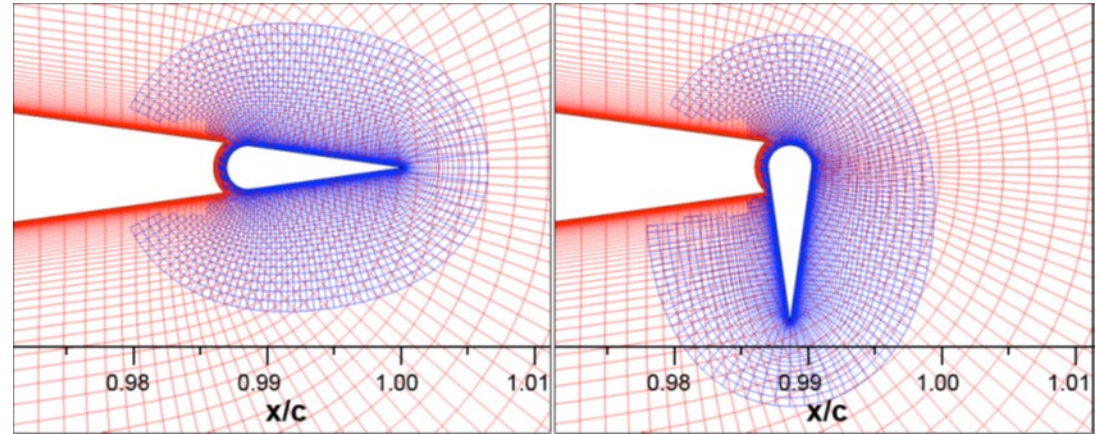
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Flow control
  - Trailing-edge flaps



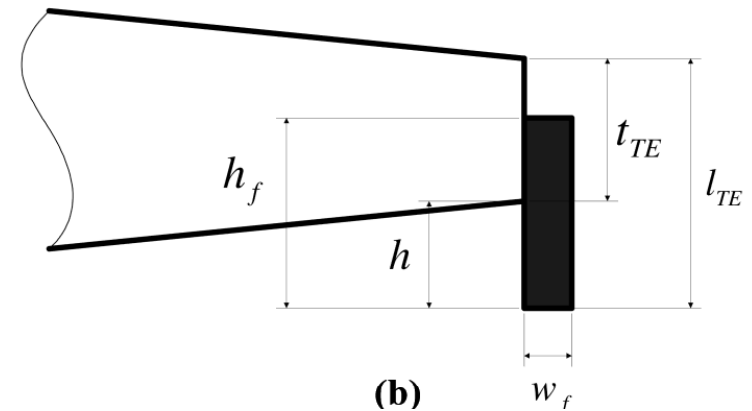
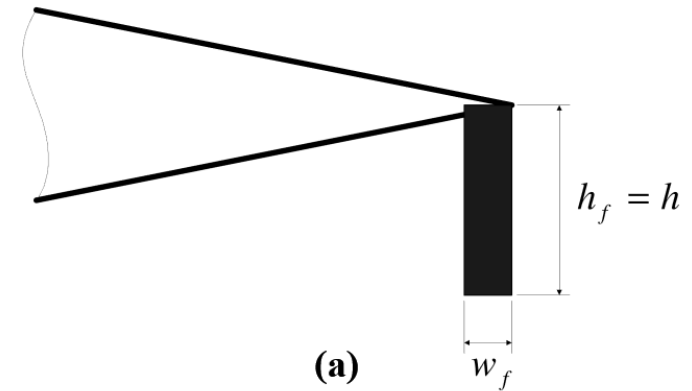
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Flow control
  - Microflaps
  - Microtabs



