

## 3. Aérodynamique des éoliennes

### 3.3 Performances des éoliennes



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

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Courbe de puissance théorique
- Courbe de puissance réelle
- Impact des conditions nordiques
- Fiches techniques
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Courbe de puissance théorique
- Courbe de puissance réelle
- Impact des conditions nordiques
- Fiches techniques
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Les différentes équations obtenues dans les présentations précédentes permettent de prédire les performances d'une éolienne via la courbe de puissance.
- Ces courbes sont disponibles dans les fiches techniques des éoliennes et permettent d'estimer la puissance extractible d'une éolienne, notamment grâce aux estimations des ressources obtenues dans le module 2.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Courbe de puissance théorique***
- Courbe de puissance réelle
- Impact des conditions nordiques
- Fiches techniques
- Conclusion

# Question

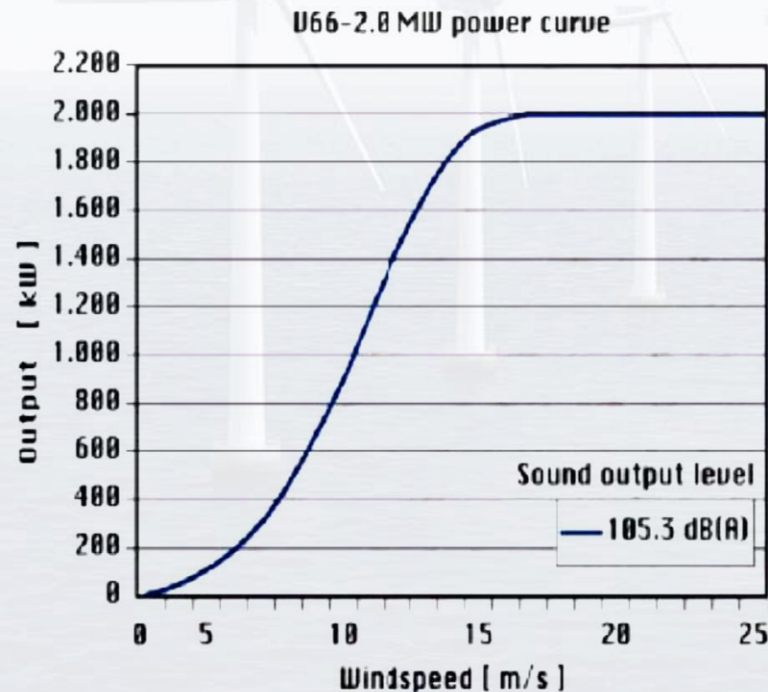
- Quels sont les facteurs influençant directement la courbe de puissance ?
  - A. La température de l'air
  - B. La géométrie de la pale
  - C. La hauteur du mât
  - D. L'angle de pitch de la pale
  - E. La vitesse de rotation

# Courbe de puissance théorique

- Les équations obtenues dans 3.2 permettent de construire la courbe de puissance théorique d'une éolienne donnée.
- Cette courbe exprime la puissance produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

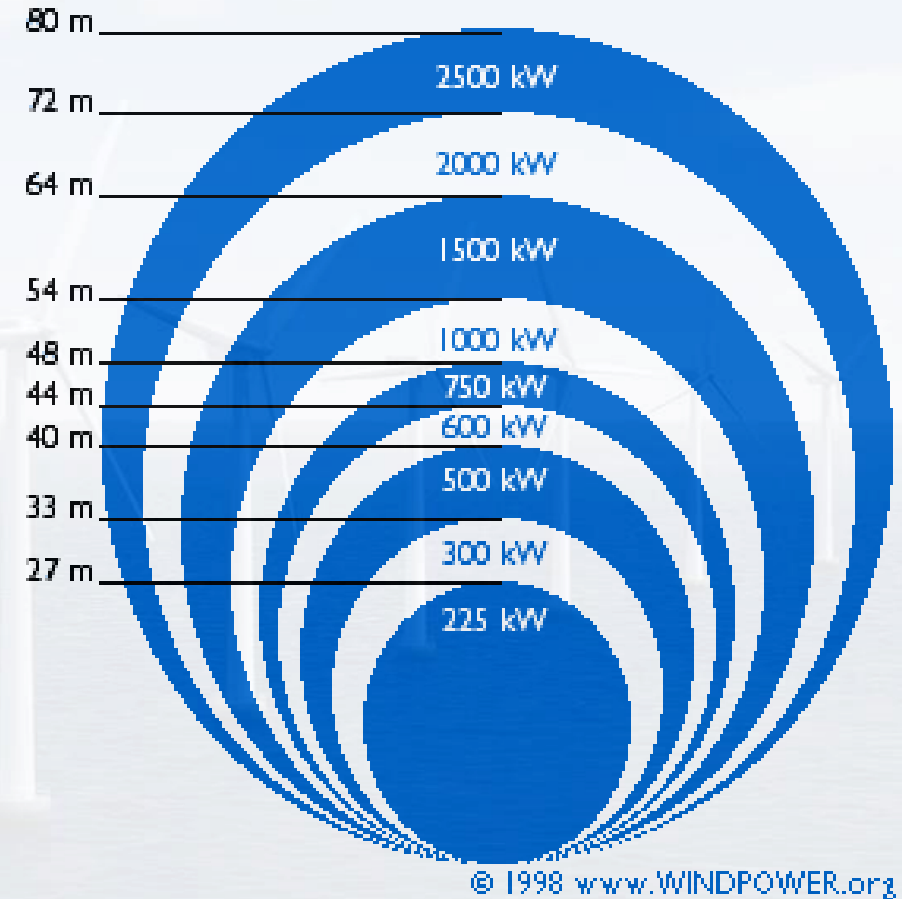
$$dT = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin\phi - C_d \cos\phi) Bcrdr$$

