

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE PHYSIQUE



Thèse de Doctorat en science  
Présentée pour l'obtention du grade de docteur

En : PHYSIQUE  
Spécialité : Energétique et Mécanique des Fluides  
Par : **Salima ADJIRI épouse BOUZOUZOU**

Titre

**Influence de la stratification thermique sur le profil  
vertical du vent**

Soutenue publiquement le 09/01/24 devant le jury composé de :

<b>M. MAHFOUD Mohamed</b>	<b>Professeur de l'USTHB/FPH</b>	<b>Président</b>
<b>M. BENZAOUI Ahmed</b>	<b>Professeur de l'USTHB/FPH</b>	<b>Directeur de Thèse</b>
<b>Mme. GUERRI Ouahiba</b>	<b>Directrice de recherche du CDER</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>Mme. HADDAD Fadila</b>	<b>Docteur en science de l'USTHB/FPH</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>M. REZOUG Tahar</b>	<b>Professeur de l'USDB</b>	<b>Examinateur</b>
<b>M. BOUDIA Sidi Mohamed</b>	<b>Directeur de recherche du CDER</b>	<b>Examinateur</b>
<b>Mme. DAAOU-NEDJARI Hafida</b>	<b>Maitre de recherche /A du CDER</b>	<b>Invitée</b>

## Résumé

Le travail présenté dans ce manuscrit, porte, dans une première partie, sur la modélisation du profil vertical du vent. Dans l'objectif d'améliorer la loi d'extrapolation verticale de la vitesse du vent, un nouveau modèle de prédiction basé sur le modèle des réseaux de neurones artificiels RNA, est proposé. La seconde partie de ce travail concerne l'étude et l'analyse du développement du sillage dans la couche limite atmosphérique CLA, pour différentes conditions de stratification thermiques.

Un modèle numérique hybride est appliqué pour la caractérisation du sillage éolien. Ce modèle consiste à coupler un modèle du rotor éolien, représenté par la méthode (BEM-Disque Actif), à la technique de résolution numérique CFD. Ce modèle hybride permet d'étudier l'effet de rotation de la turbine sur le vent. Le modèle proposé est validé par des tests en soufflerie, qui ont été effectués au sein du laboratoire Dynfluid à l'école ENSAM ParisTech (France). Le prototype expérimental utilisé est une petite éolienne bipale à axe horizontal de diamètre  $D=0,1\text{m}$ .

L'application de la loi d'extrapolation du profil vertical de la vitesse du vent proposée montre que le modèle RNA proposé permet d'améliorer la prédiction de la vitesse du vent à 50 m, à partir de données mesurées à 10 m. On retrouve 0.3% d'erreur de prédiction par rapport aux mesures de la région de Kser Chellala.

D'autre part, les résultats des calculs numériques montrent que le sillage éolien est déclenché par un mécanisme important de tourbillons qui prennent naissance à l'extrémité des pales. Le sillage apparaît progressivement dans la direction axiale en aval du rotor. Les tourbillons de bouts de pales commencent à apparaître à une distance de  $2,5 D$  en aval de l'éolienne. La diffusion se produit progressivement jusqu'à ce qu'elle s'installe à  $4D$  en aval du rotor. La dissipation du sillage est observée à partir de  $7D$ . Les résultats montrent également une meilleure approximation du sillage proche, avec une erreur de l'ordre de 1.32%, et une erreur de 2.21% pour le sillage lointain. Ces erreurs sont attribuées à la contribution des forces centrifuges et de Coriolis, qui sont négligées dans la méthode BEM. Les effets de la stratification thermique sur le sillage éolien sont ensuite discutés. La génération de puissance d'une éolienne isolée est plus affectée en condition de stratification thermique stable qu'en condition de stratification thermique instable. Les variations de puissance dues à la stratification thermique peuvent contribuer à une perte de production estimée à environ 9%.

## Mots clés :

Profil vertical de la vitesse du vent, réseaux de neurones artificiels (RNA), Stratification thermique, sillage éolien, théorie de l'élément de pale, disque actif, CFD.

## ملخص

يقترح العمل المقدم في هذه المخطوطة دراسة وتحليل تطور الاستيقاظ في الطبقة الحدودية للغلاف الجوي لظروف التقسيم الطبقي الحراري المختلفة.

تمت دراسة نمذجة ملف الرياح العمودي أيضاً في الجزء الثاني من هذا العمل. بهدف تحسين قانون الاستقراء الرأسي لسرعة الرياح، تم اقتراح نموذج تنبؤ جديد يعتمد على نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية.

مقترنة بتقنية التحليل الرقمي (BEM-Actuator Disk) إن نمذجة دوار الرياح باستخدام طريقة وذلك للحصول على نموذج هجين لحل تأثير دوران التوربين على الرياح CFD.

تم التحقق من صحة النموذج المقترح من خلال اختبارات نفق الرياح، والتي تم إجراؤها في مختبر النموذج التجريبي يمثل الجزء الدوار لتوربينة رياح ENSAM ParisTech. في مدرسة Dynfluid ذات شفرتين ومحور أفقي وقطر  $D=0.1m$ .

يتم تحفيز أعقاب الرياح المرصودة بواسطة آلية كبيرة من الدوامات، التي تنشأ في الجزء العلوي من الشفرات. يظهر الاستيقاظ تدريجياً في الاتجاه المحوري أسفل الجزء الدوار. يبدأ نظام الدوامة المكون من في اتجاه مجرى النهر. يحدث الانتشار تدريجياً حتى  $D$  دوامات طرفية في الظهور على مسافة 2.5  $D$  من الجزء الدوار. ويلاحظ تبديد أعقاب من  $7D$  يستقر على بعد 4

تظهر النتائج تقريباً أفضل للنتائج في الاستيقاظ القريب بحوالي 1.32% وخطأ بنسبة 2.21% في الاستيقاظ البعيد. ويعزى هذا الاختلاف إلى مساهمة قوى الطرد المركزي وقوات كوريوليس المهملة في  $C_L$  و  $C_D$  تقييم معاملي الرفع والسحب

تمت مناقشة تأثيرات التقسيم الطبقي الحراري على أعقاب الرياح خلال هذا العمل. يتأثر توليد الطاقة لتوربينات الرياح المعزولة بشكل أكبر في ظروف التقسيم الطبقي الحراري المستقر مقارنة بظروف التقسيم الطبقي غير المستقر. يمكن أن تساهم الاختلافات في الطاقة التي يتم الحصول عليها، بسبب التقسيم الطبقي الحراري، في خسارة إنتاج الطاقة تقدر بحوالي 9%

## : الكلمات الدالة

ملف الرياح الرأسية، التقسيم الطبقي الحراري، أعقاب الرياح، نظرية العنصر النقلي، القرص النشط، عقود الفروقات

## Abstract

The work presented in this manuscript focuses, in a first part, on the study and analysis of the evolution of the wake in the atmospheric boundary layer (ABL), for different thermal stratification conditions. The modeling of the vertical wind profile is studied in the second part of this work. With the aim of improving the law of vertical extrapolation of the wind speed, a new prediction model based on the Artificial Neural Network (ANN) model is proposed.

For the characterization of the wind turbine wake, a hybrid model is applied. This model consists of coupling a model of the wind rotor, represented by the method (BEM-Actuator Disk), to the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. This hybrid model makes it possible to study the effect of turbine rotation on the wind. The proposed model is validated by wind tunnel tests carried out in the Dynfluid laboratory of the ENSAM ParisTech school (France). The experimental prototype used is a small two-bladed wind turbine with a horizontal axis of diameter  $D=0.1\text{m}$ .

The application of the vertical profile extrapolation law that proposed ANN model improve the prediction of the wind speed at 50 m, from data measured at 10 m. We find 0.3% prediction error compared to the measurements from the Kser Chellala region.

The results obtained show that the wake of the wind turbine is triggered by an important mechanism of vortices originating at the blade tips. The wake appears gradually in the axial direction, downstream of the rotor. The blade tip vortices start to appear at a distance of  $2.5 D$  downstream of the wind turbine. Dissipation occurs gradually until it settles  $4D$  downstream of the rotor. Wake dissipation is observed from  $7D$ . The results also show a better approximation of the near wake with an error of about 1.32%, and an error of 2.21% for the far wake. These errors are attributed to the contribution of centrifugal and Coriolis forces, which are neglected in the BEM method.

The effects of thermal stratification on the wind wake are then discussed. The power production of an isolated wind turbine is more affected under stable thermal stratification conditions than under unstable thermal stratification conditions. Power variations due to thermal stratification can contribute to an estimated production loss of approximately 9%.

## Keywords

Vertical wind speed profile, artificial neural networks (ANN), Thermal stratification, wind wake, blade element theory, actuator disk, CFD.

## Remerciements

Je tiens en premier lieu à dédier un grand remerciement à mes parents et ma mère en particulier, ainsi qu'à mes frères, Nassim et Hocine et ma sœur, Yasmina, qui m'ont été d'une aide précieuse et sans qui je n'aurais jamais pu accomplir ce parcours de travail.

J'aimerais également témoigner ma reconnaissance à mon Mari Abdelghani BOUZOUZOU pour sa patience à mon égard et à l'égard de mon travail.

Je remercie le Professeur Ahmed BENZAOUI, Mon Directeur de thèse, pour son soutien durant toutes ces années de travail.

Aussi, je voudrai témoigner de ma gratitude à toute mon équipe de travail au Centre de Développement des Energies Renouvelables. Particulièrement à la Division Energie Eolienne, tout spécialement à ma Directrice de Division, la Directrice de Recherche Ouahiba GUERRI, à La Doctoresse et Co autrice Hafida DAAOU-NEDJARI, à Madame Sabiha KHEDER-HADDOUCHE et à la Doctoresse Amel BOULEMTAFES-BOUKADOUM, avec qui j'ai acquis toutes mes connaissances dans le domaine Scientifique et Didactique et grâce à qui ce travail fut possible.

J'exprime par ailleurs de sincères remerciements à toute l'équipe du Laboratoire Dynfluid au sein de l'école Art et Métiers ParisTech. Je remercie en particulier le Professeur émérite Fawaz MASSOUH et le Docteur Ivan DOBREV, qui m'ont accueilli dans le laboratoire Dynfluid et qui ont facilité toutes les procédures afin de m'intégrer dans le milieu de travail. Ils ont partagé avec moi toutes les connaissances scientifiques et techniques nécessaires qui m'ont permis de publier et finaliser ce travail.

Je tiens à adresser de vifs remerciements à chaque membre de l'équipe Gisement Eolien, le Directeur de Recherche Sidi-Mohamed BOUDIA, la Doctoresse Samira LOUASSA et le Docteur Fares MEZIANE, pour avoir partagé avec moi toutes les discussions et les débats qui ont contribué à grandir mes connaissances dans le domaine de l'éolien.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury qui ont généreusement consacré leur temps à l'évaluation de ce travail. En premier lieu, je tiens à remercier le Professeur Mohamed MAHFOUD pour avoir accepté la présidence du jury. Mes sincères remerciements vont également à la Directrice de Recherche, Mme Ouahiba GUERRI, qui a accepté d'examiner ce travail et d'y apporter son expertise. Je tiens à souligner l'apport significatif du Professeur Tahar REZOUG en tant qu'examineur, ses questions pertinentes ayant contribué à valoriser cette recherche. De même, je rends hommage au Directeur de Recherche Sidi Mohamed BOUDIA, examinateur, dont l'expertise sur une partie essentielle de mon travail a souligné l'importance de cette contribution. Mes remerciements vont également à la Doctoresse Fadila HADDAD, examinatrice, pour ses corrections substantielles dans la rédaction de cette thèse. Enfin, je suis reconnaissant envers la Maître de recherche Hafida Daaou-Nedjari, invitée à la soutenance, qui a apporté des éclaircissements précieux en expliquant l'impact actuel de cette contribution dans le domaine de l'éolien.

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père.

# Tables des matières

**-Résumé**  
**-Remerciements**  
**-Dédicace**  
**-Sommaire**  
**-Nomenclature**  
**-Liste des figures**

---

## Sommaire

<b>Introduction Générale</b>	16
1-Introduction	20
2- Problématique	20
3-Structure de la thèse	22
<b>Chapitre I : l'état de l'art</b>	
I.1 Introduction	24
I.2 Modélisation du profil vertical du vent	24
I.3 Etude du sillage éolien	26
I.4 Etude du sillage éolien en soufflerie	29
I.5 Turbulence dans la couche limite atmosphérique	30
I.6 Modélisation de la nacelle	32
I.7 Etude de l'influence de l'état de stratification thermique de la CLA	32
I.8 Conclusion	34
<b>Chapitre II : Les Etats de la Couche Limite Atmosphérique</b>	
II.1 Introduction	36
1-1 La couche limite atmosphérique CLA	36
II.2 Les états thermiques dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA)	38
II.3 Profil vertical de la Vitesse de Vent	39

II.4 Mesure de la stabilité thermique	41
4-1. Longueur de Monin Obukhov	42
4-2 Profil de la température dans la CLA	44
II.5 Conclusion	45
<b>Chapitre III : Méthodologie, Modélisation Mathématique</b>	
III. 1- Introduction	47
III.2. Méthodologie	47
2.1 Modèle de Régression linéaire	47
2.2 Modèle d'un Réseaux de Neurones Artificiels RNA	48
2.3 Structure du Réseau de neurones Artificiels	49
III. 3.1 Equations de mouvement	53
3. 2-Equation de l'énergie	54
3.3- Equation d'état des gaz parfait	55
III. 4 Modélisation du rotor	55
4.1- Concept du Disque Actif	55
4.2- Théorie de l'élément de pale	56
4.3-Modèle Théorie de l'élément de pale- disque Actif	56
4. 4-Correction des pertes de bout de pale	59
4. 5-Calcul de la puissance et de la poussée du Disque Actif	59
4.6-. Modélisation de la Nacelle	60
III. 5- Modèle de Turbulence	60
5. 1-Modification des constantes du modèle de turbulence	61
III. 6-Conditions aux frontières	62
6.1-Profil du vent dans la couche limite atmosphérique	63
6 .2- Conditions sur les parois de la soufflerie	63
6 .3-Calcul du flux thermique à la paroi inférieure	64
6 .4-Calcul du coefficient de transfert superficiel	65
6.5-Estimation du flux thermique à la paroi inférieure	66
6 .5-1-Température ressentie dans le milieu	66
6 .6-Calcul de la Longueur de Mounin-Obukhov $L$	66
III. 7-Etude expérimentale par la méthode PIV	67
7 .1 -Caractéristiques de l'écoulement dans la soufflerie	68
7.2-Dispositif PIV	69

7.3-Mesure par méthode PIV	70
7.4-Caractéristiques du rotor éolien	70
III. 8- Résolution numérique	71
8.1- Domaine de calcul	71
8.2- Discrétisation du domaine de calcul	72
8.3- Etude de sensibilité du maillage	73
8.4- Schémas et Algorithme de couplage	74
III. 9- Conclusion	74
<b>Chapitre IV : Résultats &amp; discussions</b>	
IV-1. Introduction	76
IV.2-les Données d'entrée	76
2-1 Prédiction de la Vitesse verticale du vent sur le site de Kser Chellala	76
2-2 Lois d'extrapolations et Réseaux de neurones artificiels	79
2-3 Application du module de prédiction	83
IV.3-Influence de la hauteur du mât sur le développement du sillage	87
3.1-Structure du sillage	87
3.2-Interaction du sillage avec le sol	90
3.3-Profil vertical des Vitesses	92
3.4- Profil de l'énergie cinétique turbulente	94
3.5- Rattachement du sillage éolien lointain au sol	98
3.6-Calcul de performance	99
IV.4-Influence de la stratification thermique de la CLA sur le sillage	102
4. 1 Profil des vitesses en CLA stable et instable	103
4. 2 Energie cinétique turbulente k dans les cas de CLA non neutre	104
4. 3 Performance de l'éolienne en CLA non neutre	105
IV. 5 Conclusion	106
<b>Conclusion Générale</b>	109
1. Recommandations	111
2. Perspectives	114
<b>Annexe A</b>	113
<b>Références Bibliographiques</b>	121

## NOMENCLATURE

### Lettres Latines

Grandeur	Appellation	Unité
a	Paramètre du modèle de régression	
b	Valeurs du vecteur biais du RNA	
$C_R$	Constante	
$C_S$	Valeur empirique introduite par Réthoré	
$C_X$	Coefficient de la force dans la direction x	
$C_Y$	Coefficient de la force dans la direction y	
$C_{\varepsilon 1}$	Constante du modèle de turbulence	
$C_{\varepsilon 2}$	Constante du modèle de turbulence	
$C_D$	Coefficient de traînée	
$C_L$	Coefficient de portance	
$C_\mu$	Constante du modèle de turbulence	
$C_\mu^*$	Constante du modèle de turbulence modifié	
$C_{d, nac}$	Coefficient de traînée de la Nacelle	
$C_p$	Coefficient de puissance	
$c_p$	Capacité calorifique à pression constante	J/K
$c_v$	Capacité calorifique à volume constante	J/K
c	Corde	m
D	Diamètre du rotor	m
d	Diamètre du mat	m
dt	Laps de temps	s
E	Flux d'humidité	W
e	Energie interne	J
er	Erreur relative	%
F1	Facteur de correction dû aux pertes de bout de pale	
$F_{L,D}$	Force de portance, traînée appliquée sur l'élément de pale	N

$f1$	Fonction d'activation du RNA dans la couche cachée	
$f2$	Fonction d'activation du RNA dans la couche de sortie	
$f$	Paramètre de Coriolis dû à l'effet de rotation	
$f_a$	Force axiale	N
$f_x$	Composante de la force en x	N
$f_y$	Composante de la force en y	N
$f_p$	Fonction scalaire de calibration du modèle de turbulence	
$f_{body,i}$	Force aérodynamique volumique induite par le rotor	N/m <sup>3</sup>
$G_b$	Production d'énergie turbulente par effet de flottabilité	J
$Gr$	Nombre de Grashoff	
$g$	Intensité de la gravité	m/s <sup>2</sup>
$H$	Flux de chaleur	W
$H_0$	Hauteur de référence	m
$H_1$	Hauteur verticale dans la CLA	m
$h$	Hauteur du mât	m
$h_t$	Coefficient de transfert	W/m <sup>2</sup> K
$i$	Indice de l'espace-temps	
$j$	Indice d'espace distance	
$K$	Conductivité thermique	W/m <sup>°K</sup>
$K_m$	Coefficient de transfert de quantité de mouvement	
$K_h$	Coefficient de transfert d'humidité	
$K_q$	Coefficient de transfert de chaleur	
$k$	Energie cinétique turbulente	J
$k_s$	Fonction de la rugosité du sol	
$L$	Longueur de Monin-Obukov	
$L_y$	Dimension du domaine dans la direction latérale	m
$L_x$	Dimension du domaine dans la direction transversale	m
$L_z$	Dimension du domaine dans la direction axiale	m
$l$	Paramètre du modèle de régression	
$N$	Nombre de pales	

$N_u$	Nombre de Nusselt	
$n$	Fonction de correction des pertes de bouts de pale	
$P_k$	Production d'énergie turbulente	J
$P_{réf}$	Pression de référence	Pa
$P_t$	Production d'énergie turbulente par effet de cisaillement	J
$p$	Pression Atmosphérique	Pa
$q_w$	Flux de chaleur à la paroi	W
$R$	Constante des gaz parfaits	
$R^2$	Coefficient de corrélation	
$R_b$	Nombre de Richardson de volume	
$R_d$	Rapport de puissance en condition stratifiée et neutre	
$R_e$	Nombre de Reynolds	
$R_i$	Nombre de Richardson	
$R_r$	Rayon du rotor	m
$r_c$	Rayon de la nacelle	m
$S$	Surface d'échange du sol	$s^2$
$S_E$	Terme source dû aux effets de gravité	
$T$	Température de l'air ambiant	$^{\circ}C$
$TH$	Humidité relative	%
$T_a$	Température ambiante dans le domaine d'écoulement	$^{\circ}C$
$T_i$	Période de rotation du rotor	s
$T_p$	Température à la paroi	$^{\circ}C$
$T_r$	Température ressentie	$^{\circ}C$
$t$	Espace-temps	s
$th$	Epaisseur du disque rotor	m
$U_{\infty}$	Vitesse à l'entrée du rotor	m/s
$U(z)$	Vitesse axiale	m/s
$u^*$	Vitesse de friction	m/s
$u^*_{ref}$	Vitesse de friction à la hauteur de référence $H_0$	m/s
$u_i$	Vitesse tangentielle	m/s

V	Vecteur vitesse	m/s
$V_x$	Champ de vitesse dans la direction x	m/s
$V_y$	Champ de vitesse dans la direction y	m/s
W	Vitesse relative	m/s
$x_i$	Coordonnée cartésienne	m
x	Composante latérale	m
y	Composante transversale	m
$y_0$	Hauteur de rugosité de la paroi	m
$y_p$	Hauteur de la première cellule de maillage	m
Z	Longueur du domaine	m
z	Composante axiale	m
$z_0$	Hauteur de rugosité	m
$z_h$	Hauteur de la CLA	m

### Lettres Grecques

$\alpha$	Angle d'attaque du profil de la pale	
$\beta$	Coefficient de dilatation thermique	
$\Gamma$	Terme du taux adiabatique	%
$\delta\theta$	Élément d'espace dans la direction azimutale	°
$\delta r$	Élément radial	m
$\varepsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	%
$\kappa$	Constante Von Karman	
$\lambda$	Vitesse spécifique du rotor	
$\rho$	Masse volumique de l'air	Kg/m <sup>3</sup>
$\theta$	Température potentielle	°C/Pa
$\xi$	Flux généralisé	W
$\nu_t$	Viscosité Turbulente	Pa.s

$\nu$	Viscosité dynamique	
$\phi_m$	Fonction universelle pour le cisaillement du vent	
$\phi_n$	Fonction universelle pour la stratification thermique	
$\phi_\varepsilon$	Fonction universelle due à la variabilité	
$\phi_\theta$	Fonction universelle due à la variabilité en $\theta$	
$\phi_\omega$	Fonction universelle due à la dissipation d'énergie cinétique	
$\sigma_k$	Constante du modèle de turbulence	
$\sigma_s$	Constante dans l'équation du taux de dissipation	W
$\tau$	Flux de quantité de mouvement	W
$\tau_0$	Flux à la surface	W
$\tau_y$	Flux de quantité de mouvement dans la direction verticale	
$\tau_{ij}$	Contrainte de cisaillement	%
$\epsilon$	Erreur relative absolue	Tr/min
$\Omega_r$	Vitesse de rotation	
$\bar{\Omega}$	Vorticité moyenne	
$\omega_z$	Vorticité axiale	

## Acronymes

AEP	Energie de Production Annuelle
AL	Actuator Line
ANN	Artifitiel Neural Network
BEM	Blade Element Momentum
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLC	Couche Limite Convective
CLS	Couche Limite Stable

CFD	Computational Fluid Dynamic
CFL	Courant Friedrichs Lewy
CPU	Unité Centrale
DA	Disque Actif
DT	Taux de Déviation
MSE	Erreur quadratique moyenne
ONM	Office National de Météorologie
PIV	Particule Image Velocimetry
RMSE	Racine d' Erreur quadratique moyenne
RNA	Réseau de Neurones Artificiels
UDF	User Define Function

## Liste des figures

FIG I.1.	Sillage éolien derrière une machine à une distance X.....	27
FIG I. 2.	Profil axial de la vitesse dans le sillage en aval d'un rotor.....	28
FIG I. 3.	Structure du sillage. Mesures en soufflerie.....	30
FIG II. 1	Structure de la couche limite Atmosphérique (CLA) .....	37
FIG II.2	Profil vertical de la vitesse, la direction et la température potentielle dans la couche limite atmosphérique thermiquement instable .....	37
FIG. III.1	Architecture du réseau de neurones artificiels en multicouche.....	49
FIG. III.2	Fonction sigmoïde $\sigma$ (fonction logistique). .....	50
FIG. III.3	Fonction de transfert linéaire. ....	50
Schema III. 1	Algorithme du modèle RNA.....	51
Schema III. 2	Structure du réseau du RNA.....	52
FIG. III.4	Concept du Disque Actif.....	56
FIG III.5	Définition de l'épaisseur du disque Actif.....	56
FIG III. 6.	Représentation des forces aérodynamiques sur le profil d'une turbine éolienne Bipales.....	58
FIG III. 7	Projections des vitesses et des forces sur le plan de rotation.....	58
FIG.III. 8	Profil de la vitesse à l'entrée de la soufflerie. ....	62
FIG.III. 9	Conditions aux limites à chaque frontière du domaine de calcul.....	63
FIG.III. 10	Dispositif expérimental en soufflerie.....	68
FIG.III. 11	Vue schématique de la soufflerie du laboratoire DynFluid.....	69
FIG.III. 12	Position des particules dans l'écoulement.....	70
FIG.III. 13	Représentation du domaine de calcul.....	72
FIG. IV. 1	Séries de mesures N°1 et 2 : vitesse du vent à 10 et 50m de hauteur...77	
FIG. IV. 2	Série de mesures, N°3 : température T à 10 m de hauteur. ....	77
FIG. IV. 3	Série de mesure N°4 : taux d'humidité relative RH à 10 m de	
FIG. IV. 4	Signal original de données de vitesses de vent à 10 et 50m. ....	78
FIG IV. 5	Signal Corrigé de données de vitesses de vent à 10 et 50m.....	79
FIG IV. 6	Signal de mesure de données de vitesses de vent à 30 et 40 m/s d'Almas	

	.....	79
FIG IV.7	Signal des températures mesurées à 30m.....	80
FIG IV.8	Signal de l'humidité relative mesurée à 30m d'Almas.....	80
FIG IV.9	Comparaison des Signaux de prédiction (RNA) et de mesure, à 40 m de hauteur, de la station d'Almas (Iran).....	82
FIG IV.10	Erreur relative entre les valeurs mesurées et prédites à 40 m de hauteur, station d'Almas (Iran).....	82
FIG IV.11	Corrélation entre vitesses mesurées et vitesses prédites, à 40 m de hauteur, de la station d'Almas (Iran).....	83
FIG IV. 12	Comparaison des valeurs de vitesse extrapolées à 50m et les mesures sur le site de Kser Chellala.....	84
FIG IV.13	Erreurs de prédiction.....	84
FIG IV.14	Comparaison des valeurs de vitesse extrapolées à 50m sur le site de Dellys.....	86
FIG IV.15	Comparaison des valeurs de vitesse extrapolées à 50m sur le site de Timimoune.....	86
FIG IV.16	Contours des vitesses dans la direction axiale (z), aux hauteurs (h/D=0,7 et h/D=1). A- c- Expérimentals, b-d- Calcul numérique.....	89
FIG IV.17	Contours des vorticités dans la direction axiale (z), aux hauteurs (h/D=0,7 et 1). a-c- Expérimentals, b-d Calcul numérique.....	91
FIG IV.18	Lignes de courant pour différentes sections axiales en aval du rotor, à la hauteur h/D=0,7.....	93
FIG IV.19	Lignes de courant pour différentes sections axiales en aval du rotor, à la hauteur h/D=1.....	94
FIG IV. 20	Profils verticaux représentant le déficit de vitesse, à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, à la hauteur h/D = 0,7. – Données Expérimentales (o). – Résultats de Simulation (—).....	95
FIG IV.21	Profils verticaux représentant le déficit de vitesse, à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, à la hauteur h/D =1. - Données Expérimentales (+). - Résultats de Simulation (—).....	97
FIG IV.22	Variation de l'Energie cinétique turbulente à différentes sections pour h/D=0,7. a) – dans la direction latérale. b) – dans la direction radiale.....	99

FIG IV.23	Iso-vitesse dans la direction axiale de l'écoulement et Distance de rattachement dans le sillage lointain en aval du rotor.....	100
FIG IV.24	Distance de rattachement dans le sillage lointain.....	101
FIG IV.25	Comparaison des profils verticaux représentant le déficit de vitesse, à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, pour les cas stable et instable. .a)- pour $h/D=2$ . b)- pour $h/D=5$ . c)- pour $h/D=7$ .....	104
FIG IV.26	Comparaison de profils de génération de l'énergie cinétique turbulente $k$ , à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, pour les deux cas stable et instable. .a)- pour $h/D=2$ . b)- pour $h/D=7$ .....	105

# **Introduction Générale**

### 1-Introduction

Un contexte mondial d'épuisement des réserves énergétiques se présente aujourd'hui. Aussi, il est essentiel de se diriger vers des systèmes énergétiques plus efficaces et plus intelligents afin de préserver les ressources naturelles actuelles et de puiser uniquement à partir des sources d'énergie renouvelable.

D'autre part, les problèmes environnementaux exigent la mise en œuvre de nouveaux protocoles industriels, ce qui implique une réforme urgente dans le secteur de l'industrie afin de préserver les ressources planétaires [1].

Les pays développés et ceux en voie de développement sont aujourd'hui dans une position de prise de décision ; où réduire la consommation énergétique et les effets de pollution, doivent être imposés dans tous les secteurs de l'industrie, afin d'assurer la sécurité énergétique et économique de l'humanité dans l'avenir. D'où le recours aux énergies renouvelables et notamment à l'énergie éolienne.

Au cours des dernières décennies, les parcs éoliens sont devenus de plus en plus importants et sophistiqués. La taille moyenne des parcs éoliens a augmenté, passant de quelques éoliennes à des centaines de turbines dans un même parc. En 2021, le parc de Gansu en Chine était le plus grand parc éolien du monde, avec une capacité installée totale de 7 965 MW.

L'Algérie compte suivre cet exemple de développement avec l'installation de fermes éoliennes d'envergure [2].

Le développement des parcs éoliens ne peut être envisagé sans une évaluation des ressources éoliennes disponibles. Global Wind Atlas est l'actuel Atlas mondial de gisement éolien élaboré dans le cadre d'un projet International de l'Université de Technologie du Danemark [3], Cette interface identifie la majorité des régions du monde et exprime les valeurs d'un ensemble de grandeurs qui caractérisent le potentiel éolien in situ.

Par ailleurs, plusieurs travaux à travers le monde ont étudié le potentiel éolien [4]. En Algérie, le Centre de Développement des Energies Renouvelables est l'acteur principal dans le domaine de la recherche pour le développement des énergies renouvelables et parmi ses axes de recherche, est inscrit l'étude du gisement éolien sur l'ensemble du territoire national. Il compte à son actif, plusieurs Atlas éoliens de l'Algérie, parmi eux l'Atlas éolien de N. Kasbadji [5], l'Atlas de F. Chelali et al. [6], l'Atlas de S.M. Boudia et al. [7] et en dernière date, l'Atlas de H. Daaou-Nedjari et al. [8].

### 2- Problématique

La conception, la construction et l'exploitation d'un parc éolien sont des opérations complexes qui peuvent rencontrer des défis et des contraintes. Elles nécessitent une

## Introduction Générale

gestion minutieuse pour assurer leur succès [9]. L'optimisation de la conception et de l'exploitation des parcs éoliens peut aider à maximiser la production d'énergie éolienne et améliorer la fiabilité des éoliennes.

Pour évaluer l'énergie éolienne produite, la puissance de sortie de l'éolienne est calculée en considérant la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à la hauteur de chaque machine est donc essentielle, compte tenu de l'impact direct qu'elle peut avoir sur l'investissement financier et la stabilité et la sécurité du réseau électrique local.

D'autre part, les parcs éoliens sont sous l'influence permanente de la turbulence atmosphérique, ce qui peut entraîner des problèmes de fonctionnement des éoliennes. Il existe plusieurs types de turbulences dans la CLA qui peuvent affecter les performances des parcs éoliens, telles que les turbulences mécaniques causées par les mouvements du vent sur les surfaces inégales de la Terre, comme les collines, les arbres et les bâtiments. Ces turbulences peuvent perturber la vitesse et la direction du vent qui atteint les éoliennes. Il y a aussi les turbulences thermiques causées par les différences de température entre le sol et l'air à différentes altitudes. Ces turbulences peuvent générer des mouvements d'air verticaux à même d'affecter les performances des éoliennes, c'est pour cela que des méthodes de calcul très performantes sont utilisées afin de modéliser ces mouvements et réduire l'influence de la turbulence.

Pour minimiser l'impact des turbulences sur les performances des parcs éoliens, des modèles et des simulations numériques peuvent être utilisés pour prédire les conditions de vent dans la CLA. Des techniques d'optimisation de la disposition des éoliennes et de contrôle de leur orientation peuvent également être utilisées pour minimiser les effets des turbulences [10]. La disposition des éoliennes dans un parc éolien peut avoir un impact important sur leur performance en présence de turbulences. Des études ont montré que des dispositions non-alignées des éoliennes peuvent réduire les effets de la turbulence en minimisant les interactions entre les éoliennes et en permettant au vent de se rétablir plus facilement après avoir traversé une éolienne. Plusieurs approches d'optimisation ont été proposées pour déterminer la disposition optimale des éoliennes dans un parc éolien, notamment en utilisant des algorithmes génétiques ou des simulations numériques [11].

Dans ce travail nous adoptons deux démarches afin de définir le profil vertical du vent dans la CLA :

-Les modèles physiques

-Les modèles d'intelligence artificielle (MIA).

Ces modèles nous permettront d'étudier l'influence de la stratification thermique sur le rendement d'un rotor éolien isolé.

### **3- Structure de la thèse**

Ce travail de thèse se compose de quatre chapitres, il se structure ainsi :

Chapitre premier : dans ce chapitre l'état de l'art sera fait à propos des théories qui ont contribué à construire les modèles des traitements du sillage éolien. Un nouveau modèle de réseau de neurones artificiel, pour approcher les lois classiques de distribution du profil vertical du vent, sera développé. Par la suite, l'influence des effets de l'état de la couche limite atmosphérique sur le développement du sillage éolien sera mis en revue jusqu'à ce jour.

Chapitre second : ce chapitre résume les phénomènes induisant l'évolution de la stratification thermique dans la CLA. La structure de l'Atmosphère terrestre a été développée ainsi que l'évolution des couches intermédiaires qui composent la CLA.