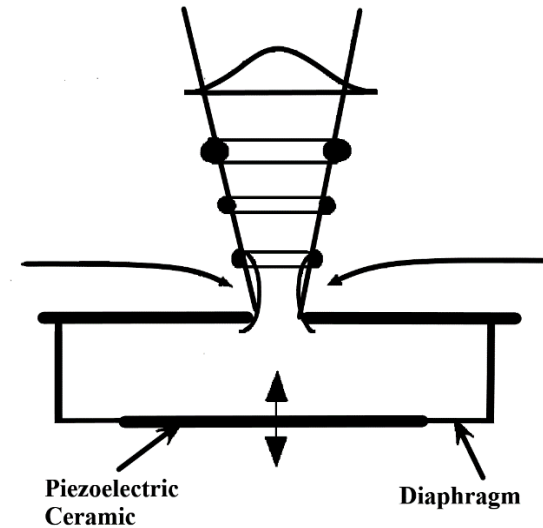
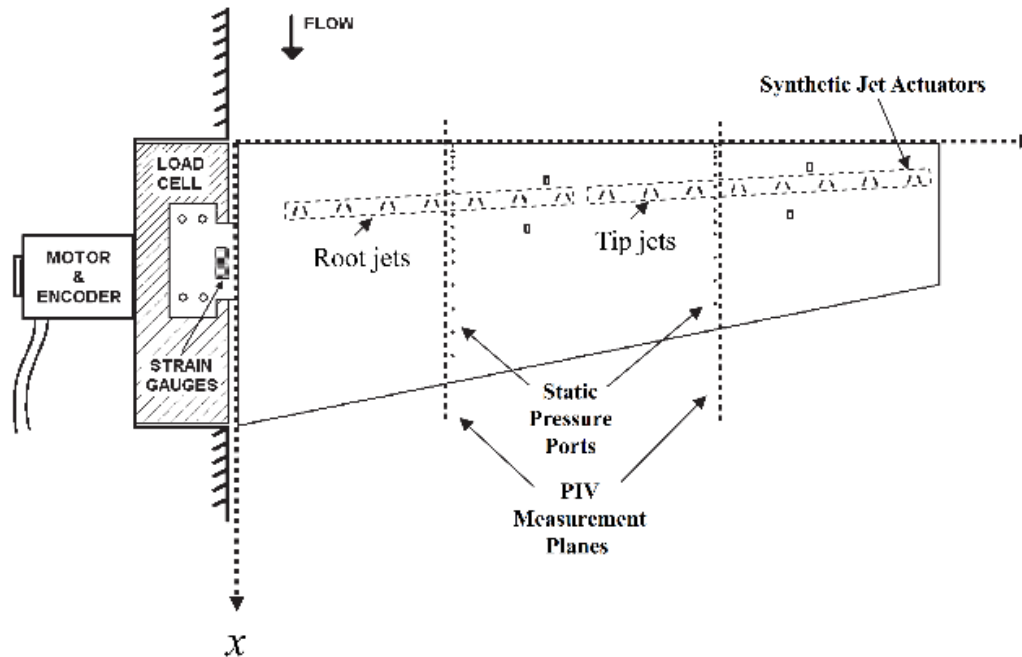
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Flow control
  - Miniature trailing edge effectors



# Overview of vibration control systems for wind turbines

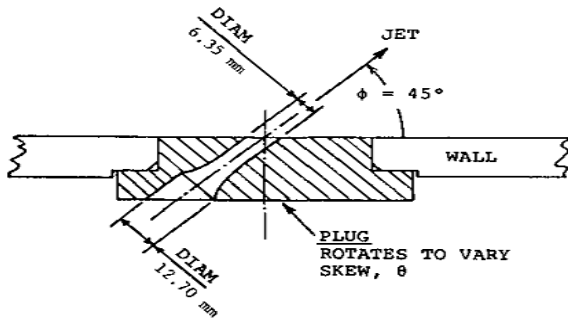
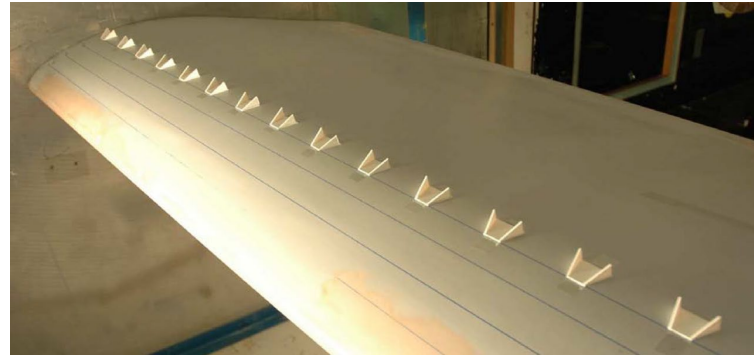
- Flow control
  - Synthetic jets



