



L'aérodynamique de la turbine éolienne et ses composantes mécaniques



Présenté par :

Adrian ILINCA, Ph.D. Ing., Professeur à l'UQAR
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

adrian_ilinca@uqar.qc.ca



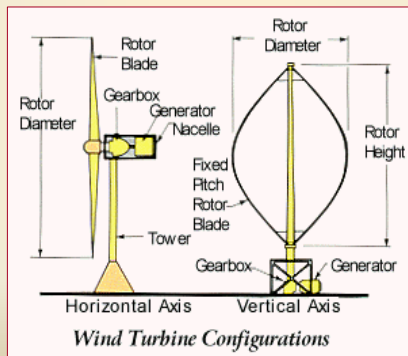
Alep, Syrie, 22-25 octobre 2007

Plan de la présentation

- ✧ Concepts généraux
- ✧ Aérodynamique des turbines
 - ★ Théorie du disque sustentateur
 - ★ Théorie de l'élément de pale
- ✧ La performance d'une turbine éolienne
 - ★ La courbe de puissance
 - ★ Utilisation du logiciel PROPID
- ✧ La régulation et le frein aérodynamique
- ✧ Composantes mécaniques de l'éolienne

Types de turbines éoliennes

- ❖ Objectif : Transformer l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation du rotor et transporter cette énergie à une génératrice
- ❖ Caractéristiques mécaniques et de fonctionnement des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Effets aéro-élastiques

Forces d'inertie

Forces élastiques

Forces d'amortissement

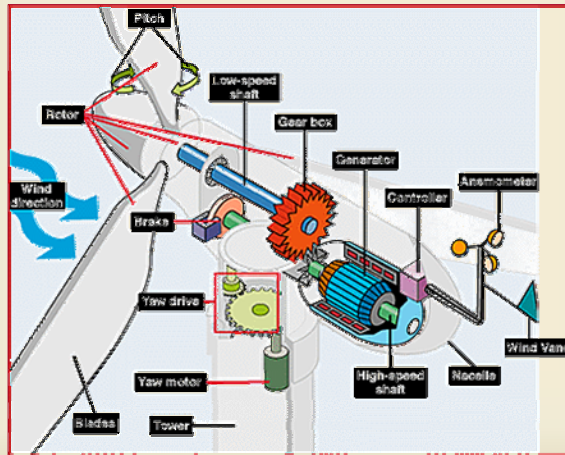
Forces aérodynamiques
statiques ou dynamiques

- ❖ Divergence aéro-élastique
- ❖ Distribution aéro-élastique de portance et traînée
- ❖ Résonance
- ❖ Décrochage dynamique
- ❖ Flutter

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Turbine à axe horizontal



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Orientation des éoliennes

❖ Face au vent – système d'orientation



❖ Sous le vent



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Nombre de pales

✧ Rotor à une, deux ou trois pales



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Optimisation et bruit

✧ Critères d'optimisation de la conception d'une turbine éolienne

✧ Bruit

★ Mécanique

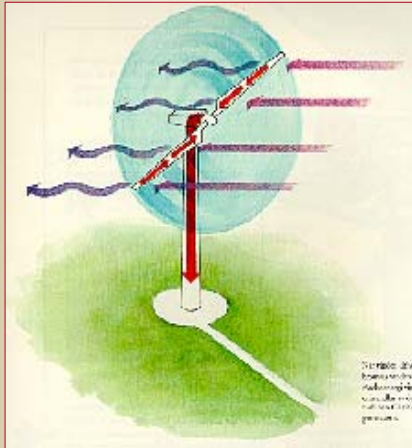
★ Aérodynamique

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

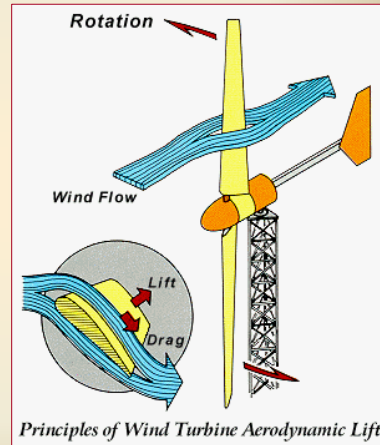
Adrian ILINCA

Théories aérodynamiques

✧ Théorie du disque



✧ Théorie de l'élément de pale



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

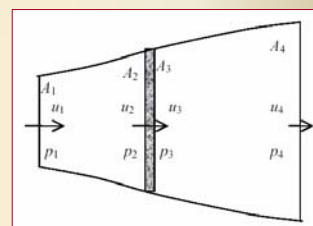
Théorie du disque

✧ Image globale de la captation de l'énergie cinétique par le disque du rotor

✧ Calcul de l'énergie captée par le « freinage » du vent :