Chapitre Trois : il sera question de développer la méthodologie, la modélisation mathématique ainsi que la résolution numérique de chaque problème étudié. Divisé en deux parties, il abordera dans la première partie une nouvelle loi d'extrapolation des vitesses de vent mesurées à 10m de hauteur à une hauteur de 50m. Cette loi utilise un modèle de Réseaux de Neurones Artificiels RNA. Dans la deuxième partie, la théorie de l'élément de pale suivi du modèle du disque actif et du modèle hybride BEM-Disque actif couplés à la technique CFD, seront développés. La méthodologie numérique adoptée pour le traitement et la résolution du sillage éolien pour un état de la couche limite atmosphérique neutre, sera présentée. Le logiciel Fluent® sera utilisé pour la résolution numérique de l'équation du mouvement ainsi que l'équation de l'énergie. Le dispositif expérimental de la soufflerie ainsi que la méthode de mesure PIV est également présentée dans cette partie.

Chapitre quatre : ce chapitre regroupera l'ensemble des résultats et la discussion de ces derniers en ce qui concerne le développement du modèle RNA pour l'extrapolation des vitesses de vent ainsi que l'étude du développement du sillage éolien en aval du rotor bipales, dans le cas d'une CLA avec une stratification thermique neutre, stable et instable.

La Conclusion Générale comporte une synthèse du travail effectué ainsi que des éléments de réponse à la problématique posée.

# Chapitre I

## Etat de l'art

## **I-1 Introduction**

Au vu du développement impressionnant qu'elle a connu ces dernières années, l'énergie éolienne peut, à elle seule, produire des centaines de kWh sur un site donné. Des expériences de fermes éoliennes à travers le monde ont vu le jour et ont réussi à atteindre leurs objectifs [12]. L'Algérie compte suivre cet exemple de développement avec l'installation de deux fermes éoliennes de grande envergure.

L'une des difficultés rencontrées dans ce type d'installation est l'optimisation de l'emplacement des turbines afin d'éviter d'éventuelles pertes d'énergie, à cause du sillage qui se développe en aval de chaque rotor éolien, ainsi que pour préserver les machines de la fatigue qui survient souvent à cause d'une trop grosse charge et du décrochage aérodynamique [13].

L'étude de l'interaction des rotors éoliens avec l'écoulement de la couche limite atmosphérique ainsi qu'entre deux machines adjacentes est un point crucial dans l'étude et l'analyse des parcs éoliens. Le développement du sillage éolien et la turbulence qu'il induit au sein d'un parc peut contribuer à l'optimisation de la production de l'énergie éolienne. Il est ainsi important de comprendre toute la phénoménologie de l'écoulement turbulent en aval d'un rotor éolien [14].

Le sillage éolien qui apparaît se caractérise par deux régions distinctes à savoir le sillage proche et la zone du sillage lointain. Cet état de perturbation favorise un fonctionnement instable du rotor éolien, aussi nombre d'études se sont penchées sur le sujet de l'analyse et de l'exploration de la structure détaillée du sillage éolien [15]. Ce problème est lié à la structure de la couche limite atmosphérique, où d'importants phénomènes de stratification thermique se produisent et provoquent ainsi des modifications du profil vertical du vent et influencent le fonctionnement de l'éolienne.

Ce chapitre présente une revue des modèles de prédiction du profil vertical de la vitesse du vent. Par la suite, on présente l'état de l'art sur les différentes méthodes d'analyse du sillage éolien en aval du rotor ainsi que sur les modèles de turbulence existants, utilisés dans ce domaine. Une revue des modèles de traitement de l'influence de la stratification thermique dans la couche limite atmosphérique (CLA) sera également effectuée.

## **I.2 Modélisation du profil vertical du vent**

L'évaluation de la production des parcs éoliens est dépendante de la prédiction du potentiel éolien présent dans la région. La prédiction du potentiel reste très sensible à la qualité des données obtenues au cours des campagnes de mesure. D'un autre côté l'énergie éolienne produite est prédite à la hauteur du moyeu, pour le calcul de la puissance de sortie de l'éolienne. De ce fait, l'extrapolation verticale de la vitesse du vent a reçu une attention croissante au cours de ces dernières années,

compte tenu de l'impact direct qu'elle peut avoir sur les investissements mis en jeu et sur la stabilité et la sécurité du réseau électrique local.

Les différents modèles pour la prédiction à long et court terme se déclinent en cinq groupes : (i) les modèles physiques [16] ; (ii) les modèles statistiques conventionnels ; (iii) les modèles de corrélation spatiale ; (iv) les modèles d'intelligence artificielle (MIA) (dont les modèles d'apprentissage inspirés du cerveau humain, comme la SOM (self organizing map), le ML (machine learning) ou encore plus largement utilisés les réseaux de neurones artificiels avec rétro-propagation [17] ; (v) les modèles de prédiction hybrides.

Les modèles physiques utilisés à ce jour sont des modèles d'extrapolation comme la loi de puissance, la loi logarithmique et le modèle de Deaves and Harris. Employés dans des travaux de prédiction de la production de parcs éoliens, ils ont montré des limites dans l'extrapolation des données vent. La loi logarithmique n'est valable que dans l'intervalle de hauteur compris entre 10m et 50m. Le modèle de Deaves Harris montre de bons résultats pour des hauteurs comprises entre 10m et 80m mais son utilisation reste limitée à cause de l'évaluation de certains paramètres essentiels comme la rugosité et la vitesse de friction. La loi de puissance reste la plus exploitée dans les applications éoliennes dans près de 73.5% des cas d'étude [18].

La prédiction des valeurs manquantes ainsi que l'extrapolation dans un domaine inconnu, ont adopté de nouvelles techniques d'Intelligence Artificielle (IA). Développées dans les années 40, elles ont été utilisées dans plusieurs domaines et applications [19]. Les bases fondamentales de ces techniques sont inspirées du schéma de fonctionnement des neurones humains. Dans le domaine de prédiction de la production d'énergie éolienne, les données de vent, de plus en plus importantes et dotées d'un comportement non linéaire, peuvent être assimilées à un problème de big data où des techniques d'apprentissage peuvent nous aider, dans un souci de précision et de stabilité des résultats, à améliorer la prédiction. Les modèles de réseaux de neurones artificiels ont été introduits dans l'objectif de prendre en charge de grandes bases de données, ils forcent le signal de donnée à approcher les résultats expérimentaux plus rapidement. Cependant très sensibles à l'intermittence des données, des critères de performance sont évalués rigoureusement afin d'approcher la solution.

Entre 2011 et 2019, un intérêt croissant pour les modèles de prévision de l'énergie éolienne a été observé. Depuis la publication du premier article sur la prévision de l'énergie éolienne en 1984 [18], plusieurs approches ont été proposées pour utiliser les mesures de la vitesse du vent afin de prédire la puissance de sortie des parcs éoliens. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) offrent une méthode de prévision de l'énergie éolienne plus précise, qui peut également fournir des informations sur l'incertitude des prévisions. Les RNA sont entraînés à partir de données enregistrées sur l'énergie éolienne pour apprendre la relation entre l'entrée et la sortie de l'énergie éolienne. Les méthodes les plus populaires pour la prévision de l'énergie éolienne

sont la machine d'apprentissage extrême (ELM) et le réseau de neurones à rétropropagation (BPNN). Des travaux ont été effectués en Algérie pour prédire la vitesse du vent à une hauteur de 50m en utilisant un modèle de prédiction basé sur les réseaux de neurones artificiels. Ce modèle a été développé à partir d'une base de données d'entrée à 10m d'altitude et a permis de comparer les résultats d'extrapolation de la vitesse de vent avec les résultats obtenus par des lois physiques. Cette approche a permis de développer un modèle d'extrapolation de la vitesse qui peut être utilisé pour prédire la vitesse du vent sur d'autres sites [20].

Plus récemment, une approche par réseaux de neurones artificiels a été utilisée pour prédire le coefficient de cisaillement afin d'extrapoler la vitesse du vent dans un site. Cette approche combine la loi de puissance et les RNA validés par des mesures du même site pour améliorer les performances de prédiction. L'apprentissage automatique (Machine Learning ML), utilisé dans une étude aux Etats Unis, a montré une amélioration de 15 à 20% des résultats de l'extrapolation verticale des vitesses de vent. Ce modèle s'avère plus efficace que les lois traditionnellement utilisées, surtout en conditions thermiques stables. Les RNA sont également présents dans l'intégration de l'énergie éolienne dans le système de réseau électrique avec la prévision de la vitesse du vent à court terme. Un autre apport innovant dans l'évaluation des vitesses de vent et de l'énergie éolienne qui a augmenté la précision du modèle RNA utilisé, est le concept de pré-traitement du signal d'entrée par une transformation des inputs en sous série de composantes stationnaires avant la prédiction. Récemment une nouvelle combinaison d'algorithme d'optimisation et une technique de prétraitement a été mise en œuvre afin d'éliminer le bruit redondant des vitesses du vent, et pour augmenter la précision et la stabilité du module de prévision [21].

Les modèles basés sur l'IA, sont très performants, cependant leur utilisation est très sensible à l'architecture du modèle utilisé ainsi qu'au pré-traitement des données d'entrées (élimination des bruits blancs) intégrées dans le calcul. Les critères de performance utilisés dans ces modèles montrent des incohérences, ce qui conduit à effectuer de nombreux tests de calculs.

### **I.3-Etude du sillage éolien**

L'étude de l'interaction du sillage des rotors éoliens avec l'écoulement dans la couche limite atmosphérique CLA se révèle d'une extrême importance compte tenu de toutes les contraintes mécanique et thermique mises en jeu. Il est ainsi primordial de bien connaître la structure de la CLA et les modifications de l'écoulement qui s'y développent. Le sillage qui apparait se caractérise par deux régions distinctes de sillage proche et sillage lointain. La zone de sillage proche est caractérisée par des vortex qui se forment à la base et en bout de pale et dont l'intensité est variable créant ainsi une nappe de tourbillons marginaux, de mouvement hélicoïdal, qui s'entremêlent à des tourbillons de faible amplitude qui se créent à l'extrémité de la pale. La zone de sillage lointain est caractérisée par une

atténuation de la structure tourbillonnaire précédente en laissant place à l'interaction du sillage avec l'écoulement atmosphérique plus turbulent dans cette zone. Cet état de perturbation favorise un fonctionnement instable du rotor éolien, aussi nombre d'études se sont focalisées sur la compréhension et l'exploration de la structure détaillée du sillage éolien. Cependant, les difficultés rencontrées à ce sujet sont importantes. Beaucoup de contraintes liées aux conditions atmosphérique, environnementale, topographique et de dimension de l'espace où se développe le sillage, rendent l'étude plus complexe.

Mortensen et al. (1993) [22], définit le déficit de vitesse induit par le sillage éolien et propose une loi linéaire pour le calcul de la distance entre les éoliennes, afin de minimiser les pertes dues au sillage (FIG I. 1). Il donne la formule suivante :

$$V = \left[ 1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) \left( \frac{D}{D + 2kX} \right)^2 \right] \quad (I.26)$$

Avec k constante de retard :  $k = A' / \ln(h/z_0)$ , et  $A' = 0,5$ .

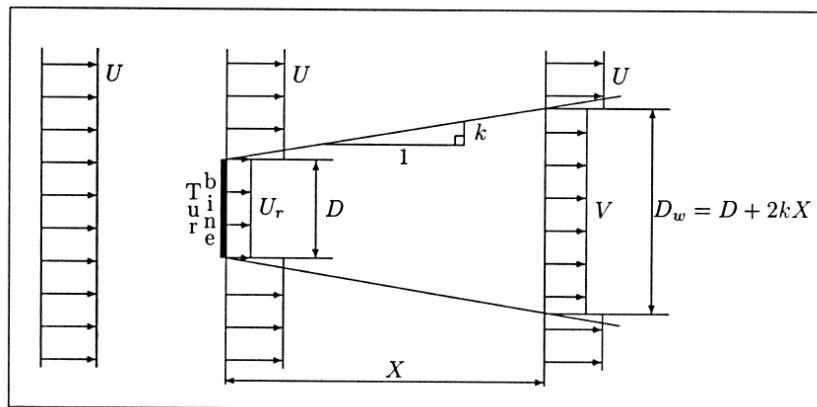


FIG I. 1. Sillage éolien derrière une machine à une distance X. [22]

Par la suite, le développement qu'ont connu les méthodes de résolution numérique, a encouragé la recherche à s'intéresser à l'étude du sillage éolien, par la résolution des équations du mouvement non linéaire, avec les techniques numériques. Ces méthodes deviennent complémentaires aux tests expérimentaux.

Le traitement et l'étude du sillage a évolué depuis la théorie de Lanchester en 1915, la théorie de l'élément de pale-quantité de mouvement s'est développée avec Glauert, 1935 [23], un nombre important de modèles issus de l'ingénierie ont suivi cette théorie [50]. Bien que ces modèles aient permis une grande avancée pour l'élaboration de la loi de développement du déficit de la vitesse dans le sillage proche, ils restent cependant, insuffisants.

Il fallait recourir aux lois de la physique fondamentale car certains phénomènes ne pouvaient être observés ni expliqués par des modèles simplifiés. En effet, le calcul

par des modèles utilisant les équations fondamentales de la mécanique des fluides et résolues par les méthodes numériques connues, communément appelées méthodes CFD, a grandement été appliqué ces dernières années. De nombreux travaux ont fait évoluer cette nouvelle méthode, dont [24], mais toujours est-il que d'importants moyens de calcul, qui ne sont pas toujours à la portée des laboratoires de recherche, doivent être mis en œuvre pour simuler numériquement un parc éolien entier avec une géométrie réelle de l'aérogénérateur. L'ambition de réduire le coût ainsi que le temps de calcul est apparu par l'utilisation des modèles hybrides qui, en modélisant les forces aérodynamiques (force de poussée et couple) combinées à la théorie de l'élément de pale et en les couplant aux équations de Navier – Stokes en tant que termes sources dans les équations, a permis de représenter le rotor éolien en tant que disque actif de rayon égal à celui du rotor. Ainsi un gain de temps et de coût en résultat [25]. Le premier modèle utilisé dans ce contexte a été introduit par Sørensen et Myken [26], par la suite plusieurs autres travaux ont suivi. Porté Agel et al [27] ont comparé des résultats de mesures expérimentales avec trois différentes approches du modèle hybride à savoir actuateur disque sans effet de rotation, avec force axiale et de rotation ainsi que le modèle de ligne active. La comparaison de Porté Agel a mis en évidence l'efficacité du modèle de ligne active en ce qui concerne le sillage proche et lointain. Il a entrepris également l'étude d'un parc éolien où il a simulé différentes dispositions de turbines afin d'améliorer l'efficacité. Les modèles AD-R et AL ont montré une très bonne concordance avec les mesures. Sorensen [25], a proposé un modèle hybride basé sur le concept de ligne active. Il a déduit la position des tourbillons d'extrémité sur la pale, qui est représentée sous forme de points sur les profils de vitesse (FIG I. 2). Comme on peut le voir, ils sont généralement situés à mi-chemin entre le sillage et l'écoulement extérieur, à l'endroit où le gradient de la vitesse axiale atteint sa valeur maximale.

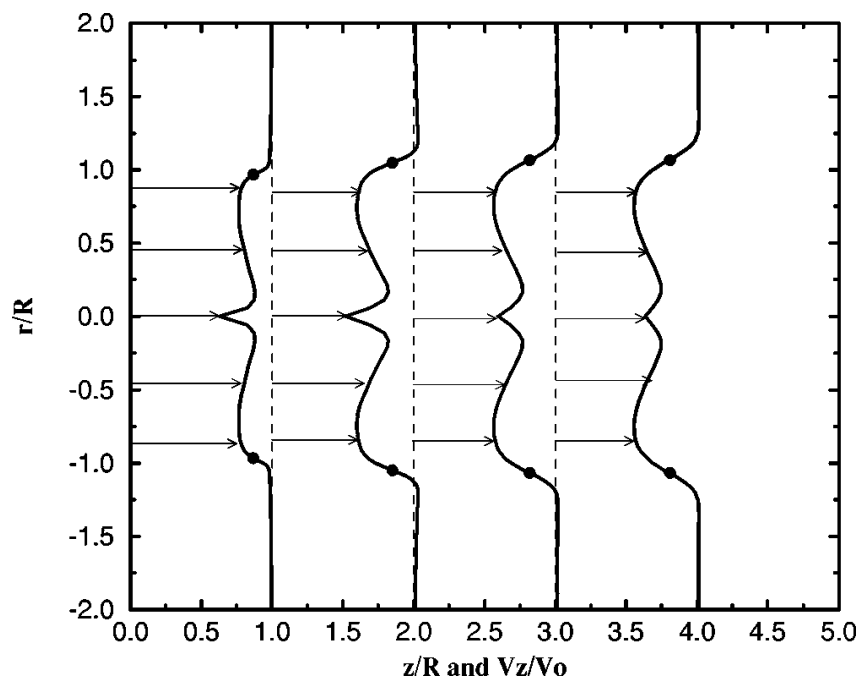


FIG I. 2. Profil axial de la vitesse dans le sillage en aval d'un rotor. [25]

B. Sanderse et al [27] ont présenté une revue de travaux de modélisation par modèle hybride. Quatre approches de la méthode ont été recensées à savoir Self-similar solutions (thrust coefficient), Quasi one-dimensional momentum theory (AD-BE), Free/fixedvorticitysheet (surface mesh), Volume mesh, Euler/RANS/LES (Actuator disk/line/surface-Volume mesh). Ils ont mis en lumière les deux nouvelles méthodes largement utilisées ces dernières années dont la méthode du disque actif généralisé (generalized Actuator disk) et la méthode directe (direct method) qui consistent à coupler les modèles du rotor actif aux équations de dynamique de fluides de manière directe ou externe car le couplage fait intervenir en grande partie la turbulence du milieu à cause de l'interaction avec la couche atmosphérique. Il a cité notamment les travaux de Crepsio pour le modèle RANS et l'utilisation de la loi logarithmique pour la description de la couche limite atmosphérique. Le disque actif employé était uniformément chargé, il a décrit la force qu'exerçait le rotor sur le vent à travers la force de poussée (Thrust) et le coefficient de poussée  $C_T$ . Tandis que le modèle non uniformément chargé décrit la force en fonction de la position radiale sur le disque, l'expression des forces aérodynamiques étant écrite à partir des coefficients de portance et de traînée selon l'angle d'attaque. Plus tard, le modèle du disque actif s'est développé avec description du problème par la ligne active [28] ainsi que par la surface active [29]. Cependant, dans ces modèles, il n'est pas question de résoudre l'équation de la couche limite autour de la pale.

### **I.4 Etude du sillage éolien en soufflerie**

Les études de validation s'avèrent très importantes que ce soit en soufflerie ou en atmosphère réelle. Les études en laboratoire (en soufflerie), à partir de modèle réduit et dans des conditions de couche limite recréées pour l'expérience, demandent des méthodes d'exploration et de visualisation de l'écoulement assez précises. La technique de la vélocimétrie par image de particules ou PIV (Particle Image Velocimetry) est l'une des plus utilisées et efficace dans l'exploration des systèmes rotatifs. Plusieurs travaux peuvent être cités dans ce contexte [30]. L'expérience a montré que des tourbillons de bout de pale et de la base de la pale existent, dans la zone de sillage proche, où ces tourbillons sont bien distincts en bout de pale mais s'avèrent très diffusifs à la base. Les méthodes de visualisation (PIV, fils chaud) (FIG I. 3), quoique très précises ne captent pas tous les petits vortex qui se forment [31]. Récemment, des travaux menés par J. Hong et al [30] ont mis en évidence expérimentalement les structures du sillage éolien et ont permis d'observer des vortex de bout de pale à partir du mouvement des particules de neige dans l'atmosphère, et cela à grande échelle. Les résultats obtenus ont mis en évidence la structure et l'évolution des tourbillons de bout de pale, leur structure, leurs caractéristiques et leurs empreintes sur l'écoulement atmosphérique (formation de zone de vide au-dessus des vortex). Ils mettent en évidence également les vortex, moins énergétiques, qui se développent le long de la pale avec un temps de diffusion très court et qui ont été très rarement visualisés par le passé. Cette étude a été mise en œuvre pour un seul aérogénérateur éolien de 2.5 MW de puissance, mais a permis

cependant d'observer l'écoulement à travers tout un parc éolien, le but étant d'optimiser les pertes d'énergie à travers une étude du sillage et donc l'emplacement des aérogénérateurs, deviendrait plus coûteux à mettre en œuvre.

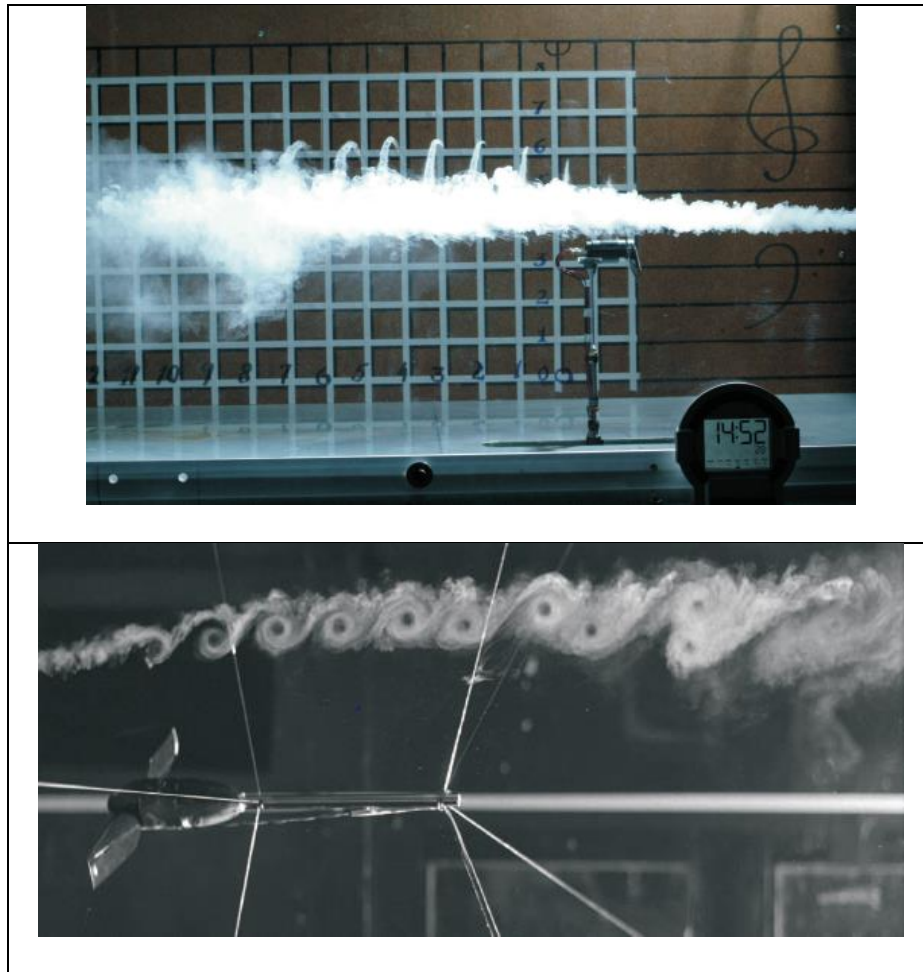


FIG I. 3. Structure du sillage. Mesures en soufflerie [13].

### I.5 Turbulence dans la couche limite atmosphérique

Le problème n'étant pas entièrement décrit car l'écoulement atmosphérique se révèle très turbulent, le rotor éolien est en interaction avec le vent, qui influence significativement le développement du sillage ainsi que l'apparition et l'atténuation des vortex de base et de bout de pale. Cette turbulence est sans doute un paramètre qu'il faut prendre en considération dans les équations de Navier-Stokes. La modélisation de la turbulence, dans le sillage éolien, a vu un développement intéressant, le choix d'un modèle peut être effectué à partir du nombre de Reynolds qui indique l'importance de la largeur de la bande d'échelle de longueur d'onde. Résoudre l'ensemble des échelles de turbulence est très volumineux et par conséquent coûteux. Deux modèles de turbulence sont répandus dans l'étude du sillage éolien, les modèles Reynolds-averaged Navier-Stokes RANS [32] et le modèle Large Eddy Simulation LES [33]. Certes il est plus judicieux d'entreprendre un calcul avec le modèle Direct Numerical Simulation DNS, car tous les ordres de grandeurs des échelles intervenant dans l'écoulement atmosphérique (de 1km à

Imm), sont pris en considération, mais les moyens de calcul auxquels on doit faire appel sont très importants. Les modèles RANS sont des modèles statistiques qui comptent plusieurs variantes à savoir, les modèles du premier degré et ceux du deuxième degré et qui utilisent le concept de viscosité turbulente. Le modèle k- $\epsilon$  à deux équations a été largement utilisé pour ce problème ; il permet aussi une économie importante de temps et du coût de calcul. Son utilisation a connu certaines modifications des constantes du modèle afin de combler ces limites pour résoudre les phénomènes de turbulence des petites échelles avec une tendance à accentuer le phénomène diffusif. Cependant, il représente bien l'écoulement turbulent isotropique dans la couche limite atmosphérique et le sillage éolien. L'écoulement turbulent étant anisotropique, Panofsky [34] et par la suite Crespo et al [35], ont introduit des modifications des constantes de fermeture pour approcher les conditions atmosphériques avec le modèle k- $\epsilon$  modifié ( $C_{1\epsilon}=1.176$  ;  $C_{\mu}=0.033$ ). Suite à ce changement, ils ont observé une diminution de l'effet dissipatif dans le sillage éolien. D'autres auteurs comme Chen YS and Kim SW [36], El Kasmi et al [37], ont proposé ainsi un modèle modifié du modèle k- $\epsilon$  avec un terme dissipatif supplémentaire de la turbulence ( $P_{\epsilon} = C_{4\epsilon} \frac{P_{\epsilon}^2}{\rho k}$ ), avec  $C_{4\epsilon} = 0.37$  au lieu de 0.25, appliqué dans une zone très voisine à environ 0.25D en aval et en amont du disque actif, afin de lier au mieux les petites et les grandes échelles de turbulence. En conclusion des travaux de cette étude, il a été nécessaire de calibrer la valeur de  $C_v$  qui n'est pas universelle ainsi que pour l'étude du sillage proche et lointain.

D'autre part, le modèle k- $\epsilon$  avec viscosité turbulente non linéaire exprimée en fonction de  $C_{\mu}^*$  et de  $C_R=1.8$  [38], qui prend en compte le comportement anisotropique de l'écoulement, a été testé. De meilleurs résultats en ont découlé mais une instabilité numérique importante était observée, surtout pour des problèmes à maillage très raffiné. M. Paul van der Laan et al [39] ont proposé un modèle k  $\epsilon$   $fp$  modifié, en corrigeant le paramètre  $C_v$  par  $C_{\mu}^* = C_{\mu} \cdot fp$ , avec  $fp$  une fonction scalaire utilisée afin de calibrer  $C_{\mu}$ , ce modèle s'est avéré plus efficace et s'accordait avec les résultats de mesure ainsi qu'avec les résultats issus du modèle LES. Ils ont validé ainsi leur modèle et ont préconisé l'utilisation de 8 cellules/ (Diamètre de rotor) pour le maillage du domaine se situant au voisinage du rotor, de 1.75D à 7.5D, ce qui donne une bonne similitude avec les mesures expérimentales.

Cependant, les modèles RANS restent faibles si l'on veut capter un large spectre d'énergie turbulente présente dans la CLA et dans le sillage éolien. Le modèle LES prend en charge les grandes échelles sans laisser pour compte les petites structures de turbulence traitées à partir d'un modèle de sous maille. Le modèle LES utilise une définition de la viscosité turbulente du modèle Smagorinsky [40], l'expression de la viscosité est fonction du coefficient Smagorinsky qui se révèle compliqué plus l'écoulement comporte de paramètre (distance au sol, stabilité de l'atmosphère, etc.). Un modèle sous maille dynamique est aussi utilisé afin d'étudier le spectre cohérent dans le sillage et la déflexion du sillage à cause de

l'effet yaw [41]. Plusieurs autres travaux ont utilisé différentes formulations du modèle LES à savoir le modèle Smagorinsky–Lilly subgrid-scale model, vorticity-based mixed-scalesubgrid-scale model, (non-dynamic) Smagorinsky model [42] afin d'améliorer la précision des résultats et d'approcher le phénomène physique tel qu'il existe. Un intérêt particulier doit être porté à la stratégie de maillage influençant particulièrement le résultat du déficit de vitesse attendu. M. Paul van der Laan et al [39] ont comparé 8 cas de tests, les aérogénérateurs suivants (Turbine Test Site Wieringermeer, the Nibe B wind turbine, Nordtank 500, NREL 5-MW) ont été utilisés. Ils ont appliqué un maillage uniformément réparti, dans la direction du développement du sillage à savoir de  $2.5D$  à  $7D$ , de 60 cellules/ $D$ , considéré comme étant suffisant pour la précision des résultats.

### **I.6 Modélisation de la nacelle**

Comme cela a été démontré dans de nombreux articles, la nacelle a une influence significative sur la propagation du sillage des éoliennes. Pour prendre en compte cet effet, différentes approches ont été appliquées pour la modélisation de la nacelle. Gao et al. [43] ont effectué des calculs LES couplés à une méthode ligne active pour étudier le sillage des éoliennes. Pour améliorer la précision numérique des résultats du sillage proche, ils ont inclus la modélisation de la tour et de la nacelle par des forces aérodynamiques projetées dans le champ d'écoulement à l'aide d'une fonction par morceaux. Dans les travaux de De Cillis et al. [44], la tour et la nacelle ont été décrites par la méthode des frontières immergées ou « immersed boundary method » (IBM). Cette méthode consiste à imposer une vitesse égale à zéro à l'intérieur du corps. Au premier point adjacent au corps, les équations de Navier-Stokes ne sont pas discrétisées, et les vitesses sont évaluées par interpolation linéaire à partir de celles du second point extérieur [45]. Dans cette étude, comme la méthode BEM-AD appliquée consistait à ajouter des termes sources dans les équations de quantité de mouvement pour la modélisation du rotor, la nacelle était également modélisée par des termes sources ajoutés aux équations de quantité de mouvement et résolu pour le volume de la nacelle. La nacelle de l'éolienne considérée était un cylindre circulaire avec un diamètre de  $r_c=2.5m$ , donc un coefficient de traînée constant  $C_{d, nac} = 1.2$  a été appliqué. Cette approche a permis de considérer l'influence de la nacelle sur le sillage en aval du rotor tout en réduisant le temps de calcul.

### **I.7 Etude de l'influence de l'état de stratification thermique de la CLA**

L'étude de l'influence de la stratification thermique est un chapitre important dans le domaine de l'énergie éolienne. La stratification thermique de l'atmosphère affecte la stabilité de l'air et sa capacité à transporter les turbulences. Dans une Couche limite atmosphérique instable, la turbulence est transportée plus haut dans la couche de surface, ce qui peut entraîner une augmentation de la production d'énergie éolienne. À l'inverse, dans une CLA stable, la turbulence reste plus près du sol, ce qui peut entraîner une diminution de la production d'énergie éolienne. Des études

ont montré que l'effet de la stabilité atmosphérique sur le sillage éolien peut être important et qu'il doit être pris en compte lors de la planification des parcs éoliens [46].

Les travaux de recherche sur l'influence de la stabilité atmosphérique sur la production éolienne, ont montré d'importantes variations du cisaillement du vent ainsi que des perturbations de la puissance obtenue dans les conditions neutres par rapport à des conditions non neutres. En effet, une étude révèle qu'à 80 m d'altitude, l'énergie éolienne pourrait être considérablement supérieure à celle estimée en l'absence des effets de la stabilité atmosphérique. Elle a également montré que la stabilité atmosphérique a un effet significatif sur les bruits, entraînant des niveaux sonores plus élevés par rapport à la stratification neutre [47]. Plusieurs études ont été menées dans le contexte d'écoulement en atmosphère thermiquement stratifiée stable, où la surface terrestre est plus refroidie que l'air ambiant en l'absence du soleil. Ces travaux mettent en évidence les effets de turbulence par cisaillement qui sont ralentis par une flottabilité négative et qui engendrent plusieurs phénomènes observés tel que des instabilités de Kelvin – Helmholtz, un découplage partiel entre les parties supérieure et inférieure de la couche limite et des niveaux accrus d'intermittence. Les expériences menées en soufflerie se sont concentrées sur les caractéristiques d'écoulement et la diffusion dans la Couche limite de surface (CLS) avec différents nombres de Richardson. Ils ont étudié l'éclatement intermittent d'un CLS équipé d'un jet à basse altitude [48].

Cependant, en dépit des efforts visant à caractériser la CLS, on sait peu de choses sur la structure et la dynamique du sillage des éoliennes dans les écoulements thermiquement stratifiés. La caractérisation du sillage des éoliennes dans différentes conditions de stratification thermique pourrait fournir des informations précieuses pour l'optimisation des configurations des éoliennes dans les parcs éoliens et la validation des paramétrages utilisés dans les modèles informatiques de dynamique des fluides à haute résolution (par exemple, simulation de grands tourbillons, LES). [49]

En ce qui concerne les parcs éoliens offshore, l'une des principales raisons de l'impact de la stabilité atmosphérique sur la puissance de sortie des machines réside dans la taille des flux d'impulsion turbulents dans l'atmosphère thermique qui agissent pour amplifier les sillages. Plus récemment, des études de données de puissance pour des éoliennes offshore uniques ont montré des différences allant jusqu'à 20 % entre une stratification stable et instable pour la même vitesse moyenne du vent [50].

Afin de modéliser l'influence de la stratification thermique sur le sillage éolien, plusieurs travaux ont été élaborés, passant par des techniques CFD avec des simulations numériques ou encore des études expérimentales en soufflerie ou en atmosphère libre [43, 44]. Les modèles mathématiques de traitement du sillage éolien en atmosphère stratifiée, prennent en compte la résolution des équations de

Navier-stocks ainsi que celle de l'énergie. Des conditions aux limites qui décrivent bien les contraintes liées à l'écoulement en stratification thermique (stable et instable), sont prises en compte dans ce modèle. Les résultats ont montré que la stratification thermique peut avoir un impact significatif sur la production d'énergie éolienne et que les modèles doivent être calibrés en fonction des conditions atmosphériques locales [45].

Les sillages éoliens se rétablissent plus rapidement et affichent un méandrement plus fort dans la couche limite convective (CLC), par rapport à la CLA neutre, comme le montrent plusieurs études. Ce phénomène a été largement mis en évidence, à l'aide de la méthode LES. Cette tendance est attribuée à l'intensité de turbulence relativement plus élevée dans le CLC, qui conduit à un mélange turbulent amélioré, à l'entraînement du flux, au recouvrement du sillage et à la réévaluation du sillage, par rapport aux CLA neutre et CLS [45].