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



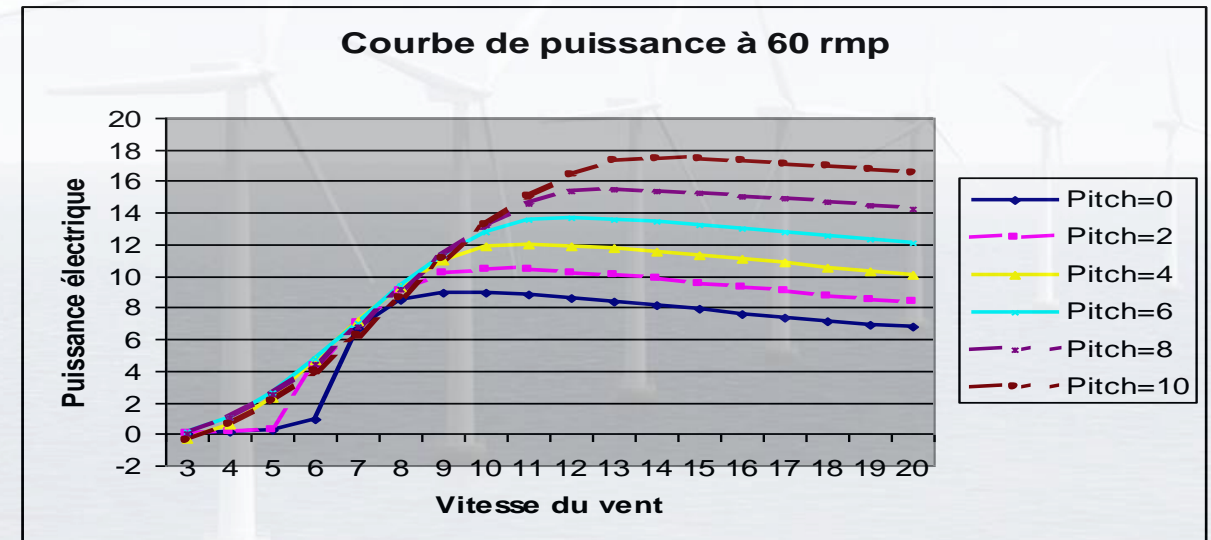
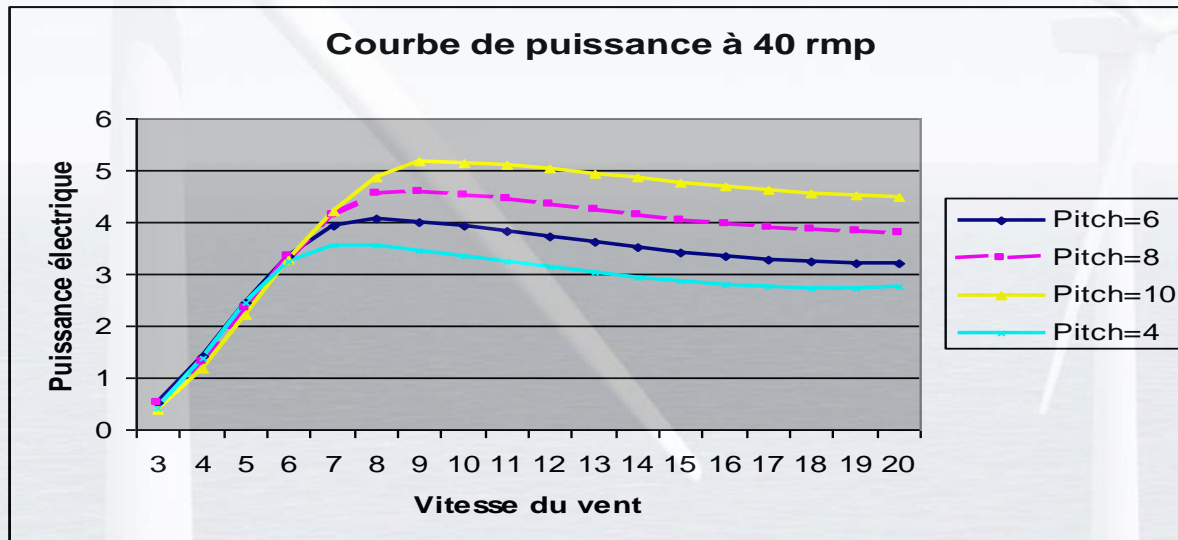
# Courbe de puissance théorique

- 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



# Courbe de puissance théorique

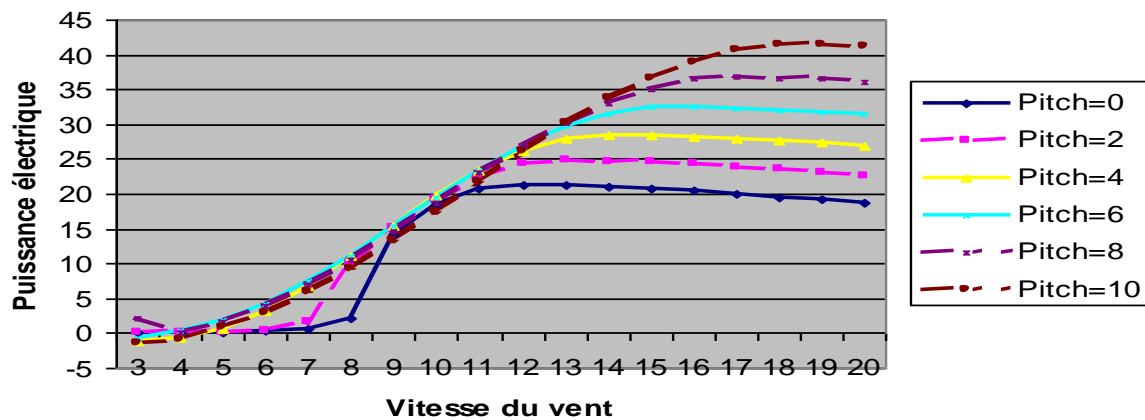
- Courbes théoriques pour la turbine PGE de 35 kW