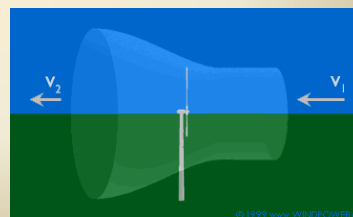
$$u_2 = u_3 = u_1 (1 - a)$$

$$u_4 = u_3 (1 - a) = u_1 (1 - 2a)$$



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

$$P = \frac{1}{2} \rho (u_1^2 - u_4^2) A_d u_2$$



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

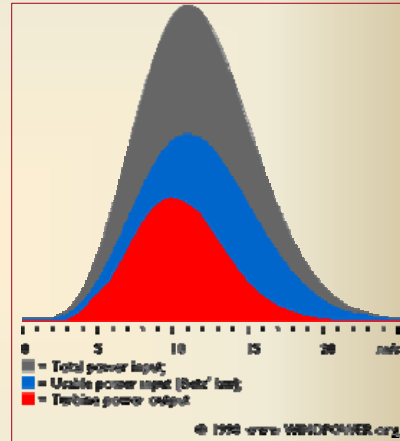
Théorie du disque

◇ Coefficient de puissance

$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho u_1^3 A_d} = 4a(1-a)^2$$

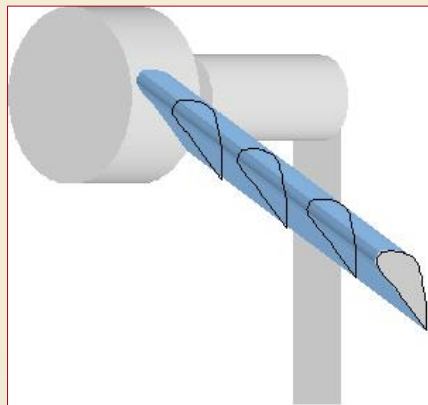
◇ La limite de Betz (pour $a=1/3$)

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



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



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

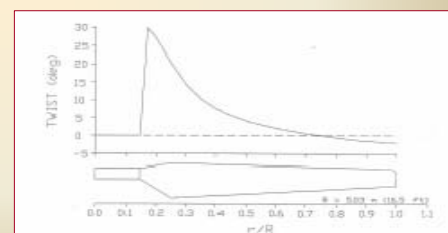
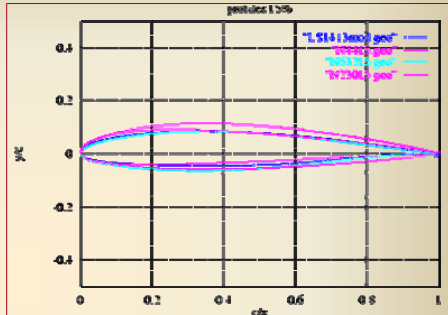


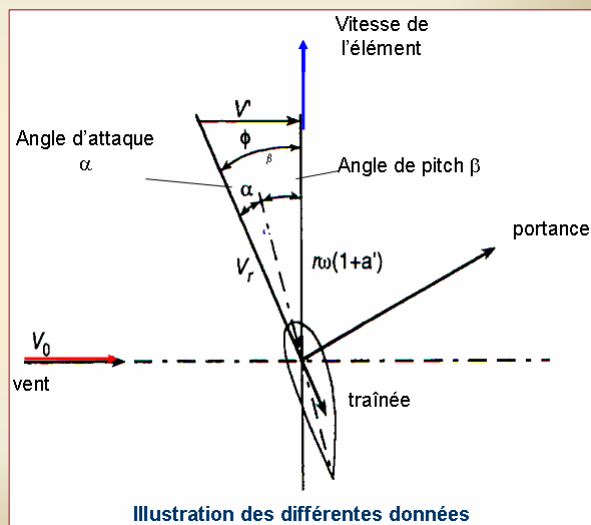
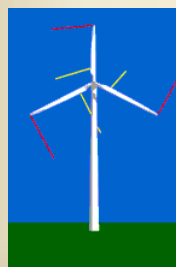
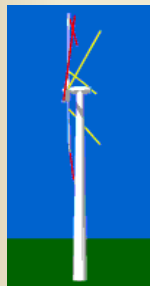
Fig. 2. Chord and twist distribution for the CER blade.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Théorie de l'élément de pale

◇ Vitesses et forces sur l'élément de pale



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Théorie de l'élément de pale