L'étude et l'identification de la structure du sillage éolien ainsi que les paramètres influençant sa formation (conditions de stratification thermique de la CLA), sont deux axes de recherche importants. En effet la structure de la CLA peut avoir un effet négatif sur l'évolution du sillage éolien et ainsi créer un dysfonctionnement des machines adjacentes, et une réduction du rendement d'un parc éolien. D'un autre côté, cet effet peut être exploité en faveur d'une production d'énergie plus importante en optimisant l'emplacement des machines en fonction de la turbulence et du comportement du sillage dans la CLA.

### **I.8 Conclusion**

Dans ce travail, nous proposons la prédiction et l'analyse du comportement des vitesses du vent dans la couche limite atmosphérique, plus précisément de la couche limite de surface. C'est dans cette couche que les applications éoliennes s'effectuent et où l'on doit tenir compte des moindres perturbations qui s'exercent sur la vitesse du vent à l'entrée d'un rotor éolien. L'évaluation et la prédiction des vitesses de vent à la hauteur du moyeu sur la base de données de mesures, a été effectuée dans un premier temps afin de comparer les résultats obtenus avec les différentes lois classiques qui sont utilisées très souvent dans la prédiction du potentiel éolien et pour lesquelles on voulait connaître l'efficacité et les limites.

Dans un second temps, l'étude et l'analyse de l'expansion du sillage éolien, en aval d'un rotor et en interaction avec la surface du sol, a été développée. Le modèle hybride BEM-AD a été validé dans ce travail par une comparaison avec les résultats des mesures expérimentales effectuées en soufflerie à l'ENSAM ParisTech, pour un rotor bipales développé en laboratoire.

Par la suite, un modèle tridimensionnel de ce rotor a été utilisé afin d'analyser l'influence de la stratification thermique (stable et instable) de la CLA sur le développement du sillage éolien en aval du rotor.

# **Chapitre II**

## **Les Etats de la Couche Limite Atmosphérique**

### II.1 Introduction

L'atmosphère terrestre est constituée d'une superposition de couches qui se distinguent l'une de l'autre par des caractéristiques intrinsèques. Elles se définissent selon leur hauteur par rapport à la surface de la terre.

La première couche de l'Atmosphère terrestre, la troposphère, se situe dans les 11 premiers kilomètres ; elle est caractérisée par une température qui décroît d'environ  $7^{\circ}\text{K}/\text{km}$ , et une pression de 1atm au niveau de la mer. La seconde couche est la Stratosphère ; elle se situe entre 12 et 50 km au-dessus de la surface de la terre, la température y est constante dans les premiers kilomètres (12 km à 30 km). Au-delà de 50km se trouvent la Mésosphère et la Thermosphère, qui sont deux couches où l'écoulement du vent est géostrophique avec des effets de la force de gradient de pression très importants.

Au voisinage de la surface de la terre, l'écoulement est sensible aux phénomènes de cisaillement causés par les effets de frottement dû à la rugosité du sol.

Dans l'Atmosphère terrestre, le bilan des forces comprend les effets des forces de gradient de pression et de la force de Coriolis, qui sont négligeables près du sol. Le domaine de validité de ces forces, définit ce qu'on appelle la Couche Limite de l'Atmosphère (CLA). Son épaisseur est typiquement de quelques dizaines de mètres. Les phénomènes qui apparaissent à ce niveau sont les plus accessibles à l'expérimentation et par conséquent les mieux connus.

#### 1-1 La couche limite atmosphérique CLA

La couche limite atmosphérique, est la première couche au contact du sol, elle se compose de la superposition de deux couches : dont la couche limite interne qui se décompose en une sous couche rugueuse (à moins de 50m de hauteur) et de la couche limite de surface de (50-100m) de hauteur. La couche supérieure est la couche externe qui représente la couche d'Ekman. Elle peut atteindre 2km au-dessus de la couche limite interne (FIG II.1). Cette distance varie selon les conditions météorologiques et le moment de la journée. Les principaux effets gouvernant l'écoulement dans cette partie de l'atmosphère sont, les effets de la coexistence de turbulences convectives et ceux générées par le cisaillement, ainsi que les variations diurnes et spatiales du réchauffement de surface. L'évolution des conditions météorologiques entraîne des mouvements verticaux de l'air, pouvant, de ce fait, modifier de manière importante la densité de l'air et la stabilité thermique de l'atmosphère (FIG II.2).

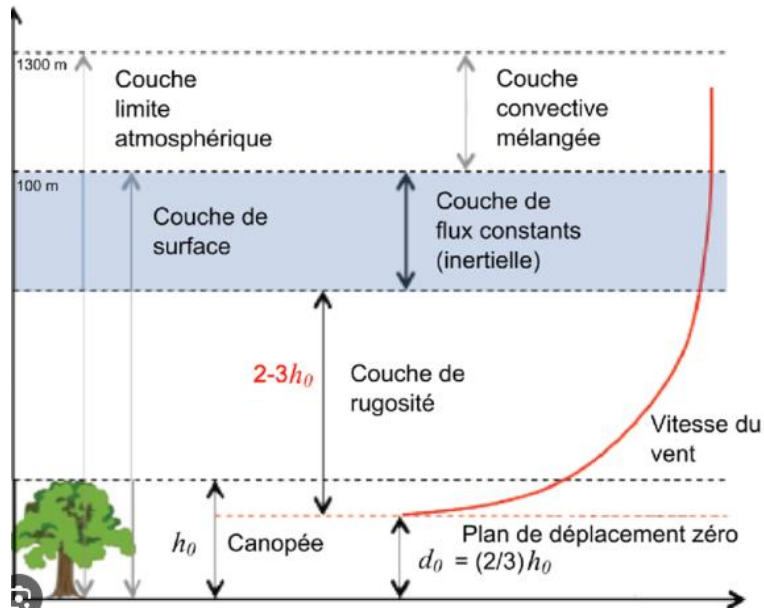


Figure II. 1 Structure de la couche limite Atmosphérique (CLA) [51].

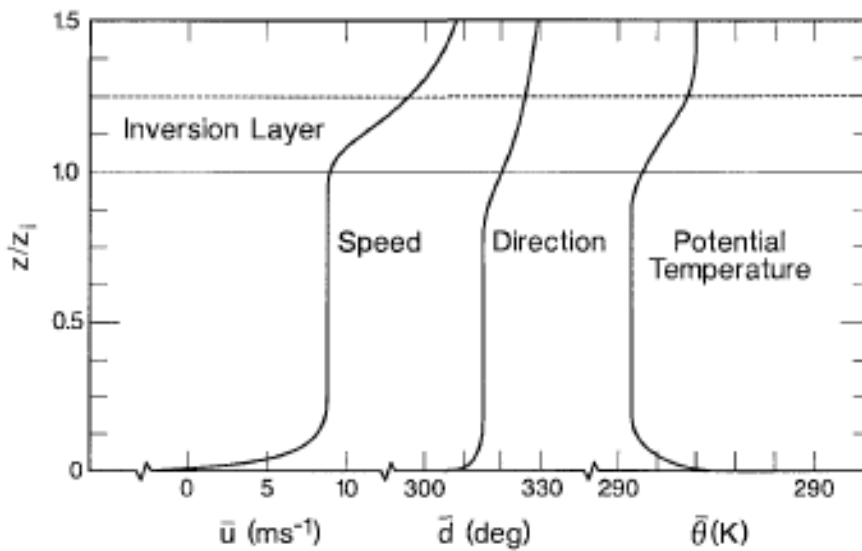


FIG II.2 Profil vertical de la vitesse, direction et température potentielle dans la couche limite atmosphérique thermiquement instable [53].

Au-delà de ces deux couches, il y aura la couche atmosphérique libre où le vent est en équilibre quasi-géostrophique et les forces qui régissent le mouvement sont le gradient de pression et la force de Coriolis. Les effets des frottements est négligeable dans l'atmosphère libre.

La hauteur de la CLA  $z_h$  est exprimée par la formule suivante :

$$z_h = C \frac{u_*}{f} \quad (\text{II.1})$$

## Chapitre II : les Etats de la Couche limite Atmosphérique

Où  $C_+$  est une valeur empirique égale à 0.25,  $f$  est le paramètre de Coriolis représentant l'effet de la rotation de la terre.  $f = 2\pi\Omega \sin \phi$ . Avec  $\Omega$  est le taux de rotation de la terre et  $\phi$  la latitude et  $u_*$  est la vitesse de friction.

Cette épaisseur est variable (éq.II.2), elle est très sensible aux changements de température et de la densité de l'air diurne et nocturne.

$$z_h = \begin{cases} z_i & (\text{jour}) \\ h & (\text{nuit}) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où  $z_i$  est la hauteur de la base de la couche d'inversion (où le gradient de température est positif) au-dessus de la couche limite diurne, et  $h$  est la hauteur du sommet de la couche limite nocturne au sol. La stratification de température qui produit cet état, appelée en météorologie déchéance adiabatique (environ 1°C/100 m de baisse de température avec l'altitude), est souvent transitoire [52].

Les états thermiques les plus persistants, qui caractérisent la couche limite atmosphérique, sont la couche limite mélangée par convection (CLC) pendant la journée et b) la couche limite stable (CLS) se produit pendant la nuit :

- a) Dans la couche limite convective (instable) (CLC), l'inversion agit comme un couvercle amortissant les mouvements verticaux. Les gradients les plus raides de la vitesse moyenne du vent, de la direction du vent et de la température se produisent dans les niveaux inférieurs de la CLC (environ 10 % de la hauteur). Dans la partie supérieure de la CLC (90% restants), un fort mélange convectif atténue presque toutes les variations verticales des profils moyens. Dans les régions inférieures de la CLC, les parcelles d'air déplacées accélèrent verticalement en s'éloignant de leurs positions d'origine.
- b) Dans la couche limite stable (CLS) le haut de la couche n'est pas aussi nettement défini que celui de la CLC. Les niveaux de turbulence diminuent progressivement avec la hauteur, amortis par une combinaison de stabilité statique et de cisaillement du vent réduit. Les parcelles d'air déplacées retournent à leurs positions d'origine.

Les limites supérieures de ces deux états, CLC et CLS, définissent la profondeur des couches limites diurnes et nocturnes.

### II.2-Les états thermiques dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA)

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) évolue selon les effets des contraintes mécanique et thermique, qui s'y développent. Les transformations ainsi que l'épaisseur de la CLA varient tout au long de la journée et de la nuit. Cette variation caractérise l'état la Couche Limite Atmosphérique.

Chaque particule dans l'air est caractérisée par sa température, mais peut être également définie à partir de la température qu'elle aurait, considérée comme un gaz

## Chapitre II : les Etats de la Couche limite Atmosphérique

parfait, par rapport à la pression de référence  $P_{ref} = 100$  kPa, de façon isentropique, ce qui définit la température potentielle de cette particule.

La température potentielle de l'air  $\theta$  dans la CLA peut être écrite, au premier ordre, comme suit :

$$\theta \cong T + \frac{g}{c_p} * z \quad (\text{II.3})$$

Où T est la température de la particule, g est l'intensité de la gravité,  $c_p$  est la capacité calorifique, à pression constante, de l'air et z est la hauteur de la particule.

Les particules dans l'air sont caractérisées par leur température au cours de la journée/nuit. Elles sont immergées dans l'air ambiant, dont la température peut être supérieure à celle des particules, et plus dense que les particules. Le déplacement des particules est alors vers le bas, à des altitudes inférieures, pour rejoindre sa position d'origine sous l'effet de son poids. Le résultat de  $\frac{d\theta}{dz} > 0$  induit un état stable de la CLA. La turbulence due aux effets de frottement (cisaillement) mais aussi à la stratification thermique, est minimisée. Les particules d'air se trouvent sous l'influence permanente de leur poids et de la force d'Archimède (poids de l'air ambiant qui se déplace). Cette force est moins intense et les niveaux de turbulence diminuent progressivement avec la hauteur, amortis par une combinaison de stabilité statique et de cisaillement du vent réduit. Ce phénomène est observé à l'approche du coucher du soleil, des panaches flottants perdent leur source d'énergie. À ce moment, il y a un effondrement rapide des mouvements turbulents dans la couche limite de surface où le sol se refroidit rapidement à cause de la perte de chaleur radiative vers l'espace.

Au lever du soleil, l'air ambiant est moins chaud qu'une particule qui se trouve à une altitude inférieure. La force d'Archimède qui influence cette particule est supérieure à son poids, elle induit donc une poussée vers le haut de la particule. Alors le gradient  $\frac{d\theta}{dz} < 0$ , l'état de la CLA est instable thermiquement et l'énergie cinétique turbulente va augmenter. Cet état apparaît pour la plupart du temps le jour où la hauteur de cette couche peut s'étendre de 1km jusqu'à 2km en fin de journée.

Lorsque la température d'une particule est égale à celle de l'air ambiant au coucher du soleil, le gradient de la température potentielle  $\frac{d\theta}{dz} = 0$  l'état de la CLA est neutre. Les forces d'Archimède sont égales au poids de la particule, elle est suspendue dans l'atmosphère et elle subit une turbulence mécanique provenant uniquement du cisaillement et du frottement à la surface de la terre [53].

### II.3- Profil vertical de la Vitesse de Vent

La couche de surface emprisonne des échanges de quantité de mouvement, de masse et de chaleur similaire à la diffusion moléculaire dans les écoulements laminaires, à cause de forts gradients verticaux contrôlant le transfert.

## Chapitre II : les Etats de la Couche limite Atmosphérique

La relation entre les flux verticaux de ces propriétés et leurs gradients verticaux moyennés sont analogues à la loi de diffusion moléculaire. On fait alors, l'extension de ce concept aux échanges turbulents dans la CLA, comme suit :

$$\tau = K_m \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (\text{II.4})$$

$$H = -K_h \rho c_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \quad (\text{II.5})$$

$$E = -K_q \rho \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \quad (\text{II.6})$$

où  $K_m$ ,  $K_h$  et  $K_q$  sont les coefficients d'échange turbulent pour la quantité de mouvement, la chaleur et l'humidité ;  $u$ ,  $\theta$  et  $q$  sont la composante moyenne la vitesse du vent dans le sens de l'écoulement, la température potentielle moyenne et l'humidité spécifique moyenne ; et  $\rho$  est la densité de l'air. Ces coefficients sont trois fois plus élevés que dans le cas de l'écoulement laminaire.

Dans la couche de surface, sur un terrain uniforme, la diminution de la contrainte avec la hauteur est suffisamment faible pour être négligeable.

On suppose que la contrainte est constante dans la couche de surface et que l'écoulement est dans le sens vertical. On obtient alors :

$$\tau_x = \tau_0 \quad (\text{II.7})$$

Et

$$\tau_y = 0 \quad (\text{II.8})$$

On peut définir comme  $u^*$  la vitesse de friction due aux frottements au sol, qui caractérise le cisaillement à la surface de la terre. Et on peut écrire :

$$\tau_0 = \rho u^{*2} \quad (\text{II.9})$$

L'identification du profil du vent dans la CLA se sert de la définition de la vitesse de friction avec une représentation du coefficient de transfert  $K_m$  à partir de la formule suivante :

$$K_m = kz u^* \quad (\text{II.10})$$

Cette formulation introduit la constante de proportionnalité de Von karman égale à  $k=0.42$ .

En remplaçant  $\rho$  et  $K_m$  dans l'équation (II.4), on obtient :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u^*}{kz} \quad (\text{II.11})$$

En intégrant cette équation, on obtient le profil logarithmique de la vitesse verticale du vent, qui est donnée sous la formulation ci-dessous :

$$\bar{u}(z) = ku^* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{II.12})$$

Où  $z_0$  est la longueur de rugosité, qui correspond à la hauteur où la vitesse s'annule au-dessus du sol.

Le profil vertical du vent dans la couche limite atmosphérique est défini ainsi dans la plupart des applications de l'énergie éolienne, cependant il n'est valable qu'en CLA thermiquement neutre.

On peut définir les flux liés à la quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité en supposant que près de la surface de la terre  $K_m = K_h = K_q$  [69]. Cette hypothèse permet d'obtenir l'expression générale du flux près de la surface de la terre :

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial z} \cong \frac{\bar{\zeta}_2 - \bar{\zeta}_1}{z_r \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \quad (\text{II.13})$$

Avec  $z_r$  la moyenne de hauteur entre  $z_2$  et  $z_1$ .

Cette expression est applicable dans la couche de surface avec une stabilité thermiquement neutre et pour un flux constant avec la hauteur sur un terrain plat. Au-delà de ces contraintes, le profil logarithmique n'est plus valable [53].

#### II.4- Mesure de la stabilité thermique

Il est important de caractériser la CLA et de mesurer les paramètres qui conditionnent le changement de stabilité à l'intérieur de la CLA. Un premier paramètre peut être défini pour décrire les trois états de la couche limite terrestre, c'est le nombre adimensionnel de Richardson  $R_i$ . Il représente l'importance relative de la flottabilité et du cisaillement dans la production de turbulence et s'exprime par la formulation suivante :

$$R_i = \frac{\left(\frac{g}{\theta}\right)\left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2} \quad (\text{II.14})$$

Où  $g$  est la gravité.  $\frac{g}{\theta}$  est paramètre de flottabilité.

On peut utiliser le nombre de Richardson afin de mesurer la stabilité thermique dans la CLA, car il est fonction de grandeurs mesurables. Il caractérise une atmosphère stable lorsque  $R_i > 0$ , instable pour  $R_i < 0$  et neutre pour un nombre  $R_i = 0$ .

Une valeur critique est définie pour le nombre de Richardson  $Ri=0.25$  (pour un fluide non visqueux), à partir de laquelle l'écoulement devient turbulent et on peut faire l'analyse suivante :

- Pour  $Ri < 0$ , l'écoulement est turbulent sous l'effet d'un mélange de la turbulence mécanique et thermique,
- $0 < Ri < 0.25$ , la turbulence est strictement mécanique (cisaillement dans la CLA),

Cependant dans l'expression du nombre de Richardson, la variable de hauteur n'apparaît pas, ce qui n'est pas adéquat pour caractériser la structure de la couche de surface.

Le nombre de Richardson de volume  $R_b$ , est plus représentatif de la stabilité thermique près du sol surtout pour des effets de cisaillement faible c'est-à-dire pour  $Ri < 0$ . Le nombre  $R_b$  peut s'exprimer ainsi :

$$R_b = \frac{\left(\frac{g}{\bar{\theta}}\right)(\bar{\theta}_z - \bar{\theta}_0)/2}{(\bar{u}_z/z)^2} \quad (\text{II.15})$$

Cette approximation du nombre de Richardson  $R_b$  reste insuffisante car elle doit être reliée au nombre de Richardson  $R_i$  et  $\ln(z/z_0)$  pour être plus utile [53].

#### 4-1. Longueur de Monin Obukhov (M-O)

Le paramètre de stabilité maintenant reconnu par les météorologues de la CLA comme approprié pour la couche de surface est le rapport de la hauteur  $z$  à la longueur d'échelle  $L$  (la longueur de Monin-Obukhov) qui dérive de la théorie de similitude de Monin Obukhov [69] et qui peut être exprimée comme suit :

$$\frac{z}{L} = - \frac{\left(\frac{g}{\bar{\theta}}\right)(\overline{\omega'\theta'})_0}{u_*^3/kz} \quad (\text{II.16})$$

et

$$L = \frac{u_*^3 c_p \rho T_0}{k g q_0} \quad (\text{II.17})$$

$(\overline{\omega'\theta'})_0$  est le flux de température à la surface et  $q_0$  est le flux de chaleur au sol.

Cette expression est beaucoup plus utile que la nombre de Richardson  $R_i$  car dans la couche de surface où la théorie de similitude de M-O est établie, les effets de la variation de la hauteur  $z$  et la stabilité thermique  $L$  sont interchangeables.

Des expériences ont montré que la structure de la turbulence, dans la couche de surface, est fortement dépendante de la hauteur  $z$  et du paramètre de flottabilité  $\frac{g}{\bar{\theta}}$  ainsi que d'autres paramètres représentatifs des flux de surface de la contrainte et de la température. La théorie de similitude de Monin-Obukhov est construite selon l'hypothèse qui consiste à définir des

## Chapitre II : les Etats de la Couche limite Atmosphérique

fonctions universelles de  $z/L$ , où des conditions d'homogénéité horizontale et de stationnarité sont imposées par la variance, la covariance et le gradient normalisés, comme suit :

$$\begin{aligned}
 \phi_m &= (kz/u_*)(\partial \bar{u} / \partial z) \\
 \phi_h &= (kz/T_*)(\partial \bar{\theta} / \partial z) \\
 \phi_w &= \sigma_w / u_* \\
 \phi_\theta &= \sigma_\theta / |T_*| \\
 \phi_\varepsilon &= kz\varepsilon / u_*^3
 \end{aligned}
 \tag{II.18}$$

Ainsi  $\phi_m$  est le cisaillement du vent,  $\phi_h$  la stratification thermique,  $\phi_w$  la variabilité en  $w$ ,  $\phi_\theta$  la variabilité en  $\theta$  et  $\phi_\varepsilon$  la dissipation de l'énergie cinétique, qui sont des grandeurs adimensionnelles, avec  $u_*$  et  $T_*$  qui sont définis par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 u_* &= \left[ -\overline{(u'w')}_0 \right]^{1/2} \\
 T_* &= -\frac{\overline{(w'\theta')}_0}{u_*}
 \end{aligned}
 \tag{II.19}$$

Ainsi que  $\sigma_w$  et  $\sigma_\theta$  qui sont les écarts-types de  $w$  et  $\theta$ , et  $\varepsilon$  est le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

Enfin, l'intégration du gradient de vitesse (éq II.11), dans la CLA, fait apparaître une constante supplémentaire qui permet d'obtenir l'expression du profil logarithmique modifié du vent, pour les différents états thermiquement stable et instable de la CLA, et qui est donné comme suit :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln(z/z_0) - \Psi_m \right]
 \tag{II.20}$$

Où le terme diabatique  $\Psi_m$  est égale à l'intégrale de  $(1-\Phi_m)/(z/L)$  entre  $z_0/L$  et  $z/L$ .

Pour une atmosphère stable, l'expression de  $\Psi_m$  est donné par  $(-5z/L)$  et pour le cas d'une atmosphère instable, les valeurs de  $\Psi_m$  sont données dans le tableau II.1 :

**Tableau II.1.** Valeurs de  $\Phi_m$  et  $\Psi_m$  pour le cas de l'atmosphère instable [53].

$z/L$	$\Phi_m$	$\Psi_m$
-------	----------	----------

0	1.0	0.000
-0.1	0.788	0.284
-0.2	0.699	0.461
-0.3	0.644	0.595
-0.4	0.606	0.702
-0.5	0.577	0.793
-0.6	0.554	0.873
-0.7	0.535	0.943
-0.8	0.519	1.006
-0.9	0.505	1.063
-1.00	0.493	1.116
-1.1	0.482	1.165
-1.2	0.472	1.211
-1.3	0.463	1.253
-1.4	0.455	1.293
-1.5	0.447	1.331
-1.6	0.440	1.367
-1.7	0.434	1.401
-1.8	0.428	1.434
-1.9	0.422	1.465
-2	0.417	1.495

#### 4-2 Profil de la température dans la CLA

Le profil de température potentielle est obtenu par l'intégration de l'équation suivante :

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \frac{kz}{\theta^*} = \phi_h(\zeta) \quad (\text{II.21})$$

Avec

$$\phi_h(z/L) = \begin{cases} 0.95 + \frac{8z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 0.5 \\ 0.95[1 - 11.6z/L]^{-1/2} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

L'expression de  $\phi_h(z/L)$  a été formulée par Hogstrom [17, 18]. Après l'intégration de l'équation (II.21), l'expression du profil de température est obtenue sous la forme suivante :

$$T(z_2) - T(z_1) = \frac{T(z_1)u_*^2}{k^2 g L} \left[ \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_h \right] - \frac{g}{c_p} [z_2 - z_1] \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Avec } \Psi = \int_{z_0}^z [1 - \phi] \frac{dz}{z}$$

La résolution de l'équation qui décrit le profil de température nécessite plus de données sur la mesure de vitesse et de température, ainsi que les équations du modèle de turbulence k-ε [54].

#### II.5-Conclusion

## Chapitre II : les Etats de la Couche limite Atmosphérique

Ce chapitre nous a permis de résumer les phénomènes induisant l'évolution de la stratification thermique dans la CLA. La structure de l'Atmosphère terrestre a été développée ainsi que l'évolution des couches intermédiaires qui composent la CLA.

Les états de stratification thermiques dans la CLA ont été explicités et exprimés en fonction du développement des gradients de vitesse et de température. Des conditions de discontinuité de ces états ont également été relatées et exprimées par des nombres adimensionnels afin de simplifier la représentation de la stratification thermique de la CLA.

Les profils verticaux de la vitesse du vent ainsi que de la température, dans la CLA, est explicité. L'évolution des expressions de ces profils, a également été effectuée en fonction de chaque cas de figure concernant les états de stratification thermique de l'Atmosphère.

**Chapitre III**  
**Méthodologie,**  
**Modélisation Mathématique**

### III. 1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la méthodologie et la modélisation suivie pour déterminer les caractéristiques du profil vertical du vent, avec la méthode de prédiction basée sur la méthode d'intelligence artificielle ainsi que par la modélisation de l'écoulement du vent par les équations de conservation de masse, quantité de mouvement et d'énergie.

De nombreuses lois pour l'extrapolation de la vitesse du vent existent dans la littérature [5] comme nous l'avons vu au Chapitre I. Cependant l'efficacité de ces dernières pour la prédiction de l'énergie éolienne produite trouve certaines limites.

Le but de ce travail est d'élaborer un nouveau modèle d'extrapolation de la vitesse du vent utilisé pour l'estimation de la production d'un parc éolien.

Parmi les nombreuses difficultés rencontrées dans l'optimisation d'une installation éoliennes, l'emplacement des turbines est une étape essentielle. Afin d'éviter des pertes de production d'énergie, dues au sillage qui se développe en aval de chaque rotor éolien, ainsi que pour préserver les machines de la fatigue, il est crucial de connaître l'écoulement du vent en amont et en aval des machines éoliennes. L'étude de l'interaction des rotors éoliens avec l'écoulement de la couche limite atmosphérique (CLA) est aussi à prendre en considération. La modélisation de l'écoulement du vent à travers un rotor et dans la CLA revêt une grande importance lors de la conception des parcs éoliens afin d'analyser le sillage éolien qui se crée.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous allons détailler les équations des écoulements dans la CLA en interaction avec un rotor éolien, qui sera représenté par un modèle hybride combinant la théorie de l'élément de pale aux équations de la dynamique des fluides CFD. Les phénomènes de turbulence qui caractérisent la CLA sont pris en considération par un modèle adapté, capable de représenter les modifications induites par l'interaction du vent avec le sol et avec le rotor. L'effet de la stratification thermique, due au réchauffement et au refroidissement de la surface de la terre, est également introduit par la résolution de l'équation de conservation de l'énergie.

### III-2. Extrapolation du profil vertical de la vitesse du vent

#### 2.1-Modèle de Régression linéaire

On approche le comportement d'un phénomène naturel ou physique par un modèle de régression ( $f(x) = a x + l$ ), où  $y$  est la réponse à la réaction de  $x$  dans une évolution quelconque. L'objectif de cette approche est de déterminer les coefficients ( $a$ ,  $l$ ) qui construisent le modèle de régression afin de définir la fonction  $f(x)$ . Cette dernière est comparée à la réponse exacte (la cible  $y$ ).

L'erreur  $e$  entre les deux est le critère de qualité de la régression. Le but de l'optimisation d'un modèle de régression est de diminuer l'erreur  $e$  au maximum. On définit la Fonction Coût  $J(\mathbf{a}, l)$  comme étant la moyenne de toutes les erreurs, comme suit :

$$J(\mathbf{a}, l) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (f(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (\text{III. 1})$$

$N$  étant le Nombre d'échantillons. On optimise (minimise) cette moyenne afin de trouver les valeurs des paramètres de la régression  $(\mathbf{a}, l)$  pour lesquels  $J(\mathbf{a}, l) \rightarrow 0$ . Pour ce faire, la dérivée de la fonction coût par rapport aux paramètres  $\mathbf{a}$  et  $l$  est appliquée.

L'opération qui consiste à reproduire les dérivations plusieurs fois jusqu'à atteindre l'optimum de  $\mathbf{a}$  et  $l$  pour le minimum de la fonction coût, est appelé Algorithme de la Descente de Gradient.

$$\begin{cases} a = a - \iota \frac{\partial J(\mathbf{a}, l)}{\partial a} \\ l = l - \iota \frac{\partial J(\mathbf{a}, l)}{\partial l} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

C'est la mise à jour des paramètres  $\mathbf{a}$  et  $\mathbf{b}$  par leurs propres valeurs et par une correction à partir de la pente  $\frac{\partial J(\mathbf{a}, l)}{\partial a}$  et  $\frac{\partial J(\mathbf{a}, l)}{\partial l}$  respectivement, où  $\iota$  est la distance parcourue pour atteindre la valeur optimale de la fonction coût, elle est appelée taux d'apprentissage.

### 2.2-Modèle d'un Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

Le modèle de prédiction de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), est un modèle de régression logistique, qui imite le comportement du cerveau humain, afin d'approcher le bon résultat (cibles). Il peut être supervisé ou non, c'est-à-dire, approcher une solution existante (une cible) afin de la prédire pour d'autres exemples (schéma de réseau supervisé) ou alors retrouver une solution qui n'existe pas (sans la cible), c'est le schéma non supervisé.

Plusieurs applications dans le domaine de l'éolien exploitent cet outil, afin de répondre aux problématiques suivantes :

- Prédiction des données manquantes rencontrées dans les bases de données ;
- Prédiction dans le temps à court et long terme ;
- Extrapolation des données à plusieurs niveaux d'altitude ;
- Prédiction des vitesses de vent à des endroits où les mesures sont inaccessibles [55].

Les modèles RNA formés sur la base de séries chronologiques à l'entrée opèrent une modélisation, par des fonctions linéaires et non linéaires. Le modèle peut apprendre à partir des données antérieures, reconnaître les tendances ou identifier les relations cachées dans les observations historiques et les utiliser pour prévoir les valeurs futures. Un réseau de neurones artificiels est un processeur étroitement parallèle composé d'unités de traitement simples (un perceptron), qui ont la tendance naturelle à emmagasiner des informations d'expérience à travers un processus d'apprentissage et de le traduire en un système optimal d'équations pour la prédiction.

### 2.3-Structure du Réseau de neurones Artificiels

Le modèle de prédiction RNA est en général, utilisé avec un algorithme d'optimisation à rétro-propagation, afin d'engendrer les nouvelles valeurs de la Matrice poids  $w$  et des Vecteurs biais  $b$ , qui sont les coefficients du modèle RNA et qui sont optimisés à l'aide de la fonction coût  $J(w, b)$ .

Les séries temporelles de données prises à une fréquence constante constituent le signal  $x(t)$ . Le réseau choisi dans ce travail, est un réseau à rétropropagation (*feedforward*). Il est souvent utilisé dans le domaine de la prédiction éolienne. L'architecture du réseau utilisée dans ce travail est un schéma à multicouche (FIG III.1), composé d'une couche cachée à  $n$  neurones avec une fonction de transfert (le modèle) sigmoïde  $f1(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$  (FIG III.2), afin de classer les données d'entrées  $x(t)$ , qui sont représentées, par une matrice à plusieurs vecteurs. La couche de sortie est composée de neurones dont la fonction de transfert est linéaire,  $f2(x)=x$  (FIG III.3). Ce système neuronal est optimisé afin d'aboutir à la meilleure architecture possible pour chaque problème traité.

*Modèle de régression*

$$f1(x,w,b) = \frac{1}{1+e^{-W.X-b}} ;$$

*Fonction coût*

$$J(w,b) = \frac{-1}{N} \sum y * \log(f1(x, w, b)) + (1 - y) * \log(1 - f1(x, w, b)) ;$$

*Algorithme d'optimisation*

$$\frac{\partial J(w,b)}{\partial w} , \frac{\partial J(w,b)}{\partial b} ;$$

*Mise à jour du calcul d'erreur*

$$w = w - \iota \frac{\partial J(w,b)}{\partial w}$$

$$b = b - \iota \frac{\partial J(w,b)}{\partial b}$$

FIG III.1. Architecture du réseau de neurones artificiels en multicouches.

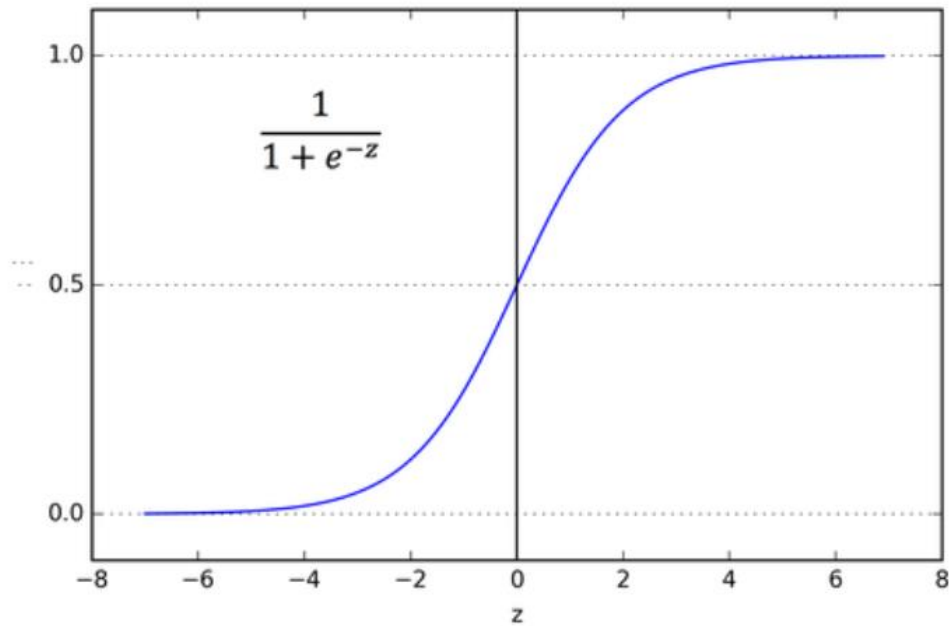


FIG. III.2. Fonction sigmoïde  $\sigma$  (fonction logistique).