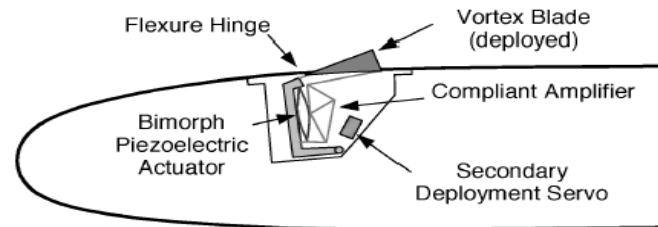


# Overview of vibration control systems for wind turbines

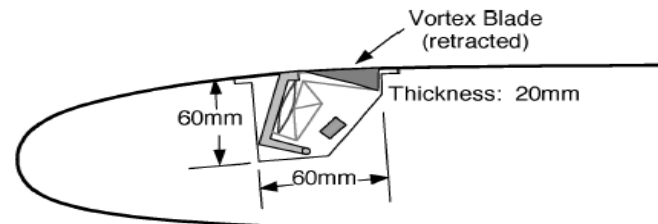
- Flow control
  - Fixed vortex generators
  - Vortex generators jets



- Micro-vortex generators

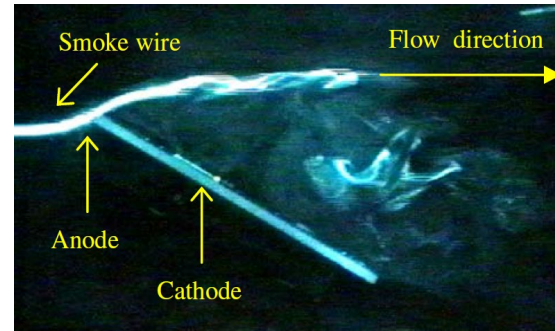
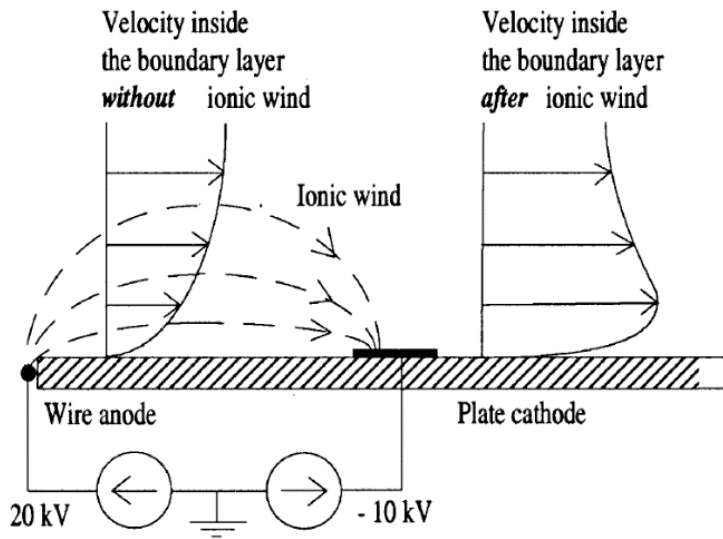


a) Vortex blade deployed

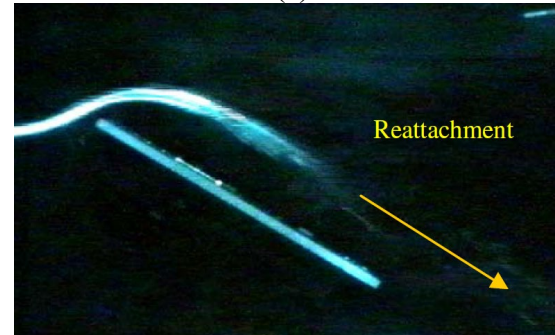


# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Flow control
  - Plasma actuators



(a)