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

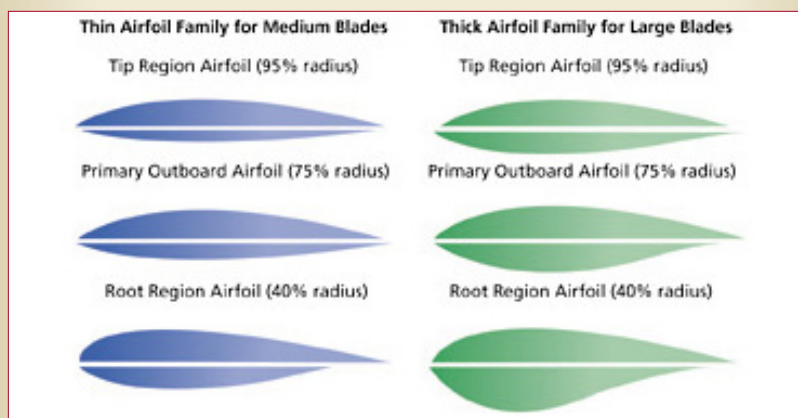
$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) B c dr$$

✧ Le couple (torque) total de la pale :

$$T = \int_0^R dT$$

Les types de profils aérodynamiques

✧ Variation du profil aérodynamique au long de la pale



Caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale

- ◇ Coefficient de portance c_l et coefficient de traînée c_d
- ◇ Décrochage aérodynamique (voir film)

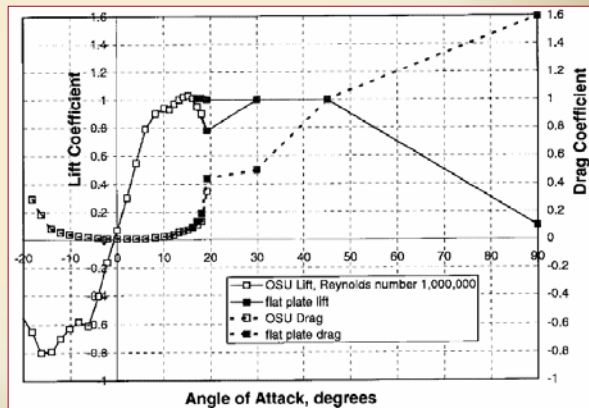


Figure 6. Post-stall airfoil data based on torque-weighted aspect-ratio

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

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)



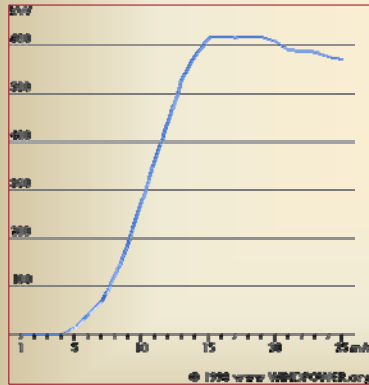
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Performances de l'éolienne