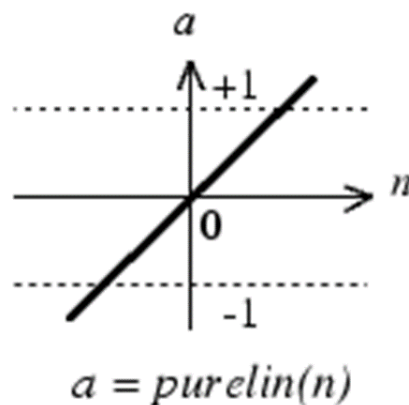


FIG. III.3. Fonction de transfert linéaire.

La fonction « nftool », Function fitting Neural Network, définie dans le logiciel de programmation Matlab®, est utilisée dans ce travail. Le modèle RNA développé fonctionne selon un algorithme qui schématise les étapes de la prédiction de la vitesse du vent à hauteur du moyeu à savoir 50 m (Schéma III.1, 2). Le réseau utilisé combine la fonction d'activation (logsig) dans la couche cachée, l'algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt et la fonction de transfert (purelin) pour la couche de sortie.

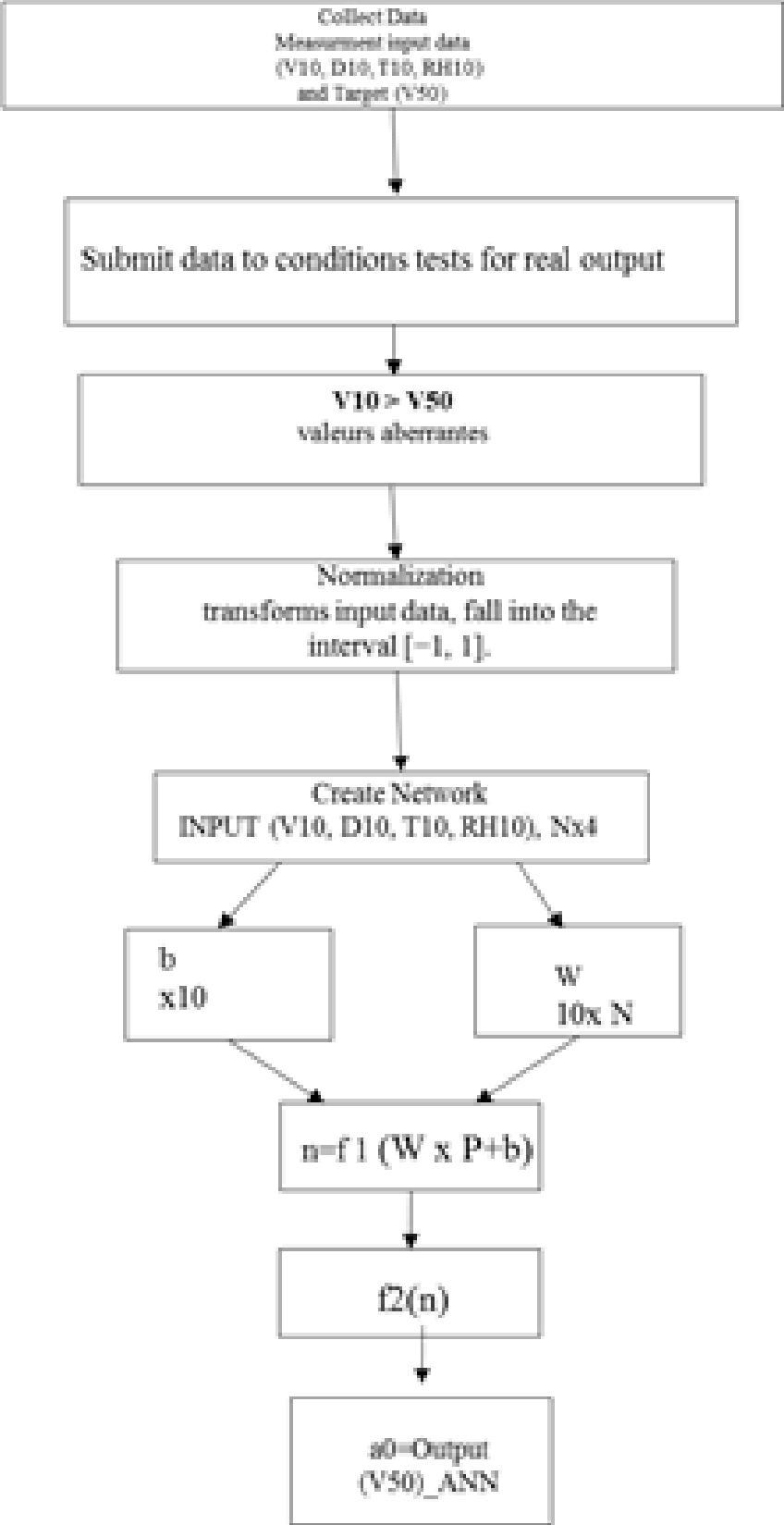


Schéma III. 1. Algorithme du modèle RNA.

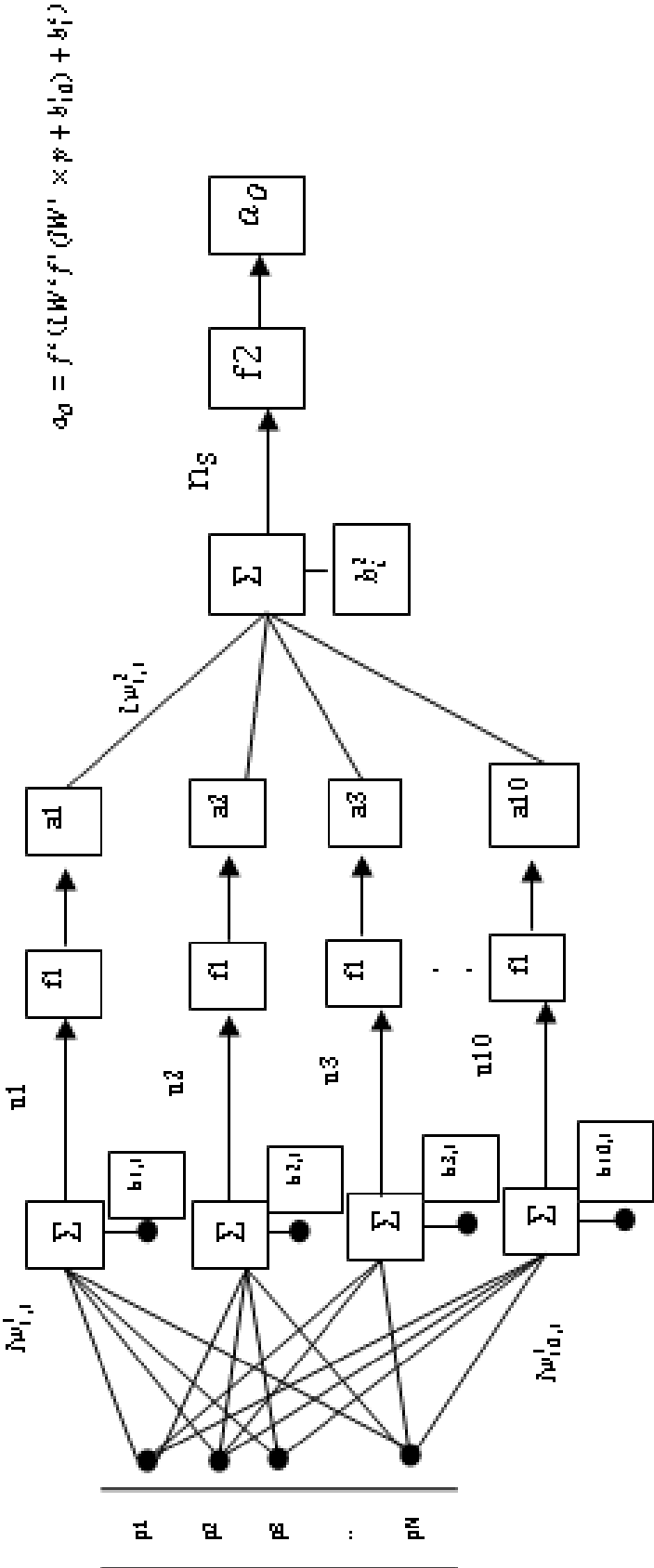


Schéma III. 2. Structure du réseau de neurones artificiels.

Le système d'équations du modèle de simulation, utilisé dans ce travail, s'écrit sous la forme globale suivante :

Pour le calcul des performances du modèle RNA, plusieurs paramètres ont été définis par [56] :

- la racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE,
- le coefficient de corrélation  $R^2$  [80], comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (|X(t) - y'(t)|)^2} \quad (III. 3)$$

$$R^2 = \frac{\sum \sum (w_{ij} - \bar{w})(b_{ij} - \bar{b})}{\sqrt{(\sum \sum (w_{ij} - \bar{w})^2) (\sum \sum (b_{ij} - \bar{b})^2)}} \quad (III. 4)$$

### III. 3. Modèle hybride disque actif-CFD

Une description du modèle hybride Disque Actif-CFD utilisé dans ce travail pour l'étude du sillage proche et lointain est détaillée ci-dessous.

#### 3.1 Equations de mouvement

La résolution du sillage éolien implique la création d'un modèle basé sur les équations de continuité, de conservation de la quantité de mouvement et de conservation de l'énergie dans une zone d'écoulement située en aval du rotor. Cela permet d'examiner l'évolution du sillage éolien. Les conditions aux frontières ont été établies en accord avec les hypothèses du problème. Le modèle utilisé dans ce travail pour représenter le rotor éolien est un modèle de disque actif. Les équations de continuité et de quantité de mouvement, permettent de décrire l'écoulement autour du rotor mais aussi d'introduire les forces aérodynamiques comme termes sources dans les équations de Navier-Stokes, sous forme d'UDF c'est-à-dire des fonctions définies par l'utilisateur. A partir de tableaux de données, le profil de la pale éolienne est défini à chaque section.

L'écoulement observé dans la couche limite atmosphérique est modélisé par les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement des fluides incompressibles. Elles ont été établies par Jones et Launder [57], et formulées comme suit :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (III.5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_{body,i} \quad (III.6)$$

$\rho$  est la masse volumique de l'air,  $p$  la pression atmosphérique,  $u_i$ ,  $u_j$  sont les composantes du champs de vitesse et  $x_i$ ,  $x_j$  sont les coordonnées cartésiennes utilisées.

$f_{body,i}$  représente le terme source qui sont les forces induites par le rotor ; elles s'expriment par des forces de volume dans l'équation de Navier stockes.

L'écoulement atmosphérique fortement turbulent et anisotrope incite d'utiliser un modèle de turbulence adapté. Le modèle k- $\epsilon$  avec modification des constantes de fermeture est utilisé.

### 3. 2-Equation de l'énergie

Le bilan de l'énergie dans la couche limite terrestre est caractérisé par une variation de la température et de la masse volumique de l'air en fonction de la hauteur et au cours de la journée et de la nuit. Ce phénomène définit l'état thermique de la CLA. Afin de déterminer ces états ainsi que la variation de la température et de la densité de l'air dans la couche limite atmosphérique, la résolution de l'équation de conservation de l'énergie est indispensable ainsi que l'équation d'état des gaz parfaits afin de caractériser les termes de flottabilité.

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de conservation de l'énergie à un volume de contrôle à l'intérieur du fluide et en moyennant dans le temps par la décomposition de Reynolds. Elle est présentée sous forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \rho c_p u_i T = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u_j \tau_{ij} + \frac{c_p \mu_t}{\sigma_T} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} - \Gamma \right) \right] + S_E \quad (\text{III.7})$$

Où  $c_p$  est la chaleur spécifique de l'air,  $T$  est la température de l'air,  $\sigma_T$  est le nombre de Prandtl turbulent,  $S_E = u_i g \rho$  est le terme source ajouté à l'équation de l'énergie pour prendre en considération les effets de la force de gravité et  $\Gamma = g/c_p$  est le terme du taux adiabatique sec utilisé afin de reformuler le gradient de température en fonction de la température potentielle  $\theta$ .

On peut reformuler l'équation de l'énergie en fonction de la température potentielle en utilisant l'équation (II.2). On fait alors l'approximation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial z} - \Gamma = \frac{\theta}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) = \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (\text{III.8})$$

L'équation de l'énergie peut s'écrire également sous la forme ci-dessous, qui est une forme plus reconnue par les météorologistes [71] :

$$\rho c_p u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = u_j \tau_{ij} + \frac{c_p \mu_T}{\sigma_T} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) \quad (\text{III.9})$$

### 3.3- Equation d'état des gaz parfaits

La variation de la densité de l'air sera prise en compte dans les termes de flottaison suivant l'équation d'état des gaz parfaits.

$$p = (\gamma - 1)\rho e, \quad T = \frac{(\gamma-1)e}{R} \quad (\text{III.10})$$

où  $e = c_v T$  est l'énergie interne du fluide,  $\gamma$  est le taux de chaleur spécifique égale à  $\frac{c_p}{c_v}$ ,  $R$  est la constante des gaz parfaits égale à 8.314 kPa /mol °K et  $c_p$  et  $c_v$  sont respectivement les chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant.

### III. 4-Modélisation du rotor

Le rotor éolien étudié dans ce travail est un rotor bipale avec un profil de pale de plaque plane, développé au sein du laboratoire Dynfluid, à l'ENSAM ParisTech, et dont les caractéristiques à savoir : les coefficients de traînée et de portance  $C_L$ ,  $C_D$  respectivement sont obtenues expérimentalement en soufflerie au laboratoire Dynfluid. Ces caractéristiques ont été utilisées dans le sous-programme développé pour cette étude afin de modéliser le rotor éolien en tant que Disque Actif.

La théorie de l'élément de pale (Blade Element Momentum, BEM) a été utilisée dans la représentation des forces aérodynamiques pour modéliser l'effet du rotor sur le vent. Ces forces sont répartis sur un ensemble d'anneaux coaxiaux d'épaisseur radiale  $dr$ . Le modèle BEM-Disque Actif a été développé et appliqué pour explorer le développement du sillage proche et lointain de l'éolienne ainsi que l'interaction du sillage avec le sol afin d'évaluer les effets de la hauteur du moyeu sur l'expansion du sillage. Le champ de vitesse calculé est comparé aux mesures expérimentales relevées sur l'éolienne Bipales testée dans la soufflerie à l'ENSAM Paris, afin de valider les résultats obtenus par le modèle.

#### 4.1- Concept du Disque Actif

La théorie du disque actif s'inspire de la théorie d'écoulement à travers un tube de courant.

La surface du rotor considérée, qui est la surface balayée par les pales, est représentée comme une surface de disque mince décomposé en secteurs dans le sens azimutale d'épaisseur  $\delta\theta$  (FIG.III.4), où des forces volumiques (en projection cartésienne)  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_a$  sont définies et agissent sur le vent (FIG.III.6, 7). Leurs expressions seront définies par la théorie de l'élément de pale.

On peut assimiler la surface du rotor à une grille, de volumes de contrôle dont les frontières sont la longueur de la pale ( $D/2$ ) (FIG III. 4).

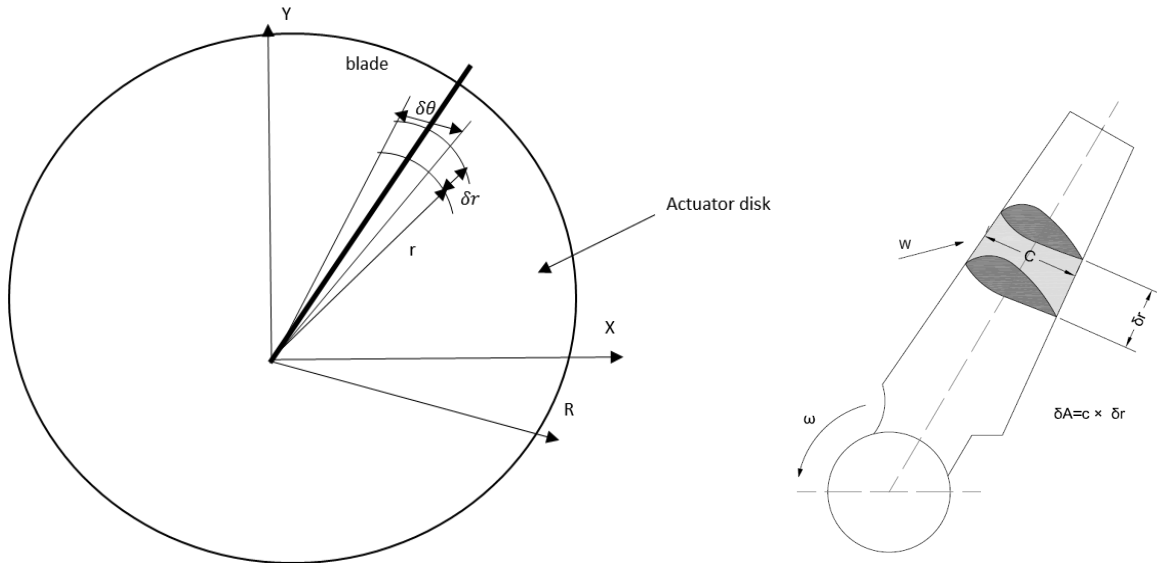


FIG III. 4 Concept du Disque Actif.

#### 4.2- Théorie de l'élément de pale

Les forces aérodynamiques, introduites comme terme source, dans les équations de Navier-Stokes, sont distribuées sur chaque élément de volume sur un ensemble d'anneaux coaxiaux. Chaque anneau est décomposé en plusieurs volumes de contrôle, de dimension  $(\delta r \times \delta \theta \times th)$ , comme le montre la FIG III. 4, 5,  $th$  étant l'épaisseur du disque représentée et qui est égale à  $th = c \sin \beta$ .

Où  $\beta$  est l'angle de calage (mesuré entre la ligne de portance nulle du profil (axe de la corde) et le plan de rotation) (FIG III.5) [58].

Les forces axiales et tangentielles locales sont calculées en fonction de la géométrie de la pale et des données du profil aérodynamique. Les forces sont calculées en utilisant le champ de vitesse calculé par le solveur CFD à chaque pas de temps.



FIG.III. 5 Définition de l'épaisseur du disque Actif.

#### 4.3-Modèle Théorie de l'élément de pale- disque Actif

Dans le modèle BEM-AD, le disque du rotor est divisé en secteurs avec un angle azimutal  $\delta \theta$  et un rayon  $R$ , chaque secteur étant constitué d'éléments de longueur  $\delta r$ . Les forces volumiques moyennes,  $\delta F_m L, D$ , sont calculées sur chaque élément de pale  $(\delta \theta \times \delta r)$ , comme suit :

$$\delta F_{m L, D} = \delta F_{L, D} \frac{\delta t}{T} = \delta F_{L, D} \frac{N \delta \theta}{2\pi} \quad (\text{III.11})$$

Où  $\delta F_{L,D}$  sont les forces sur l'élément de pale calculées à chaque pas de temps  $\delta t = \delta \theta / \omega$ ,  $T_i$  et  $\omega$  étant respectivement la période de rotation et la vitesse angulaire. On peut définir la période  $T$  comme suit :

$$T_i = \frac{2\pi}{N \cdot \omega} \quad (\text{III.12})$$

$N$  correspond au nombre de pales.

Les forces  $\delta F_{L,D}$  obtenues par la théorie de l'éléments de pale [58] sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$\delta F_{L,D} = \rho \frac{W^2}{2} C_{L,D}(\alpha) c(r) \delta r \quad (\text{III.13})$$

Où  $C_{L, D}$  sont les coefficients de portance et de traînée de la section de la pale respectivement,  $\alpha$  est l'angle d'attaque local du profil de pale,  $\beta$  est l'angle de calage (pitch) et  $\phi$  est l'angle de l'écoulement du vent (FIG III.7).

La force moyenne appliquée à l'élément de surface active est calculée en remplaçant les forces de portance et de traînée par leurs expressions dans l'équation (III.11).

On obtient alors la nouvelle expression de la force moyenne surfacique :

$$\delta F_{m L,D} = \rho \frac{W^2}{2} C_{L,D}(\alpha) c(r) \delta r \frac{N \delta \theta}{2\pi} \quad (\text{III.114})$$

Pour un disque actif d'épaisseur  $h$ , le volume de l'élément annulaire est  $dV = \delta r * r \delta \theta * th$ . Les forces par unité de volume sont donc :

$$f_{L,D} = \frac{\delta F_{m L,D}}{\delta V} = \rho \frac{W^2}{2} C_{L,D}(\alpha) c(r) \frac{N}{2\pi r h} \quad (\text{III.15})$$

Où  $W$  est la vitesse relative, elle est définie par l'expression suivante :

$$W = \sqrt{(\omega r + u_i)^2 + V^2} \quad (\text{III.16})$$

Le champ de vitesse axiale  $V$  et la vitesse tangentielle  $u_i$  sont obtenues à partir du calcul CFD sur le plan du Disque Actif.

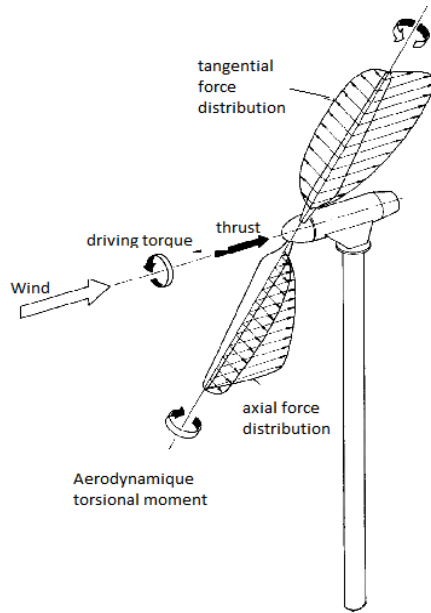


FIG. III.6. Représentation des forces aérodynamiques sur le profil d'une turbine éolienne bipale.

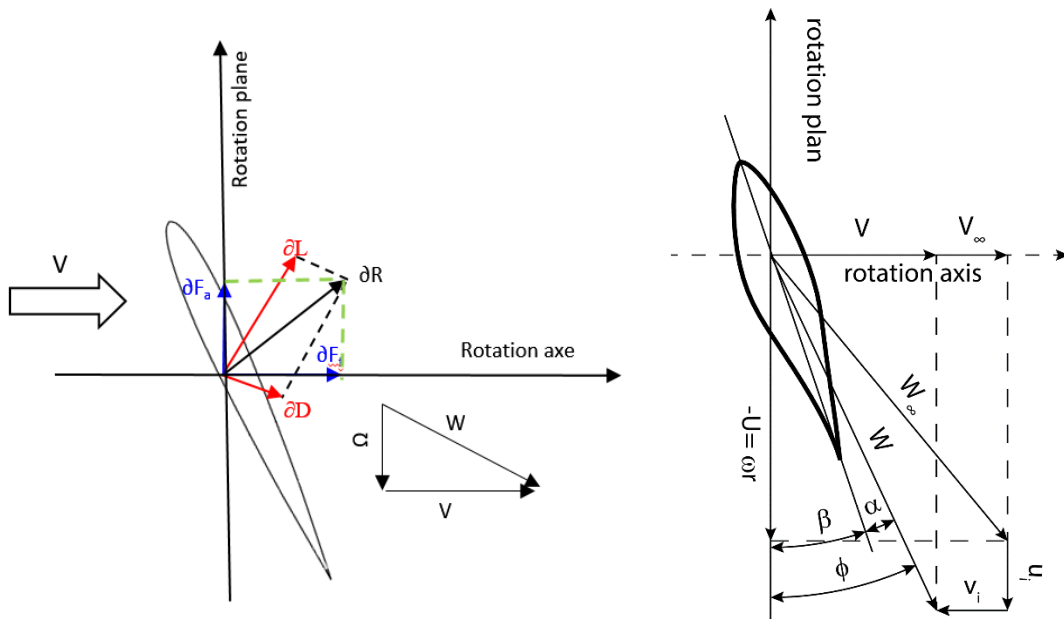


FIG. III.7 Projections des vitesses et des forces sur le plan de rotation.

Les forces de portance et de traînée sont projetées dans les directions axiale et tangentielle (FIG III.7), selon les expressions suivantes :

$$\delta f_a = \delta f_L \cos(\phi) + \delta f_D \sin(\phi) \quad (\text{III.17})$$

$$\delta f_t = \delta f_L \sin(\phi) - \delta f_D \cos(\phi) \quad (\text{III.18})$$

#### 4. 4-Correction des pertes de bout de pale

Pour inclure les effets tridimensionnels de perte en bout de pale, Shen et al. [59] ont introduit un facteur de correction  $F_1$  aux coefficients de portance et de traînée des profils 2D, comme suit :

$$C_{L,D} = F_1 C_{L,D}^{2d} \quad (\text{III.19})$$

Avec

$$F_1 = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( -n \frac{N(R_1-r)}{2r \sin \alpha} \right) \right] \quad (\text{III.20})$$

Où  $R_1$  est le rayon de la turbine et  $n$  est une fonction dépendante exprimée comme suit :

$$n = \exp[-0.125(RN\omega/V_\infty - 21)] + 0.1 \quad (\text{III.21})$$

#### 4. 5-Calcul de la puissance et de la poussée du Disque Actif

L'intégration des deux forces axiale  $\delta f_a$  et tangentielle  $\delta f_t$  sur le volume du Disque Actif permet de déterminer les expressions de la puissance et de la poussée du rotor.

La force de poussée (thrust) du rotor est obtenue en intégrant la force axiale  $f_a$  sur le volume du disque, suivant l'expression ci-dessous :

$$F_a = \int_V f_a dv = \int_V (f_L \cos \phi + f_D \sin \phi) dv \quad (\text{III.22})$$

La puissance du rotor est déduite, quant à elle, par l'intégrale de la force tangentielle  $f_t$  sur le volume du Disque Actif, comme suit :

$$F_t = \omega \int_V r f_t dv = \omega \int_V r (f_L \sin \phi - f_D \cos \phi) dv \quad (\text{III.23})$$

Pour le calcul par la technique CFD, et afin d'intégrer les forces axiales et tangentielles comme termes sources dans les équations de quantité de mouvement, une projection des forces est effectuée sur un repère de coordonnées cartésiennes, comme suit :

$$\begin{cases} f_x = -f_t \sin \theta \\ f_y = f_t \cos \theta \\ f_z = f_a \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

#### 4.6-. Modélisation de la Nacelle

La nacelle est également modélisée par un terme source ajouté aux équations de quantité de mouvement lors de la résolution des équations dans le domaine qui représente le volume de la nacelle. Cette dernière est représentée par un cylindre circulaire avec un diamètre de  $r_c=2.5\text{mm}$ , doté d'un coefficient de traînée constant  $C_{d, nac}= 1,2$ .

### III. 5- Modèle de Turbulence

La turbulence atmosphérique présente dans la région autour du rotor résulte de plusieurs phénomènes, notamment le gradient de vitesse du vent près de la surface, la génération et la dissipation d'énergie due à l'interaction du rotor avec le flux d'air environnant, ainsi que les variations de température dues au réchauffement (ou au refroidissement) du sol, qui influencent les mouvements des particules d'air en suspension.

D'expérience il a été observé que dans le sillage éolien proche, la turbulence est générée par les tourbillons marginaux produits par la pale en rotation [46, 64, 66 72]. Mais ces tourbillons marginaux se dissipent rapidement, en aval du rotor donnant lieu au phénomène du sillage.

Le modèle de turbulence choisi pour ce travail est le modèle k- $\varepsilon$  à deux équations de fermeture.

Le modèle k- $\varepsilon$  permet de prendre en considération la plupart des échelles de turbulence citée précédemment dans le phénomène du sillage. D'autre part, son utilisation dans la simulation de parcs éoliens a montré sa pertinence pour l'analyse de l'écoulement dans le sillage d'une éolienne [60]. L'équation de transport de la production de l'énergie cinétique turbulente  $k$  ainsi que la production du taux de dissipation  $\varepsilon$ , sont données respectivement, comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_t + G_b - \rho \varepsilon \quad (\text{III.25})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho \varepsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} G_b) \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{III.26})$$

Où  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  sont respectivement, les nombres de Prandtl turbulent pour  $k$  et  $\varepsilon$ .  $P_t$  est la production de l'énergie cinétique turbulente due au cisaillement,

$$P_t = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{III.27})$$

Et  $G_b$  est le terme qui représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux effets de flottabilité. Il est donné par l'expression suivante :

$$G_b = \beta_1 g_i \frac{\mu_t}{\sigma_T} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{g_i}{c_p} \right) \quad (\text{III.28})$$

Avec  $\beta_1 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{T}$ , qui représente le coefficient d'expansion thermique volumique de l'air.

Finalement, la viscosité turbulente est obtenue à partir de l'énergie cinétique turbulente,  $k$ , et de son taux de dissipation  $\varepsilon$ . L'expression  $\mu_t$  est donnée comme suit :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{III.29})$$

Les valeurs des constantes  $C_\mu$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  sont définies suivant le tableau III.1 :

Tableau III.1. Constantes standards du modèle de turbulence  $k$ - $\varepsilon$ .

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1	1.3

Cependant, ces valeurs sont prises en considération dans le modèle  $k$ - $\varepsilon$  lorsque  $G_b = 0$ . Dans le code de calcul ANSYS FLUENT 19 utilisé dans ce travail,  $C_{\varepsilon 3}$  n'est pas spécifiée, mais elle est calculée et prise en compte par la relation suivante  $C_{\varepsilon 3} = \tanh w/u$  comme définie dans le manuel théorique de FLUENT 19.

## 5. 1-Modification des constantes du modèle de turbulence

### -Cas de la couche limite atmosphérique neutre

Les constantes du modèle de turbulence  $k$ - $\varepsilon$  ont été modifiées suivant le modèle proposé par Crespo et al [35]. Cette modification a été apportée afin d'améliorer la résolution des phénomènes de turbulence des petite échelles (*small scales*) et d'atténuer le phénomène diffusif dans le sillage éolien.

Afin de recalibrer notre modèle pour approcher les conditions d'écoulement atmosphériques, on utilise la modification des valeurs de  $C_\mu = 0.033$  et  $C_{\varepsilon 1} = 1.176$ .

### -Cas de la couche limite atmosphérique stable et instable

Pour la simulation des conditions d'écoulement dans la couche limite atmosphérique avec stratification thermique (stable ou instable), les équations du modèle de turbulence  $k$ - $\varepsilon$  admettent des changements de valeurs des coefficients  $C_\mu$ ,  $C_{\varepsilon 1}$  et  $C_{\varepsilon 3}$  par rapport aux coefficients originaux [61].

Le coefficient  $C_\mu$  est obtenu à partir de la solution empirique de l'énergie cinétique turbulente combinée à celle de son taux de dissipation, comme suit :

$$k_0(z) = \sqrt{\frac{\mu T_0 \varepsilon_0}{\rho C_\mu}} = 5.48 u_*^2 \left[ \frac{\phi_\varepsilon(z/L)}{\phi_m(z/L)} \right]^{1/2} \quad (\text{III.30})$$

Les valeurs utilisées dans ce travail ont été proposées par Crespo et al [37], comme suit :

$$C_\mu = 5.48^{-2} = 0.033, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.176 \text{ et } C_{\varepsilon 3} = 0.8.$$

Les simulations d'écoulement dans les différentes conditions de stratification thermique sont différenciées à partir des conditions aux limites imposées aux frontières du domaine de calcul.

### III. 6-Conditions aux frontières

Les conditions aux frontières imposées dans ce problème décrivent les différents phénomènes qui évoluent dans l'écoulement de couche limite atmosphérique complètement développé sur un terrain plat dans le cas de différentes conditions de stratification thermique (neutre, stable et instable). Les expressions décrivant ce type d'écoulement sont basées sur des lois de transfert de quantité de mouvement et de chaleur. Afin de modéliser les conditions hypothétiques représentant chaque état de la CLA, le champ de vitesse non perturbé est représenté par le profil de vitesse expérimental mesuré à l'entrée de la soufflerie (FIG. III.8).

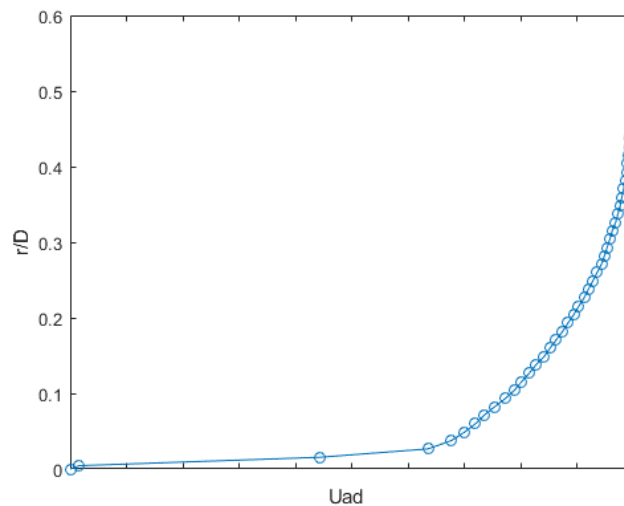


FIG III. 8 Profil de la vitesse à l'entrée de la soufflerie.

Pour tenir compte des différentes conditions de stabilité thermique (stable, instable), le flux thermique à la paroi a été calculé à l'aide de la loi de Newton et définit pour des conditions de transfert de la chaleur dans la soufflerie.

### 6.1-Profil de la vitesse du vent dans la couche limite atmosphérique

Le profil de la vitesse dans l'écoulement de CLA est défini par le profil de vitesse logarithmique proposé par [60, 61] et qui s'écrit comme suit :

$$V(H_1) = \frac{u_{ref}^*}{\kappa} \ln\left(\frac{H_1+H_0}{H_1}\right) \quad (III.31)$$

Avec

$$u_{ref}^* = \frac{\kappa U_{ref}}{\ln\left(\frac{H_{ref}+H_0}{H_{ref}}\right)} \quad (III.32)$$

Où  $\kappa=0,4187$  est la constante de Von Karman.

L'énergie cinétique turbulente à l'entrée  $k$  et le taux de dissipation  $\varepsilon$  sont définis comme dans [62] et exprimés comme suit :

$$k = \frac{u_{ref}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} = 5,5u_{ref}^{*2} \quad (III.33)$$

$$\varepsilon(H) = \frac{u_{ref}^{*3}}{K(H+H_0)} \quad (III.34)$$

### 6.2- Conditions sur les parois de la soufflerie

Le profil des vitesses de vent à l'entrée du domaine de calcul, pris en compte dans cette étude est exprimé par un profil de données de mesure, prélevées à l'entrée de la soufflerie, et imposées comme condition aux limites à partir d'une fonction définie par l'utilisateur (UDF) (FIG III. 8). Elle est représentée sur le domaine de calcul par (BC1) sur la (FIG III. 9).

