

Fiabilité aérodynamique : Application à la technologie éolienne

Arezki SMAILI

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement

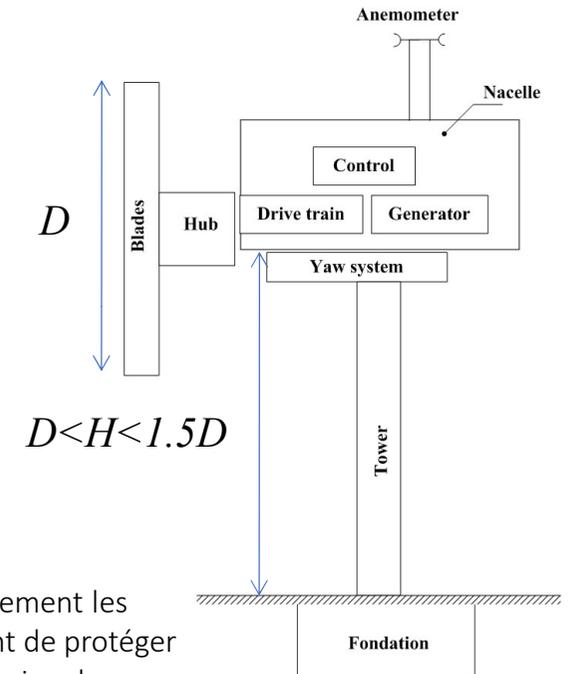
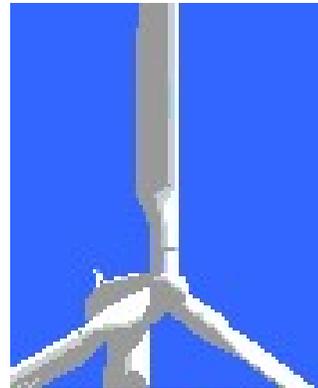
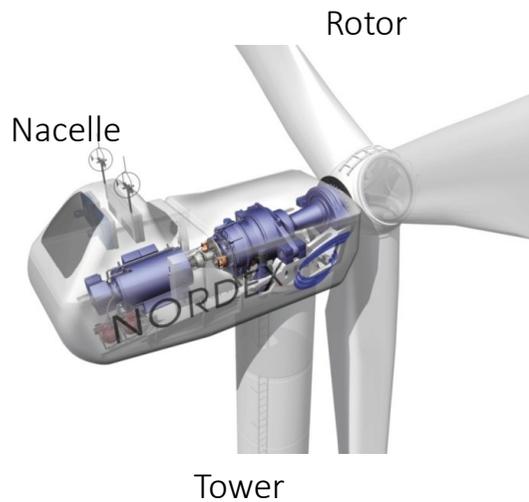
**LA 6^E JOURNÉE DE LA FIABILITÉ
18 NOVEMBRE 2018**

Sommaire

1. Introduction
 - 1.1 Description, Principe de fonctionnement d'une éolienne
 - 1.2 Evolution de la technologie éolienne
 - 1.3 Situation mondiale
2. Aérodynamique des turbines éoliennes
 - 2.1 Modèle mathématique
 - 2.2 Méthode numérique (CFD)
3. Fiabilité aérodynamique -Turbines éoliennes
 - 3.1 Décrochage aérodynamique et Vortex generation
 - 3.2 Finesse et Turbine optimale
 - 3.3 Tourbillons en bout de pale et Winglet
 - 3.4 Sillage du rotor et Optimisation des Centrales éoliennes
4. Conclusion

Introduction

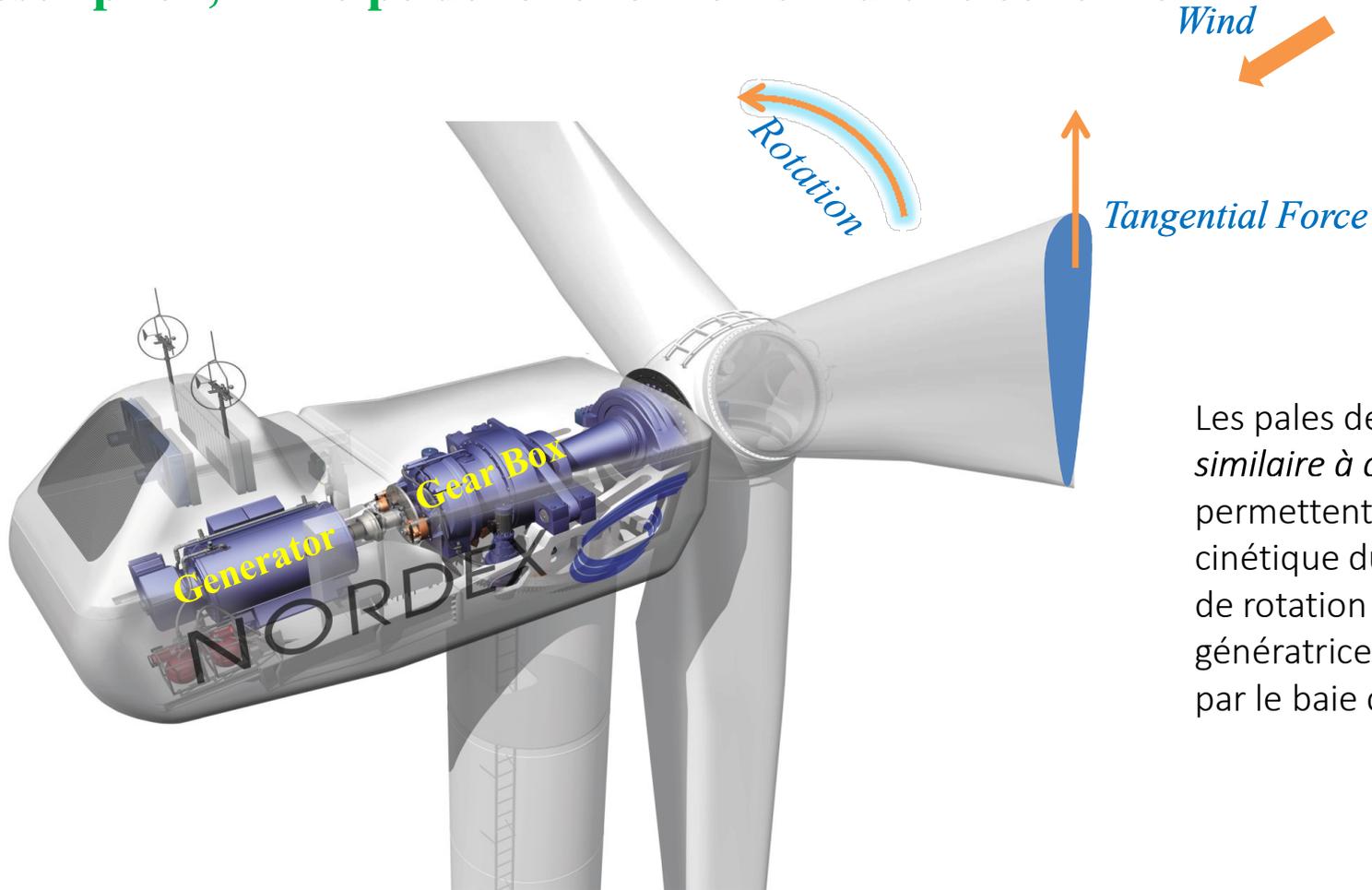
Description, Principe de fonctionnement d'une éolienne



Les principaux composants d'une éolienne moderne typique: le Rotor est constitué des pales et le moyeu. Actuellement les turbines sont souvent à 3 pales, avec un contrôle à calage variable (pitch control). la Nacelle : couvercle permettant de protéger les pièces mécaniques et électromécaniques des conditions atmosphériques. On y trouve les systèmes de transmission, la génératrice, le système de contrôle (joue un rôle primordial pour le fonctionnement de la machine et la production de puissance à l'aide de mesures de vitesse prise par l'Anémomètre. Minimiser les effets des changements de la direction du vent et la turbulence sur le fonctionnement de la machine, et maximiser la production de puissance), et le système de Yaw (consiste en un dispositif d'orientation permettant de maintenir le rotor aligné avec le vent.)

Introduction

Description, Principe de fonctionnement d'une éolienne



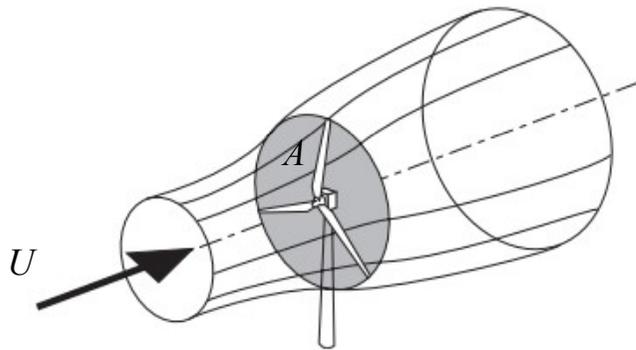
Les pales de section *aérodynamique* similaire à celle utilisée en aviation permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation susceptible d'entraîner la génératrice pour produire de l'électricité par le baie du système de transmission.