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

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



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

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

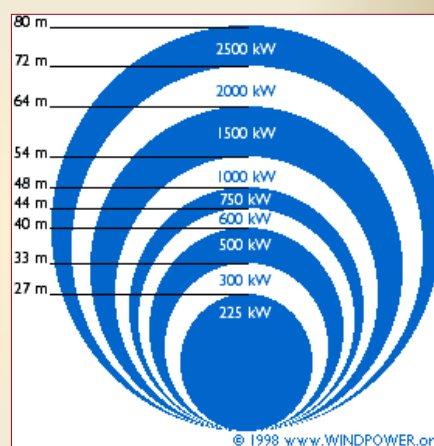
Adrian ILINCA

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

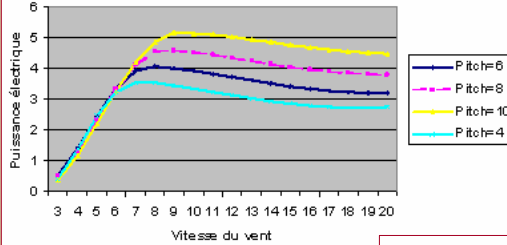


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

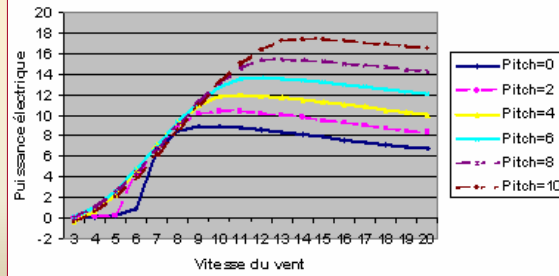
Performances de l'éolienne

Courbe de puissance à 40 rpm



Courbes théoriques pour la turbine
PGI de 35 kW

Courbe de puissance à 60 rpm

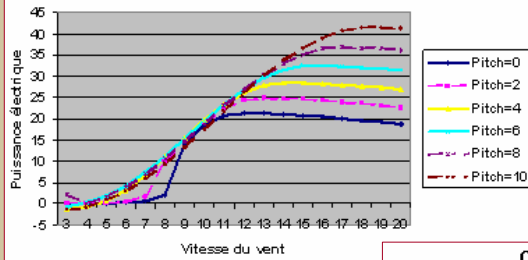


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

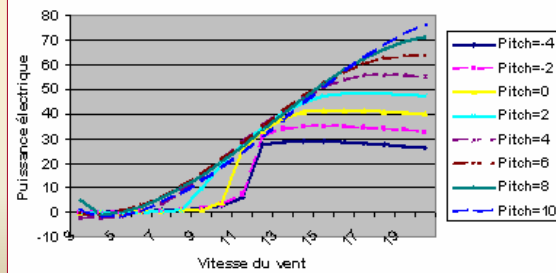
Performances de l'éolienne

Courbe de puissance à 80 rpm



Courbes théoriques pour la turbine
PGI de 35 kW

Courbe de puissance à 100 rpm



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Performances de l'éolienne

Puissance de l'éolienne théorique vs. mesurée

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

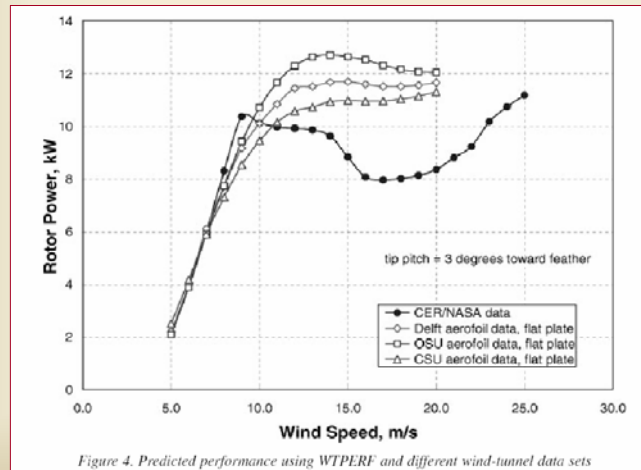


Figure 4. Predicted performance using WTPERF and different wind-tunnel data sets

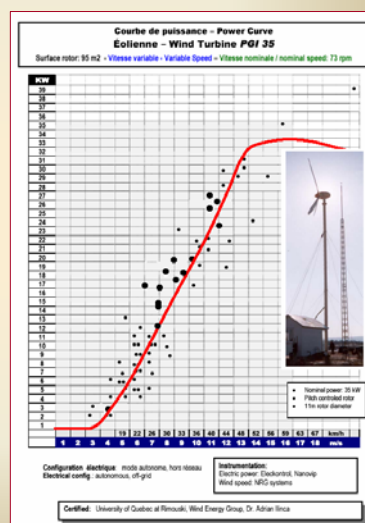
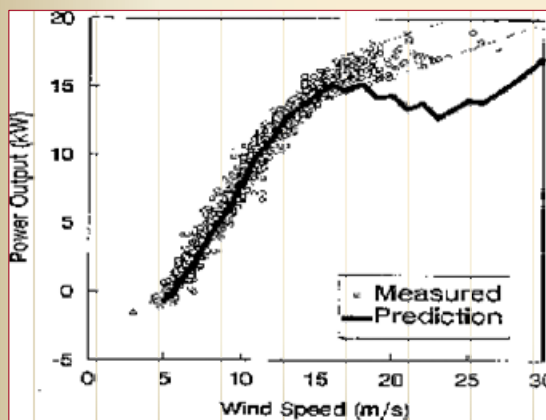
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Performances de l'éolienne

Puissance de l'éolienne théorique vs. mesurée

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



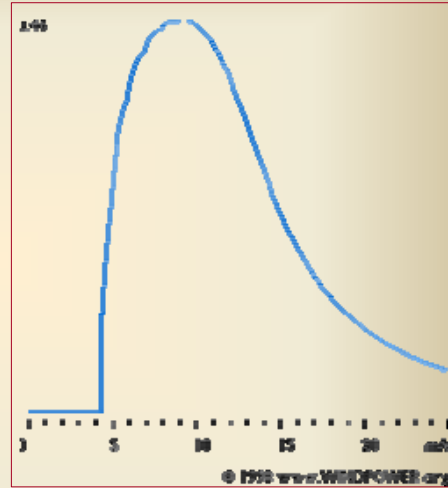
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