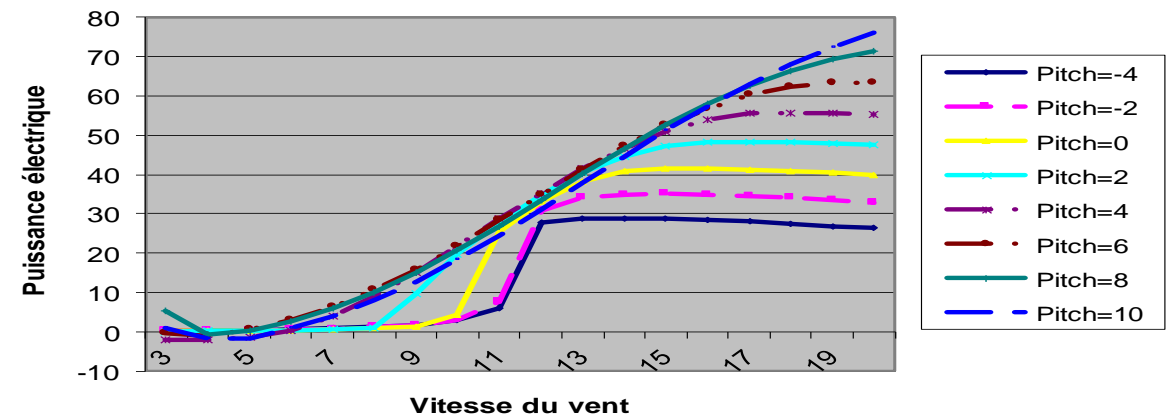
# Courbe de puissance théorique

- Courbes théoriques pour la turbine PGE de 35 kW

Courbe de puissance à 80 rpm



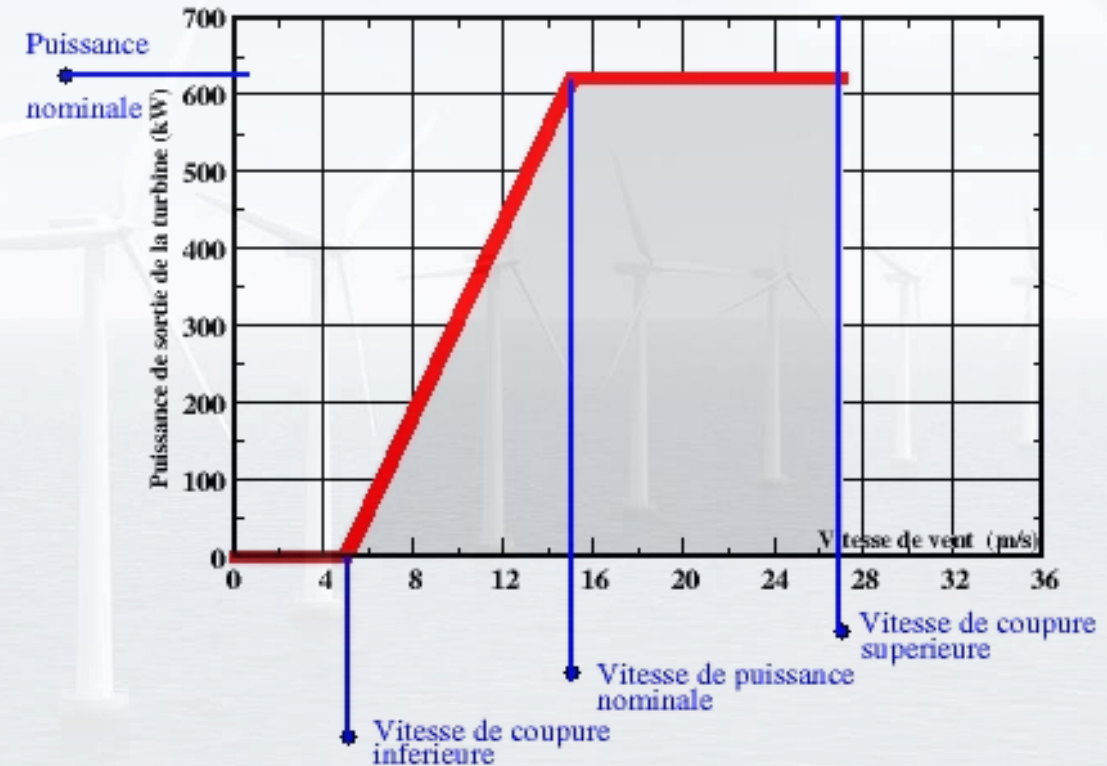
Courbe de puissance à 100 rpm



# Courbe de puissance théorique

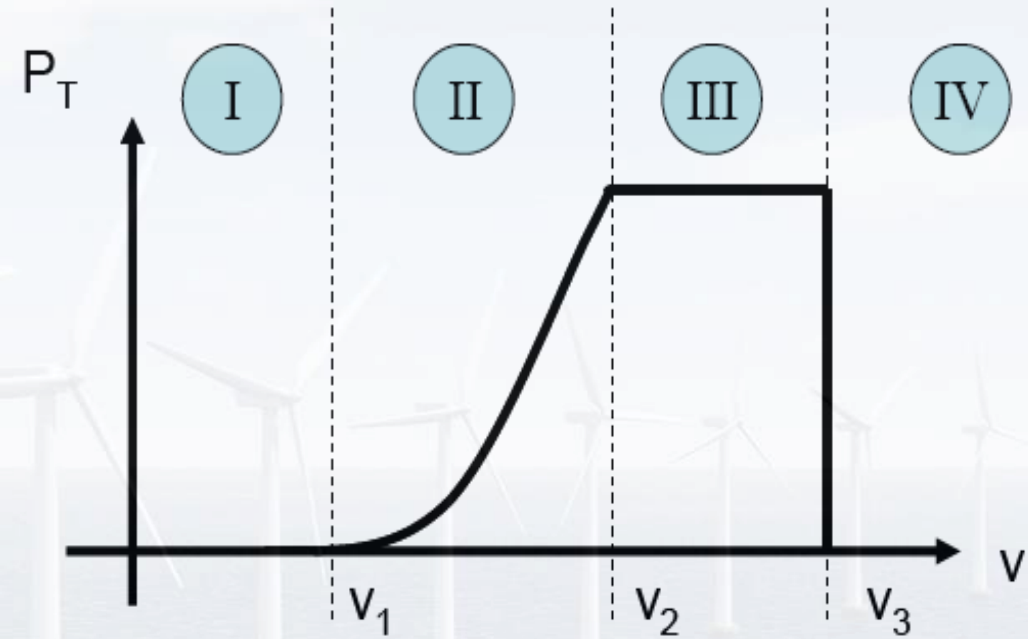
- Paramètres de performance très importants qui sont fournis par la courbe de puissance:
  - La vitesse de démarrage
  - La vitesse de coupure
  - Le coefficient de puissance (l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie disponible du vent)

Courbe de puissance idealisee d'une turbine (exemple)



# Courbe de puissance théorique

- 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.



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Courbe de puissance théorique
- ***Courbe de puissance réelle***
- Impact des conditions nordiques
- Fiches techniques
- Conclusion

# Courbe de puissance réelle

- Comparaison entre le modèle théorique et les simulations faites en soufflerie :

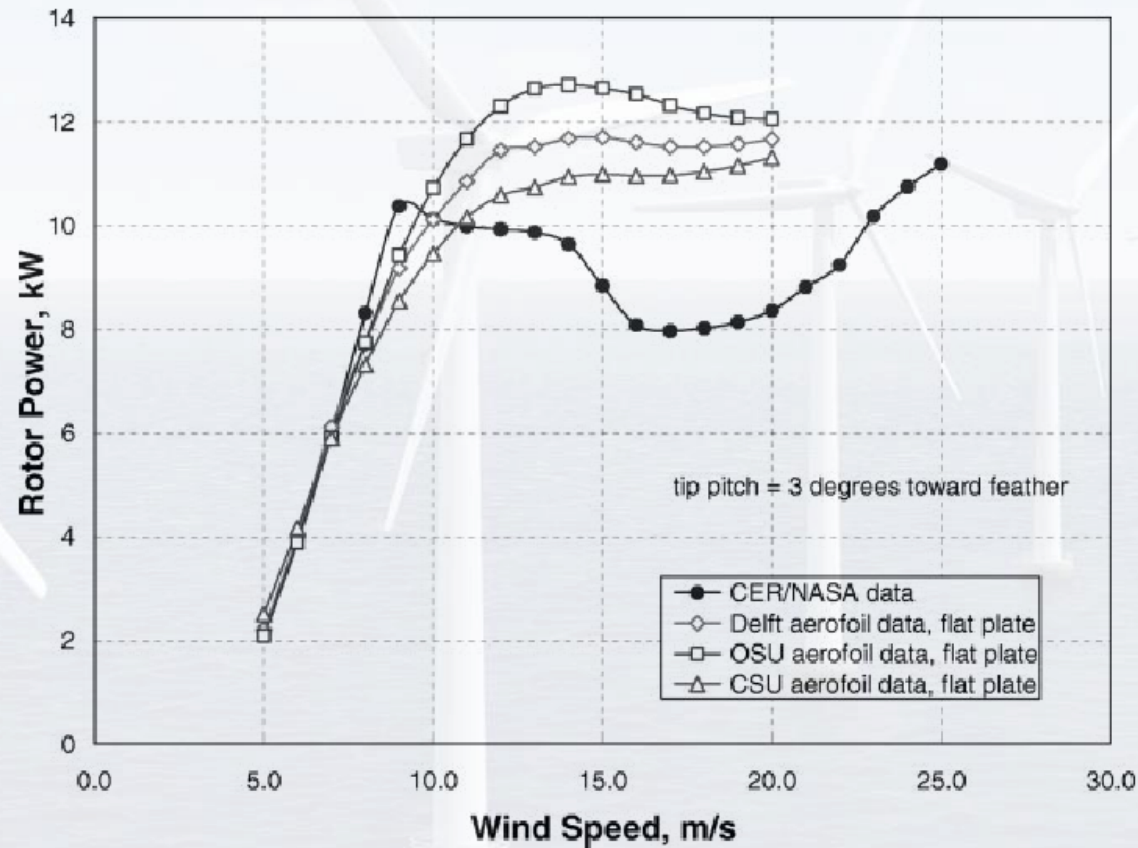
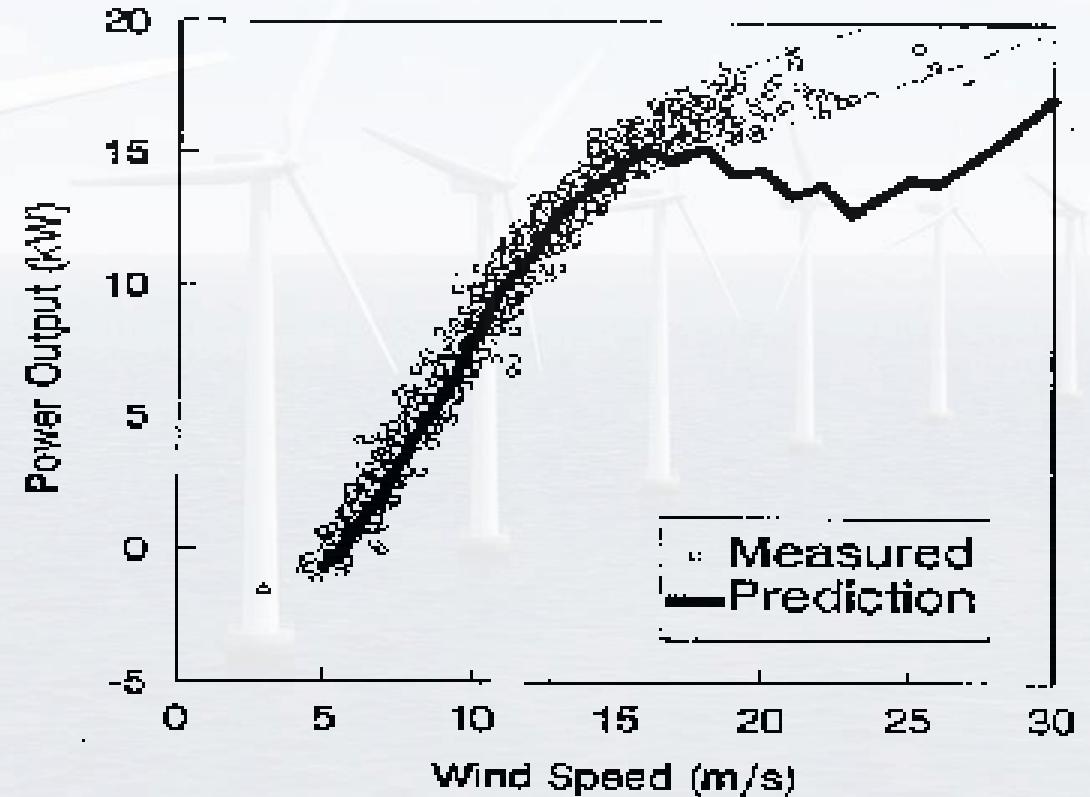
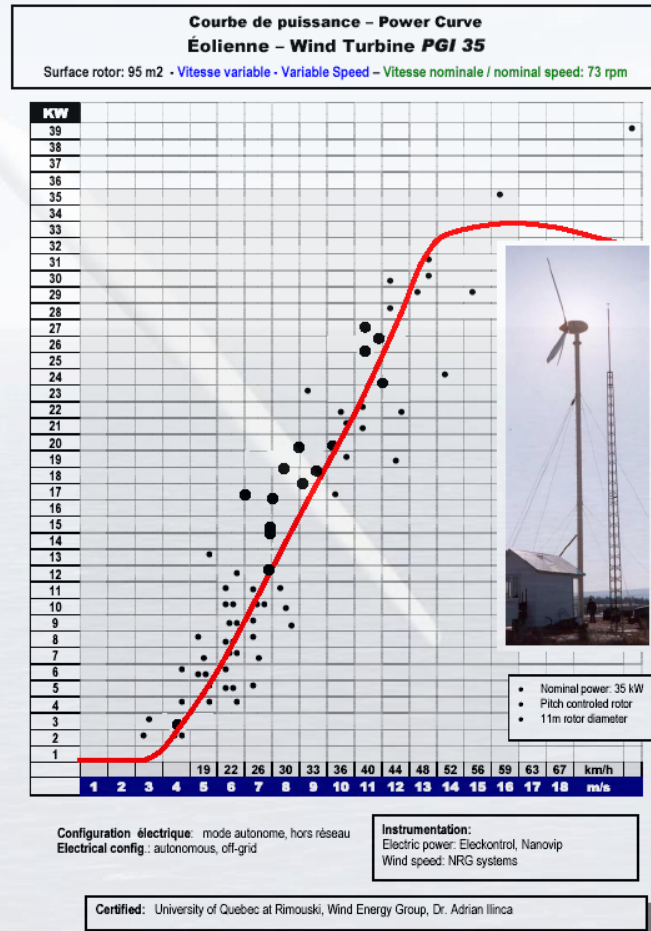