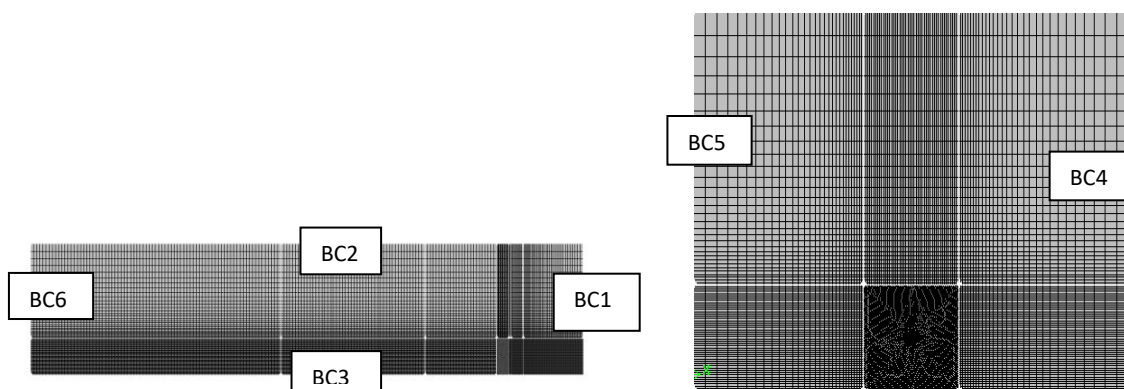


FIG III. 9 Conditions aux limites à chaque frontière du domaine de calcul.

Les conditions utilisées pour le reste des frontières, sont explicitées et représentées sur le domaine de calcul discrétisé : à la limite supérieure (BC2), une condition de "symétrie" est définie, ce qui implique que le vecteur vitesse est parallèle à l'écoulement qui est orienté dans la direction de l'axe (z). À la limite

inférieure du domaine (BC3), une condition de paroi est définie. Sur les limites gauche (BC4) et droite (BC5), une condition de "symétrie" est imposée, tandis que la condition de "Pressure Outlet " est définie à la sortie du domaine (BC6) (FIG III. 9).

Cette étude est appliquée à une éolienne immergée, située sur un terrain plat, sans relief. Les terrains plats sont caractérisés généralement, par une longueur de rugosité qui varie entre  $3,10^{-3}$  à  $5,10^{-3}$  m [63], nous avons appliqué une condition de paroi rugueuse pour (BC3) avec  $y_0 = 3,10^{-3}$  m [64].

Il est bien connu que le développement du sillage est influencé par la topographie et la rugosité locale du sol, en particulier lorsque la hauteur du moyeu est au niveau de la couche limite atmosphérique (CLA). D'autres valeurs sont appliquées pour les zones sablonneuses, rocheuses, les forêts denses ou pour les cas offshore [65]. Différentes lois sont également proposées pour calculer  $y_0$  [66]. Ces cas ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Les conditions aux limites telles qu'appliquées sur notre domaine de calcul, sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 Conditions aux limites du domaine de calcul.

Frontières	Conditions
BC1	Profil de vitesse d'entrée (UDF)
BC2	Symétrie
BC3	Paroi
BC4	Symétrie
BC5	Symétrie
BC6	Pression de sortie

### 6.3-Calcul du flux thermique à la paroi inférieure

Tel qu'illustré par la loi de Newton le flux de chaleur peut être défini à la paroi par :

$$q_w = h_t. S. (T_p - T_a) \quad \text{(III.35)}$$

Cette formule exprime le transfert de la chaleur qui s'effectue entre la paroi du sol de la soufflerie et l'air ambiant.  $T_a$  caractérise la température de l'air ambiant.  $h$  est le coefficient de transfert superficiel qui se dit aussi coefficient de transfert convectif,  $S$  est la surface d'échange entre les deux milieux, elle correspond à la surface de la soufflerie telle qu'elle est décrite à la section III.7, elle est calculée par la longueur et la largeur du sol de la soufflerie ( $Z^*1$ ).

#### 6.4-Calcul du coefficient de transfert superficiel

Le coefficient de transfert superficiel  $h_t$  appelé aussi coefficient de transfert convectif, est calculé en fonction du nombre adimensionnel de Nusselt  $N_u$  et de la conductivité thermique  $K$  du matériau de la paroi.  $h_t$  est défini ainsi :

$$h_t = N_u * (K/Z) \quad (\text{III.36})$$

Où  $N_u$  est le nombre de Nusselt, il est formulé à partir de  $N_u = 0.5 * G_r^{1/4}$ . Il donne une mesure de l'efficacité de la convection dans le transfert de chaleur entre l'air en mouvement et la surface du sol avec lequel il est en contact.  $K$  et  $Z$  sont respectivement la conductivité thermique du sol estimé pour la soufflerie à 0.16 W/m°K et la longueur de la surface de la paroi  $Z=2\text{m}$ .

Le transfert de chaleur qui s'effectue entre l'air et la paroi est un transfert par convection naturelle à cause de la différence de température entre l'air et la paroi. Cependant, la circulation de l'air dans la soufflerie est assurée par une vitesse à l'entrée, dans notre cas 13.7 m/s. De ce fait, nous utiliserons la température ressentie dans le milieu  $T_r$  et non pas la température ambiante de l'air  $T_a$ . Pour le calcul du flux de chaleur à la paroi  $q_w$  avec  $G_r$  le nombre de Grashof qui exprime le rapport entre les forces de flottabilité (induites par les différences de densité liées aux variations de température) et les forces visqueuses.

$G_r = g\beta * (T_p - T_a)Z^3 / \nu^2$  est l'expression du nombre de Grashof pour déterminer le coefficient de transfert superficiel  $h$ , où  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  est l'accélération de la gravité et  $\nu = 15.6 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  est la viscosité cinématique de l'air et  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique de l'air.  $(T_p - T_a)$  est la différence de température entre la paroi et l'air ambiant estimé à 10°C et  $L$  est la longueur de la surface en contact dans la soufflerie, elle est égale à 2m comme décrite dans la section 7. On obtient  $Gr = 3.22 * 10^{12}$ ; cette valeur indique que le transfert est dominé par les forces de flottabilité par rapport aux forces visqueuses, ce qui suggère un fort mouvement convectif du fluide.

Le nombre de Nusselt est alors calculé pour cette valeur du nombre de Grashof, on obtient  $N_u = 5 * 10^4$ . Cette valeur indique que le transfert entre la paroi et l'air ambiant dans la soufflerie est prédominé par le transfert convectif. Ce résultat confirme la conclusion émise par le résultat de la valeur obtenue du nombre de Grashof. On en déduit que la convection mixte prédomine dans cet écoulement.

Le coefficient de transfert superficiel est calculé pour ces valeurs du Nombre de Nusselt  $N_u$  et de Grashof  $G_r$ , on obtient :

$$h_t = 4 * 10^3 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$$

## 6.5-Estimation du flux thermique à la paroi inférieure

Le flux de chaleur exprimé en fonction du coefficient de transfert superficiel  $h$ , et de la température ressentie dans le milieu est calculé-pour chaque cas de stratification thermique, stable et instable

### 6.5-1-Température ressentie dans le milieu :

La température ressentie dans le milieu est celle qui se trouve sous l'influence de la vitesse d'entrée du fluide et qui peut être calculée par la formule, donnée par Alinot [51] qui s'écrit comme suit :

$$T_{input} = -g/c_p * (z-z_0) \quad (III.37)$$

#### -Cas de stratification thermique stable

La température ressentie est calculée pour des conditions de stratification thermique stable par la loi (III.37) où le milieu ambiant est caractérisé par la température ambiante  $T_a$ , afin d'assurer un transfert de chaleur vers le bas, ce qui réalise une condition de flux thermique à la paroi  $q_w > 0$  (la force de gravité l'emporte sur la forces d'Archimède de l'élément de volume d'air considéré); on obtient ainsi:

$$\text{Pour} \quad \begin{cases} T_{input} = 21.09^\circ\text{C} \\ q_w = 208,91 \text{ W} \end{cases} \quad (III.38)$$

#### -Cas de stratification thermique instable

La température ressentie est calculée pour des conditions de stratification thermique instables par la loi (III.37) où la température ambiante  $T_a$  est considérée égale à  $25^\circ\text{C}$  afin d'assurer un transfert de chaleur vers le haut et engendrer un taux de turbulence suffisant et réaliser une condition de flux thermique à la paroi  $q_w < 0$  (la force d'Archimède l'emporte sur la force de gravité de l'élément de volume d'air considéré); on obtient ainsi:

$$\text{Pour} \quad \begin{cases} T_{input} = 11.6^\circ\text{C} \\ q_w = -116.63 \text{ W} \end{cases} \quad (III.39)$$

## 6.6-Calcul de la Longueur de Mounin-Obukhov $L$

Le paramètre de stabilité reconnu par les météorologues est la gradeur  $z/L$  comme on l'a vu au chapitre II. Cependant  $L$ , qui est le nombre sans dimension de Mounin-Obukhov [53], caractérise aussi l'état de l'atmosphère Terrestre et il est considéré comme critère de stabilité :

Où

$$L = \frac{u_*^3 c_p \rho T_w}{k g q_w} \quad (III.40)$$

$u^*$  représente la vitesse de friction due aux frottements de l'air à la rugosité du sol ; elle est calculée à l'aide de mesure de la vitesse du vent  $v(z)$  et de la valeur de la rugosité du sol  $z_0$ , qui est déduite à partir de la nature de la surface de la terre. La vitesse de friction est calculée à partir des conditions expérimentales par le profil logarithmique (éq. II.12) du vent.

Dans notre cas nous avons :  $u^* = 0.2$  m/s pour la valeur de la vitesse à l'entrée du rotor éolien à la hauteur du moyeu  $U_\infty = 13.7$  m/s et pour une valeur de rugosité  $z_0 = 0.003$  m définie par les conditions expérimentales, avec  $c_p = 1007$  J/kg °K,  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup>,  $\kappa = 0.41$ ,  $T_w$  est la température à la paroi définie égale à 15°C (288.15 °K) et  $q_w$  est le flux de chaleur thermique imposé à la paroi.

-Pour le cas de stratification thermique stable nous obtenons : **L=3,38**

-Pour le cas de stratification thermique instable, **L= - 6.06**

Les valeurs de températures ressenties et du flux à la paroi (éq III.38, 39) seront utilisées en tant que conditions aux frontières pour chaque cas de stratification thermique de l'atmosphère.

### III. 7-Etude expérimentale par la méthode PIV

Une étude expérimentale du sillage a été réalisée dans la soufflerie du laboratoire Dynfluid de l'école d'Art et métier Paris Tech. La soufflerie est en boucle fermée, avec un ventilateur axial de 3 m de diamètre et un moteur de 120 kW entraîne le ventilateur. La section d'essai est précédée d'un plénum et d'un convergent avec un grand rapport de contraction, égal à 12,5, produisant un profil de vitesse uniforme jusqu'à 40 m/s, avec une faible turbulence. Les dimensions de la section d'essai sont respectivement de 1,35 m de hauteur, 1,65 m de largeur et 2 m de longueur (FIG III.10). Les mesures de PIV sont activées à partir d'un signal transmis par le système d'acquisition de données à travers un capteur qui suit une cible réfléchissante fixée au rotor (FIG III.11).

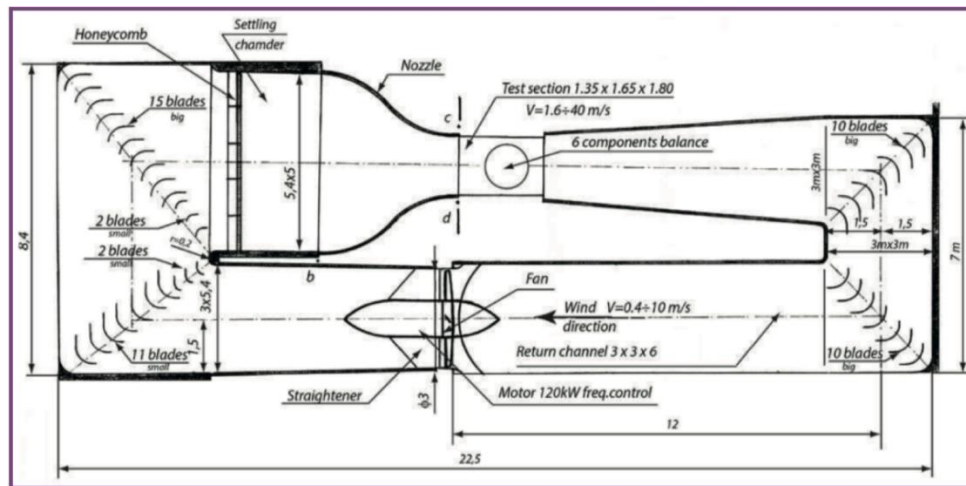


FIG III. 10. Dispositif expérimental en soufflerie.

### 7.1 -Caractéristiques de l'écoulement dans la soufflerie

Deux hauteurs de moyeu, exprimées en fonction du diamètre du rotor, ont été testées :  $h/D = 0,7$  et  $h/D = 1$ . La vitesse de l'écoulement en amont est une progression naturelle de l'écoulement. En raison de la proximité du sol, le profil de vitesse mesuré est parabolique. Cependant, à la hauteur de l'éolienne, la vitesse d'entrée a une valeur constante. Ces expériences sont réalisées pour  $U_{\infty} = 13,7$  m/s avec une vitesse de rotation constante de la turbine  $\Omega = 11.900$  tr/min. Le rapport de vitesse de pointe est donc  $\lambda = \omega R / U_{\infty} = 4,75$ . Le nombre de Reynolds basé sur la corde de l'extrémité de la pale et la vitesse périphérique de l'extrémité  $U$  est  $Re = 23000$  et l'intensité de turbulence est fixée à  $TI = 1\%$ . La couche limite qui se développe à la surface de la soufflerie est semblable à la couche limite d'une plaque plane, dont l'épaisseur est de l'ordre de  $0,45 D$ . Cette valeur a été déterminée expérimentalement dans des travaux antérieurs par Dobrev et al [29].

L'efficacité de l'éolienne est représentée par son coefficient de puissance  $C_p$  qui est le rapport entre la puissance obtenue  $P$  et la puissance disponible. La puissance dépend de la vitesse spécifique (tip speed ratio)  $\lambda = 4,75$  proche de son optimum, qui a été déterminé.

La valeur de l'intensité de la turbulence est fixée à l'entrée de la soufflerie, car elle engendre une forte influence sur l'écoulement, et ce afin d'isoler les effets du rotor sur la turbulence produite dans le milieu.



FIG III. 11. Vue schématique de la soufflerie du laboratoire DynFluid.

## 7.2-Dispositif PIV

Le système PIV est contrôlé par Dynamics-Studio 2.30 de Dantec. Les images sont prises avec un Nd-YagLitron Nano-L 200-15, avec une puissance d'impulsion de 200 mJ et deux caméras Dantec-Flow-Sense 4M avec une résolution de 2048x2048 pixels. Les caméras sont équipées d'objectifs Nikkor AF-D 180 mm f/2.8IF ED, pour les mesures de sillage proche. Pour les mesures de sillage lointain, les caméras sont équipées d'objectifs AF Micro-Nikkor 60mm f/2.8D. Le système d'acquisition est équipé de deux cartes NI-1428 et synchronise les images avec des flashes laser. L'écoulement estensemencé de micro-gouttelettes d'huile d'olive générées par un générateur de brouillard (Dantec 10F03). Le diamètre moyen des gouttelettes est de 2 à 5 $\mu$ m. Les deux caméras PIV, qui sont synchronisées avec la position azimutale du rotor et fonctionnent en parallèle, capturent le champ d'écoulement jusqu'à une distance de 7D derrière l'éolienne [67].

Le sillage proche est analysé sur plusieurs plans azimutaux (de 0° à 165°). Chaque plan de mesure correspond à 500 prises de vue. Les mesures du sillage lointain sont effectuées sur 6 plans azimutaux (de 0° à 150°), et chaque plan de mesure correspond à 2x500 plans. L'angle 0° correspond à la position verticale des pales. En raison de la limitation de la puissance du laser et de la résolution de la caméra, le champ de vitesse est divisé en six fenêtres qui se chevauchent. Ces fenêtres désignées par h1, h2, h3, m1, m2 et m3 sont présentées sur la FIG III.12.

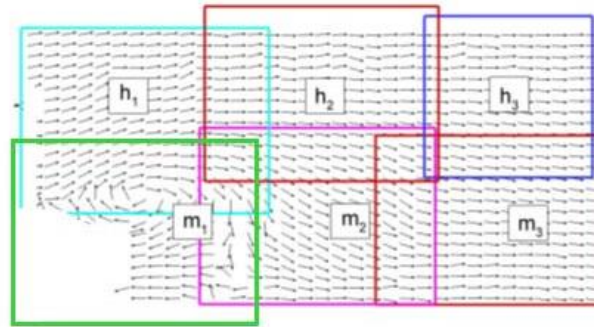


FIG.III. 12. Position des particules dans l'écoulement.

### 7.3-Mesure par méthode PIV

Cette méthode de mesure a été utilisée afin de permettre de visualiser les champs de vitesses et vorticité instantanément. La méthode PIV est basé sur une technique de détermination des trajectoires des particules entre deux instantanés de capture et de ce fait calculer la vitesse des particules en fonction du temps.

L'enregistrement sur un plan éclairé par laser dévoile un ensemble de positions de particules dans l'écoulement. À l'instant suivant, le plan des positions des particules est de nouveau capturé par des caméras. La comparaison des positions sur les deux plans éclairés donne le déplacement effectué par les particules sur un laps de temps  $\Delta t$  connu et permet d'obtenir le champ de vitesse des particules :

$$V_X = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

$$V_Y = \frac{\Delta Y}{\Delta t}$$

En effet, un plan de capture PIV comporte plusieurs points de particules. Un calcul d'intercorrélation est utilisé pour identifier la position des particules dans les deux images successives [58].

### 7.4-Caractéristiques du rotor éolien

Nous avons utilisé un rotor de petite dimension comme prototype afin d'explorer l'écoulement et le développement du sillage en aval. Le rotor dimensionné et fabriqué à cet effet est composé de deux pales avec un profil de plaque plane.

Le rotor éolien possède les caractéristiques suivantes : le diamètre du rotor est  $D=100$  mm ; Le diamètre de moyeu d'environ  $d=14$  mm ; Le profil des pales est celui d'une plaque plate d'épaisseur  $th =0,5$  mm, et la corde  $c$  varie de 9 mm à la base, à 6 mm à l'extrémité. Les pales sont non vrillées, droites avec un angle d'inclinaison de  $8^\circ$ .

## III. 8- Résolution numérique

## Chapitre III : Méthodologie, Modélisation Mathématique

Dans cette partie nous présentons le développement numérique adopté afin de résoudre le modèle mathématique proposé dans cette partie du travail.

La résolution du système d'équations qui régissent le problème étudié est réalisée à l'aide du code de calcul commercial Ansys Fluent 19, pour un fluide incompressible en écoulement tridimensionnel instationnaire.

Le logiciel Fluent présente de nombreux avantages et facilités, à savoir la définition des conditions initiales et aux limites, l'intégration de domaine de calcul aussi complexe soient-ils ainsi qu'une panoplie de modèles de turbulence.

D'autre part il accepte des programmes additionnels en sous-routine afin d'exprimer des forces externes (termes sources) et des profils aux limites (profil vertical de vitesse).

Un programme écrit en langage C, a été développé afin d'intégrer les équations développées au logiciel Fluent par l'intermédiaire d'une fonction définie par l'utilisateur (USER DEFINE FUNCTION), dite UDF.

Deux UDF sont définies dans ce travail, la première, concerne le développement des équations des forces aérodynamiques exercées par le rotor éolien sur l'écoulement du vent du modèle hybride BEM-AD, détaillé dans la section III. 4. La deuxième exprime le profil de température et de la vitesse à l'entrée du domaine de calcul, utilisée en tant que condition à l'entrée

L'ensemble des équations, ainsi qu'une équation d'état et les conditions initiales/aux limites définies ci-dessus, exprimé en système de coordonnées cartésiennes, nous permet de modéliser le champ d'écoulement et de résoudre les variables d'écoulement inconnues en chaque point de l'espace.

Afin de procéder à la résolution de notre problème, les étapes suivantes seront à développer :

- Discrétisation du domaine de calcul en volumes de contrôle ;
- Maillage du domaine et étude de sensibilité de la taille du maillage sur les résultats calculés.
- Répartition des conditions sur les frontières du problème pour la fermeture du système d'équation.
- Choix du schéma du couplage pression -vitesse.

### 8.1- Domaine de calcul

Le domaine de calcul est composé d'une zone fluide et d'un disque mince qui représente le rotor (FIG III. 13).

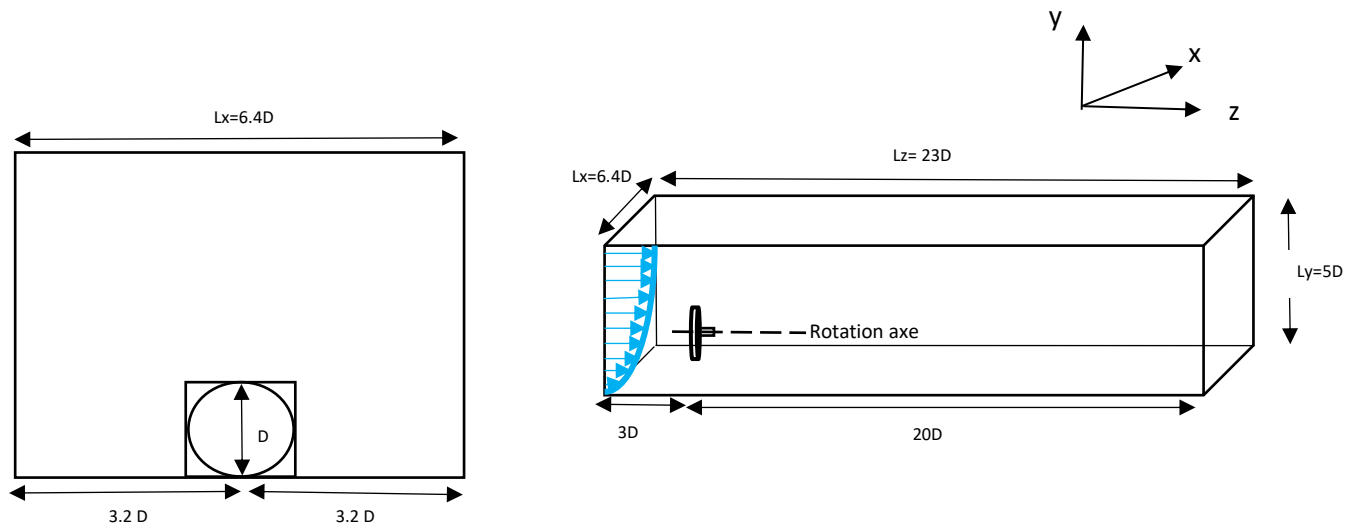


FIG.III. 13. Représentation du domaine de calcul.

Le logiciel utilisé est basé sur la méthode de décomposition du domaine en volumes finis. Une résolution du système d'équations discrétisées, s'opère à chaque volume de contrôle du domaine.

L'écoulement dans le voisinage du rotor immergé dans une couche limite atmosphérique est purement tridimensionnel.

Afin de représenter le domaine tel qu'il est considéré lors de la résolution des équations discrétisées, on définit tout d'abord les dimensions du domaine, qui est un parallélépipède de longueur  $L_z = 23D$ , de largeur  $L_x = 6,4D$  et de hauteur  $L_y = 5D$ , où le diamètre du disque correspond au diamètre du rotor dans la soufflerie. L'épaisseur du disque est égale à  $h = 0,4D$ . L'origine des coordonnées cartésiennes est fixée au centre du disque et le flux d'entrée est dirigé le long de l'axe ( $z$ ) (FIG III.13).

On doit discrétiser le domaine contenant le domaine fluide et le disque rotor, en créant un maillage de l'ensemble de l'espace contenant l'écoulement ainsi que le domaine représentant le rotor et son épaisseur.

## 8.2- Discrétisation du domaine de calcul

Le domaine de calcul est discrétisé en une grille qui contient environ 4 millions de cellules, avec un maillage fin autour du disque du rotor et au-dessus de la paroi inférieure. Dans le reste du domaine, une grille plus grossière est générée (FIG III. 9). La surface du sol étant caractérisée par une longueur de rugosité  $y_0$ , la hauteur de la première rangée de cellules au-dessus du sol ( $y_p$ ) doit être supérieure à

$y_0$  [59]. On s'assure donc que la condition ( $y_p > k_s$ ) est remplie,  $k_s$  étant défini en fonction de  $y_0$ , comme suit :

$$k_s = \frac{9,793 y_0}{C_s} \quad (\text{III.41})$$

Où  $C_s \approx 0.5$  est une valeur empirique introduite par Réthoré [24].

### 8.3- Etude de sensibilité du maillage

Un test de sensibilité du maillage est effectué pour améliorer la qualité des résultats de calcul et optimiser le coût et la précision de la simulation. Certains travaux [48] ont comparé le nombre de nœuds par diamètre de rotor requis en aval de la turbine pour capturer la turbulence du sillage. Ils ont relevé 4, 8, 16 et 32 (nœuds/diamètre de rotor) et ont montré que 8 à 16 (cellules/diamètre de rotor) sont suffisantes et recommandées pour l'étude du sillage. L'erreur relative obtenue, pour ces travaux, était inférieure à 1%, mais ils ont conclu que l'étude du maillage devait tenir compte du temps CPU (unité centrale de traitement) de la machine.

Dans le présent travail, quatre grilles ont été créées et testées, deux grilles fines, une moyenne et une grossière. Le nombre de cellules est augmenté de manière homogène dans les trois directions de l'écoulement afin de ne pas perturber la topologie du domaine. L'erreur relative absolue  $\epsilon$  (%), entre la vitesse axiale moyenne du rotor et les données expérimentales, est calculée à la hauteur du moyeu en utilisant la relation suivante :

$$\epsilon = \frac{u_{\text{exp}} - \bar{u}}{u_{\text{exp}}} \quad (\text{III.42})$$

L'erreur est calculée pour deux distances en aval du rotor,  $z=5D$  et  $z=7D$ . Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 3 qui montre que les erreurs obtenues avec les deux configurations de maillage fin sont très proches, et sont égales à 2.899% et 3% à  $z=5D$ , et à 5,7% et 5.6% pour  $z=7D$ , pour la grille\_3 et la grille\_4, respectivement. Ces résultats indiquent que le maillage\_3 est bien adaptée à cette étude, car il permet d'obtenir des résultats acceptables en moins de temps CPU. On a choisi donc d'adapter notre maillage à la grille\_3 afin de gagner en temps de calcul.

Tableau III.3. Etude de sensibilité du maillage.

Grille de maillage	Nombre de cellules	Erreur relative absolue (%)	
		$z/D=5$	$z/D=7$
1	<b>966 527</b>	19.2%	5.8%
2	<b>1 933 054</b>	19.1%	5.6%

3	<b>3 866 109</b>	2.899%	5.7%
4	<b>4 627 959</b>	3%	5.6%

#### 8.4- Schémas et Algorithme de couplage

Pour la résolution du système d'équations linéaires résultant. L'algorithme de couplage SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) développé par Patankar [68] est alors utilisé afin de résoudre le couplage vitesse pression  $n$ . Un schéma itératif est alors effectué à chaque centre de volume de contrôle afin de calculer la valeur de la pression, utilisée par la suite dans la résolution de l'équation de quantité de mouvement.

Les schémas Upwind du second ordre et du premier ordre sont appliqués respectivement pour les équations de la quantité de mouvement et de la turbulence.

Le pas de temps est fixé à  $\Delta t = 0,0001s$ , ce qui donne un nombre CFL d'environ 1 pour assurer la stabilité de l'écoulement [69]. Les calculs ont été effectués pour plus de 4 000 pas de temps, ce qui correspond au temps physique  $t=0,4 s$  et à environ 80 révolutions du rotor. Ainsi, la stabilité des calculs est assurée et des informations suffisantes sur les structures de l'écoulement turbulent du sillage sont obtenues.

Le critère de convergence a été fixé à  $10^{-6}$  pour la somme des résidus de l'équation de continuité.

### III. 9- Conclusion

Dans ce chapitre, les modèles mathématiques et numériques utilisés pour l'extrapolation verticale du profil de la vitesse du vent et pour l'analyse du sillage éolien ont été développés. Le dispositif expérimental appliqué dans un laboratoire de l'ENSAM ParisTech pour la mesure du sillage en aval d'un petit prototype d'éolienne bipale a été présenté.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats obtenus pour chacune des deux parties des travaux effectués au cours de cette thèse.

# **Chapitre IV**

## **Résultats & Discussions**

## IV-1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu les résultats obtenus pour l'extrapolation de la vitesse de vent de 10 à 50m de hauteur, par le modèle RNA.

Les résultats obtenus pour l'écoulement du vent à travers un disque rotor, immergé dans la couche de surface de l'atmosphère, sont présentés et analysés dans une seconde partie.

## IV.2-Extrapolation verticale de la vitesse du vent

Cette étude est appliquée à des données mesurées par l'Office National de la Météorologie (ONM) à la station de Ksar Chellala située à une Latitude de 35.10° N, longitude : 02.19° E, et à une altitude de 800 m. Comme noté précédemment, les travaux effectués commencent par un traitement des données. Nous présentons donc en premier les données utilisées et les résultats de leur pré-traitement. Ensuite nous présentons l'étude de validation du modèle développé qui a été appliqué à des données vent de référence. Puis exposeront les résultats de l'étude relative aux données de Ksar Chellala.

### 2.1. Données d'entrée

L'ensemble de données d'entrée est formé par une matrice M4 composée de quatre vecteurs qui sont : la vitesse (V) et la direction (D) du vent, la température (T) et le taux d'humidité relative de l'air (RH). Ces données sont des moyennes trihoraires des mesures instantanées qui ont été enregistrées, à 10 m de hauteur, durant une année, avec 8 données par jour. Des données vents mesurés à 50 mètres de hauteur sont également utilisées (Tableau IV.1). Les échantillons des données utilisées sont représentés dans les figures IV.1, IV.2 et IV.3.

TABLEAU IV.1-Caractéristiques des données de la station de Ksar Chellala – Matrice M4.

Données	Nombre d'échantillons	Valeurs Minimum-maximum
1. Vitesse(m/s) à 10 m	2920	Vitesse [0 – 23 m/s]
2. Direction du vent (°) à 10m		Direction [0° – 360°]
3. Temperature (°C) à 10m	2920	[-22.0°C – 397.0°C ] x (0.1)
4. Humidité Relative en (%) à 10m	2920	[0 – 100]
5. Vitesse (m/s) à 50 m	2920	Vitesse [0 – 23 m/s]
6. Direction du vent (°) à 50m		Direction [0° – 360°]

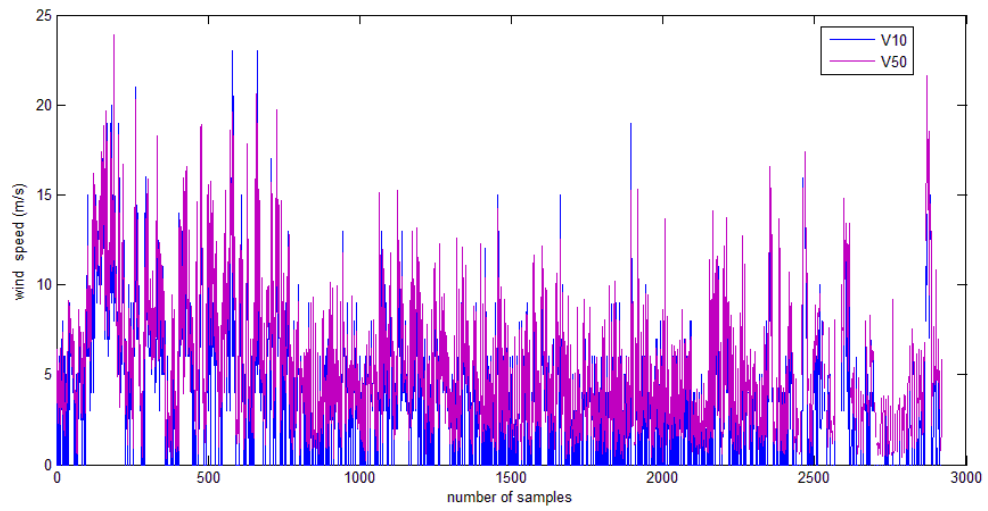


FIG IV.1. Séries de mesures N°1 et 2 : vitesse du vent à 10 et 50m de hauteur.

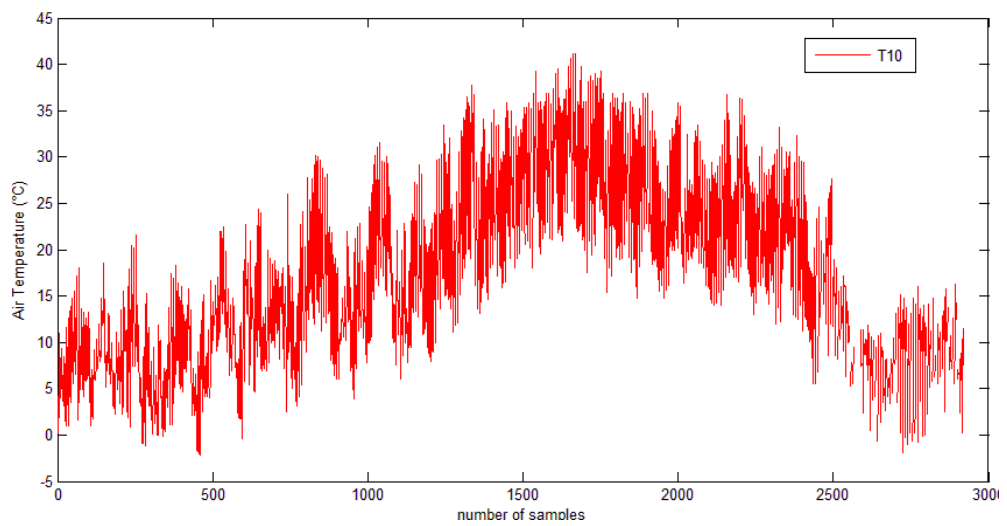


FIG IV.2. Série de mesures, N°3 : température T à 10 m de hauteur.