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



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

- ✧ Les différents éléments de PROPID
- ✧ Présentation de deux exemples
 - ★ Analyse d'un profil de pale
 - ★ Amélioration des performances d'un rotor

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

◇ Les fichiers sources

★ Le fichier d'entrée

◇ Données générales sur le type d'étude

- ↳ Définition des différents modèles utilisés pour les calculs
- ↳ Définition de la valeur de la densité de l'air

```
wt01a.in - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
# Modeled loosely after the AOC 15/50, analysis case
# Stall Regulated Turbine

# Basic input
MODE 1.0          # wind turbine
INCV 0.0          # wind turbine mode (use TSR in analysis)
LTIP 1.0          # use tip loss model
LHUB 1.0          # use hub loss model
IBR 1.0           # use brake state model
ISTL 1.0          # use viterna stall model
USEAP 1.0         # use swirl suppression
WEXP 0.0000       # boundary layer wind exponent
NS_NSEC 10.0 1.0 # number of blade elements/number of sectors
IS1 1.0           # first segment used in analysis
IS2 10.0          # last segment used in analysis
BE_DATA 1         # printout blade element data
SH 0.0            # no shaft tilt effects on crossflow
RHO 0.0023769    # air density (slugs/ft^3)
```

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

◇ Les fichiers sources

★ Le fichier d'entrée

◇ Données générales sur le type d'étude

◇ Données sur la géométrie de l'éolienne et des pales

```
wt01a.in - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
# Geometry
HUB 0.04          # normalized hub cutout
HH 3.333         # normalized hub height
BN 3              # blade
CONE 6.0          # cone
RD 24.61         # radius (ft)
CH_TW            # Normalized chord and twist distribution
0.15             6
0.13             6
0.12             6
0.11             6
0.10             4
0.09             2
0.08             1
0.07             0
0.06             -1
0.05             -2
```

Nombre de pales

Rayon en pied

Distribution de la corde et du twist le long de la pale

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

✧ Les fichiers sources

★ Le fichier d'entrée

- ◆ Données générales sur le type d'étude
- ◆ Données sur la géométrie de l'éolienne et des pales
- ◆ Données sur le type d'aile utilisée

```
wt01a.in - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
# No stall models used
# CORRIGAN_EXPN 1]
# Corrigan inputs are not used since stall model is off
AIRFOIL_MODE 4
4
S814.pd
.24 13. 3 1.600 6
S814.pd
.24 13. 3 1.600 6
S812.pd
.21 14.3 3 1.180 6
S813.pd
.16 9. 3 1.100 6
# airfoil family 1 with 4 airf
# r/r-location and airfoil inc
AIRFOIL_FAMILY 4
.0000 1
.3000 2
.7500 3
1.0000 4
# use the first airfoil family (the one above)
USE_AIRFOIL_FAMILY 1
```

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

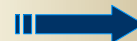
Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

✧ Les fichiers sources

★ Le fichier d'entrée

- ◆ Données générales sur le type d'étude
- ◆ Données sur la géométrie de l'éolienne et des pales
- ◆ Données sur le type d'aile utilisée
- ◆ Données pour le calcul : vitesse de rotation, pitch,...



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

```
wt01a.in - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
# Enforce tip loss model to always be on
TIPON
# Use the Prandtl tip loss model,
# not the original modified model
TIPMODE 2
# Design point: 64 rpm, 2 deg pitch, 15 mph
DP 1 64 2.00 15.000 2
# Initiate design (does some preliminary work before analysis)
IDES
# Determine the rotor power, cp, and thrust curves (2D_SWEEP)
#
# use pitch setting from design point (DP) 1
PITCH_DP 1
# use rpm from design point (DP) 1
RPM_DP 1
# sweep the wind from 5 to 50 mph in increments of 5
WIND_SWEEP 5 50 1 2
# perform the sweep
2D_SWEEP
# write out
# 40 - power curve (kw) vs wind speed (mph)
# 45 - cp vs TSR
# 51 - rotor thrust curve
WRITE_FILES 40 45 51
```

Données initiales

Définition de l'étude qui sera effectuée

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

✧ Les fichiers sources

★ Le fichier d'entrée

★ Les fichiers sources *.pd:

◆ Ils contiennent les valeurs de C_l et C_d pour chaque angle α et pour différentes valeurs du nombre de Reynolds