Figure 4. Predicted performance using WTPERF and different wind-tunnel data sets

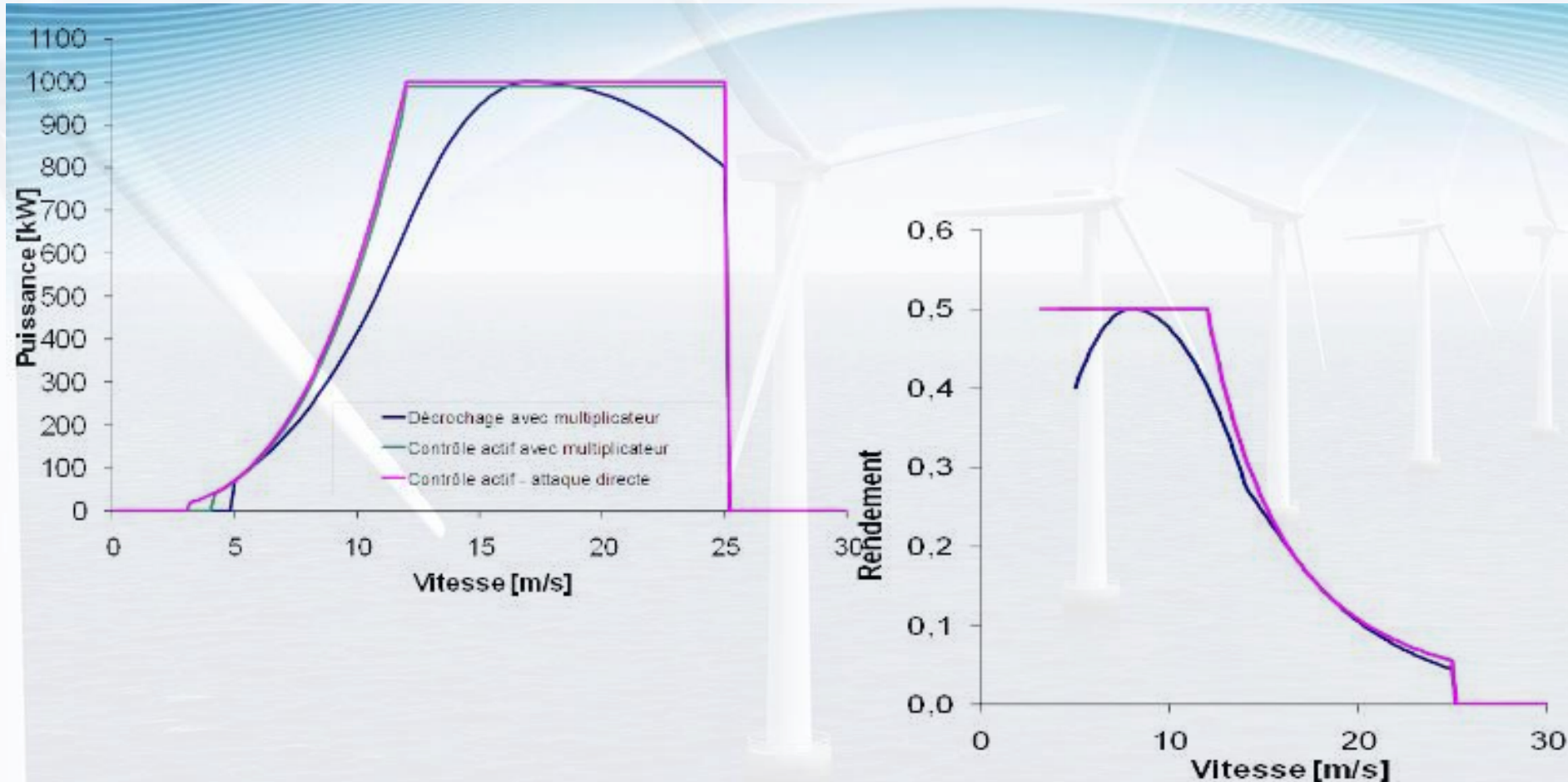
# Courbe de puissance réelle

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



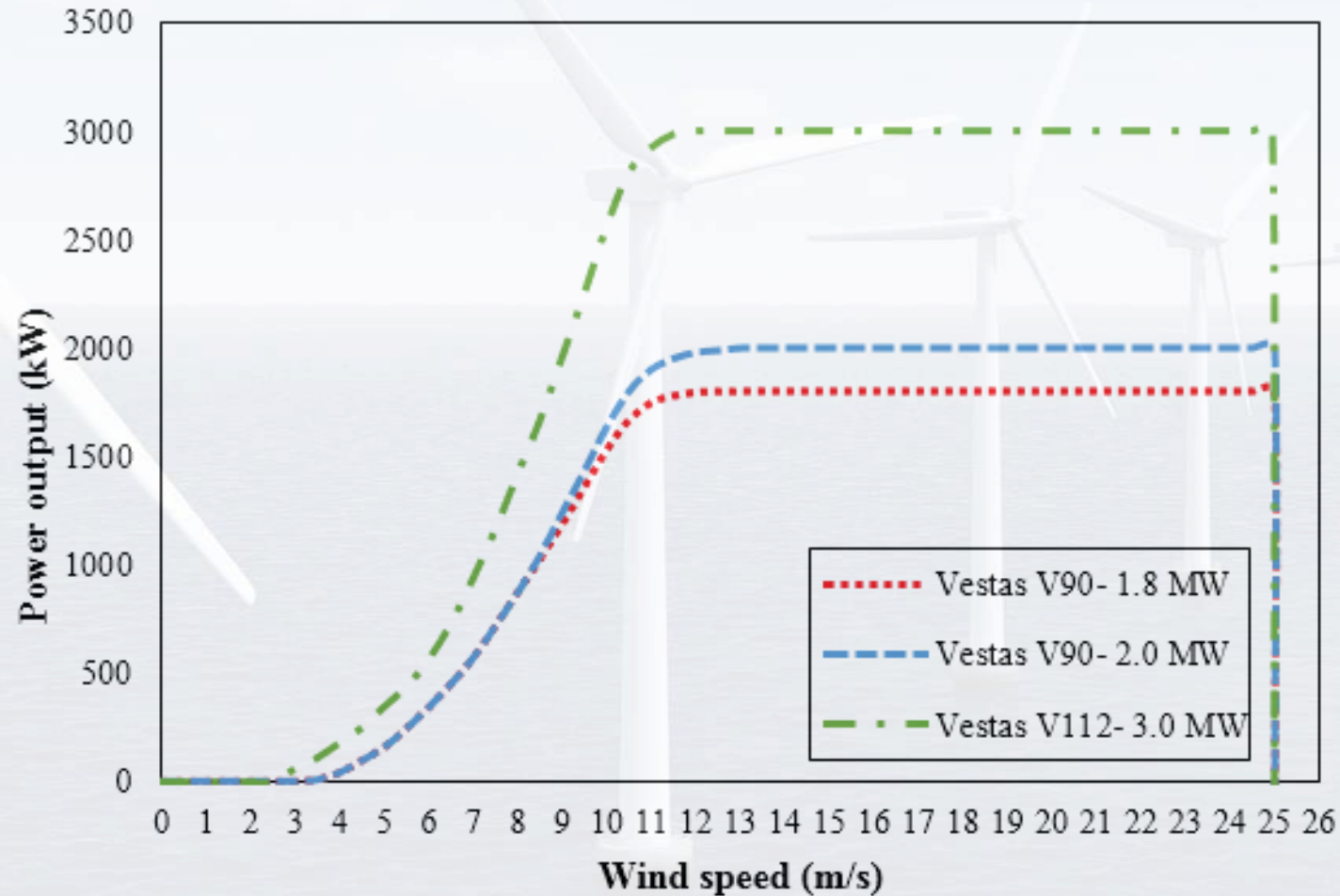
# Courbe de puissance réelle

- Impact du type de contrôle sur la courbe de puissance



# Courbe de puissance réelle

- Impact du type de contrôle sur la courbe de puissance



# Plan de cette présentation

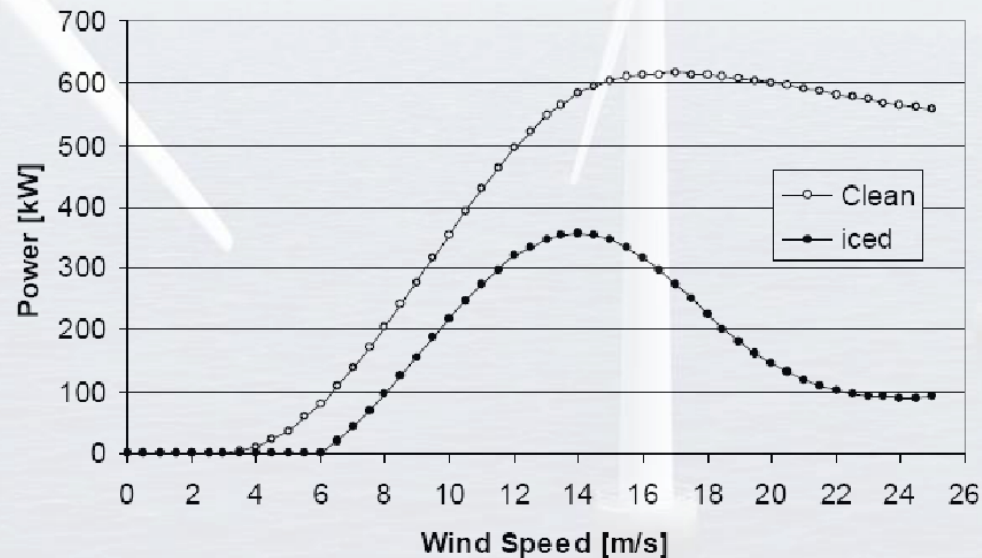
- Introduction et objectifs
- Courbe de puissance théorique
- Courbe de puissance réelle
- ***Impact des conditions nordiques***
- Fiches techniques
- Conclusion

# Impact des conditions nordiques

- Les conditions nordiques dans lesquelles évoluent les éoliennes au Québec ont des conséquences sur les performances des turbines.
- La baisse de température de l'air en milieu nordique implique une augmentation de la densité de l'air. La portance augmente alors, ce qui provoque à son tour l'augmentation du couple et de la vitesse de rotation du rotor.

# Impact des conditions nordiques


- L'accumulation du givre sur les pales augmente la traînée, ce qui génère une perte de portance. La production énergétique diminue sans pouvoir la quantifier facilement.
- Il est également nécessaire d'arrêter l'éolienne lors de situations critiques ce qui implique une production nulle pendant le dégivrage (manuel ou naturel).



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Courbe de puissance théorique
- Courbe de puissance réelle
- Impact des conditions nordiques
- ***Fiches techniques***
- Conclusion