Introduction

Description, Principe de fonctionnement d'une éolienne

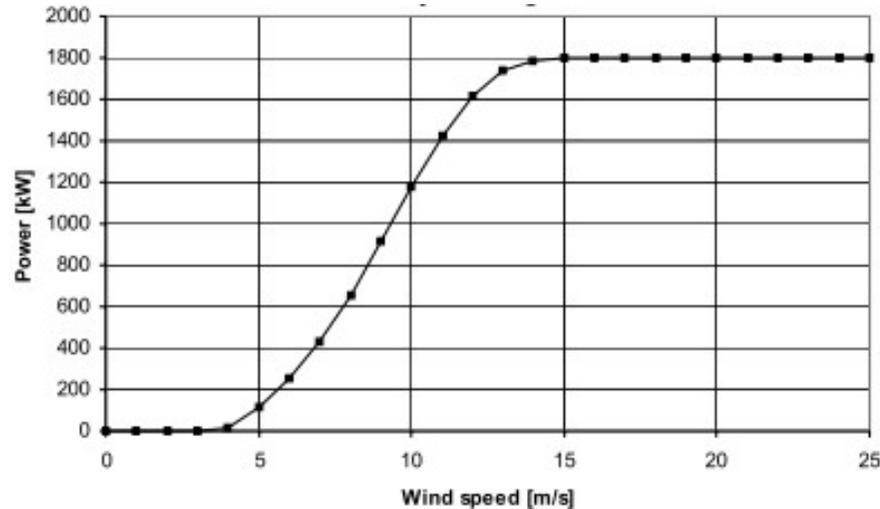
Vitesses du vent typiques

$$4 \text{ m/s} \leq V \leq 25 \text{ m/s}$$



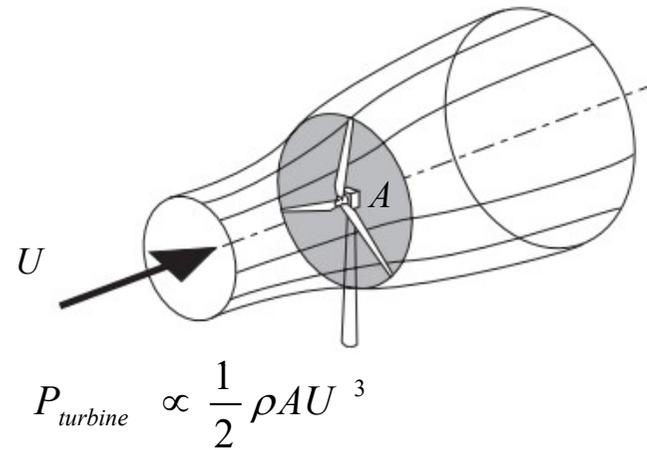
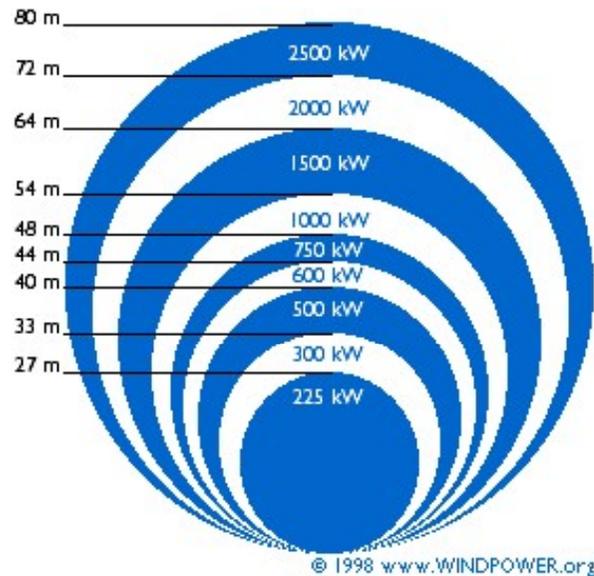
$$P_{\text{turbine}} \propto \frac{1}{2} \rho A U^3$$

Les éoliennes modernes sont conçues pour opérer dans la plage de vitesses de vent variant de **4 à 25 m/s (14.4 km/h à 90 km/h)**. La puissance produite est proportionnelle au taux d'énergie cinétique pouvant être généré par la surface A balayée par les pales. Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance. La figure montre la courbe typique de puissance produite en fonction de la vitesse du vent



Introduction

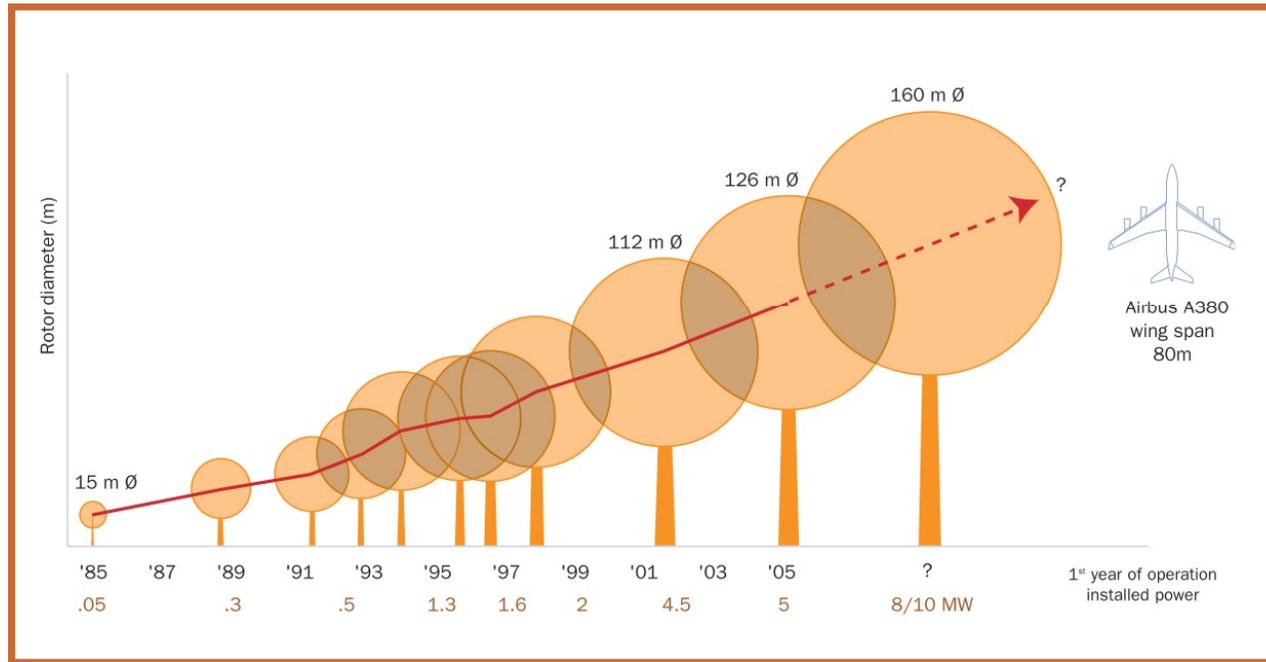
Evolution de la technologie éolienne



Voyons de près la relation entre la puissance et la taille de la machine. A partir de la relation exprimant la puissance produite par une éolienne, il ressort clairement que pour faire augmenter la puissance, seule l'augmentation du diamètre est possible. Etant donné que les valeurs de vitesses d'opérations sont bornées entre 4 et 25 m/s. Tant que la technologie le permettra, la taille des éoliennes continuera toujours d'augmenter dans le futur, comme le montre la figure du slide suivant.

Introduction

Evolution de la technologie éolienne



Source: Jos Beurskens, ECN

La taille des éoliennes commerciales n'a pas cessé d'augmenter depuis les années 1985, en passant de 50 kW à 10 MW en 2012

Introduction

Evolution de la technologie éolienne



Enercon E-126 (2008)

- Rated power: 6MW
- Rotor diameter:126 m
- Tower Height : 135 m

En 2008, Enercon (compagnie allemande) a mis en service une éolienne de 6MW de puissance nominale, de diamètre 126 m (qui dépasse largement l'envergure du plus gros transporteur aérien). Cette évolution de la taille des machines a contribué énormément à améliorer la fiabilité et la productivité des éoliennes et, tout en réduisant le nombre de machines sur le site.

Introduction

Evolution de la technologie éolienne



SeaTitan (from 2012)

- Rated power: 10 MW
- Rotor diameter: 190 m
- Tower Height : 125 m
- Generator type: HTS synchronous

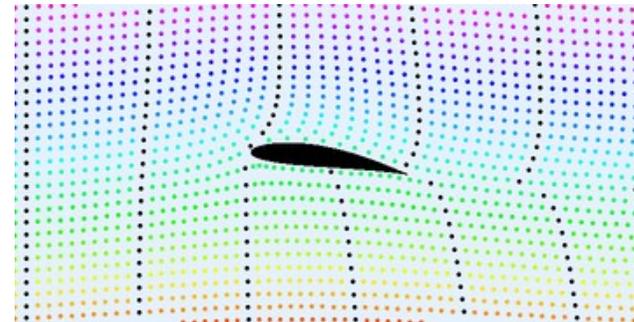
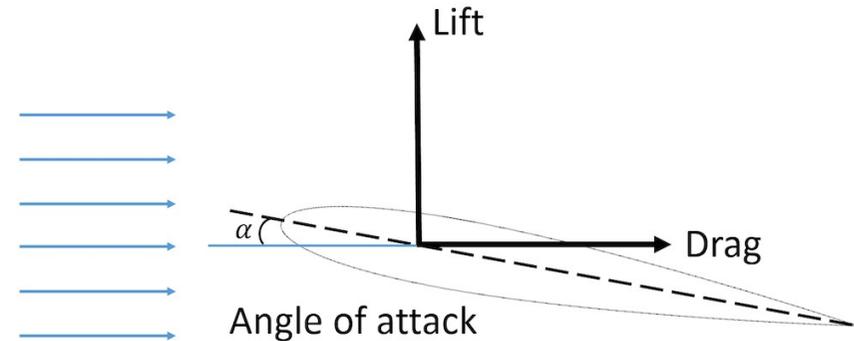
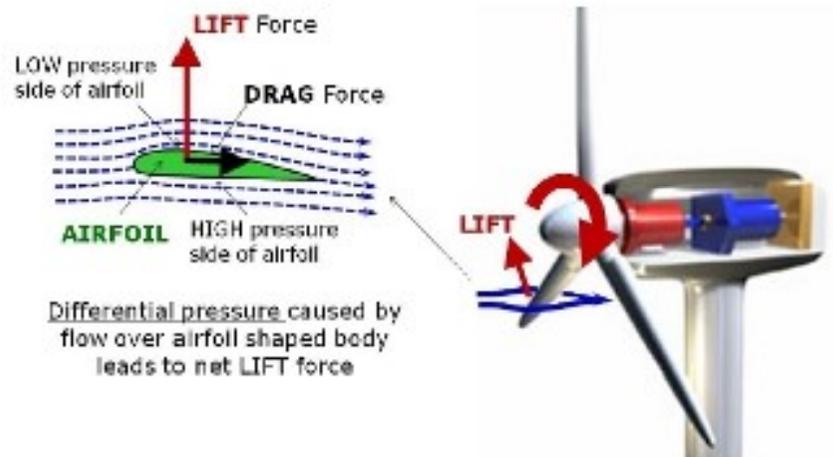
The SeaTitan (direct drive) wind turbine design includes a high temperature superconductor (HTS) generator, which is significantly smaller and lighter than a generator using conventional technologies - See more at:
<http://www.amsc.com/windtec/>

Aérodynamique des turbines éoliennes

- L'analyse aérodynamique des turbines à vent est l'une des étapes cruciales dans la conception des pales du rotor. Il existe trois méthodes d'analyse.
- **BEM integral method (Wilson et al. Oregon State University, 1974)**
 - ✓ La majorité des modèles du rotor existant sont basés sur la Méthode BEM
 - ✓ Vu sa simplicité, pratique et souvent utilisée en industrie (codes sources libres: AeroDyn, PROPID)
 - ✓ Limitée pour des faibles vitesses de vent
 - ✓ Incapable de simuler avec précision les effets 3D, de turbulence, et instationnaires
- **Hybrid Method (RISO-Danmark 1992, Laboratoire des éoliennes-Montreal 1995)**
 - ✓ Basée sur les Eqs. De Navier-Stokes et le concept du *disque actuateur* (utilise la CFD, In house codes, ANSYS Fluent)
 - ✓ Les simulations 3D et instationnaires sont plus précises
 - ✓ CPU acceptable pour les problèmes de R&D en général
 - ✓ CPU relativement élevé pour des applications industrielles
- **Full Navier-Stokes method (NREL -USA 1999, RISO-Danmark 2002)**
 - ✓ Modélisation plus convenable du problème physique (écoulement autour du rotor)
 - ✓ Méthodes de CFD (In house codes, codes sources libres, Ansys Fluent)
 - ✓ Requière un temps de calcul considérable (CPU) et d'importantes ressources informatiques (les schémas de calcul parallèle et HPC).