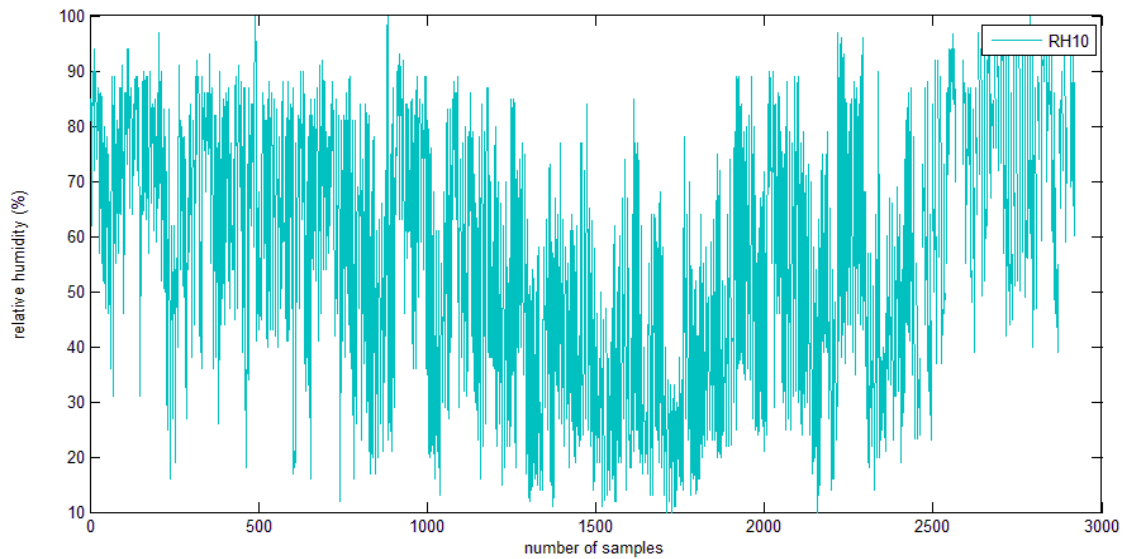


FIG IV.3. Série de mesures N°4 : Taux d'humidité relative RH à 10 m de hauteur.

Un réseau de neurone supervisé est utilisé. Un vecteur de données cible est intégré afin d'optimiser le réseau de neurone artificiel. Les mesures de vitesses de vent à 50m de hauteur sont utilisées à cet effet (Schéma III.1).

L'analyse de l'ensemble de données, révèle l'existence de valeurs erronées, manquantes et aberrantes. Lors du prétraitement des données, l'un critère de sélection est la condition  $V_{10} > V_{50}$ ,  $V_{10}$  étant la vitesse mesurée à 10 m de hauteur, et  $V_{50}$ , la vitesse mesurée à 50m. Ce critère est imposé sur chaque ligne de la matrice  $M_4$  ainsi que sur celles du vecteur cible. Cette hypothèse permet d'améliorer la prédiction du réseau de neurones en minimisant les erreurs et la fonction coût. Les FIG IV. 4 et 5 représentent un extrait des deux signaux de la vitesse du vent à 10 et 50 m (original et corrigé).

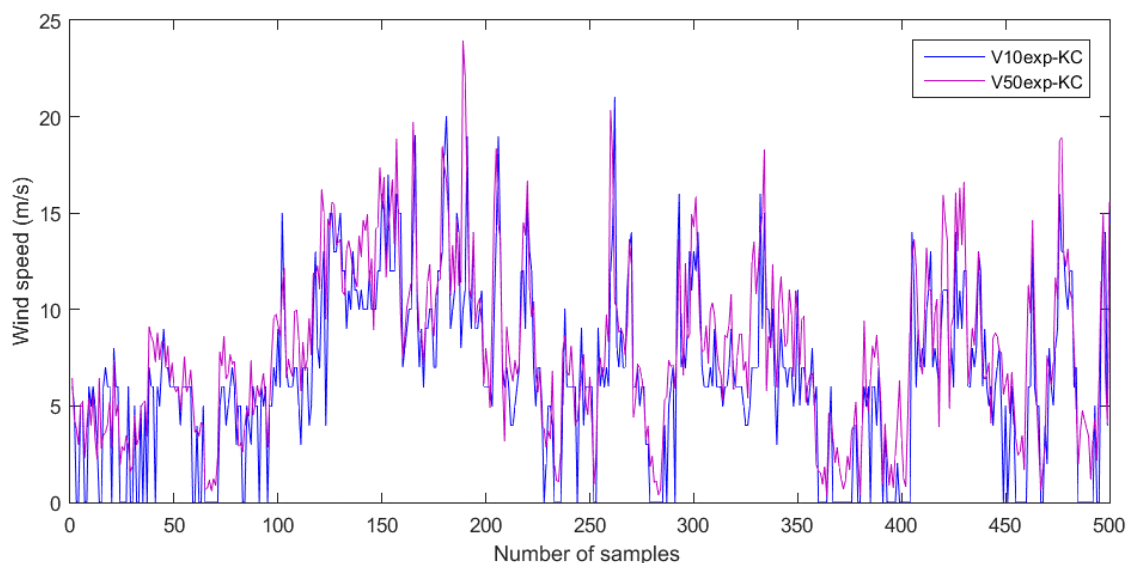


FIG IV.4. Signal original des données de la vitesse du vent à 10 et 50m.

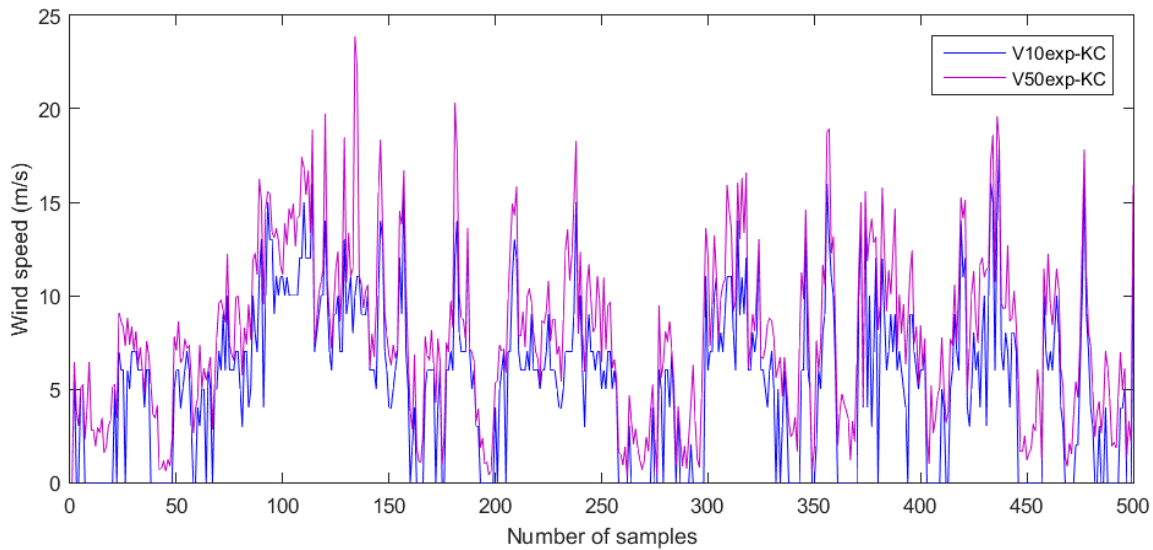


FIG IV.5. Signal corrigé des données de la vitesse du vent à 10 et 50m.

## 2.2- Validation du modèle proposé

Le modèle utilisé pour la prédiction des vitesses de vent a été testé et validé par une simulation utilisant des données de mesures de vent provenant de la station d'Almas en Iran [70]. Ces données ont été choisies car elles présentent une qualité et une fiabilité de mesures appréciable. Avec un nombre de 61.292 données mesurées, des données moyennées sur un intervalle de temps de 10min et 0.1% de valeurs aberrantes (FIG. IV.6, 7, 8). Pour cet ensemble de données, aucun critère de sélection n'a été appliqué.

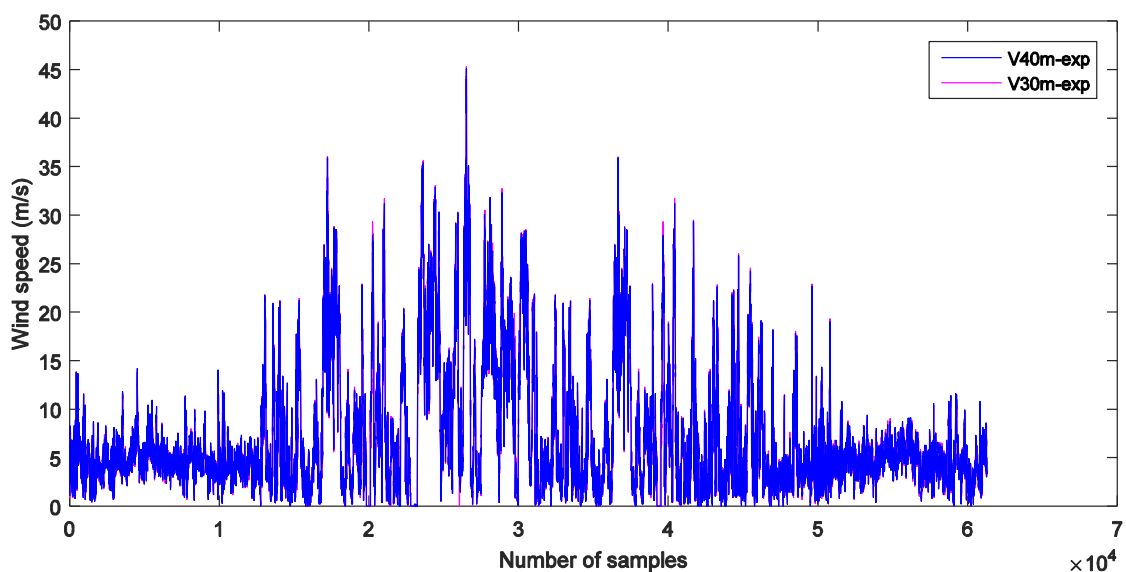


FIG IV. 6. Signal de mesures de données de vitesses de vent à 30 et 40 m, Station d'Almas

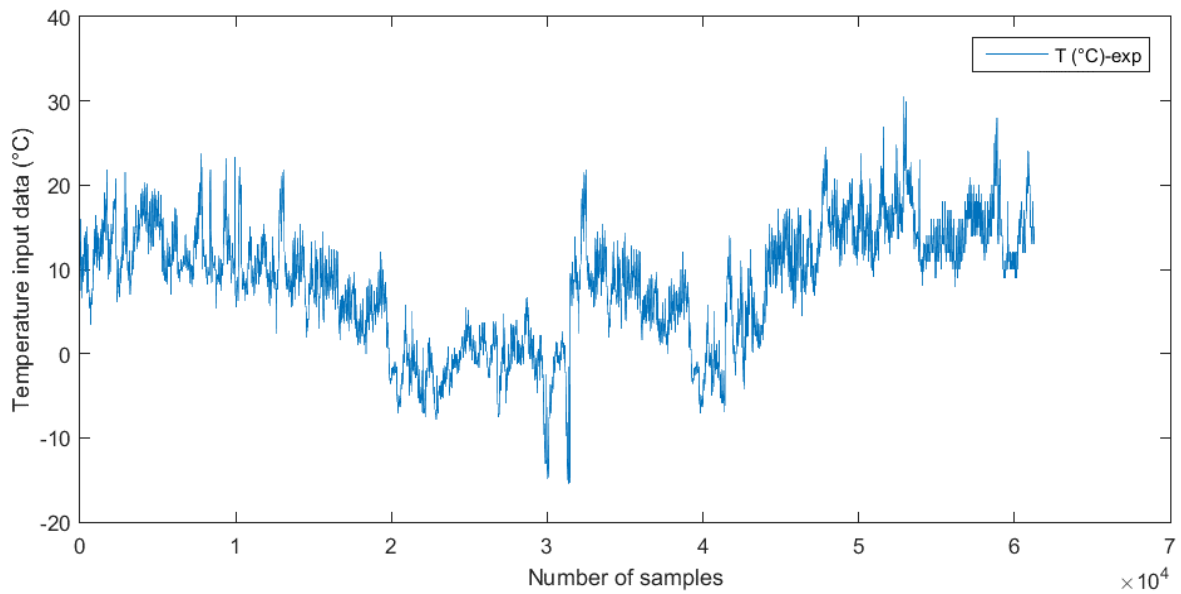


FIG IV.7. Signal des températures mesurées à 30m, Station d'Almas.

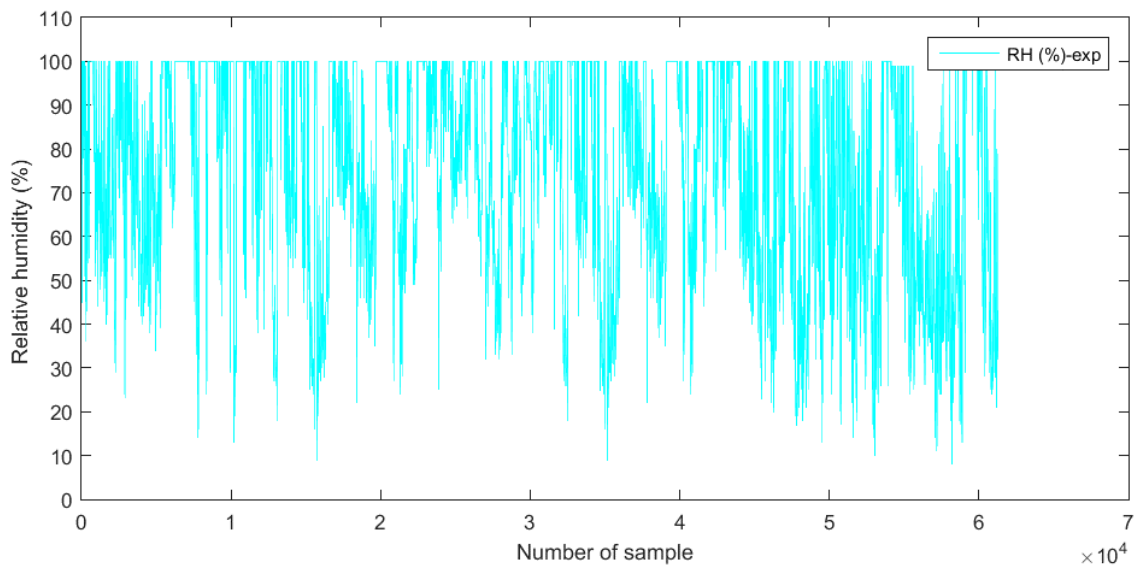


FIG IV. 8. Signal du taux d'humidité relative mesurée à 30m, station d'Almas.

La configuration d'un réseau optimisé a été effectuée après une série de tests de calcul afin de trouver la meilleure combinaison possible du nombre de neurones de la couche cachée. Le Tableau. IV.2 montre les résultats d'une série de simulations obtenus pour 11 configurations différentes du RNA. Ces résultats montrent que la configuration du réseau ANN\_3 à 10 neurones dans la couche cachée présente la plus faible erreur quadratique moyenne ( $MSE=1.843 e^{-1}$ ), et l'un des coefficients de corrélation les plus optimaux avec  $R^2= 9.883 e^{-1}$ . A partir de ce résultat, un nombre

## Chapitre IV : Résultats & Discussions

de neurones de 10 neurones dans la couche cachée est adopté pour notre modèle RNA.

Tableau IV.2 Optimisation du nombre de neurones cachés dans le RNA.

Nombre de neurones dans la couche cachée	MSE	$R^2$
ANN_1, n=2	2.091 e <sup>-1</sup>	9.872 e <sup>-1</sup>
ANN_2, n=5	2.014 e <sup>-1</sup>	9.876 e <sup>-1</sup>
ANN_3, n=10	<b>1.843 e<sup>-1</sup></b>	9.883 e <sup>-1</sup>
ANN_4, n=15	1.887 e <sup>-1</sup>	9.882 e <sup>-1</sup>
ANN_5, n=20	1.900 e <sup>-1</sup>	<b>9.886 e<sup>-1</sup></b>
ANN_6, n=25	1.902 e <sup>-1</sup>	9.883 e <sup>-1</sup>
ANN_7, n=30	1.925 e <sup>-1</sup>	9.879 e <sup>-1</sup>
ANN_8, n=35	1.850 e <sup>-1</sup>	<b>9.886 e<sup>-1</sup></b>
ANN_9, n=40	1.922 e <sup>-1</sup>	9.883 e <sup>-1</sup>
ANN_10, n=45	1.866 e <sup>-1</sup>	9.879 e <sup>-1</sup>
ANN_11, n=50	1.910 e <sup>-1</sup>	9.882 e <sup>-1</sup>

Les FIG IV. 9 et FIG IV.10, représentent respectivement, une comparaison des vitesses et l'erreur relative entre les vitesses mesurées et prédites par le modèle ANN\_3, à 40m de hauteur dans la région d'Almas. Les résultats de cette simulation montrent une erreur relative maximale inférieure à 6% par rapport aux valeurs mesurées.

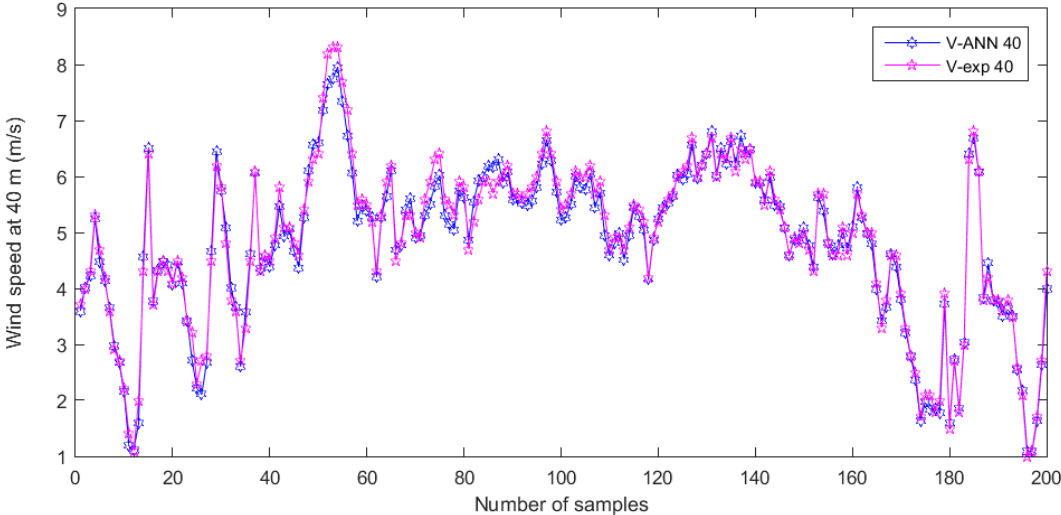


FIG IV. 9. Comparaison des signaux de prédiction (RNA) et de mesures, à 40 m de hauteur, station d’Almas (Iran).

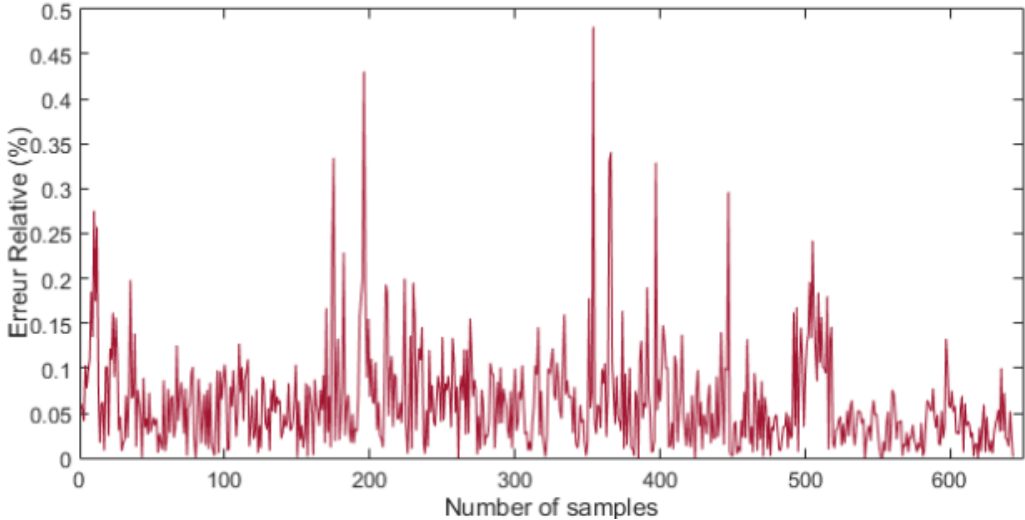


FIG IV. 10. Erreur relative entre les valeurs mesurées et prédites à 40 m de hauteur, station d’Almas (Iran).

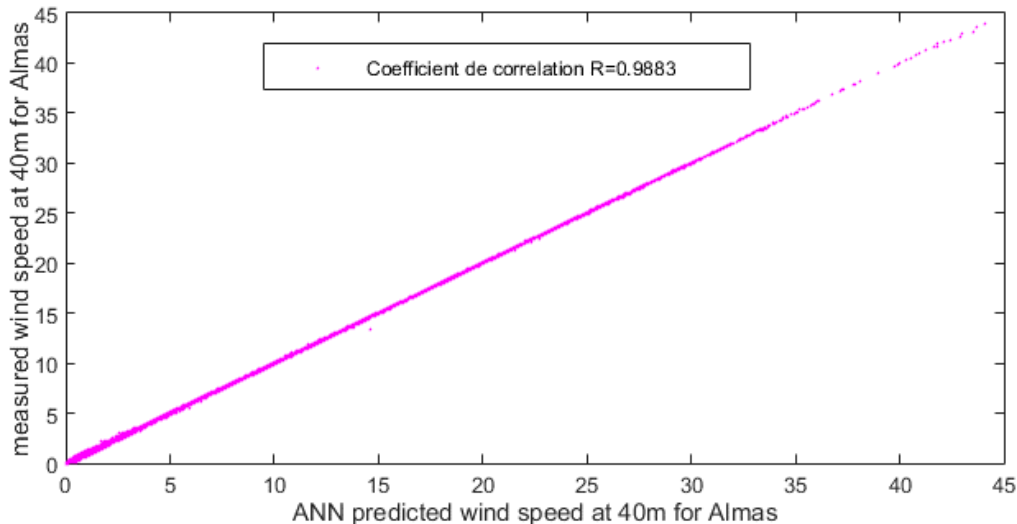


FIG IV.11. Corrélation entre vitesses mesurées et vitesses prédites, à 40 m de hauteur, de la station d'Almas (Iran).

### 2.3 Application du modèle proposé aux données de Ksar Chellala

La configuration du réseau ANN\_3 ayant montré les meilleures performances lors des tests effectués sur les données de la station d'Almas, ce modèle est donc choisi pour la prédiction des vitesses de vent dans la région de Ksar Chellala à 50 m de hauteur.

La simulation en utilisant les données de Ksar Chellala a été effectuée en entrant la matrice M4 de données mesurées à 10m [V10, D10, T10, RH10] et afin d'avoir un réseau entraîné et supervisé on utilise les données de vitesses mesurées à 50m comme données cible V50.

A partir de l'entraînement de ces données, on a obtenu les résultats avec les paramètres de performance suivants : RMSE égale à  $1.2539 \times 10^{-4}$  ainsi qu'un coefficient de corrélation de  $R^2$  de 0.92301. Ces résultats montrent que le modèle utilisé présente une bonne corrélation avec les données cibles avec une erreur de prédiction de l'ordre de  $10^{-4}$ . On remarque que le coefficient de corrélation est moins important comparé au cas de la station d'Almas, cela est probablement dû à la qualité des données utilisées pour l'apprentissage.

#### - Comparaison des résultats à ceux d'une extrapolation basée sur la loi logarithmique.

La loi d'extrapolation logarithmique largement testée et utilisée dans de nombreux travaux scientifiques et logiciels commerciaux [71], est utilisée pour illustrer l'efficacité de la méthode de prédiction par les RNA.

Les résultats de l'extrapolation par les RNA des données de Ksar Chellala sont comparés à ceux obtenus avec l'application de la loi logarithmique (log). Les figures IV.12, IV.13 illustrent, respectivement, l'évolution des signaux des vitesses de vent

à 50m de hauteur et l'erreur représentée entre les vitesses prédites par la loi log et les mesures ainsi que celles prédites par le modèle ANN\_3 et les mesures.

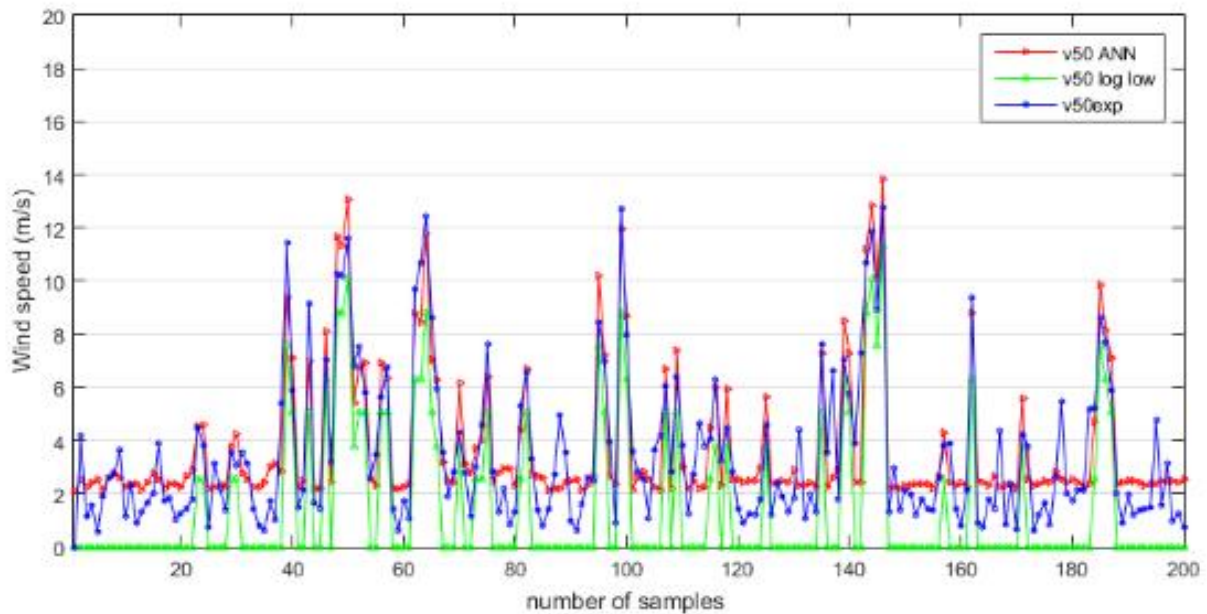


FIG IV.12. Comparaison des valeurs de vitesse extrapolées à 50m et les mesures sur le site de Kser Chellala.

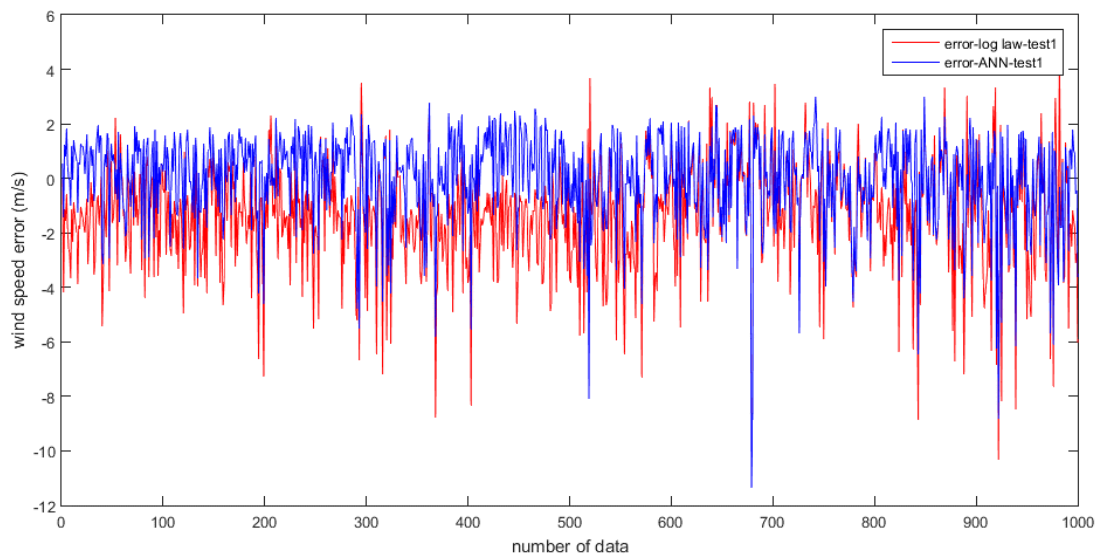


FIG IV.13. Erreurs de prédiction.

La superposition du signal des vitesses extrapolées par ANN\_3 (V50 ANN), par la loi logarithmique (V50\_log) et les mesures, montrent la même tendance et les mêmes fluctuations. Cependant on observe une différence des valeurs. On définit le taux de déviation DT (%), obtenue à partir de l'extrapolation logarithmique et celui obtenue par le modèle ANN\_3, par l'expression suivante :

$$DT(\%) = \frac{mse(V_{exp}) - mse(V_{predict})}{mse(V_{exp})} \quad (IV. 1)$$

Les résultats du calcul montrent que le taux de déviation est d'environ 2.75% pour la loi logarithmique et (0.0029) à savoir 0.29% pour le modèle du réseau de neurones artificiels ANN\_3. Cette comparaison illustre la contribution du RNA dans l'extrapolation verticale de la vitesse du vent à 50m de hauteur, avec une diminution des erreurs de prédiction de 2.4%.

#### 2. 4 Application du modèle proposé à d'autres régions

Le modèle ANN\_3 nous a permis de construire un module pour l'extrapolation verticale de la vitesse à 50m de hauteur pour deux autres sites : Dellys et Timimoune (Tableau IV.3). Les données d'entrée utilisées ont été mesurées à 10 m de hauteur, et sont composées de vitesses, directions, température et du taux d'humidité relative (V10, D10, T10, RH10). Ces données sont trihoraires et comprennent deux années de mesures.

TABLEAU IV. 3 CARACTÉRISTIQUES GÉOGRAPHIQUES.

Site	Longitude	Latitude
DELLYS (AFIR)	03,57° E	36,55° N
TIMIMOUNE	00°17 E	29.15° N

Un module a été développé dans cette partie, à l'aide de l'utilitaire Simulink, un produit MathWorks®.

Les FIG IV. 14 et IV. 15, représentent l'évolution de la série chronologique de la vitesse du vent extrapolée à 50 m de hauteur, à partir du module Simulink (ANN\_3) développé et par la loi d'extrapolation logarithmique. On définit l'erreur relative  $er$  (%) qui apparait entre les vitesses extrapolées par les deux lois comme suit :

$$er = \frac{\sum \left( \frac{(V_{ANN} - V_{log})}{V_{ANN}} \right)}{N} \quad (IV.2)$$

Où N est le nombre d'échantillons.

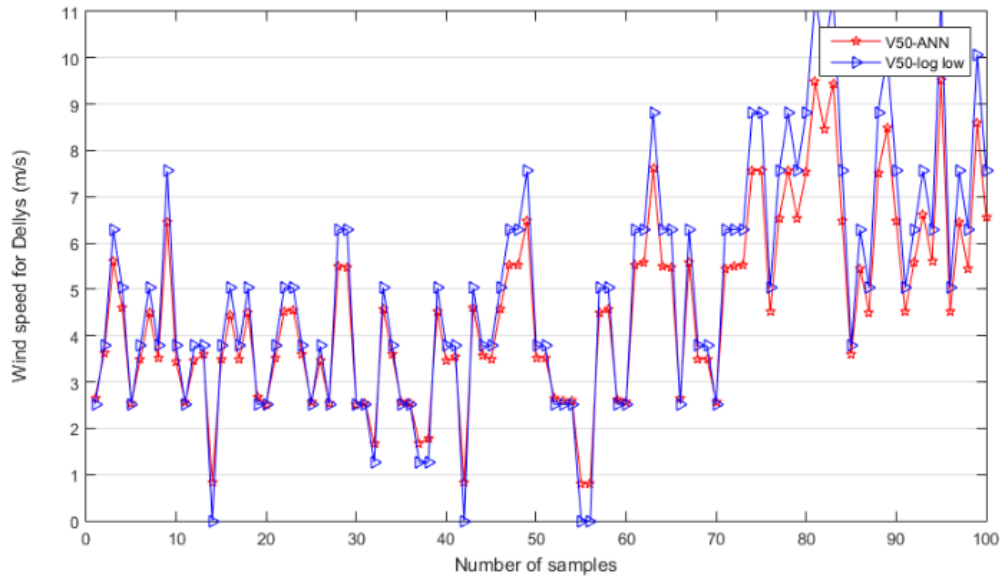


FIG IV.14. Comparaison des valeurs de vitesses extrapolées à 50m sur le site de Dellys.

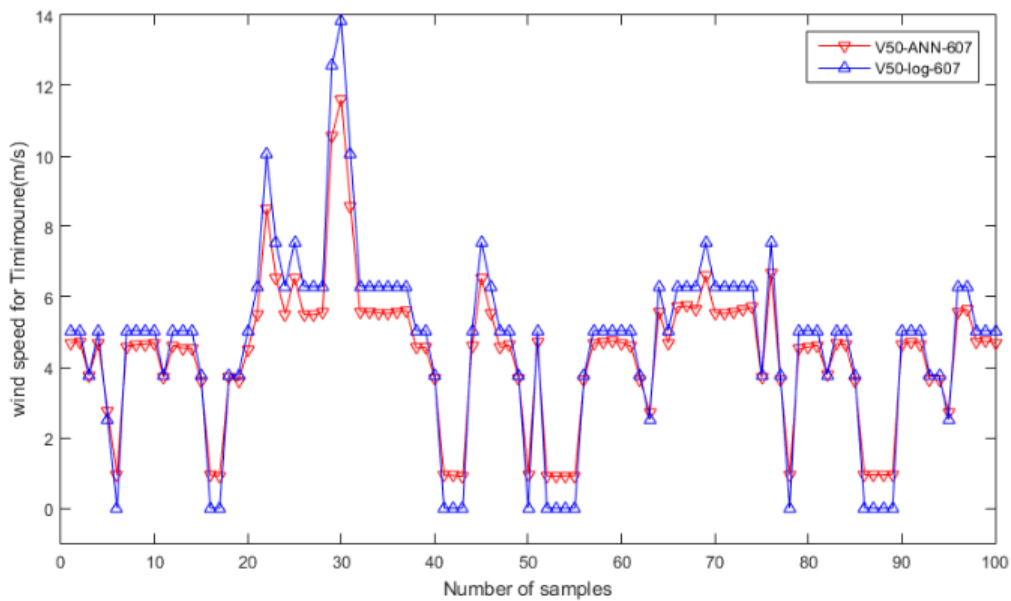


FIG IV.15. Comparaison des valeurs de vitesses extrapolées à 50m sur le site de Timimoune.