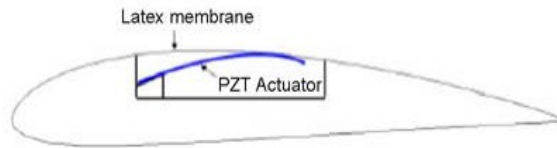
(b)

Figure 1: Visualization of the airflow at 0.4 m/s with DC corona discharge actuator off (a) and actuator on (b) [86]

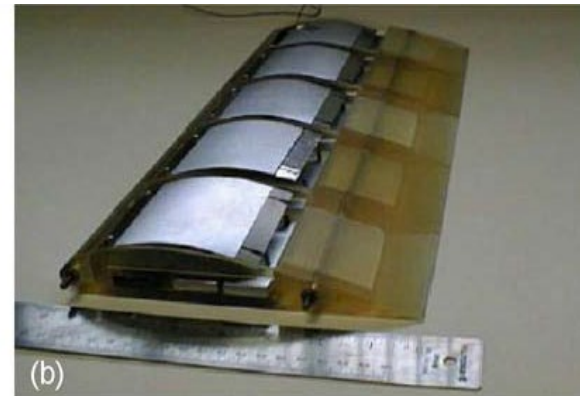
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Flow control

- Shape change airfoils

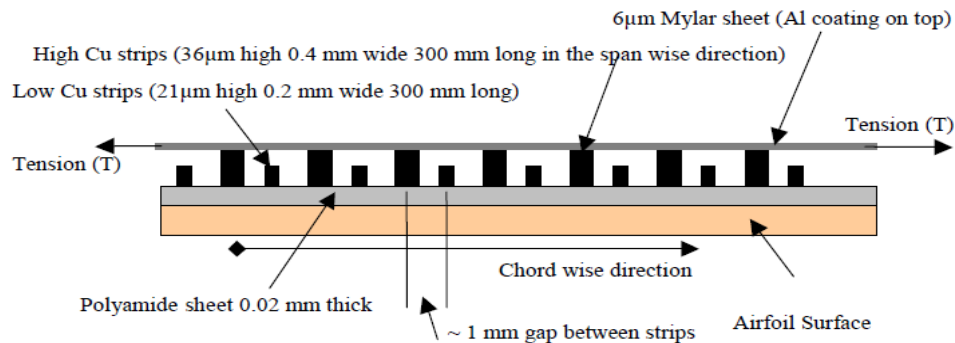


(a)



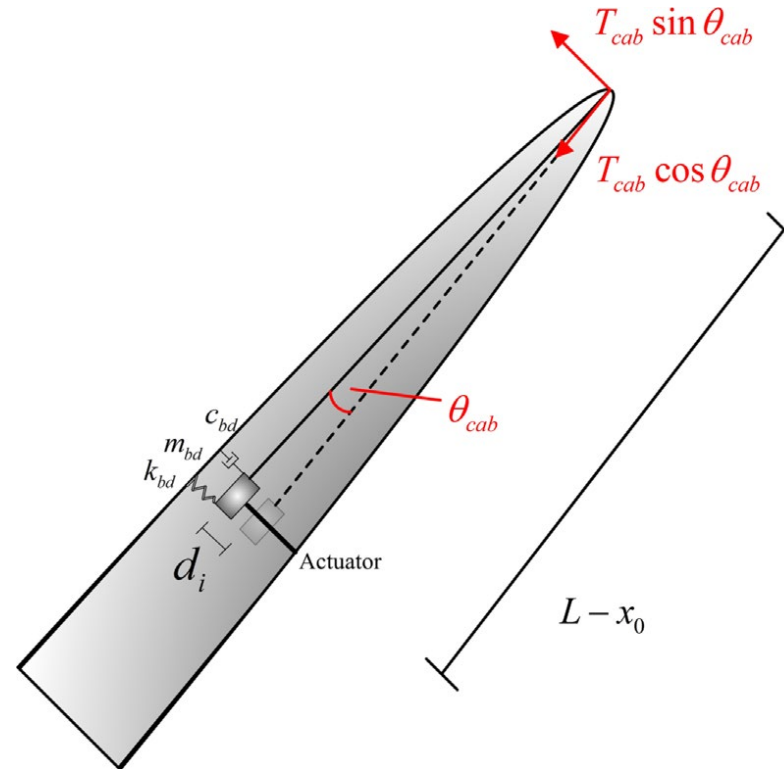
(b)