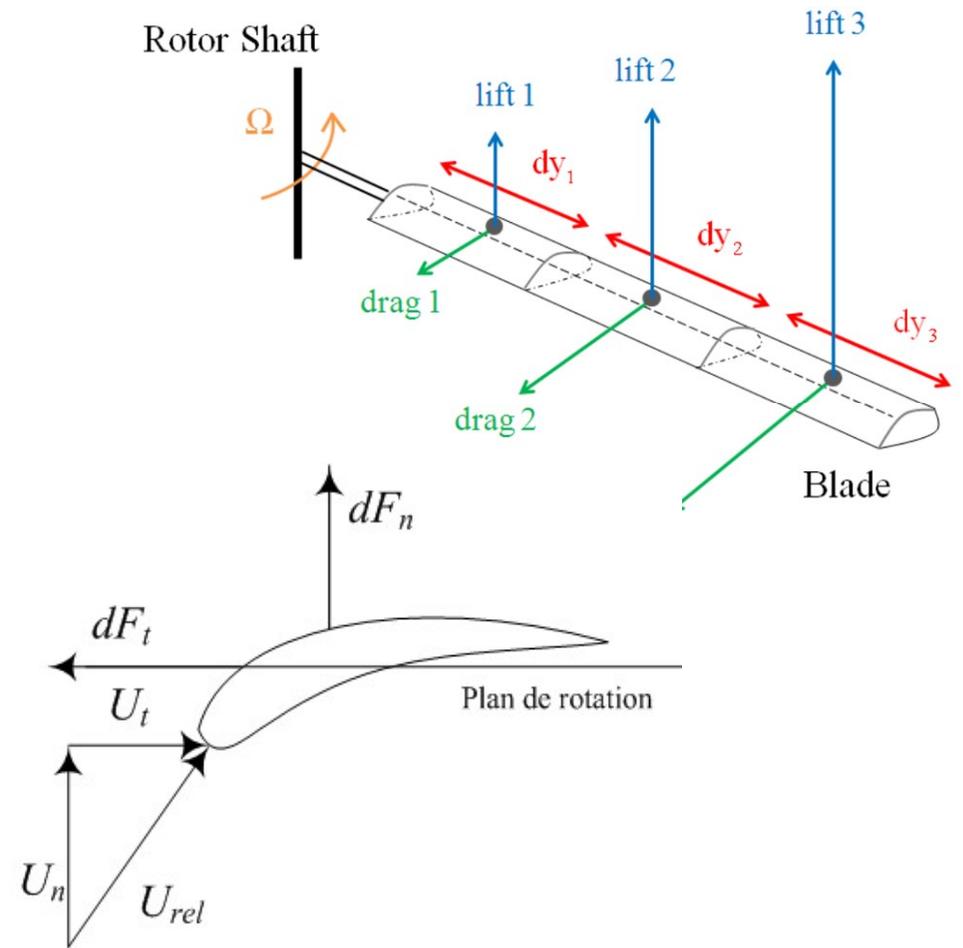
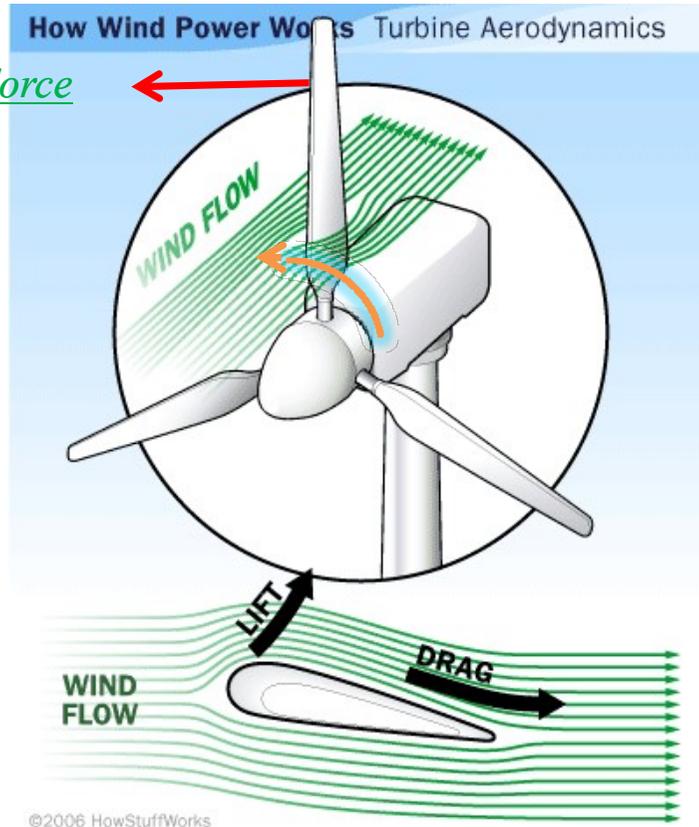
Aérodynamique des turbines éoliennes

L'Aérodynamique étudie l'interaction de l'air avec le rotor, qui concerne principalement les forces de traînée et de portance, se développant sur les pales.



Aérodynamique des turbines éoliennes

Rotation de la pale



Aérodynamique des turbines éoliennes

Mathematical Model

For steady conditions, the time averaged continuity, Navier-Stokes and energy equations written in Cartesian tensor form are

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad \rho u_j \frac{\partial (c_p T)}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j''}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

The ideal gas law : $\frac{p}{\rho} = R_{air} T$ The shear stress tensor: $\tau_{ij} = (\mu_t + \mu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

From the k-ε turbulence model, the turbulent viscosity : $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$

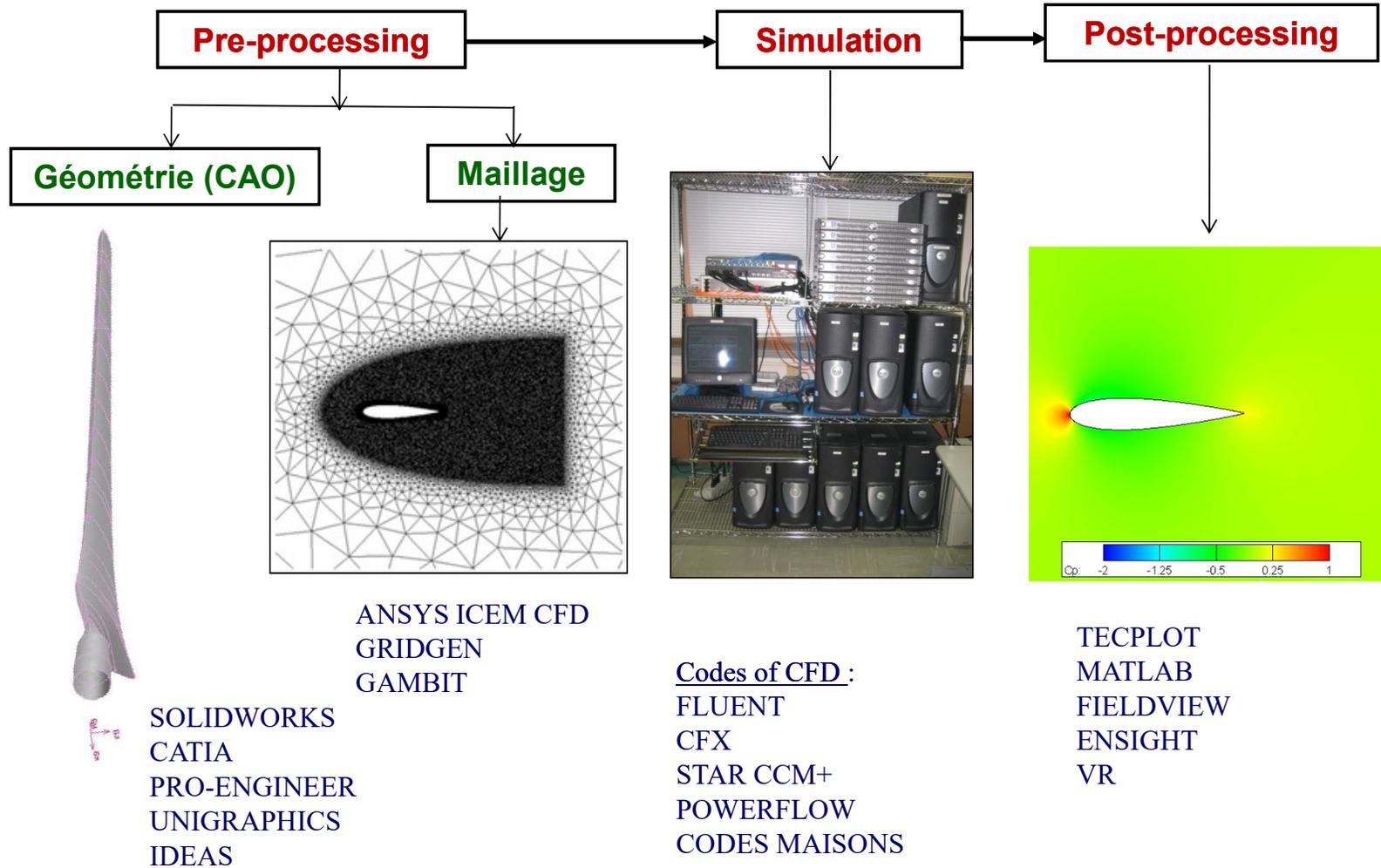
Where, k is the turbulent-kinetic energy, ε is the rate of turbulent energy dissipation and C_μ is a model constant.

The j^{th} heat conduction flux component : $q_j'' = -(\lambda_t + \lambda) \frac{\partial T}{\partial x_j}$

The eddy thermal conductivity : $\lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$

Aérodynamique des turbines éoliennes

Méthode numérique (CFD)

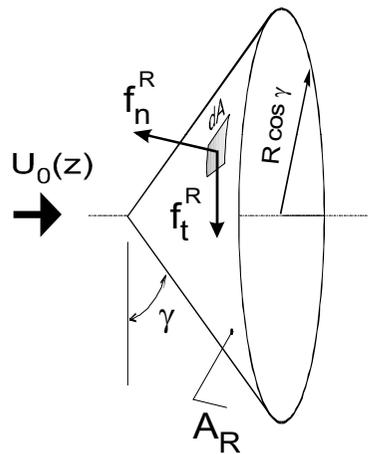


Aérodynamique des turbines éoliennes

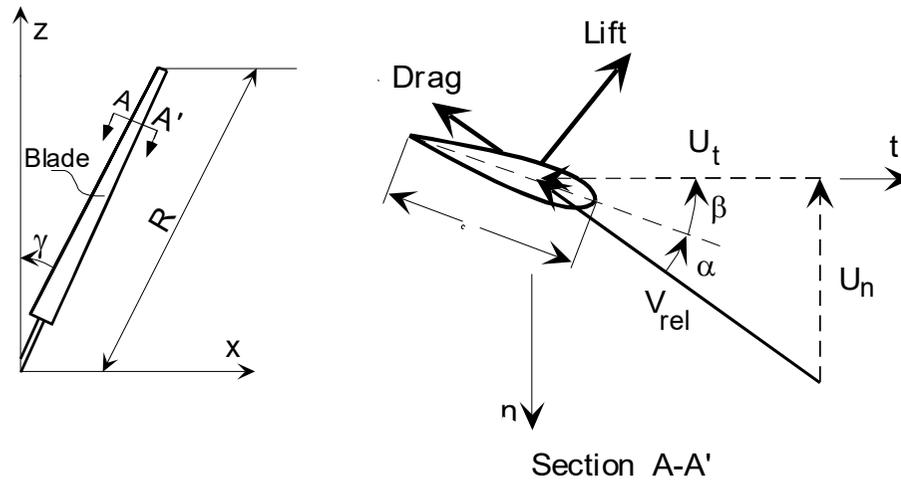
Méthode numérique-Hybrid

Rotor Modeling

Actuator Disk Concept



Blade Element Theory



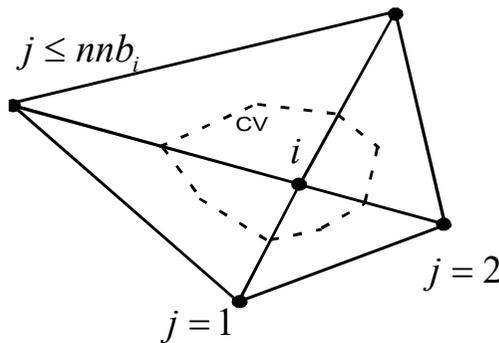
$$f_n = \frac{B}{2\pi r} \rho \frac{V_{rel} c}{2} [U_t C_L + U_n C_D] \quad ; \quad f_t = -\frac{B}{2\pi r} \rho \frac{V_{rel} c}{2} [U_n C_L - U_t C_D]$$