Les résultats montrent que pour le site de Dellys, l'erreur relative d'erreur relative entre les valeurs prédites par le modèle ANN\_3 et la loi log, est de 18.7%, et pour le site de Timimoune, l'erreur est de 19.5%. Ces valeurs montrent que la prédiction par le Réseau de neurones artificiels présente environ 20% de différence dans l'estimation de vitesse à 50m de hauteur pour les deux ensembles de données des sites utilisés (Dellys et Timimoune).

Ces travaux ont été poursuivis avec la caractérisation du sillage éolien dans une couche limite atmosphérique neutre puis non neutre, en considérant, dans les deux cas, une éolienne isolée.

### IV.3- Caractérisation du sillage éolien dans une CLA neutre

Pour la caractérisation du sillage éolien dans une CLA neutre, nous avons étudié l'influence de la hauteur du mât sur le sillage développé en aval.

Ces simulations ont été réalisées en considérant deux hauteurs de mât,  $h/D=0.7$  et  $h/D=1$ , la vitesse d'entrée et l'intensité de turbulence étant de 13.7 m/s et 1%, respectivement. Ces conditions représentent les conditions d'opération observées à la hauteur du moyeu lors de l'étude expérimentale.

Les résultats des simulations numériques sont représentés par les contours des vitesses et de vorticités, par les profils verticaux de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente, comparés aux résultats des mesures effectuées en soufflerie.

Les grandeurs représentées sont la vitesse moyenne axiale  $\bar{U}$  et la vorticité moyenne  $\bar{\Omega}$ , exprimées sous la forme adimensionnelle suivante :

$$\bar{U} = \frac{U(z)}{U_0} \quad (\text{IV.3})$$

$$\bar{\Omega} = \frac{\omega_z D}{U_0} \quad (\text{IV.4})$$

Les données expérimentales sont également des grandeurs moyennes.

#### 3.1- Contours des vitesses

A la hauteur  $h/D=0.7$ , les contours des vitesses  $\bar{U}$ , obtenus par simulation sont comparés aux résultats des mesures dans les figures (IV.16-a) et (IV.16-b). Ces figures représentent l'expansion du sillage en aval du rotor sur une distance qui s'étend de  $1D$  jusqu'à  $7D$ , dans la direction axiale ( $z$ ). Ces figures montrent un écoulement confiné qui forme une couche limite autour de la pale et génère des tourbillons qui se détachent le long de la pale. En outre, les tourbillons s'échappent plus rapidement de la racine, car la vitesse diminue et l'effet de la force de traînée augmente à ce niveau. Les tourbillons apparaissent sous la forme de petites structures tourbillonnaires isolées à la distance  $z < 0,5D$  (FIG V.1-a). Le modèle de turbulence utilisé montre uniquement une formation des structures tourbillonnaires visibles à partir de  $z = 1D$  (FIG IV.16-b), puis les tourbillons fusionnent pour former une nappe continue, qui s'étend jusqu'à  $z=2D$ . Dans la région du sillage proche, la vitesse de l'écoulement  $\bar{U}$ , augmente aux extrémités du rotor, en raison de la séparation des particules du fluide, qui accélèrent à l'extrémité des pales. Le

détachement progressif de ces tourbillons contribue à créer une couche de séparation entre le sillage et la zone d'écoulement développée. A cette hauteur les petites structures qui apparaissent dans la partie inférieure du sillage sont dissipées par l'effet de la paroi.

Pour la hauteur  $h/D = 1$ , on constate que l'apparence des tourbillons est insensible à l'effet de paroi. Cependant, la figure IV.16. (d) montre que l'axe du sillage est dévié vers le haut. Deux tourbillons se forment et se propagent à faible vitesse jusqu'à ce qu'ils fusionnent et forment un tourbillon unique à  $z=3D$  (FIG. V.1-a, V.1-c). L'écoulement est plus lent dans la partie inférieure de la soufflerie, près du sol. L'atténuation des structures tourbillonnaires commence à une distance  $z=4D$  (FIG. V.1-a et 1-b). En effet, à la distance  $z = 5D$  correspondant à la fin de la zone de sillage proche, il existe une zone de transition vers le sillage lointain, à partir de laquelle les effets de la turbulence aérodynamique se dissipent progressivement jusqu'à  $z > 7D$ .

Les petits tourbillons de pointe, générant le sillage proche en aval du rotor et délimitant la zone de sillage des deux côtés par rapport à l'écoulement développé, sont plus perceptibles dans les résultats expérimentaux (FIG IV.16-a). Toutefois, des structures n'apparaissent pas pour la hauteur  $z/D=0.7$ . Ceci est probablement dû au modèle numérique AD qui ne permet pas une description détaillée de l'écoulement à proximité du rotor à des distances inférieures à  $1D$ . Cependant, les résultats de la simulation fournissent de bonnes informations sur le comportement du sillage au-delà de  $1D$ . Ces résultats confirment que le modèle AD donne une bonne représentation du comportement du sillage en aval, mais ne reproduit pas les tourbillons d'extrémité de pale près du rotor. Ceci a également été observé par [49]; qui ont suggéré l'utilisation du modèle de ligne active pour reproduire les tourbillons d'extrémités de pale, pour lesquels une description fine et une grille plus détaillée sont nécessaires.

D'autre part, nous avons appliqué un facteur de correction pour tenir compte des pertes de bout de pale, et rétablir la fraction de l'énergie cinétique transmise au tourbillon de bout de pale. Par conséquent, les structures d'écoulement en aval fournies par le modèle AD sont suffisamment représentatives. Ainsi, les caractéristiques typiques du sillage d'une éolienne sont bien reproduites, à savoir : l'augmentation du niveau d'énergie cinétique turbulente, la formation de la zone de déficit et la diffusion du sillage dans la couche limite au sol, comme ceci est illustré dans les figures IV.16-a et IV.16-b.

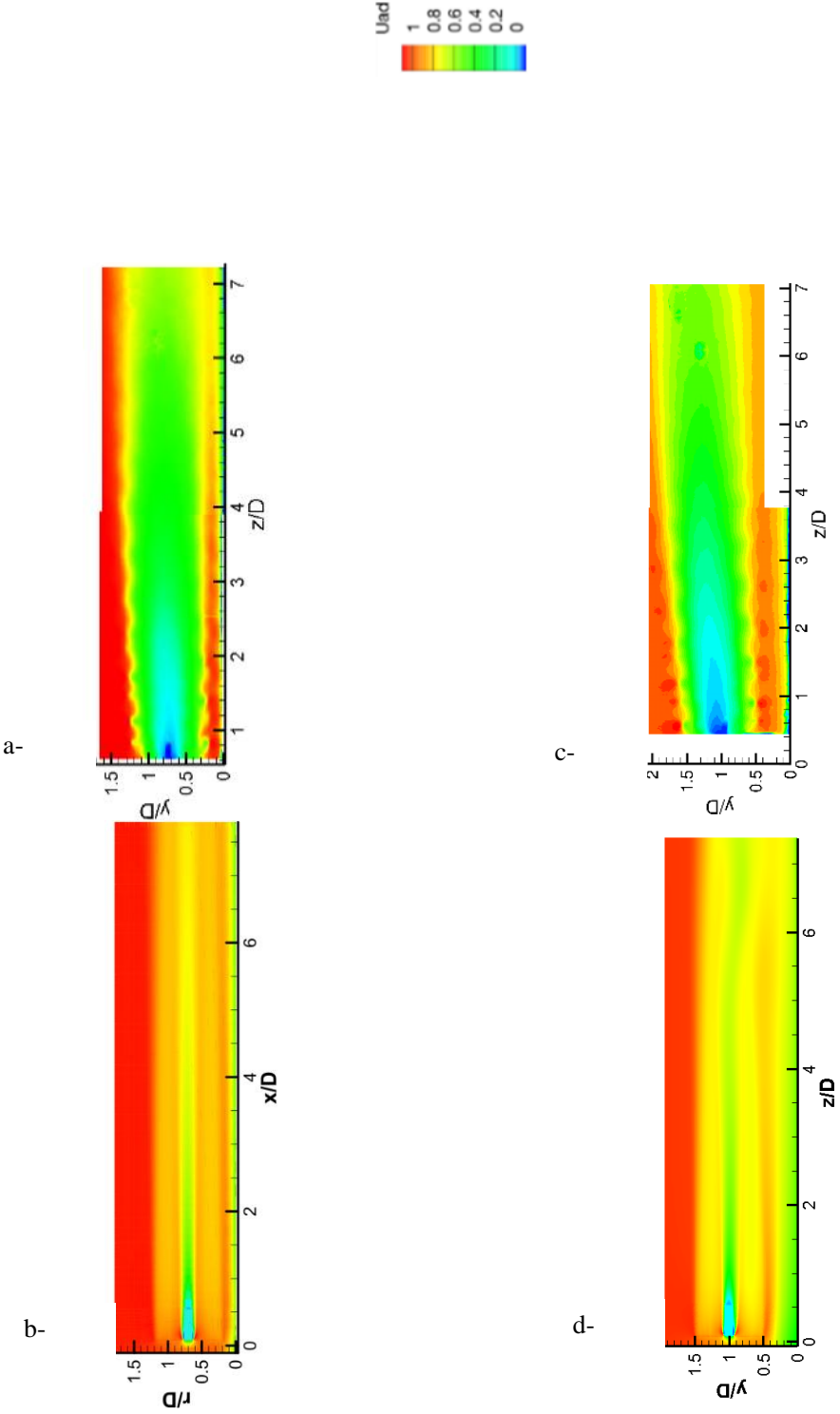


FIG. IV. 16- Contours des vitesses dans la direction axiale (z), aux hauteurs ( $h/D=0,7$  et  $h/D=1$ ).  
a- c- Mesures expérimentales, b-d- Résultats des calculs numériques.

### 3.2- Contours de vorticité

Les contours de vorticité sont représentés dans la figure IV.17 qui montre que le sillage est caractérisé par des tourbillons hélicoïdaux [72], perçus distinctement dans l'écoulement aval. L'écoulement devient diffusif et les petites structures turbulentes individuelles disparaissent sous l'influence de la turbulence à environ  $z/D= 3.5$ , pour se fusionner et former une nappe continue. On observe des structures tourbillonnaires contrarotatives générées par le détachement des tourbillons de la surface de la pale. L'apparition de ces tourbillons est due à l'existence d'une discontinuité de la circulation le long de la pale, comme cela a été confirmé expérimentalement par Kamada & al [73]. Cette explication est appuyée par Sorensen [60] qui montre des contours d'iso-vorticité avec une formation de tourbillons de pointe, illustrant le développement en aval des tourbillons de sillage. Nos résultats montrent que les tourbillons liés aux pales sont perdus à environ 2 tours, après quoi ils se diffusent en une nappe tourbillonnaire continue. Il mesure également leur position de détachement le long de la pale. Cependant, ces structures en spirale distinctes sont maintenues plus de tours que ce qu'il rapporte, probablement, à cause de l'effet du maillage quelque peu grossier en aval du rotor, ce qui provoque une diffusion trop précoce des tubes vortex.

Les petites structures tourbillonnaires se diffusent différemment selon la hauteur du mat :    $h/D=0.7$ , on observe que la diffusion est plus précoce vers  $z=3.5D$  (FIG. IV.17-a).    $h/D=1$ , la diffusion se produit en retard, vers  $z= 4D$  (FIG. IV.17-c). Cette différence est due à l'influence qu'exerce la paroi inférieure sur la propagation du sillage. En effet, à  $h=0.7D$ , l'influence du sol est plus importante car les effets des frottements freinent l'écoulement, augmentent la turbulence du milieu, et dissipent les structures tourbillonnaires individuelles plus rapidement.

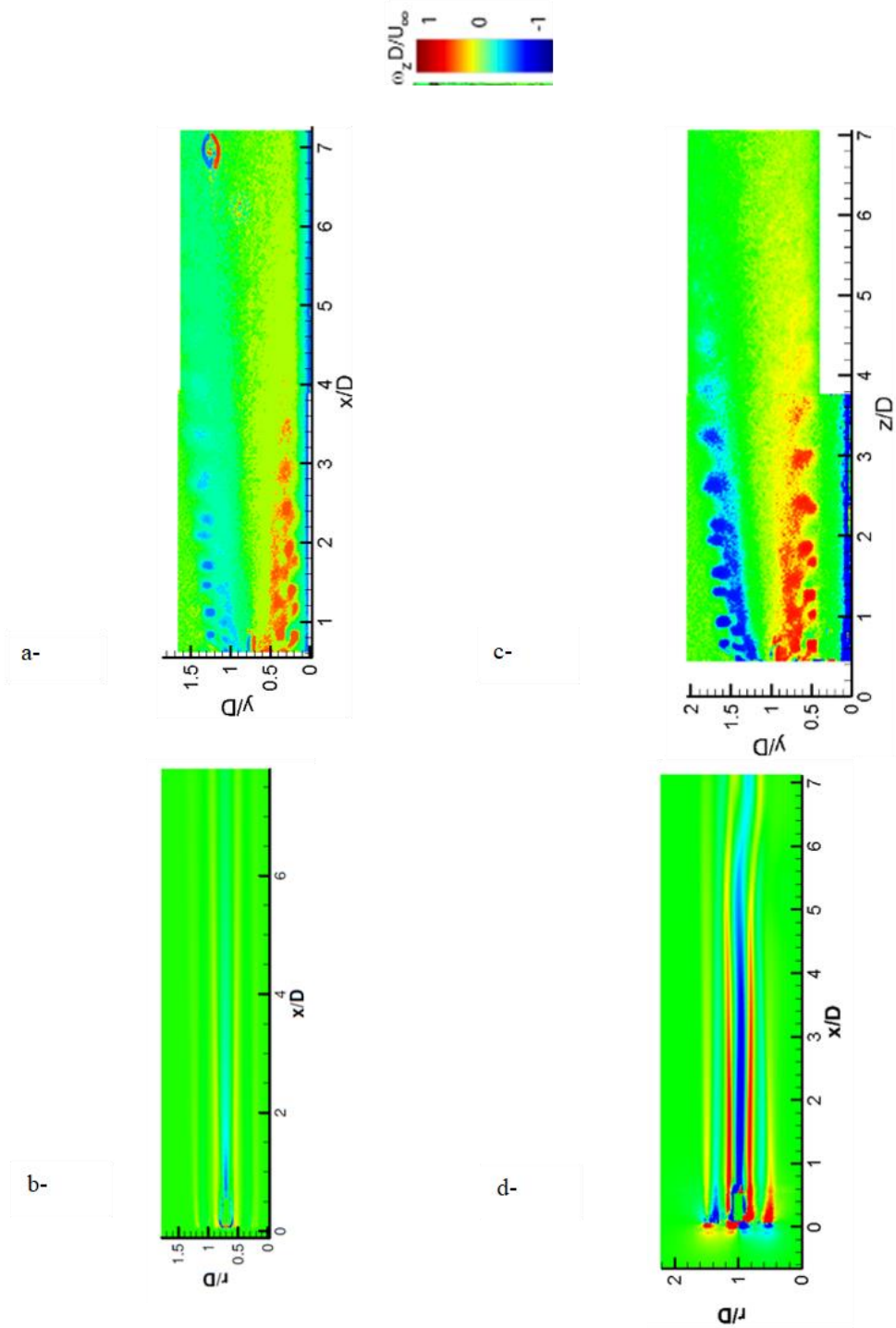


FIG. IV. 17- Contours de la vorticité dans la direction axiale (z), aux hauteurs ( $h/D=0,7$  et  $h/D=1$ ).  
 a- c- Mesures expérimentales. b-d- Résultats des calculs numériques.

### 3.3- Interaction du sillage avec le sol

La hauteur de la couche limite dans la soufflerie, a été déduite expérimentalement au laboratoire Dynfluid. Elle est similaire à la couche limite qui se développe au-dessus d'une plaque plane. Son épaisseur est de l'ordre de 45% du diamètre du rotor, soit  $0,45D$ . L'expansion du sillage est développée en aval du rotor et parallèlement à la paroi, sur une largeur de  $1 D$ .

Comme on l'a vu précédemment, pour la hauteur  $h/D=1$ , le développement du sillage est en dehors de la couche limite à la paroi, bien que l'influence de cette dernière soit visible. En effet, au niveau du sol, l'écoulement généré par la pale est ralenti, ce qui induit de faibles vitesses d'écoulement. Comme l'ont remarqué [73] l'apparition des tourbillons inférieurs est retardée par rapport aux tourbillons supérieurs (FIG.IV.16-a, IV.17-a). Ce freinage disparaît à la distance  $z=4D$ .

Afin d'illustrer cette interaction, les lignes de courant ont été tracées pour six plans variant de  $z = 3D$  à  $z=10D$  dans les figures IV.18. et IV.19, pour  $h/D = 0,7$  et  $h/D=1$ , respectivement, Ces figures montrent l'effet de l'intensité de la force tangentielle sur la structure de sillage en différentes positions en aval du rotor.

Comme observé sur les contours de vitesse (FIG. IV.16), les lignes de courant ne sont pas symétriques par rapport à l'axe de rotation. Cela est dû au profil de vitesse d'entrée et à la couche limite du sol. L'effet de la rotation persiste jusqu'à  $7D$  en aval du rotor, cela se voit dans l'étendue du sillage lointain, et perturbe l'écoulement aval au-delà de  $10D$ , comme l'ont remarqué Wu et Porté-Agel [74].

Les lignes de courant représentées dans la figure IV.18 montrent que le sillage de l'éolienne interagit fortement avec le sol lorsque  $h/D=0,7$ . En effet, pour la distance au sol la plus proche, (FIG IV.18), on constate que le sillage de l'éolienne est perturbé par le phénomène de cisaillement créé par la couche limite.

A la distance  $z=6D$  (FIG. IV.18-d) jusqu'à  $z=10D$  (Fig.IV.18-f), un vortex se forme près du sol de la soufflerie. Ce roulis tourbillonnaire, d'environ  $4D$  de longueur, se développe selon la direction longitudinale, dans la partie inférieure du sillage, plus précisément dans la zone de cisaillement proche du sol, à moins de  $y=0,5D$ . Cette interaction du sol avec la zone de vortex induit une attraction du centre de sillage vers le bas résultant en un sillage asymétrique. Ce phénomène a également été montré par Espana [75].

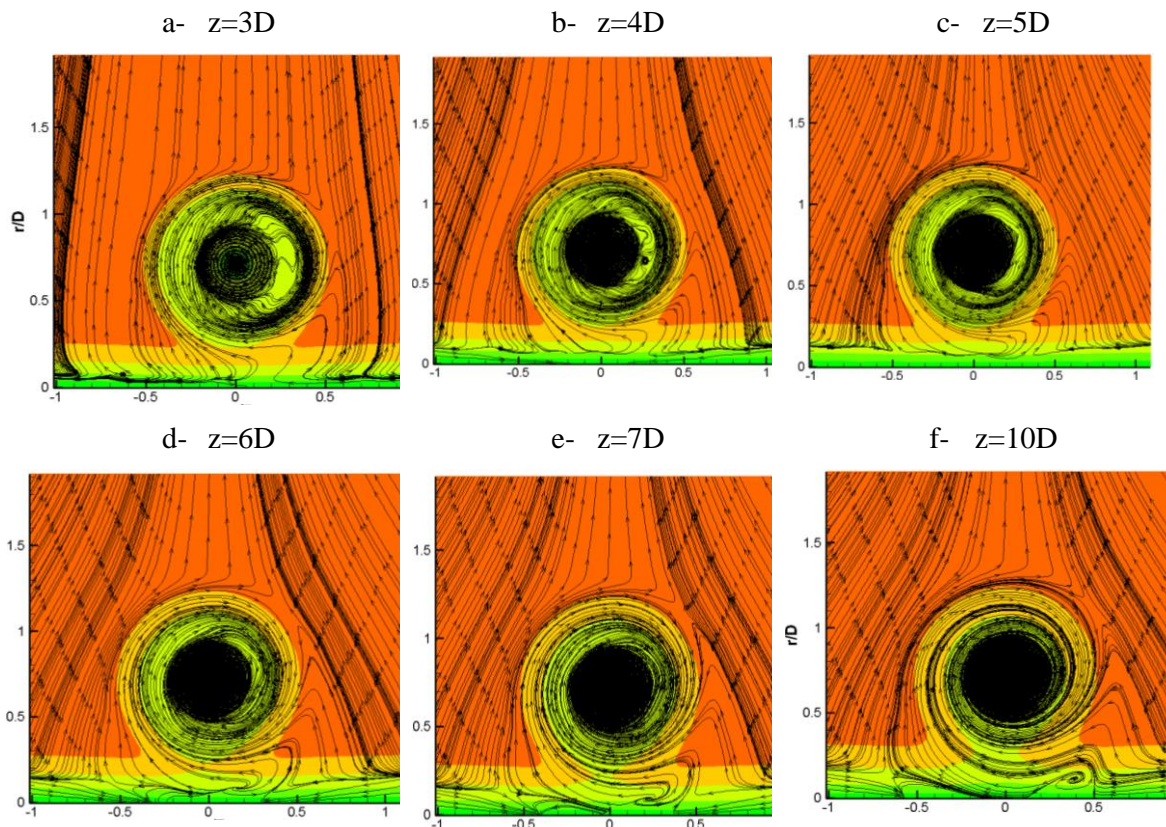


FIG. IV. 18- Lignes de courant pour différentes sections axiales en aval du rotor, pour  $h/D=0.7$

Pour le cas  $h/D=1$ , la FIG IV.19 (c et d) montre que l'interaction entre le sillage de l'éolienne et le sol est moins importante. La rotation des lignes de courant de sillage à  $z=3D$  est clairement indépendante du sol et la zone de sillage est plus axisymétrique. Aux distances  $z=4D$  et  $z=5D$  (FIG. IV.19-b et IV.19-c), les lignes de courant proches du sol sont légèrement déformées mais la zone de sillage reste bien définie. A  $z=6D$  (FIG. IV.19-d), on observe une expansion des lignes de courant qui représente le début de la dissipation du sillage. C'est la zone de transition vers le sillage lointain. Les effets de la turbulence aérodynamique se dissipent progressivement lorsque  $z > 7D$  (FIG IV.19-e) où le recouvrement atteint 70% et se dissipent presque complètement à  $z=10D$  (FIG IV.19-f). Par contre, pour le cas  $h/D=0.7$ , l'expansion des lignes de courant dans le sillage n'est pas observée même à la distance  $z = 10D$  (FIG IV.19-f). La dissipation de sillage se produit donc plus rapidement dans le cas  $h/D=1$  par rapport au cas  $h=0.7D$ .

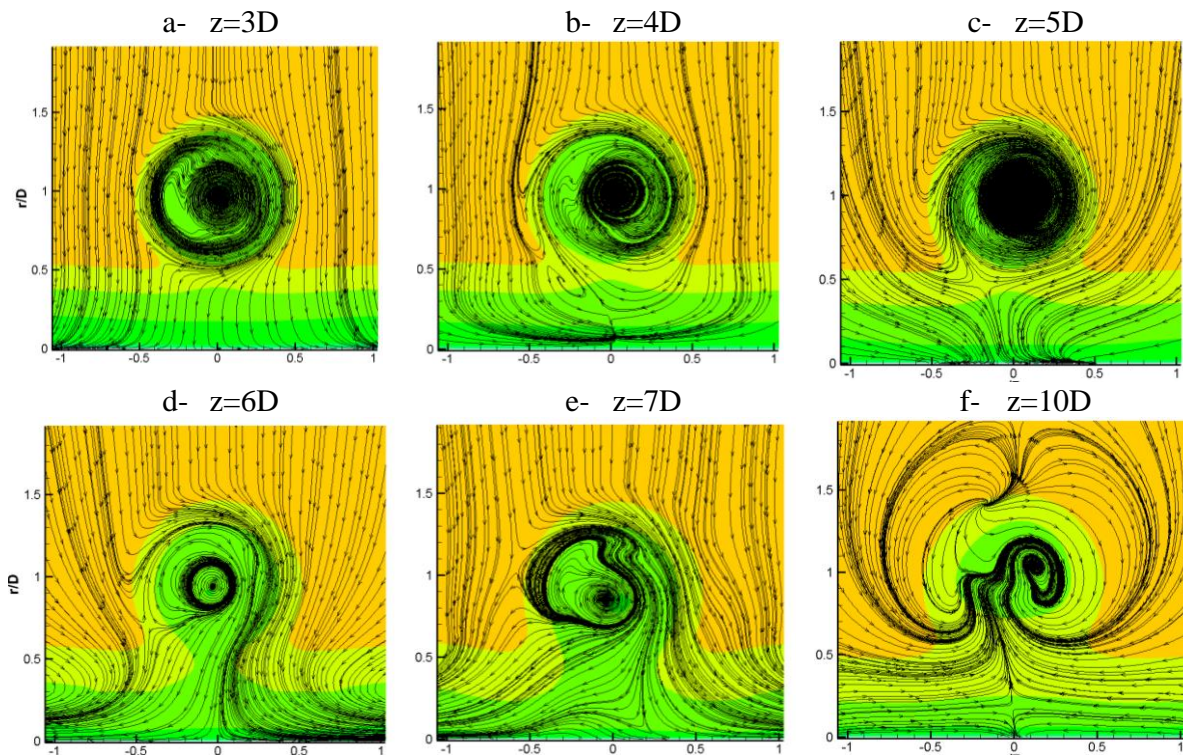


FIG. IV. 19- Lignes de courant pour différentes sections axiales en aval du rotor, pour  $h/D=1$ .

### 3.4-Profil vertical des vitesses

Les profils de vitesses verticaux, qui correspondent au déficit de la vitesse du vent en aval du rotor, sont comparés à ceux obtenus lors des mesures expérimentales effectuées dans la soufflerie du laboratoire Dynfluid. Un calcul de l'erreur relative du déficit vitesse a été effectué en utilisant l'expression suivante :

$$er (\%) = \frac{\bar{U}_{exp} - \bar{U}_{sim}}{\bar{U}_{exp}} \quad (IV.5)$$

Dès les premiers cycles de révolution, une chute significative de la vitesse axiale est enregistrée au centre du sillage. Elle est causée par la désintégration des tourbillons générés par les extrémités des pales (FIG. IV.16-b). Cette zone de faible vitesse définit la région proche du sillage qui s'étend jusqu'à  $z=3D$  [63 36].

Les profils de vitesses verticaux sont représentés dans les figures IV.20 et IV.21 pour des positions axiales variant de  $z/D = 1$  à  $z/D=7$ .

L'allure des courbes montre que le sillage a une épaisseur de  $1D$  et n'est pas symétrique. Ceci est dû à la non-uniformité du profil de vitesses à l'entrée, ainsi qu'à la contrainte de cisaillement créée au voisinage du sol. Initialement, un déficit de vitesse de près de 23% dans l'axe du sillage est obtenu à  $z = 1D$  ; le déficit de vitesse se rétablit progressivement jusqu'à 70% à  $z= 7D$ .

Ces courbes montrent également que le sillage adhère à la couche limite du sol pour  $h/D = 0,7$  (FIG IV.20). L'effet d'interaction est plus faible pour  $h/D = 1,0$  (FIG IV.21), où l'axe de sillage est décalé d'environ  $0,3D$  vers le haut. Les travaux d'Espana et al [75] ont montré une dissymétrie dans l'allure verticale du sillage due aux effets du sol.

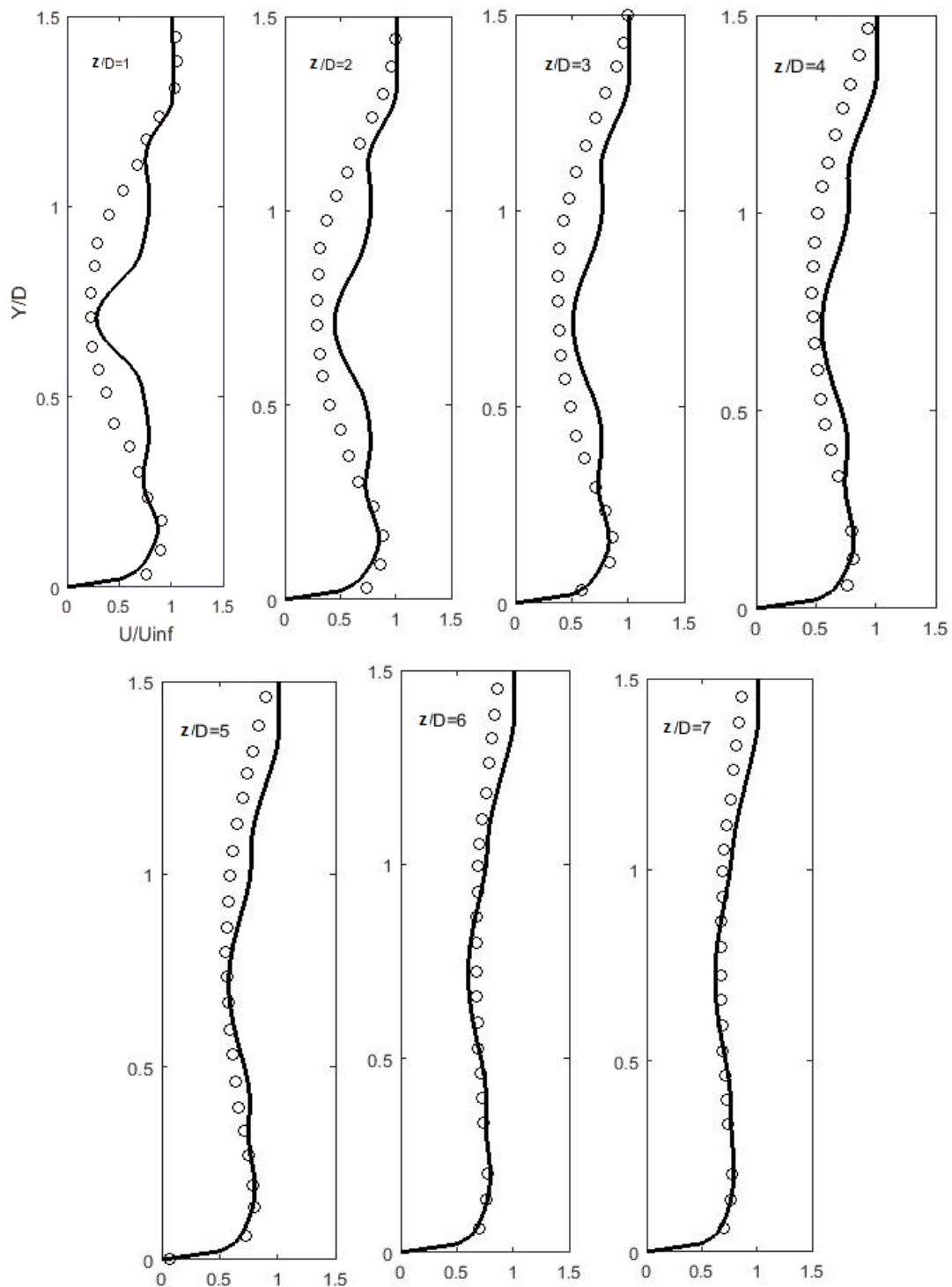


FIG. IV. 20- Profils verticaux représentant le déficit de vitesse, à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, pour la hauteur  $h/D = 0,7$ .  
Données Expérimentales (o). Résultats de Simulation (—).

## Chapitre IV : Résultats & Discussions

A la distance  $1D$  en aval du rotor, l'écoulement, en dehors du sillage, s'accélère du fait de la présence de tourbillons de pointe, qui sont bien observés dans la partie supérieure du sillage. Une différence entre les valeurs expérimentales et numériques est observée dans la région du sillage proche, à  $z/D=1$  et  $z/D=2$ . Ces différences sont attribuées aux effets supplémentaires des forces centrifuges et de Coriolis [76], qui sont négligés dans la méthode BEM appliquée dans cette étude.