- Active flexible wall



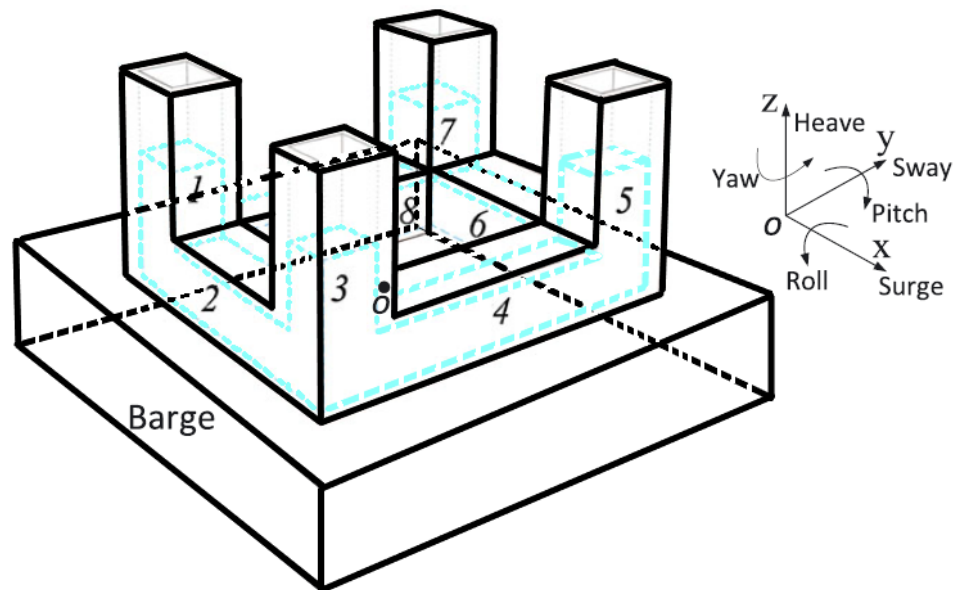
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Tuned mass dampers



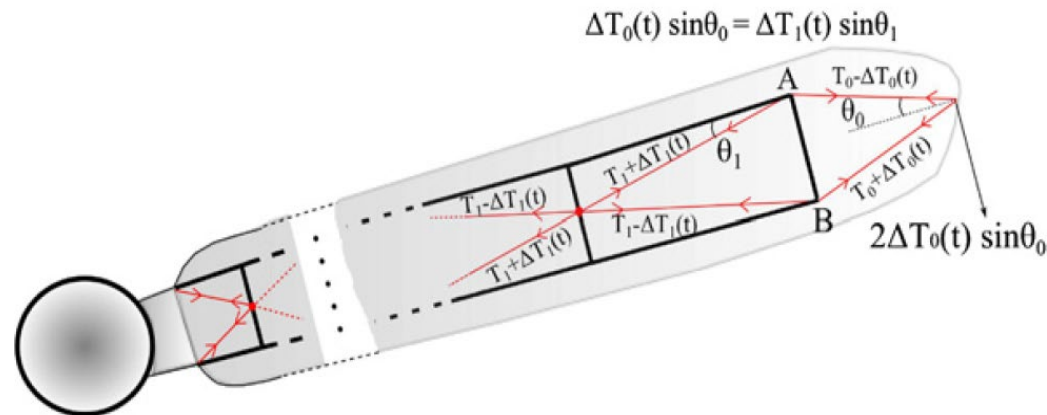
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Tuned liquid dampers: bidirectional horizontal tuned liquid damper