Aérodynamique des turbines éoliennes

Méthode numérique-Hybrid

An *In-house code (NSC)* based on co-located equal-order Control-Volume Finite-Element Method (CVFEM), developed previously (*Laboratoire d'Aérodynamique des éoliennes-Montreal, 2003*)

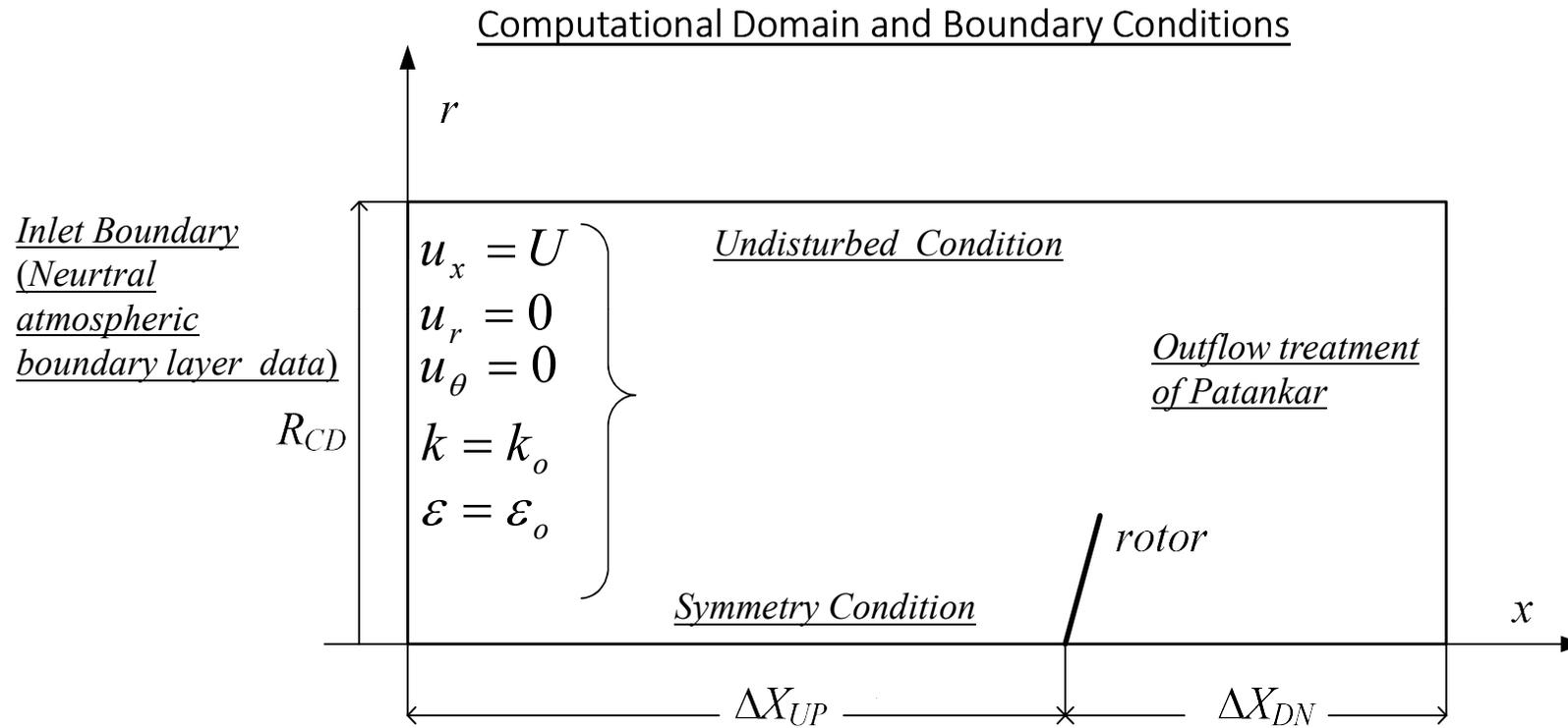
- Unstructured /Structured formulation
- Discretization equation for dependent variable $f(V, T, k, e)$



$$ap_i \phi_i = \sum_{j=1}^{nnb_i} anb_{ij} \phi_{ij} + b_i$$

Aérodynamique des turbines éoliennes

Méthode numérique-Hybrid

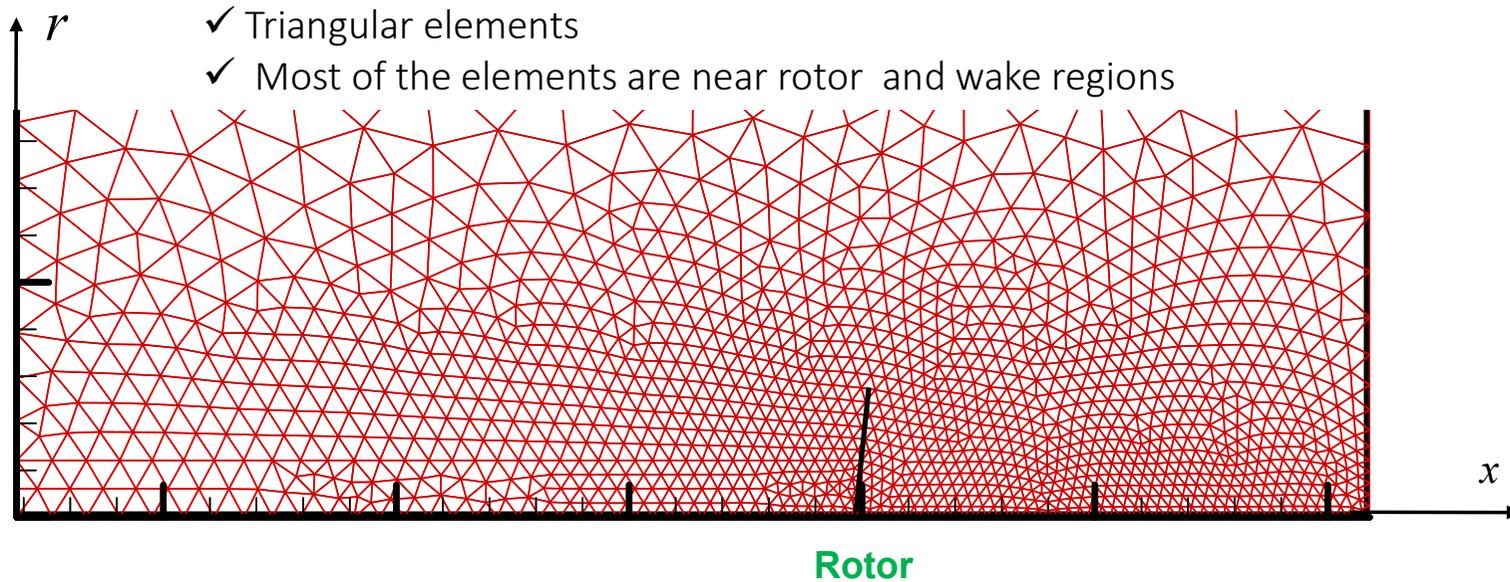


Aérodynamique des turbines éoliennes

Méthode numérique-Hybrid

Grid Topology

$\Delta X_{UP}/R$	$\Delta X_{DN}/R$	R_{CD}/R
20	12	14

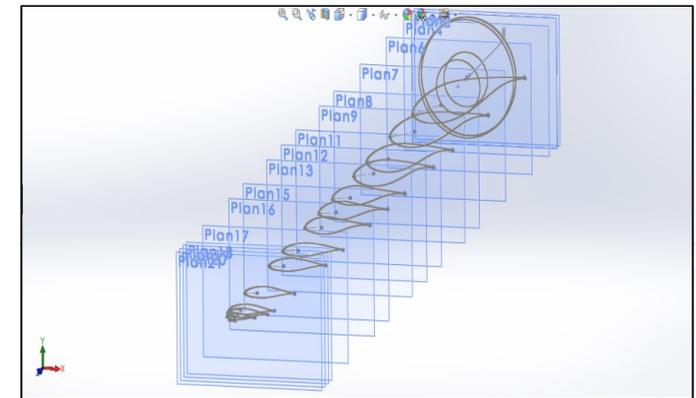
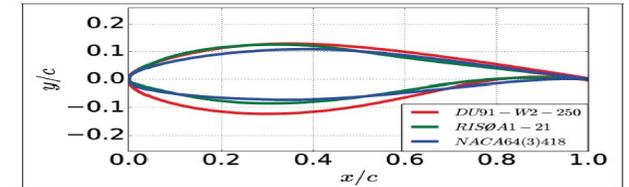


Aérodynamique des turbines éoliennes

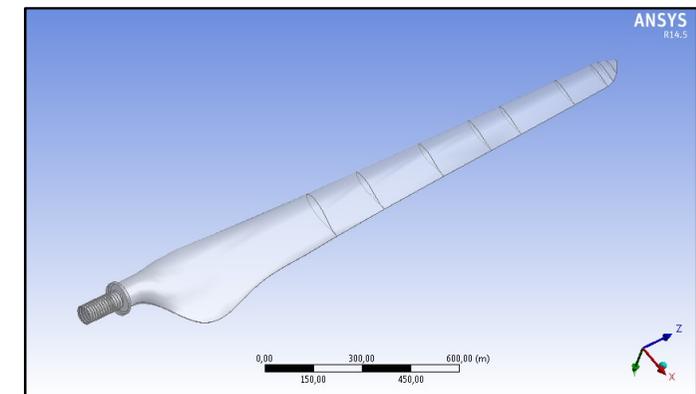
Méthode numérique-Full N-S

En se basant sur les paramètres géométriques 2D des profils et la forme géométrique de la pale