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

✧ Les fichiers sources

✧ Le fichier exécutable

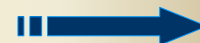
- ★ Il permet de lancer l'étude dont on a modifié les caractéristiques dans le fichier source

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

✧ Les fichiers sources

✧ Le fichier exécutable

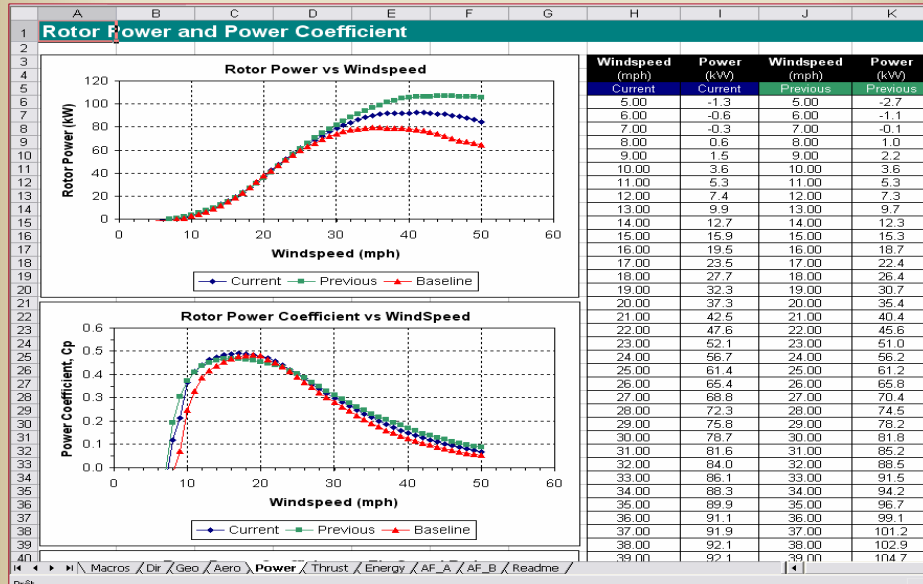


✧ Le fichier de visualisation Excel

- ★ Ce fichier comporte plusieurs feuilles, chacune composée de série de graphe caractérisant l'étude

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID

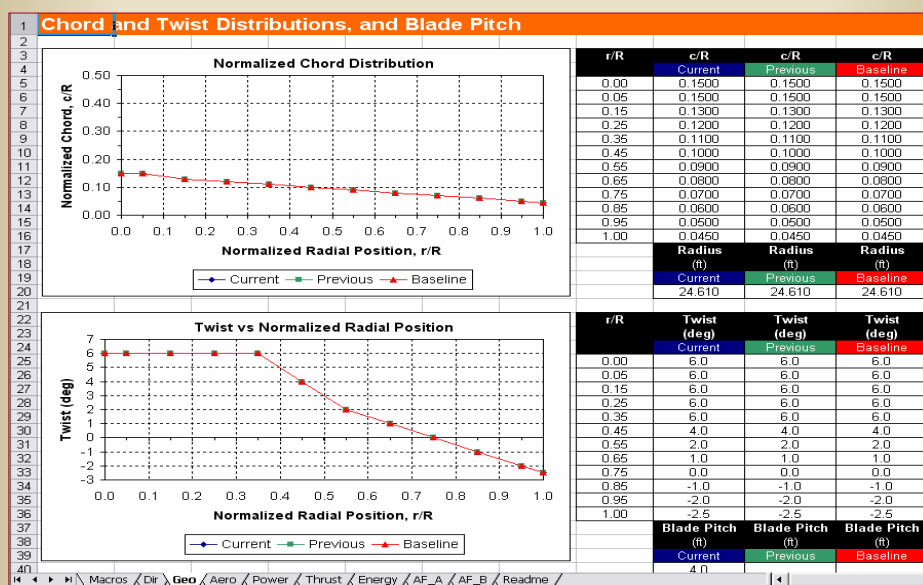


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Les différents éléments de PROPID



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

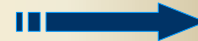
Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples

✧ Analyse d'un profil de pale

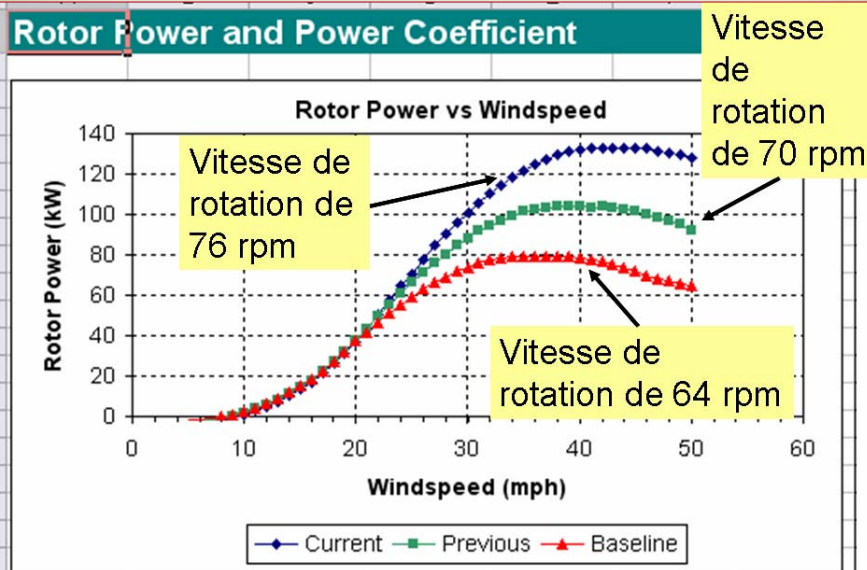
★ Un des graphiques qui nous intéresse le plus ici est celui de la courbe de puissance. On peut donc effectuer des comparaisons pour différentes valeurs, par exemple, de :

- ◇ Vitesses de rotation
- ◇ Pitch
- ◇ Diamètre de rotor



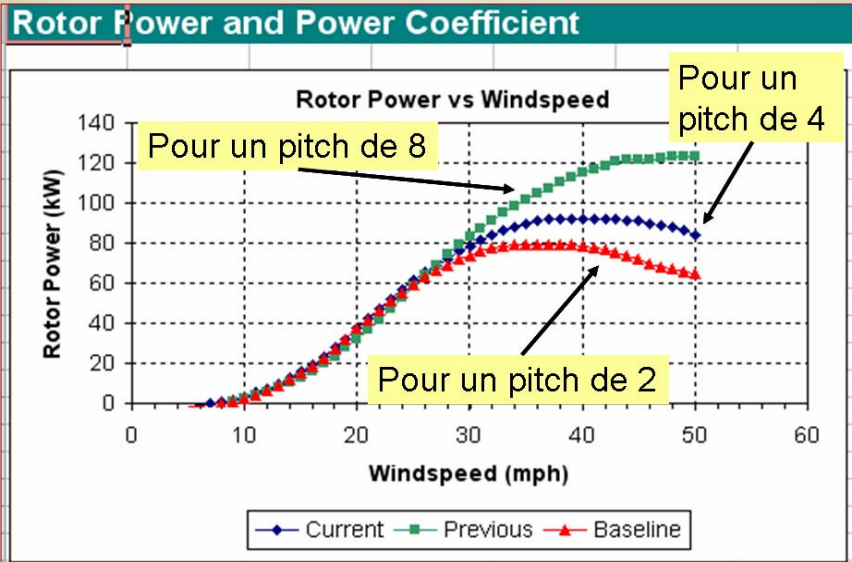
Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples



Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples

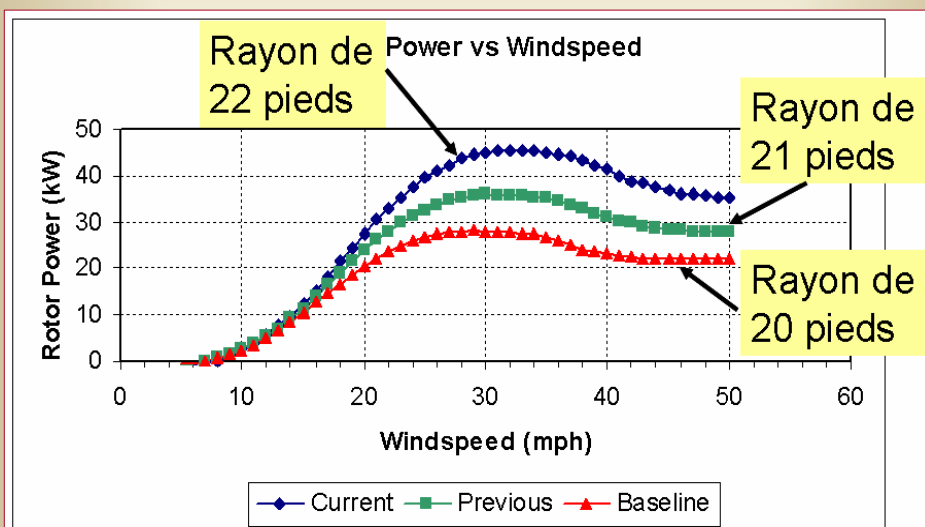


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples

✧ Analyse d'un profil de pale

✧ Amélioration des performances d'un rotor

★ Exemple 1

◇ Initialement :