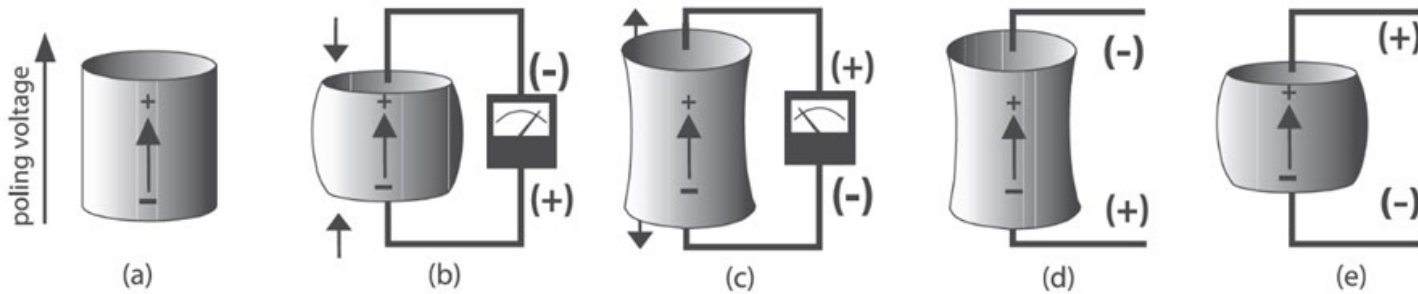
# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Embedded active tendons



# Overview of vibration control systems for wind turbines

- Piezoelectric actuators



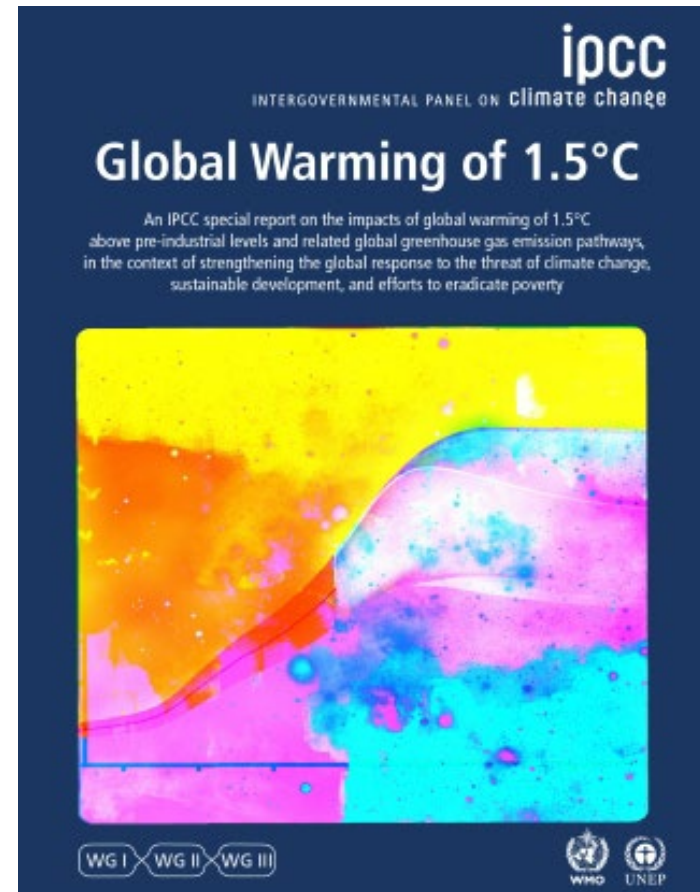
# Conclusion

- Some actions and contributions from the Wind Energy Research Laboratory and its partners in relation to the challenges and opportunities of developing wind energy in Quebec:
  - Wind-diesel hybrid systems with compressed air storage
  - Adaptation of the technology to the cold climate
  - Social acceptability of wind projects
  - Multi-criteria and multi-stakeholder decision support model for wind projects



# IPCC REPORT – OCTOBER 2018

- ***IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty***



# ACTIONS

- GHG emissions reduction
- Energy efficiency
- Replace conventional energy with renewable energy (hydro, solar, wind, biomass, marine, geothermal)
- Limitations of renewable energies: periodic, intermittent, fluctuates, not synchronous with the charge
- Requires integration of multiple sources, energy storage and smart grid approaches

# Thank you!

- Contact:

Adrian ILINCA

Wind Energy Research Laboratory

Université du Québec à Rimouski

[adrian\\_ilinca@uqar.ca](mailto:adrian_ilinca@uqar.ca)

Phone: +1-418-723-1986, ext. 1460