Station Number	Span (m)	Chord (m)	Twist (°)	Profile Shape (-)
1	0	0.195	0	Cylinder
2	0.02	0.195	0	Cylinder
3	0.025	0.09	0	Cylinder
4	0.09	0.09	0	Cylinder
5	0.165	0.165	8.2	Transition (from 0.09 to 0.24)
6	0.24	0.24	16.4	DU91-W2-250
7	0.465	0.207	12.1	DU91-W2-250
8	0.690	0.178	8.3	DU91-W2-250
9	0.815	0.166	7.1	DU91-W2-250
10	0.915	0.158	6.1	Transition (from 0.815 to 1.015)
11	1.015	0.15	5.5	RISØ-A1-21
12	1.140	0.142	4.8	RISØ-A1-21
13	1.265	0.134	4	RISØ-A1-21
14	1.365	0.129	3.700	Transition (from 1.265 to 1.465)
15	1.465	0.123	3.2	NACA 64-418
16	1.59	0.116	2.6	NACA 64-418
17	1.815	0.102	1.5	NACA 64-418
18	1.955	0.092	0.7	NACA 64-418
19	1.983	0.082	0.469	NACA 64-418
20	2.012	0.056	0.231	NACA 64-418
21	2.04	0.011	0	NACA 64-418



A l'aide du logiciel SolidWorks:

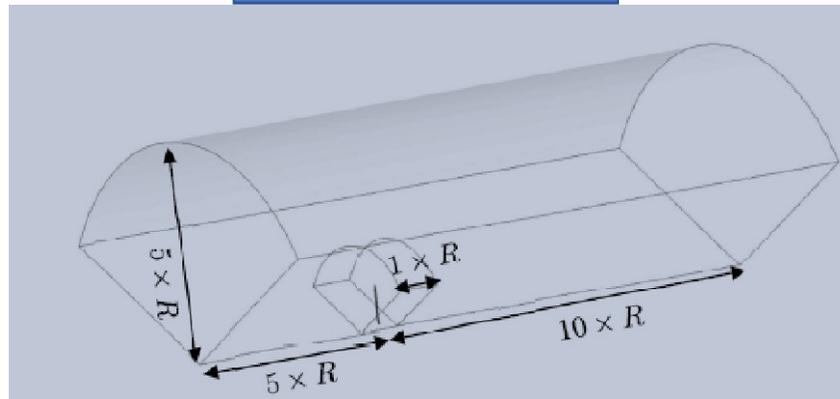


Aérodynamique des turbines éoliennes

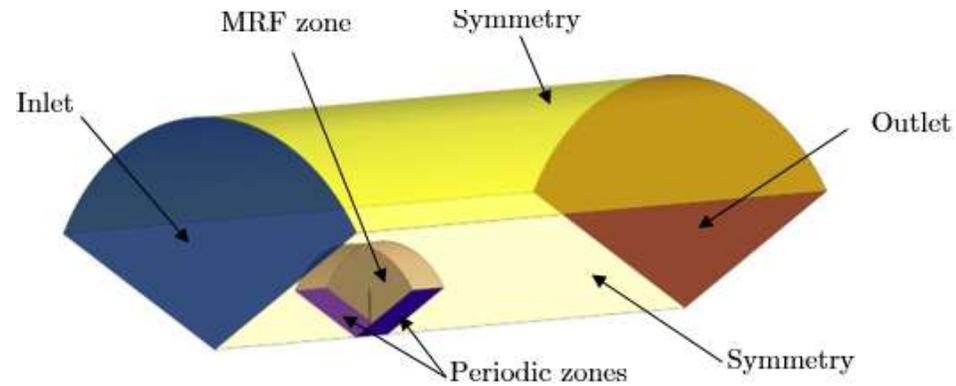
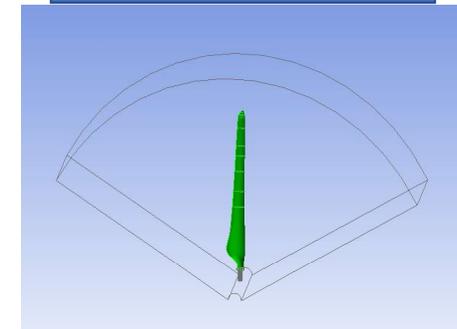
Domaine de calcul et conditions aux limites

Méthode numérique-Full N-S

Stationary part



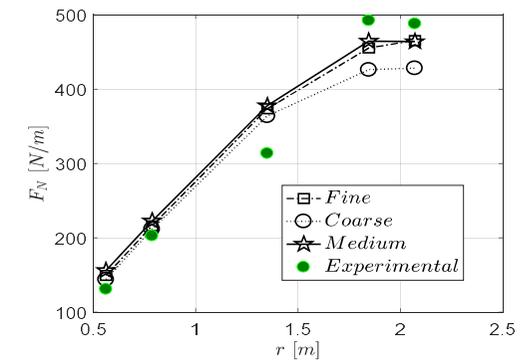
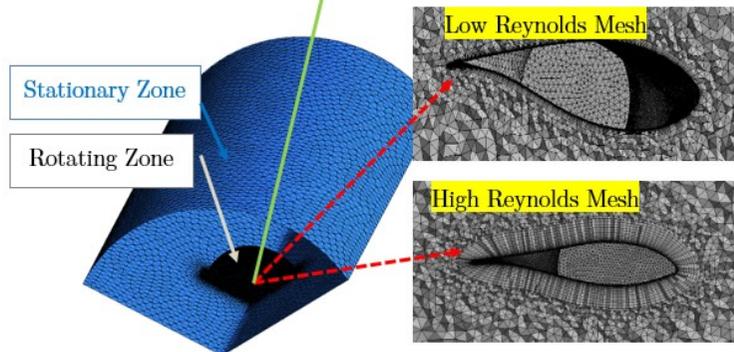
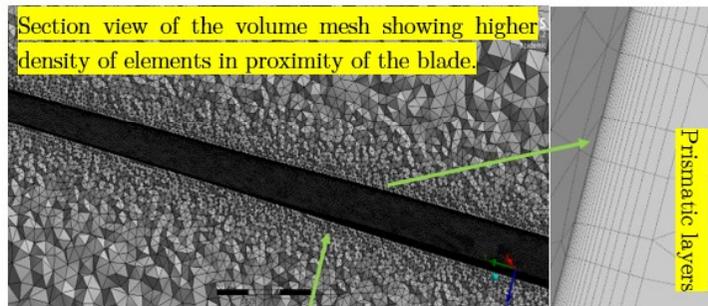
Rotating part



Aérodynamique des turbines éoliennes

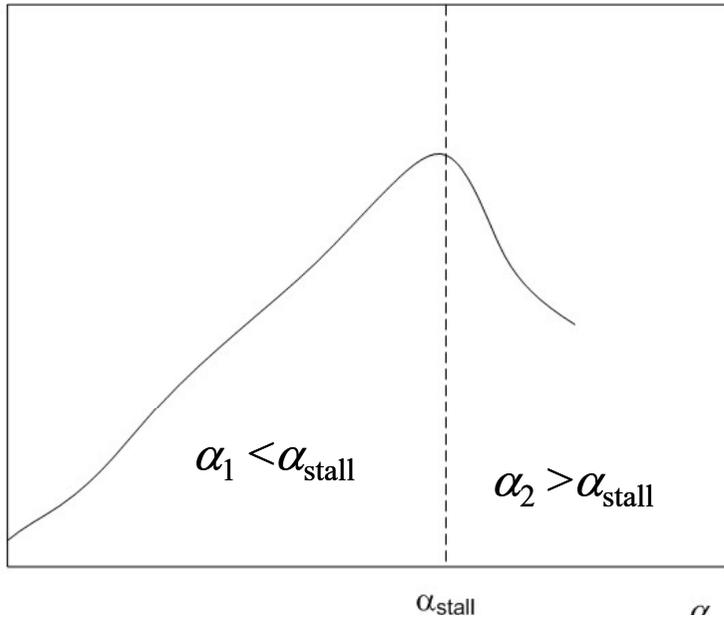
Méthode numérique-Full N-S

Grid topology

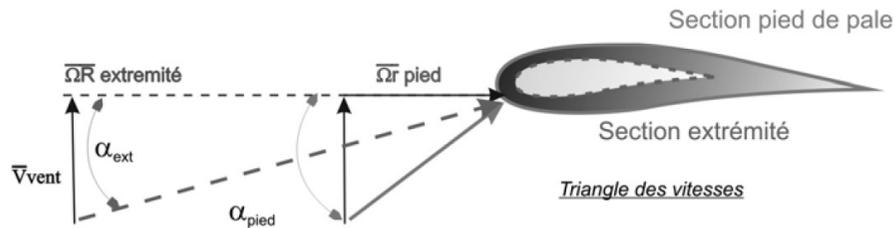


Mesh case	Node Number ($\times 10^6$)	Power (KW)	Error (%)
Coarse	2.314206	12.121	14.10
Medium	5.191504	15.066	06.76
Fine	12.305786	14.912	05.67

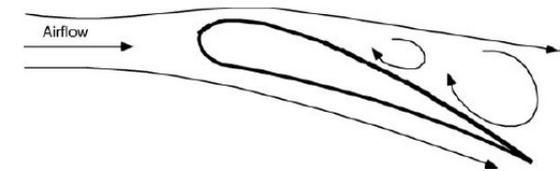
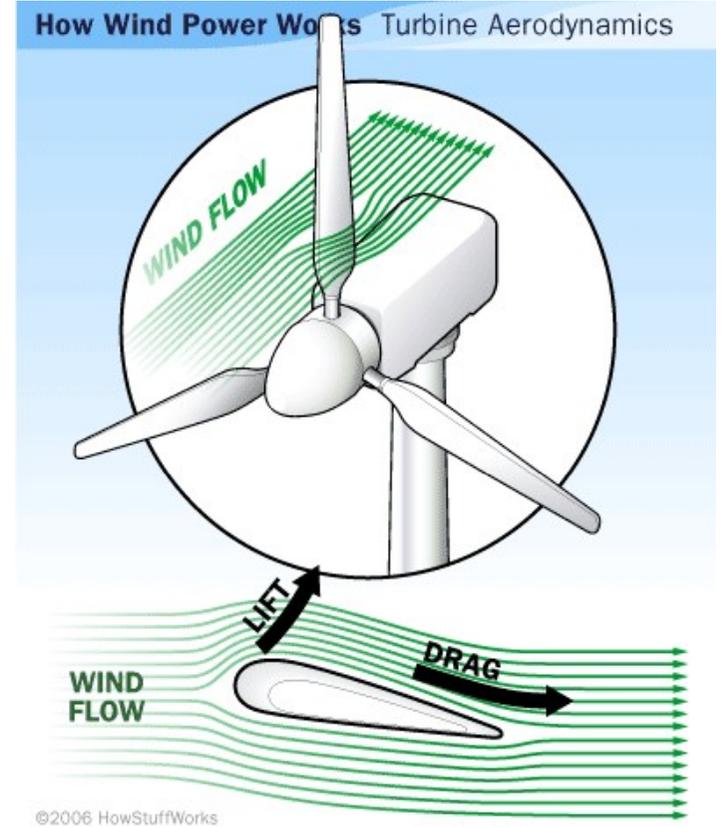
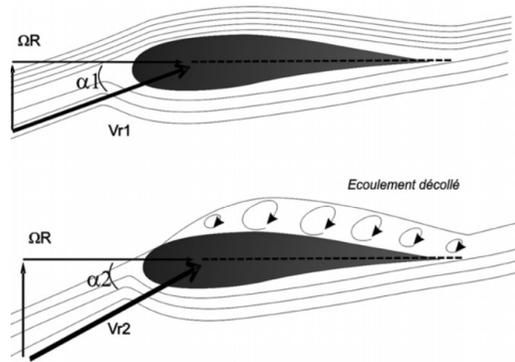
Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes



$$\alpha_{ext} < \alpha_{pied}$$



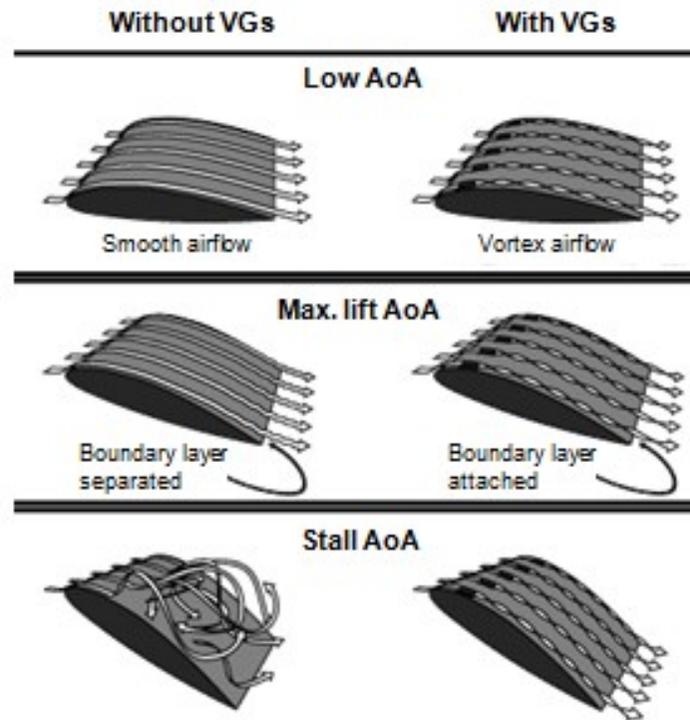
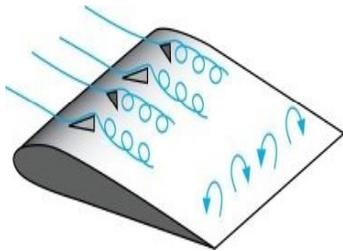
Airfoil stall



Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Airfoil stall

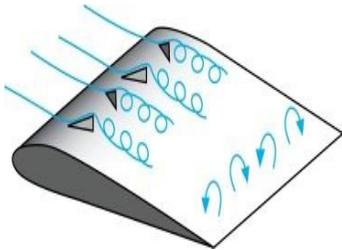
Vortex generation



Vortex generators improve blade performance by reducing flow separation

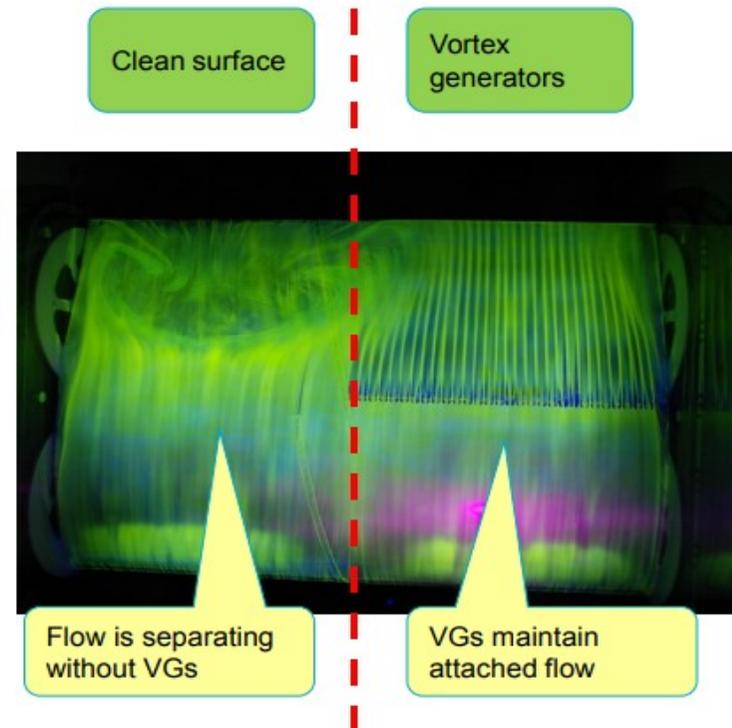
Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Airfoil stall



Compared to a clean blade, VG's typically improves AEP by 0.5% – 1% for a given wind turbine

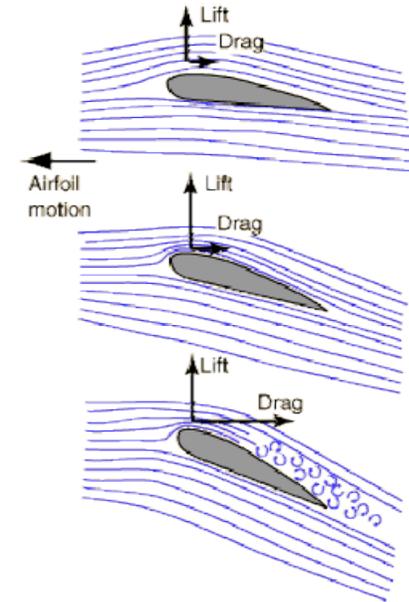
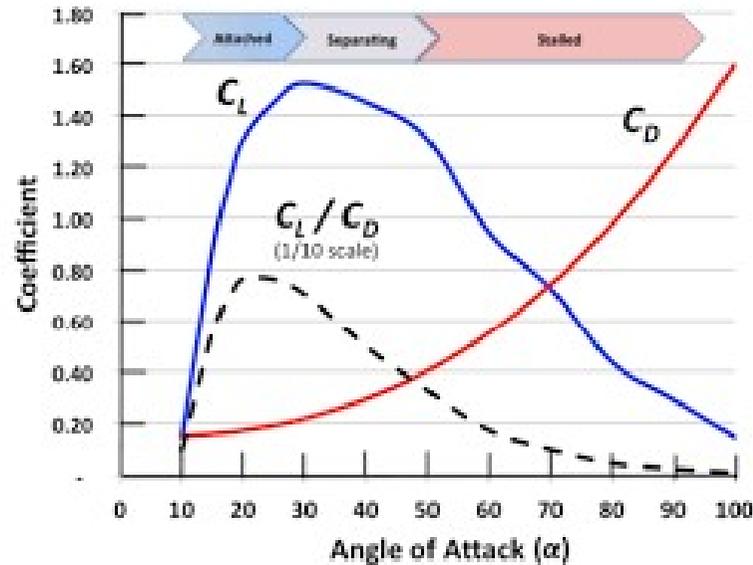
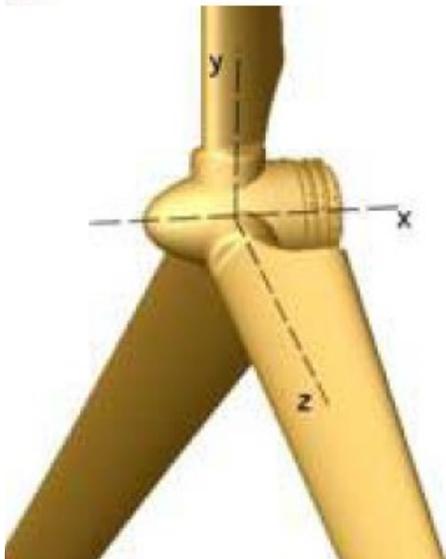
Vortex generation



L'application de VG permet d'augmenter la production d'énergie annuelle de la machine

Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

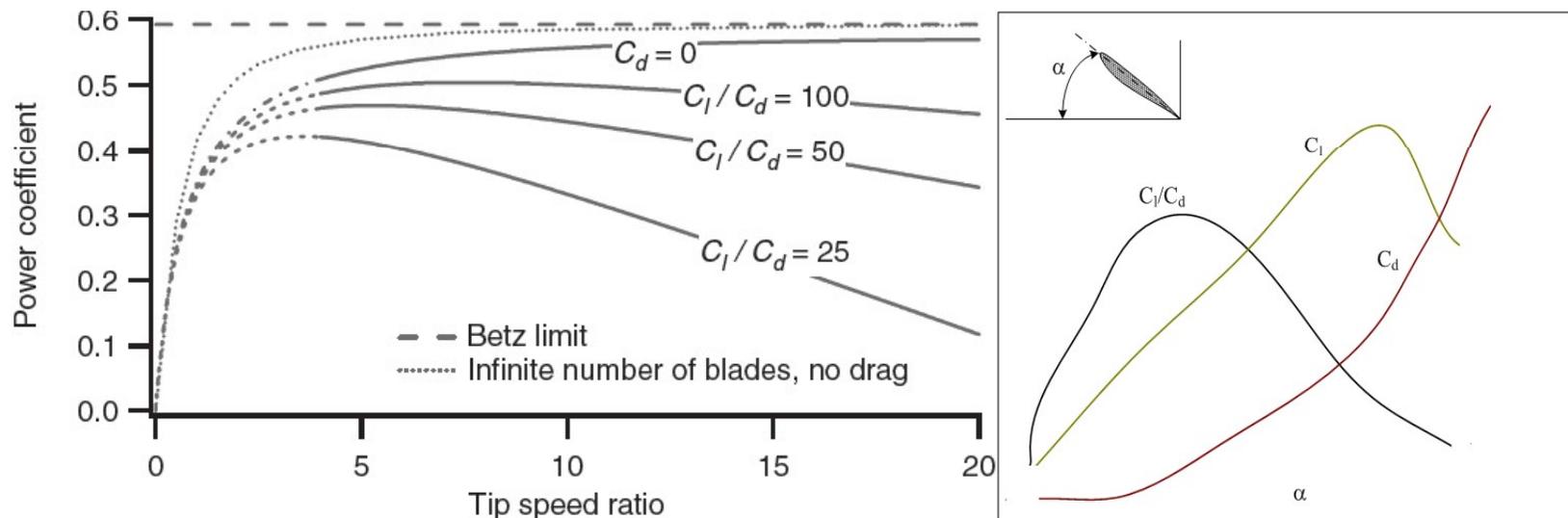
Finesse = Lift/Drag



Le choix convenable des profils aérodynamiques pour une pale donnée est déterminé par les valeurs de la finesse comme montre la figure

Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

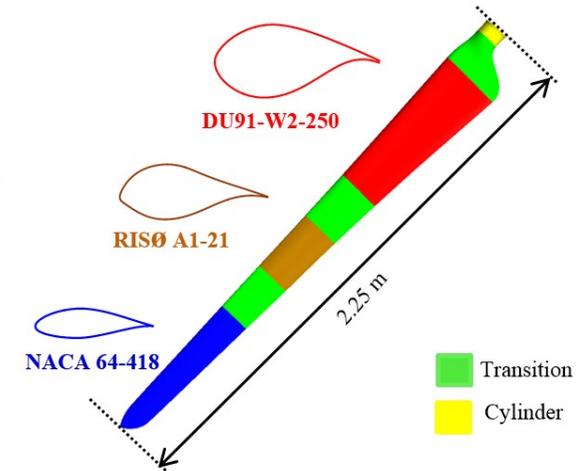
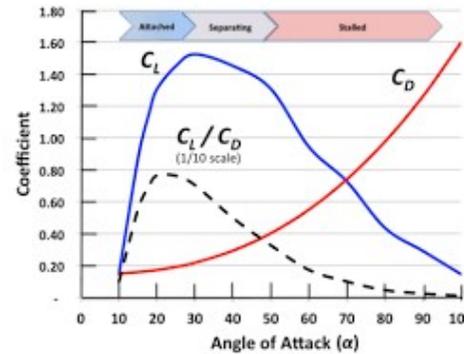
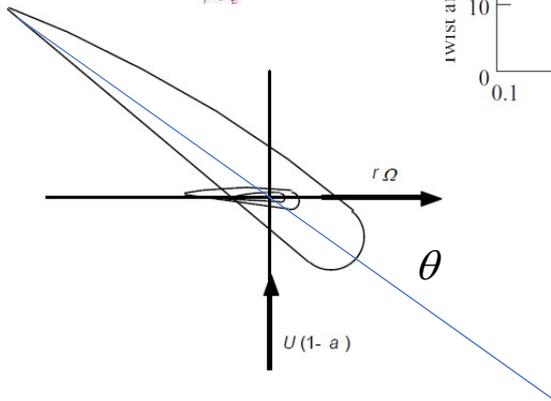
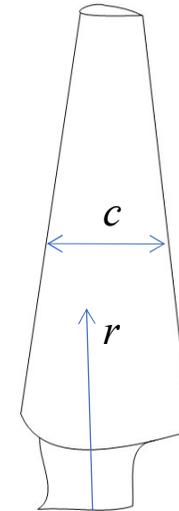
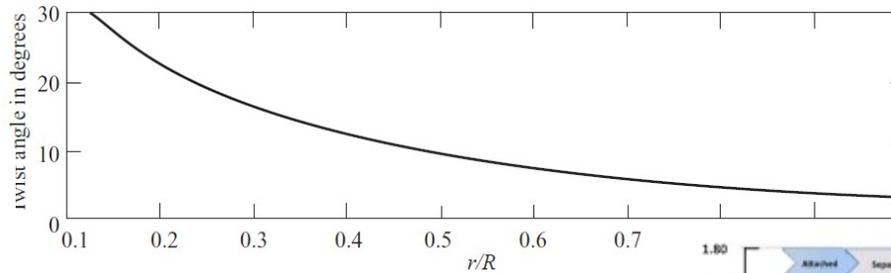
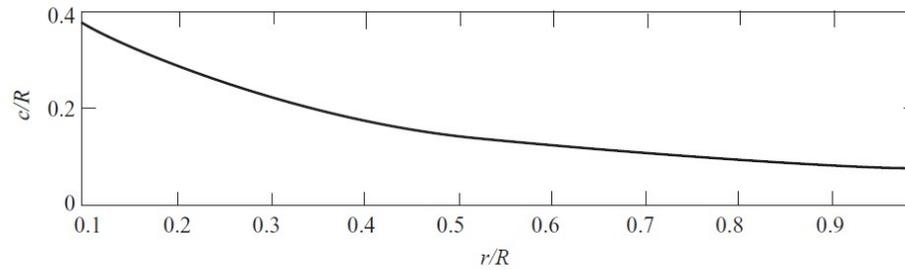
Finesse = Lift/Drag



Profile drag may reduce performance coefficient up to 40% if the ratio C_l/C_d , profile finesse, is lower (less than 30)

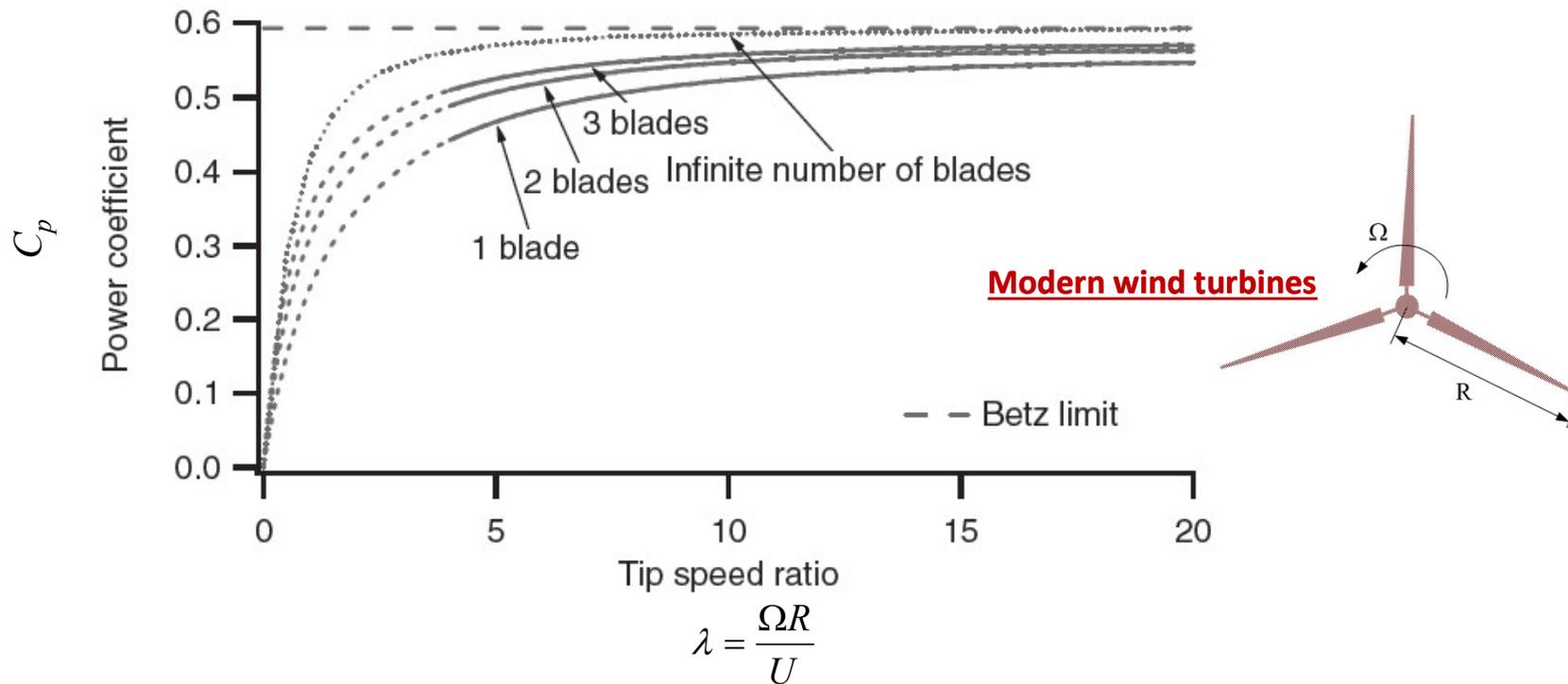
Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Turbine optimale (forme optimale de la pale, finesse élevée)



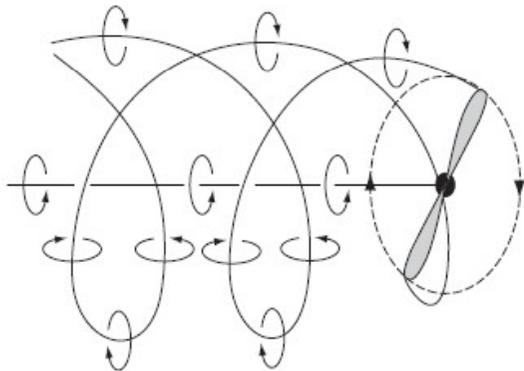
Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Turbine optimale (effet du nombre de pales)



Fiabilité aérodynamique -Turbines éoliennes

Tip losses – Turbine Wake

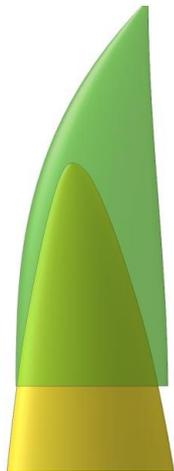


Fiabilité aérodynamique -Turbines éoliennes

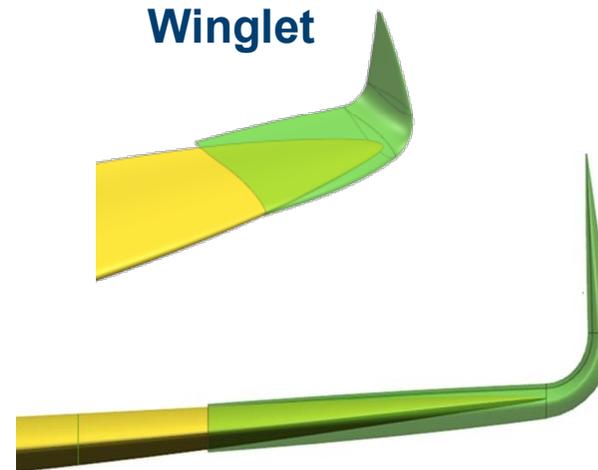
Tip losses : Innovative Tip Designs

Objectives:

- Reduction of Turbine Wake to improve total windfarm yield
- Optimize blade tip aerodynamics
- Reduction of Noise



Conventional Blade Tip



Winglet

Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Tip losses : Innovative Tip Designs