↳ Pitch de 2 degrés

↳ Puissance nominale de 80 kW

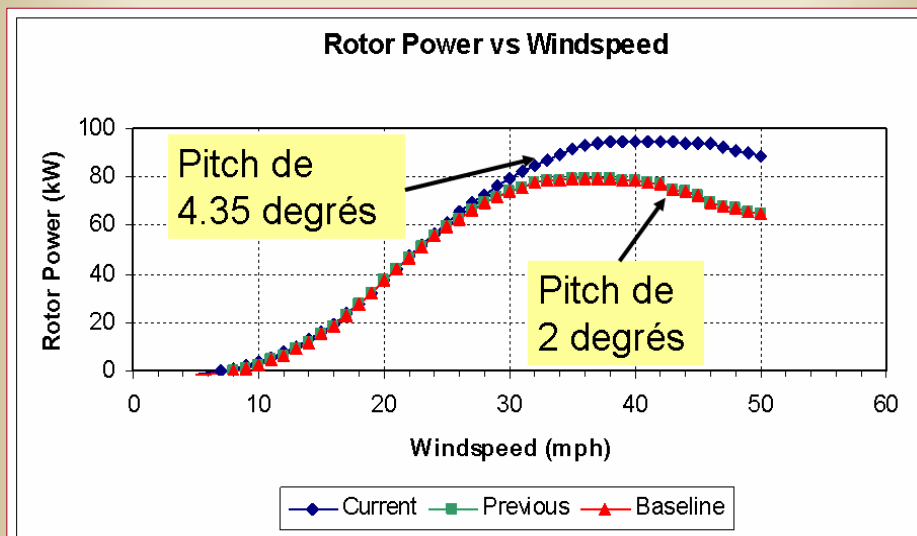
◇ But : puissance nominale de 95 kW

◇ Conséquence: nouveau pitch de 4.35 degrés



Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples



Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

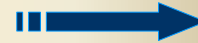
Présentation de deux exemples

✧ Analyse d'un profil de pale

✧ Amélioration des performances d'un rotor

★ Exemple 1

★ Exemple 2



◇ Initialement :

↳ Diamètre de 24.61 pieds

↳ Puissance nominale de 80 kW

◇ But : puissance nominale de 95 kW

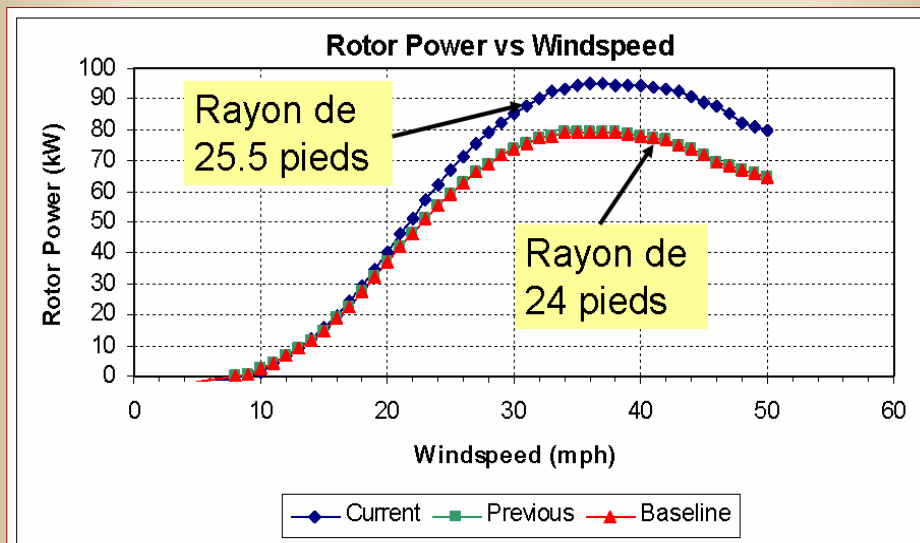
◇ Conséquence: nouveau diamètre de 25.5 pieds

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Présentation de deux exemples



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Adrian ILINCA

Étude de profils de pales - Utilisation du logiciel PROPID

Conclusion concernant l'utilisation du PROPID

- ◇ Programme simple d'utilisation
- ◇ Permet de nombreuses combinaisons pour l'amélioration
 - ☆ du profil d'une pale
 - ☆ des performances d'une éolienne



Questions ?



Merci pour votre attention