# Fiche technique : éolienne à multiplicateur de vitesse

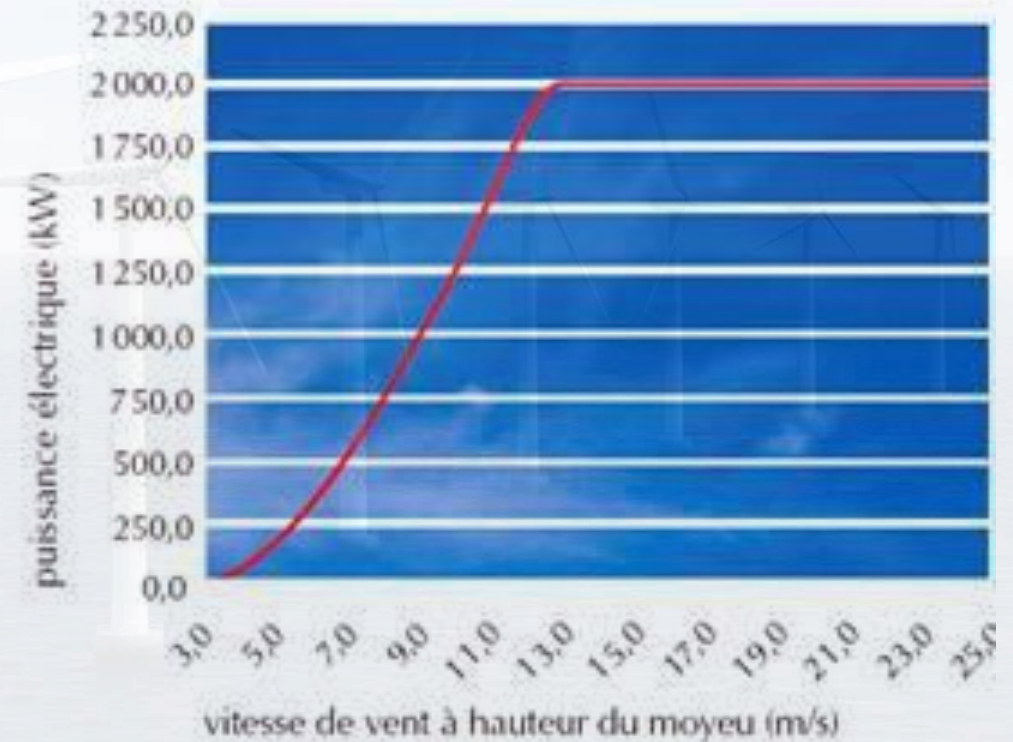


**MM92**

## Données techniques

<b>Dimensionnement</b>	
Puissance nominale	2.050 kW
Vitesse de démarrage	3,0 m/s
Vitesse de vent nominale	12,5 m/s
Vitesse de décrochage	24,0 m/s
Zone des vents	jusqu'à DIBt 3
Classe	jusqu'à IEC IIA
<b>Rotor</b>	
Diamètre	92,5 m
Surface balayée	6.720 m <sup>2</sup>
Vitesse de rotation	7,8 à 15,0 tr/min (+12,5%)
<b>Pale</b>	
Longueur	45,2 m
Type	Composite en résine et fibre de verre par injection sous-vide
<b>Système d'orientation</b>	
Type	Roulement de rangée double, à quatre points de contact et denture extérieure
Entraînement	Motoréducteurs
Stabilisation	Frein à disque
<b>Multiplicateur</b>	
Type	multiplicateur de type épicycloïdal
Rapport	i = env. 120,0 (50 Hz) i = env. 96,0 (60 Hz)
<b>Système électrique</b>	
Type de génératrice	génératrice asynchrone à double alimentation 4 pôles (50 Hz), 6 pôles (60 Hz)
Puissance nominale	2.050 kW
Tension nominale	690 V (50 Hz) 575 V (60 Hz)
Vitesse de rotation nominale	900 à 1.800 tr/min (50 Hz) 720 à 1.440 tr/min (60 Hz)
Classe de protection de la génératrice	IP 54
Type de convertisseur	IGBT à commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI)
<b>Régulation</b>	
Principe	Pitch (calage électrique variable des pales) et vitesse de rotation variable
<b>Niveau acoustique maximal</b>	
LWA, 95%	104,2 dB (A)
<b>Tour</b>	
Type	Tubulaire en acier
Hauteurs de moyeu	68,5/80/100 m
<b>Fondation</b>	
Fondation en béton armé adaptée aux conditions du sol avec structure coulée dans le béton et enfoncée dans le sol	
<b>Système de sécurité</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Calage de pales électriques indépendants et à sécurité intrinsèque</li> <li>■ Système de contrôle de la température et de la vitesse de rotation redondant</li> <li>■ Protection anti-foudre par zone totalement intégrée</li> <li>■ Transport de l'énergie par gaine-barres et câbles blindés pour la protection de l'homme et de la machine</li> <li>■ Frein de sécurité du rotor avec fonction de freinage progressif</li> </ul>	

## Courbe de puissance



# Fiche technique : éolienne à attaque directe



Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp [-]
1	0.0	0.00
2	3.0	0.12
3	25.0	0.29
4	82.0	0.40
5	174.0	0.43
6	321.0	0.46
7	532.0	0.48
8	815.0	0.49
9	1,180.0	0.50
10	1,580.0	0.49
11	1,900.0	0.44
12	2,200.0	0.39
13	2,480.0	0.35
14	2,700.0	0.30
15	2,850.0	0.26
16	2,950.0	0.22
17	3,020.0	0.19
18	3,020.0	0.16
19	3,020.0	0.14
20	3,020.0	0.12
21	3,020.0	0.10
22	3,020.0	0.09
23	3,020.0	0.08
24	3,020.0	0.07
25	3,020.0	0.06

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

## Technical specifications E-82 E3

**Rated power:** 3,000 kW  
**Rotor diameter:** 82 m  
**Hub height in meter:** 78 / 85 / 98 / 108 / 138  
**Wind zone (DIBt):** -  
**Wind class (IEC):** IEC/EN IA and IEC/EN IIA  
**WEC concept:** Gearless, variable speed  
Single blade adjustment

### Rotor

**Type:** Upwind rotor with active pitch control  
**Rotational direction:** Clockwise  
**No. of blades:** 3  
**Swept area:** 5,281 m<sup>2</sup>  
**Blade material:** GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection  
**Rotational speed:** Variable, 6 - 18 rpm  
**Pitch control:** ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

### Drive train with generator

**Hub:** Rigid  
**Main bearing:** Double row tapered/cylindrical roller bearings  
**Generator:** ENERCON direct-drive annular generator

**Grid feed:** ENERCON inverter

**Brake systems:** - 3 independent pitch control systems with emergency power supply  
- Rotor brake  
- Rotor lock

**Yaw system:** Active via yaw gear, load-dependent damping

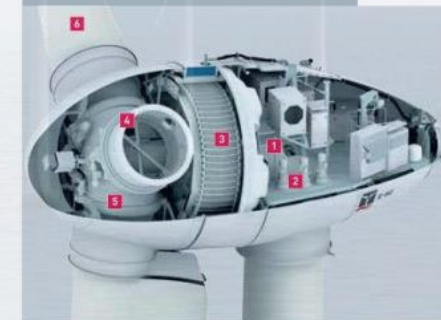
**Cut-out wind speed:** 28 - 34 m/s [with ENERCON storm control\*]

**Remote monitoring:** ENERCON SCADA

\* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

# E-82

3,000 kW



- 1 Main carrier
- 2 Yaw drive
- 3 Annular generator
- 4 Blade adapter
- 5 Rotor hub
- 6 Rotor blade

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Courbe de puissance théorique
- Courbe de puissance réelle
- Impact des conditions nordiques
- Fiches techniques
- ***Conclusion***

# Conclusion

- L'évaluation des performances d'une éolienne est une étape clé dans un projet éolien.
- Les courbes de puissance disponibles dans la fiche technique d'une éolienne doivent donc être étudiées avec sérieux.
- Ces courbes de performances permettent de comprendre qu'une éolienne ne fonctionne pas toujours à sa puissance nominale et que seules des conditions climatiques favorables permettent d'atteindre cette puissance nominale.

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION !**



# MERCI



## Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D  
Tél: 418-962-9848 # 340  
[cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca](mailto:cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca)  
[Hussein\\_ibrahim01@uqar.ca](mailto:Hussein_ibrahim01@uqar.ca)  
[Hussein.ibrahim@itmi.ca](mailto:Hussein.ibrahim@itmi.ca)