Tourbillon créé par le passage d'un avion



Fiabilité aérodynamique -Turbines éoliennes

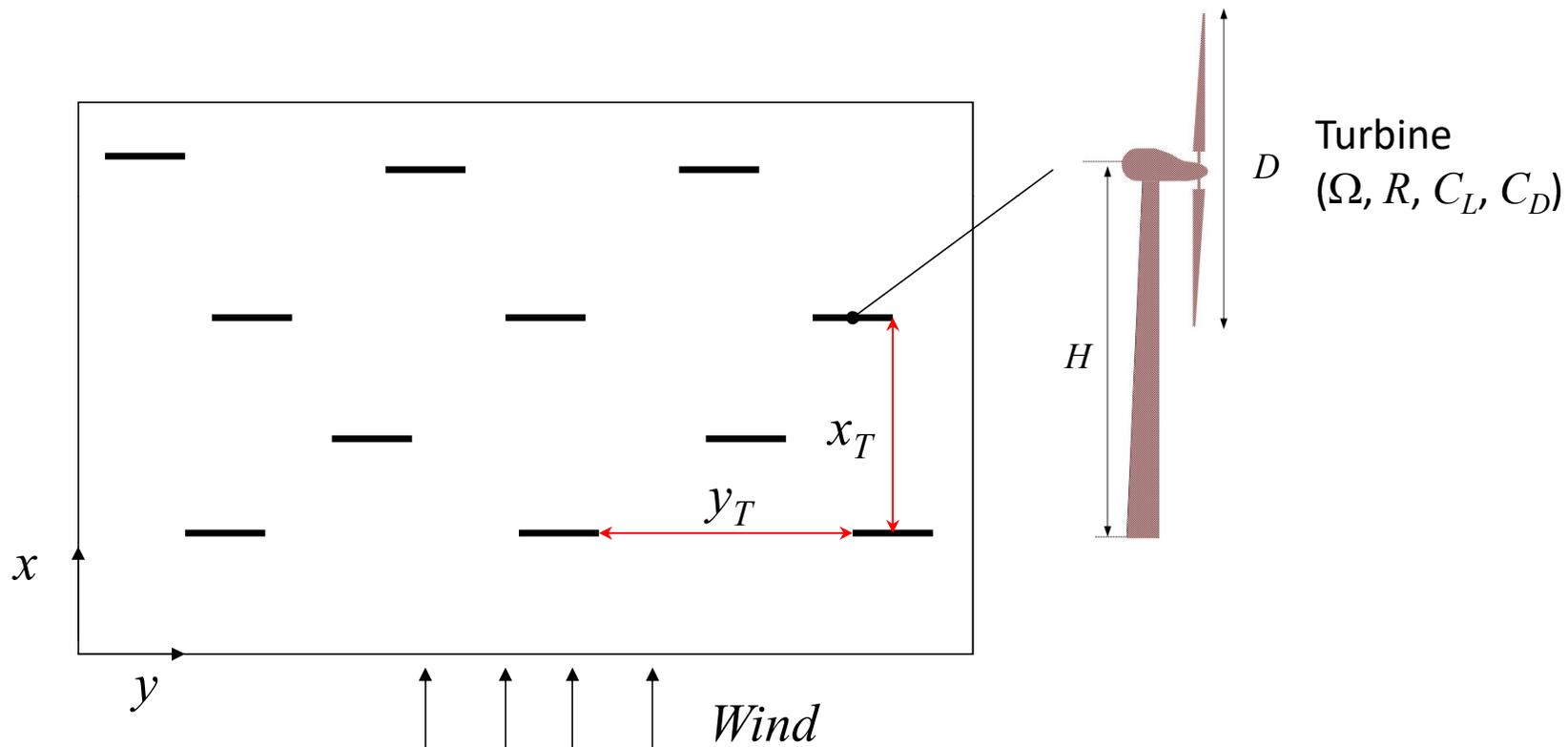
Wind farms :Turbine wake interactions



Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Wind farms : Optimisation of turbine wake interactions

Méthodes d'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs

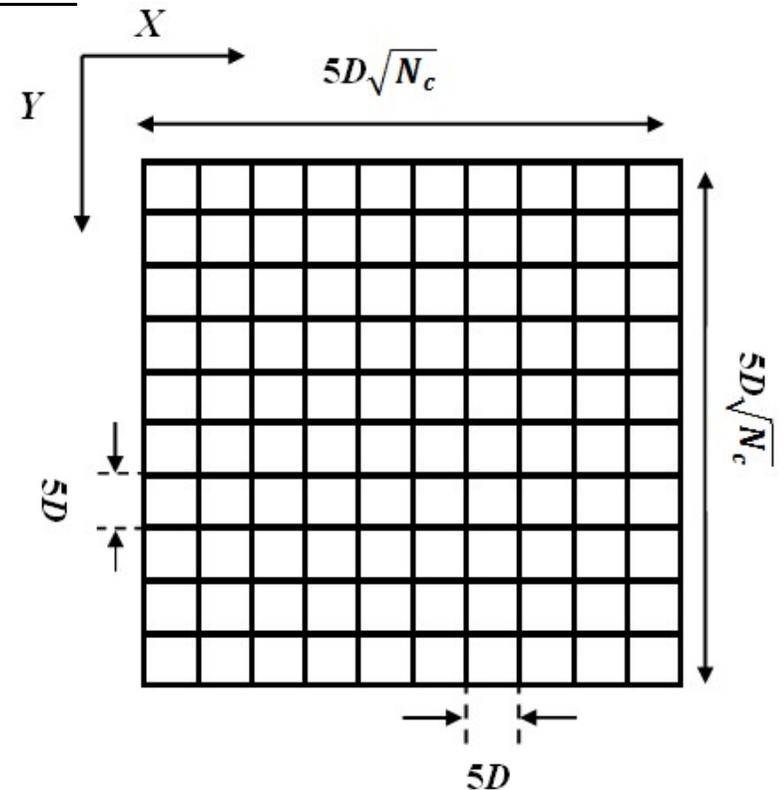


Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Wind farms : Optimisation of turbine wake interactions

Méthodes d'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs

On considère une ferme de forme carrée, subdivisé en N_c cellules identiques. Les dimensions d'une cellule donnée est $5D \times 5D$. Le centre de chaque cellule représente l'emplacement possible d'une seule éolienne au maximum.



Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Wind farms : Optimisation of turbine wake interactions

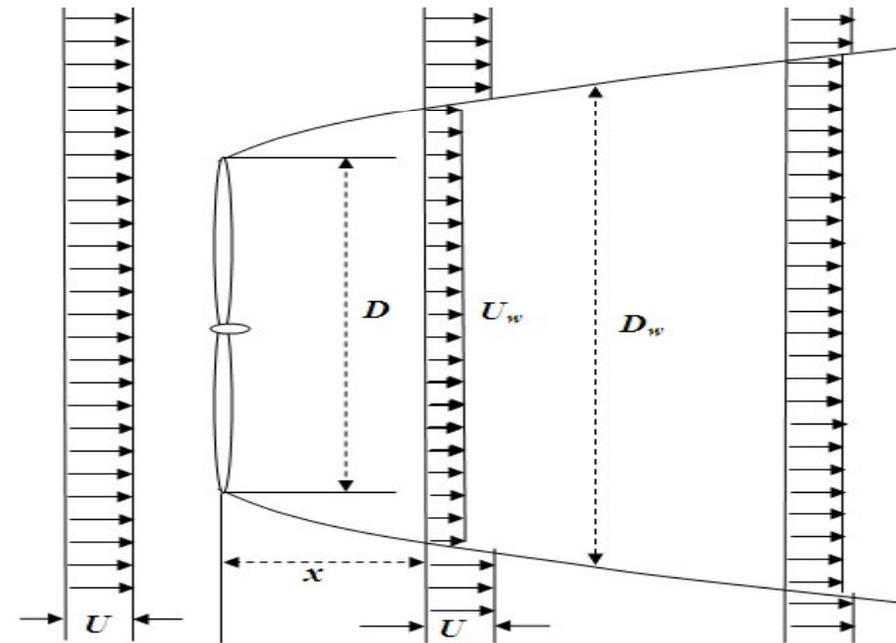
Méthodes d'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs

- Modèle détaillé traitant la turbulence atmosphérique et aérodynamique
- Le diamètre du sillage est hyperbolique :

$$D_w = D + \frac{K_1 + C_T^{0.25}}{0.833} D^{1-\frac{P}{2}} x^{0.5P}$$

- La vitesse dans le sillage :

$$U_w = U \left[1 - \frac{\sqrt{C_T}}{32} \left(\frac{1.666}{K_1} \right)^2 \left(\frac{x}{D} \right)^{-P} \exp \left(\frac{R^2}{D_w^2} \right) \right]$$



Fiabilité aérodynamique -Turbines éoliennes

Wind farms : Optimisation of turbine wake interactions

Méthodes d'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs

Des études, basées sur des méthodes poussées d'optimisation, ont démontrées que des distances de 8 à 10 D suivant la direction du vent entraînent des pertes de sillage < 10%

Configuration optimale

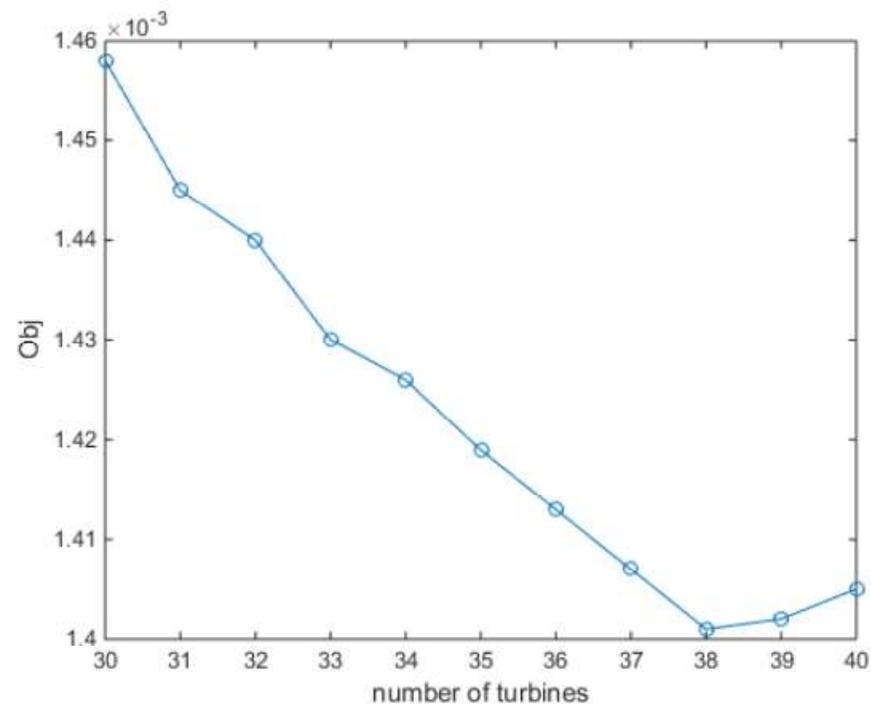
		X	X		X				
X	X							X	X
						X	X		
			X	X	X				
	X	X							X
X							X	X	
				X	X	X			
		X	X						
X	X							X	X
					X	X	X		

Fiabilité aérodynamique - Turbines éoliennes

Wind farms : Optimisation of turbine wake interactions

Méthodes d'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs

Figure indicates that the optimum number of turbines to install can be reached and which is $N=38$.



Conclusion

En somme, la fiabilité aérodynamique consiste en les éléments suivants :

1. Rotor performant permettant de convenir le maximum de puissance cinétique du vent en puissance aérodynamique (s'adaptant convenablement aux écoulements complexes d'air atmosphérique, vent turbulent et fortement fluctuant) :
 - 1.1 Profils aérodynamiques ayant une Finesse élevée.
 - 1.2 Vortex generation (faire face au décrochage aérodynamique)
 - 1.3 Winglet (réduire les pertes en bout de pale, tip losses)
2. Optimisation des Centrales éoliennes : minimisation des interférences des sillages émanant des différents aérogénérateurs, en utilisant des méthodes poussées d'optimisation et des outils de CFD (computational fluid dynamics) permettant d'optimiser la micro-localisation des aérogénérateurs dans une ferme. Par conséquent, augmentation notable de la production d'énergie annuelle (AEP) de la centrale

Merci