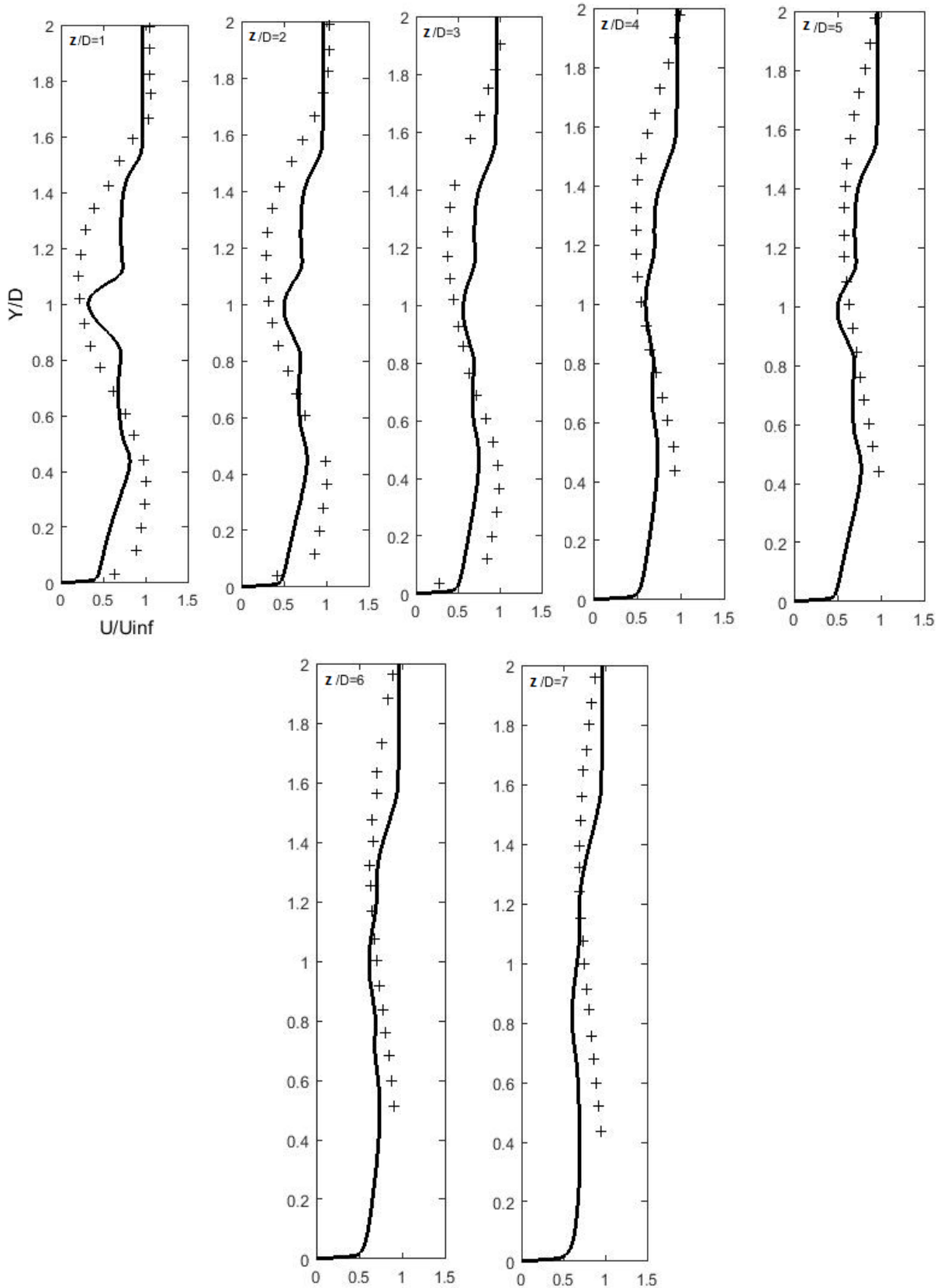


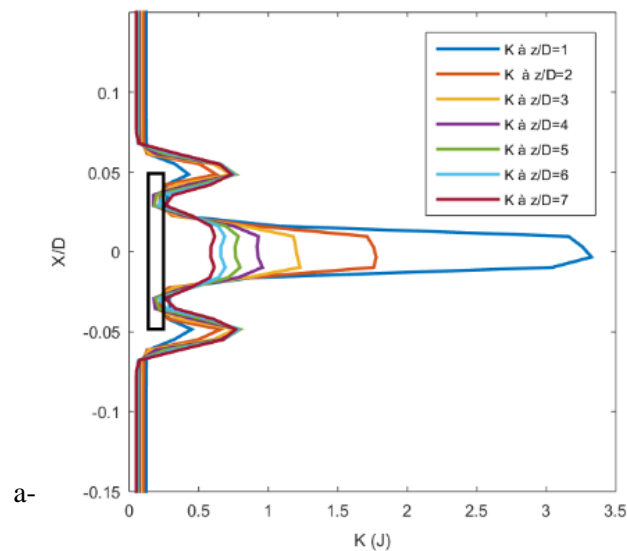
FIG IV. 21. Profils verticaux représentant le déficit de vitesse, à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, à la hauteur  $h/D = 1$ .  
Données expérimentales (+). Résultats de simulation (—).

Au-delà de la région proche du rotor, à partir de  $z=3D$ , les résultats numériques sont en bon accord avec les données expérimentales. En effet, l'erreur relative varie de 1.32% à la section  $z/D=3$ , à 2.21% à la section  $z/D=5$ . Ces résultats montrent que notre modèle hybride est mieux adapté à la simulation du sillage à partir de  $3D$ .

Pour la hauteur  $h/D=0.7$ , le déficit de vitesse montre un rétablissement précoce près de la paroi, à la section  $z=3D$  (Fig. IV.20). Pour l'éolienne à la hauteur  $h/D=1$ , la figure IV.21 montre qu'il y a un retard de rétablissement du profil de vitesses, qui est mesuré par une augmentation du déficit de l'ordre de 20%, et qui interprète l'influence de la paroi sur le développement du sillage.

### 3.5- Profil de l'énergie cinétique turbulente

La FIG IV.22 qui représente l'évolution de l'énergie cinétique turbulente dans les directions latérale (a) et radiale (b) montre qu'un important dégagement d'énergie turbulente  $k$  se produit le long du rotor, avec l'apparition d'un pic au centre (FIG. IV. 22-a). Dans la direction radiale, l'énergie cinétique turbulente  $k$  augmente au centre du rotor, selon la direction  $z$  (FIG. IV.22-b). L'énergie cinétique  $k$  est plus importante dans le sillage proche, du fait de la diffusion, et diminue dans le sillage lointain. Les vortex tourbillonnants apparaissent à l'extrémité de la pale à environ  $r/R = 0,5$ . Ces structures, produites par le mouvement de la pale, se dissipent progressivement en aval du rotor. Cependant, l'énergie cinétique turbulente ne diminue pas comme la turbulence atmosphérique. De plus, des couches de cisaillement sont présentes dans l'écoulement et entretiennent la turbulence dans le sillage lointain.



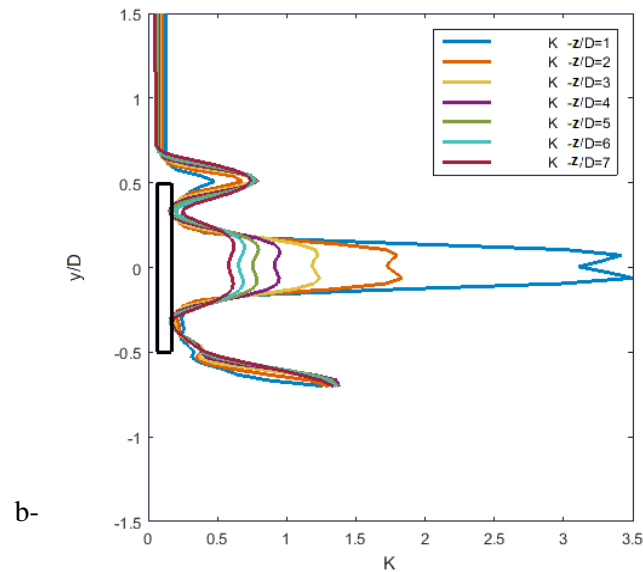


FIG IV. 22. Variation de l'énergie cinétique turbulente à différentes sections pour  $h/D=0,7$ .  
 A) – dans la direction latérale. B) – dans la direction radiale.

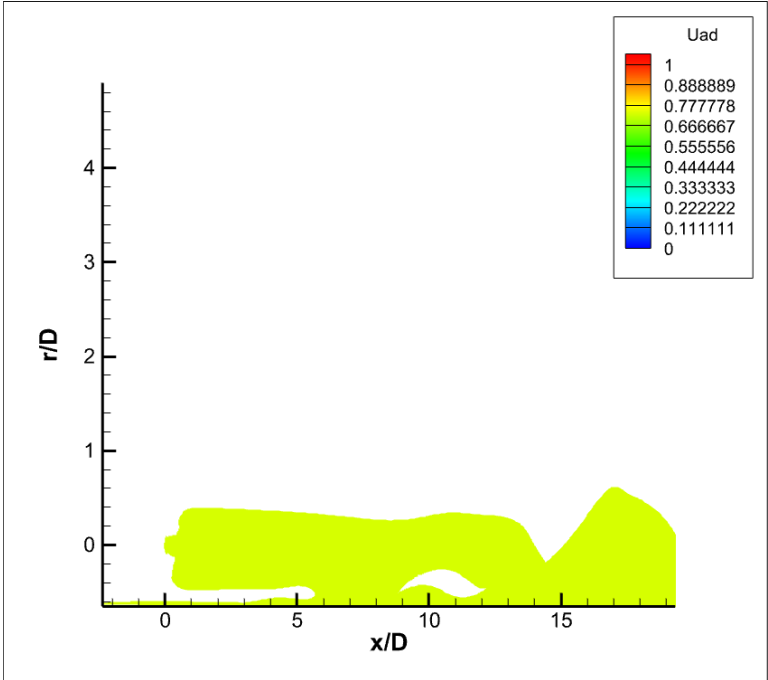
### 3.6- Rattachement du sillage éolien au sol

Dans le sillage lointain, le phénomène de rattachement de l'air au sol est observé (FIG. IV. 23). Formant une zone de basse pression, l'air dans le sillage lointain est attiré vers le sol. Ce phénomène est principalement dû à la séparation de la couche limite atmosphérique (CLA) autour de l'obstacle. Dans le sillage éolien, il se crée une zone de forte turbulence. L'air qui traverse cette zone, subit des variations de pression et de vitesse (FIG. IV. 20, 21), ce qui entraîne une zone de basse pression en aval. Cette dépression relative où l'air ambiant, de pression plus élevée, est alors aspiré, crée un flux d'air descendant qui est dirigé vers le sol en aval du rotor.

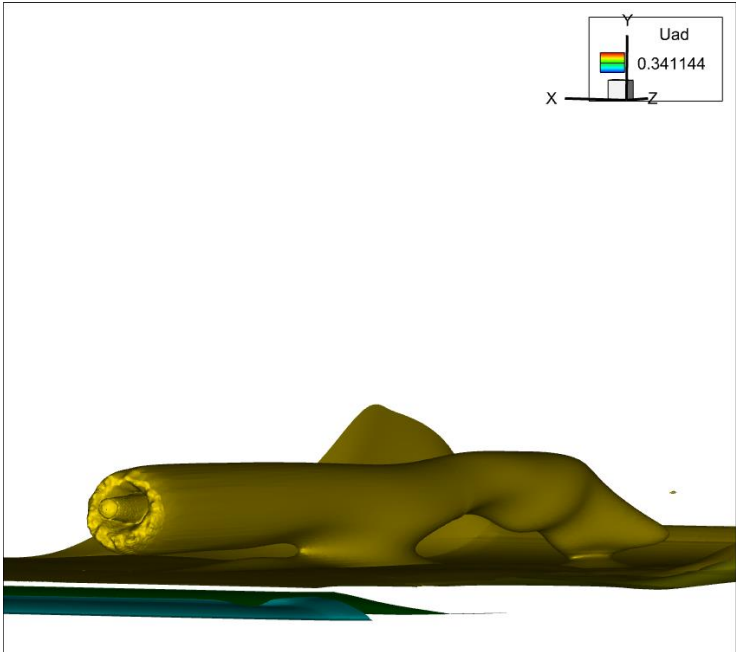
Dans le sillage éolien, des tourbillons apparaissent sous la forme de petites structures tourbillonnaires isolées, puis fusionnent pour former une nappe continue (FIG.IV.23). Cette nappe de tourbillons se propage et génère des zones de basse pression. Ces structures tourbillonnaires peuvent interagir avec le flux d'air ambiant et induire un mouvement descendant, amenant ainsi l'air à être aspiré vers le sol. Les tourbillons contribuent également à la persistance de la turbulence dans le sillage.

Les résultats de nos simulations numériques montrent que la distance de rattachement de l'air au sol est observée à partir de  $6D$ , et qu'elle s'étend jusqu'à  $9D$ . Au-delà de cette distance, il se produit des mouvements ascendants et descendants de l'air. Ces mouvements entraînent un ralentissement du sillage éolien et des instabilités apparaissent dans l'écoulement aval du sillage, c'est le phénomène de méandrement qui apparaît (FIG. IV.24). Le lien entre le flux entrant et les méandres du sillage a été étudié plus en détail dans une série d'études récentes en soufflerie. Espana et al [75] ont confirmé expérimentalement que les méandres du sillage ne se

produisent pas à moins que des tourbillons turbulents soient beaucoup plus grands que le diamètre du rotor [45].



a-



b-

FIG. IV.23. Iso-vitesses dans la direction axiale de l'écoulement et distance de rattachement dans le sillage lointain.

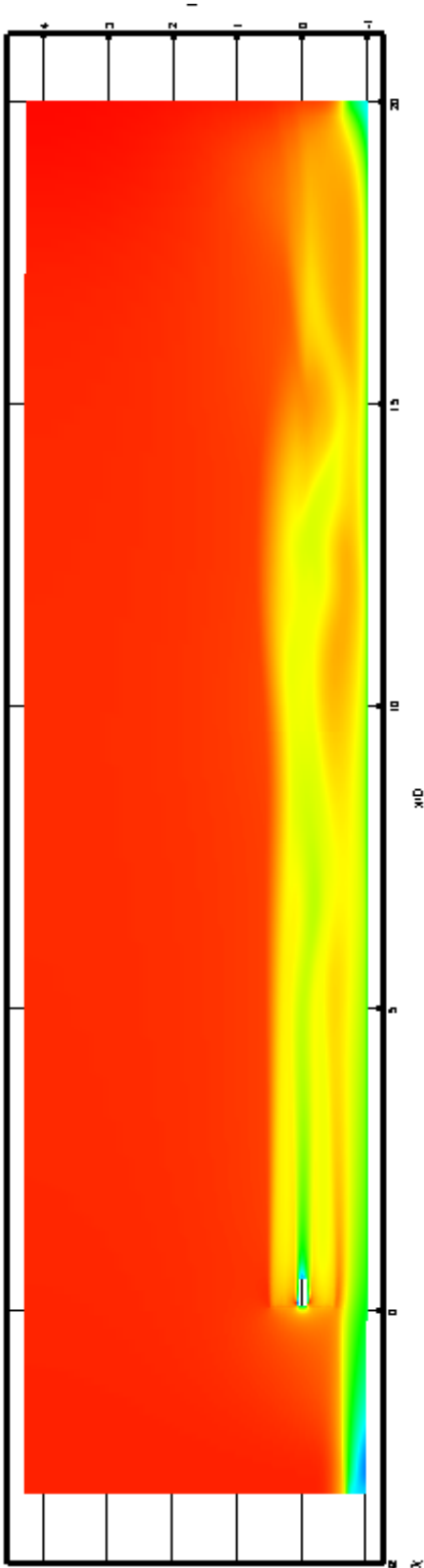


Figure IV. 24. Distance de rattachement dans le sillage lointain.

### 3.7- Calcul de performance de l'éolienne

La puissance produite par l'éolienne est calculée à l'aide de la relation (III.23) pour les deux hauteurs de mât considérées dans cette étude.

Ce calcul montre que les performances du rotor sont plus importantes lorsque le rotor est à la hauteur  $h/D=1$  car le déficit de vitesse est plus élevé à savoir 57% à  $z/D=5$  alors que pour la hauteur  $h/D=0.7$ , le déficit est de 55.7%. Le rendement de la machine est calculé par rapport à la puissance maximale théorique du rotor (qui correspond au coefficient de puissance maximal théorique de Betz,  $C_p = 0.59$ ). Les résultats sont résumés dans le Tableau IV.4. Ainsi on peut dire, que l'effet de la paroi est moins important sur les performances d'une machine, pour une hauteur du mat supérieur au diamètre de la machine ( $h>1D$ ). Notant que le rendement de petites éoliennes tourne autour de 15%.

Tableau IV.4. Comparaison du rendement de la machine.

Rendement du rotor	$z/D=5$
$h/D=0.7$	6%
$h/D=1$	7%

### IV.4- Influence de la stratification thermique de la couche limite atmosphérique sur le sillage éolien

L'étude des effets d'une couche limite atmosphérique non neutre porte sur la structure du sillage en aval de l'éolienne et sur les performances de l'éolienne. Tous les résultats obtenus, profils verticaux des vitesses, énergie cinétique turbulente et performance de l'éolienne, sont comparés à ceux correspondant à une CLA neutre.

A cet effet, les conditions retenues pour l'écoulement à l'entrée du domaine sont similaires à celles appliquées précédemment à savoir, une vitesse à la hauteur du moyeu de 13.7 m/s ainsi qu'une intensité de turbulence de 1%.

Les simulations ont été réalisées pour deux conditions de stratification thermique : stable et instable. Deux longueurs de Monin-Obukhov ont été fixées pour chaque condition,  $L_{stable} = 3.38$ , et  $L_{instable} = -6.06$ , respectivement. Ces valeurs sont obtenues par l'équation (III.40).

Afin s'illustrer chaque condition de stratification dans la couche limite atmosphérique où le rotor est immergé, un flux de chaleur est imposé à la paroi inférieure correspondant à un refroidissement ou un réchauffement de la paroi [77].

#### 4.1- Profil des vitesses en CLA stable et instable

Une comparaison du déficit de vitesse en aval du rotor des deux cas de stabilité thermique stable et instable est présentée dans la FIG. IV.25. Les profils de déficit de vitesse sont représentés à trois sections en aval du rotor pour  $h/D=2$ ,  $h/D=5$  et  $h/D=7$ .

Le cas de stratification thermiquement instable qui se crée à la hauteur du mât. La superposition des profils à la section  $h/D=2$  montre un déficit de 72%, à  $h/D=5$  le déficit est 77%.et à  $h/D=7$  un rétablissement de la vitesse de l'ordre de 78%. Les profils des vitesses obtenues pour des conditions de stratification thermique stable, présentent les déficits de vitesses de 62% à la section  $h/D=2$ , un déficit de 75% à  $h/D=5$  et un taux de rétablissement de la vitesse de 80% à  $h/D=7$ . L'écoulement devient pleinement développé au-delà de  $7D$ . Ces valeurs sont plus importantes que dans le cas des résultats obtenu pour la stratification neutre, avec près de 23% dans l'axe du sillage, obtenu à  $z = 1D$  et 70% à  $z= 7D$ .

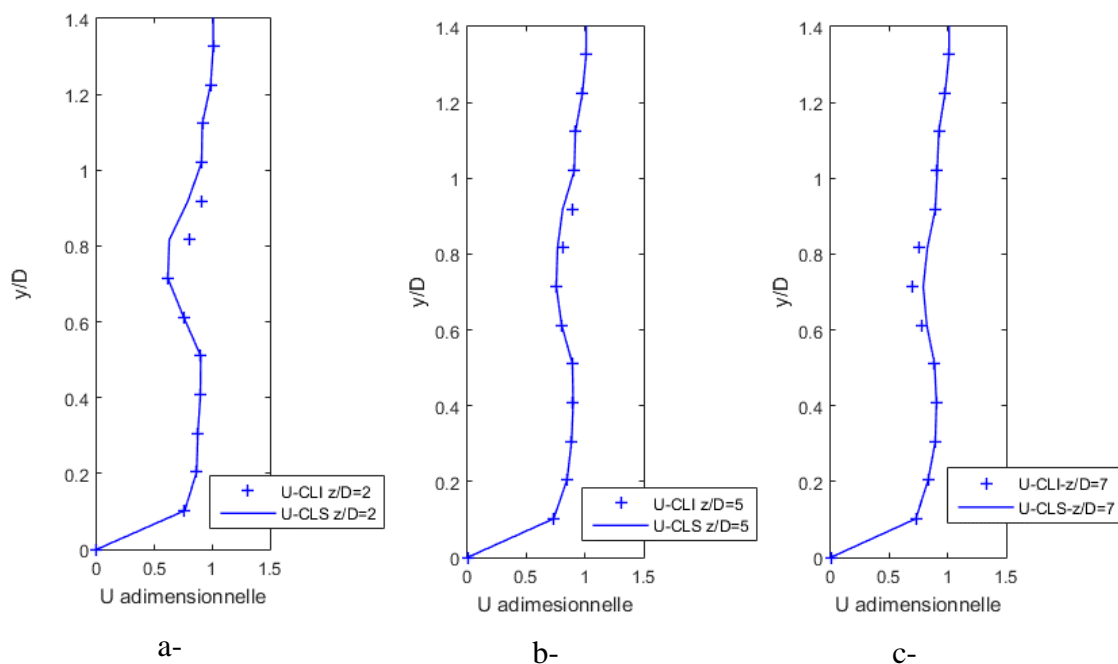


FIG. IV. 25 Comparaison des profils verticaux représentant le déficit de vitesse, à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, pour les cas stable et instable. .a)- pour  $h/D=2$ . b)- pour  $h/D=5$ . c)- pour  $h/D=7$

#### 4.2- Energie cinétique turbulente $k$ dans les cas de CLA stable et instable

Les profils de l'énergie cinétique turbulente, représentés sur la FIG (IV.26. a- b- c-), montre le gain d'énergie engendré par le passage de l'air à travers le rotor. L'évolution des profils de l'énergie cinétique turbulente, à travers les sections  $z=2D$  et  $z=7D$  en aval du rotor, illustre un important dégagement de quantité d'énergie au centre du rotor avec un pic à la section  $z=2D$ . La quantité d'énergie cinétique se

réduit aux fils des sections. Cependant les résultats montrent que la production de l'énergie cinétique est plus importante, en aval du rotor, par rapport au cas de stratification thermique neutre (FIG.IV.26. vs. FIG.IV.22-b). Ce résultat est en conformité avec celui obtenu par Alinot et al [51].

Les résultats montrent que la génération de l'énergie cinétique de l'éolienne isolée, est plus affectée en condition de stratification thermique stable qu'en condition de stratification instable [77]. Effectivement, on note un pic plus important engendré en condition de stratification instable qu'en condition stable (FIG 26. a, b). Cela peut s'expliquer par des conditions de turbulence plus faible en amont du rotor en condition de stratification stable. En effet, le niveau moyen d'énergie cinétique turbulente  $k$  en amont de l'éolienne est plus faible en condition stable, comparé aux autres conditions de stratification thermique.

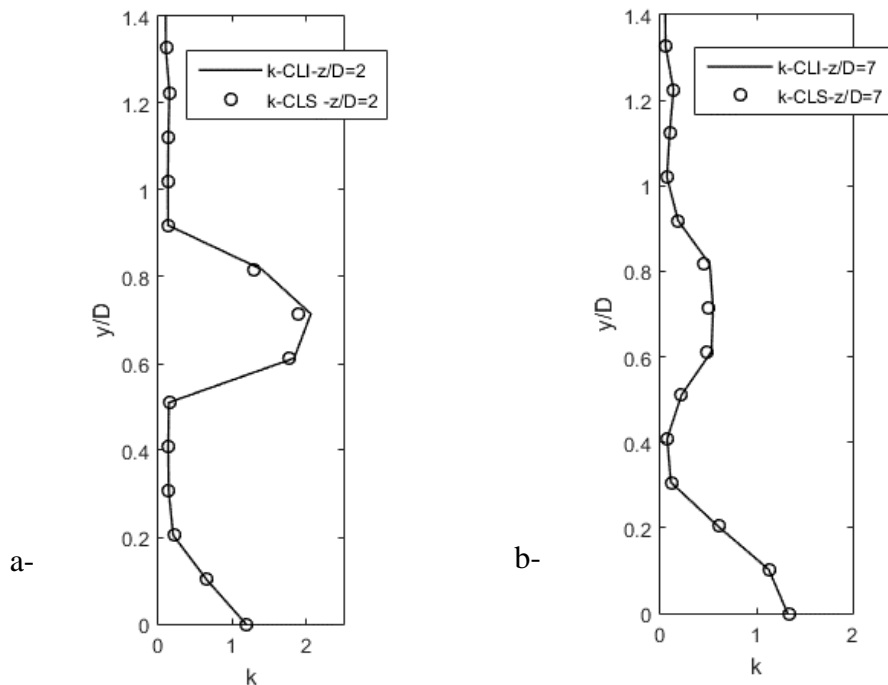


FIG. IV. 26. Comparaison de profils de génération de l'énergie cinétique turbulente  $k$ , à différentes sections dans la direction axiale de l'écoulement, pour les deux cas stable et instable. .a)- pour  $h/D=2$ . b)- pour  $h/D=7$ .

### 4.3- Performances de l'éolienne en CLA non neutre

Les performances de l'éolienne en fonctionnement dans une couche limite atmosphérique thermiquement stratifié, stable et instable, sont comparées à celle de l'éolienne en condition thermique neutre. A cet effet, un rapport entre les puissances fournies est défini comme suit :

$$R_d = \frac{P_{stratifié}}{P_{neutre}} \quad (\text{IV.6})$$

## Chapitre IV : Résultats & Discussions

Les résultats montrent que la puissance fournie par une éolienne en conditions atmosphériques non neutre est supérieure à celle fournie en CLA neutre. De plus, la génération de puissance en condition de stratification thermique instable est supérieure à celle générée en condition de stratification stable (Tableau IV.5).

La différence entre le rapport de puissance du cas stable et instable est de l'ordre de 3,44. Cette valeur peut être considérée comme la hausse de puissance due aux conditions de stratification instable.

Ces chiffres s'accordent avec ceux publiés dans des travaux antérieurs, où une variation de la puissance de 7% était notée.

Notre travail a permis de mettre en évidence l'importance de l'influence des conditions de stabilité sur les performances d'une éolienne. Ces résultats confirment les observations faites précédemment par Alinot & al [51] démontrant également que l'augmentation de l'intensité de la turbulence à la hauteur du mat, résulte en une augmentation de la production éolienne [78]. Dans notre cas la turbulence augmente dans les conditions de stratification thermique instable (FIG.IV.25-a).

Tableau IV.5. Comparaison des performances de production dans les deux cas de stratification thermique.

Conditions de stratification thermique	Stable	Instable
$R_d$	2.21	5.66

### IV.5 Conclusion

Les travaux effectués dans la première partie de cette thèse nous ont permis de proposer une nouvelle loi d'extrapolation des vitesses de vent de 10 à 50m de hauteur. Ce modèle, élaboré sur la base de données de la station d'Almas qui sont de bonne qualité, a été testé et validé. Le modèle RNA développé, est par la suite entraîné pour un ensemble de données de Ksar Chellala. Comparées à des données de l'ONM mesurées à 50m, les vitesses extrapolées ont une erreur de 0.3% environ pour le modèle RNA et environ 3% pour la loi logarithmique. Une valeur satisfaisante pour le modèle RNA, qui pourrait être optimisée en améliorant la qualité des données mesurées (fréquence de mesure) ainsi que d'autres paramètres comme l'Algorithme d'optimisation du Réseau.

Ce travail est proposé afin de pallier à l'insuffisance des données mesurées à plus de 10m de hauteur. En effet, la plupart des stations de mesure en Algérie sont munies de mâts de mesure de 10m de hauteur, ce qui nécessite l'utilisation d'une loi d'extrapolation fiable pour identifier les vitesses de vent à la hauteur du mât. De plus, l'utilisation des données de la température mesurée dans le processus

d'apprentissage du réseau, exprime la sensibilité de la prédiction de la vitesse au changement de la température (diurnal et nocturne), qui influence le profil vertical de la vitesse de vent. Ce qui n'est pas pris en considération dans la loi d'extrapolation logarithmique.

Les résultats de prédiction obtenus pour les deux sites de Dellys et de Timimoune montrent au plus 20% d'écart par rapport à la prédiction sur la base de la loi logarithmique. On note que cette valeur représente une amélioration du modèle de prédiction proposé de près de 20%.

Dans la deuxième partie de nos travaux, différents aspects du développement du sillage en aval d'un rotor éolien ont été étudiés.

Dans un premier temps, l'influence de la hauteur du mât sur le développement du sillage d'une éolienne dans une CLA neutre a été étudiée. L'évaluation du déficit de vitesse ainsi que la description des champs de vitesses et de vorticités, ont montré que le sillage est moins impacté lorsque la hauteur du mât est plus importante, comme l'a démontré le calcul de la performance du rotor à la section IV.1.5.

Le modèle hybride utilisé dans ce travail, donne une bonne représentation du comportement du sillage en aval du rotor, mais ne reproduit pas les tourbillons d'extrémité de pale près du rotor. Cependant, il fournit assez d'informations sur le comportement du sillage au-delà de 1D.

La méthode proposée a été validée par comparaison des résultats numériques avec ceux de tests effectués en soufflerie. Le calcul de l'erreur relative entre le déficit de vitesses dans le sillage simulé et le déficit obtenu des mesures en soufflerie, fait apparaître une meilleure approximation des résultats dans le sillage proche de l'ordre de 1.32% et de 2.21% dans le sillage lointain.

Le rendement de la machine évalué pour les deux hauteurs du mât considérées dans ce travail montre que la hauteur du mât de l'ordre du diamètre de la machine est plus efficace que la hauteur la plus faible.

La méthode proposée a été ensuite appliquée pour l'analyse du sillage d'une éolienne dans une couche limite atmosphérique non neutre.

Les résultats obtenus montrent que les conditions de stratification thermique dans l'atmosphère influencent le rendement de la machine. En effet la génération de puissance d'une éolienne isolée est plus affectée en condition de stratification thermique stable qu'en condition de stratification instable. Ainsi on peut conclure que la turbulence dans la couche limite atmosphérique, plus présente en condition de stratification instable, n'affecte pas la production d'énergie ce qui s'accorde avec les résultats obtenus pour la variation des profils de l'énergie cinétique turbulente en aval du rotor. Les variations maximales en puissance, dues à la stratification

## Chapitre IV : Résultats & Discussions

thermique peuvent contribuer à une perte de production de puissance estimé à environ 7 à 9%.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de Doctorat nous ont permis d'aborder deux problématiques qui sont l'insuffisance sensible des données mesurées à plus de 10m de hauteur, et le développement du sillage dans différentes conditions d'écoulement de couche limite atmosphérique.

La plupart des stations de mesure en Algérie sont équipées de mâts de mesure de 10m de hauteur, ce qui nécessite l'utilisation d'une loi d'extrapolation fiable pour identifier les vitesses de vent à la hauteur du mat. Afin d'améliorer la loi d'extrapolation verticale de la vitesse du vent, un nouveau modèle de prédiction basé sur la méthode des réseaux de neurones artificiels a été utilisé. Le modèle a été appliqué aux données mesurées par l'ONM à la station de Ksar Chellala. Comparées aux mesures expérimentales, les vitesses prédites à 50m ont un taux de déviation de 0.3% pour le modèle RNA, et environ 3% pour la loi d'extrapolation logarithmique. Ces résultats montrent que le modèle RNA améliore la prédiction d'environ 2.7%. Ces résultats pourraient être optimisés en améliorant la qualité des données mesurées (fréquence de mesure) ainsi que d'autres paramètres comme l'Algorithme d'optimisation du Réseau. D'autre part, l'utilisation du paramètre de mesure de la température dans le processus d'apprentissage du RNA, exprime la sensibilité de la prédiction de la vitesse au changement de la température (diurnal et nocturne), qui influence effectivement le profil vertical de la vitesse de vent. Ce qui n'est pas pris en considération par la loi d'extrapolation logarithmique.

L'étude effectuée dans la deuxième partie de cette thèse nous a mené à analyser la composition et les états de stratification thermique de la couche limite atmosphérique, d'étudier l'influence de la hauteur du mât sur le sillage, et d'évaluer la performance d'une éolienne à axe horizontal dans ces conditions.

Le modèle hybride proposé a été validé par comparaison des résultats de mesures effectuées en soufflerie au laboratoire Dynfluid de l'école ENSAM ParisTech, où nous avons procédé à la mesure des champs de vitesses et de vorticités dans la zone en aval d'un petit prototype d'éolienne de 10 cm de diamètre, en utilisant la technique de vélocimétrie par images de particules (PIV).

Les résultats obtenus montrent que le modèle hybride utilisé donne une bonne représentation du comportement du sillage en aval du rotor, mais ne reproduit pas tous les tourbillons d'extrémité de pale près du rotor. Cependant, il fournit assez d'informations sur le comportement du sillage au-delà de 1D en aval du rotor. Les résultats obtenus montrent que le sillage est déclenché par un mécanisme important de tourbillons, qui prennent naissance au sommet des pales du rotor. Une composition de bulles apparaît à proximité du moyeu provoquant une zone de recirculation cassant ainsi la turbulence. Le sillage apparaît progressivement dans la direction axiale en aval du rotor. Le système de vortex composé de tourbillons de pointe commence à apparaître à une distance de 2,5 D en aval. La diffusion se produit progressivement jusqu'à ce qu'elle s'installe à 4D en aval.

## Conclusion Générale

L'étude de l'influence de la hauteur du mât sur le développement du sillage d'une éolienne dans une couche limite atmosphérique neutre a montré que le sillage est moins impacté lorsque la hauteur du mât est plus importante ; il en est de même pour les performances de l'éolienne.

Les résultats de l'évaluation du rendement de la machine effectuée pour deux hauteurs de mât ont montré une légère différence, indiquant que la hauteur du mât, de l'ordre du diamètre de la machine, se révèle plus efficace que la hauteur plus basse.

Finalement, les effets de la stratification thermique sur les sillages ont été discutés. On note que les conditions de stratification thermique dans l'atmosphère influencent le rendement de la machine éolienne et que la génération de puissance d'une éolienne isolée est plus affectée en condition de stratification thermique stable qu'en condition de stratification instable. Ainsi on peut conclure que la turbulence dans la couche limite atmosphérique, plus présente en condition de stratification instable, affecte moins la production d'énergie ce qui s'accorde avec les résultats obtenus pour la variation des profils de l'énergie cinétique turbulente en aval du rotor. Les variations en puissance obtenues, dues aux conditions de stratification thermique peuvent contribuer à une perte de production de puissance estimée à environ à 9%.

### 1-Recommandations

Cette étude a mis en évidence les principaux résultats cités ci-dessus qui nous ont aidé à proposer les recommandations suivantes :

Le modèle d'extrapolation verticale de la vitesse du vent, basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) développé au cours de cette étude a démontré une performance de prédiction supérieure. Ce modèle peut être intégré à l'évaluation du potentiel éolien sur les emplacements envisagés pour l'installation d'une ferme éolienne. L'application de ce modèle a entraîné une amélioration des prédictions de vitesses à la hauteur du moyeu, ce qui se traduit par une meilleure prédiction de la production d'énergie et optimiser l'analyse de préfaisabilité pour un projet de ferme éolienne.

L'identification des structures tourbillonnaires qui se diffusent dans le sillage lointain, sont utiles pour déterminer la distance à observer entre les éoliennes, qui peut s'évaluer à 7D, selon les observations effectuées, où le déficit de vitesse se rétablit à près de 75%, dans le cas du rotor bipales proposé dans cette étude.

D'autre part, les résultats obtenus montrent que l'influence du sol sur l'évolution du sillage est notablement marquée lorsque la hauteur du mât est inférieure à 1D, entraînant une légère diminution de l'efficacité de la machine. Il est donc recommandé de prendre en considération ces interactions entre le sol et le

## Conclusion Générale

sillage lors de l'optimisation des emplacements des éoliennes au sein d'un parc éolien

L'étude de l'influence de la stratification thermique dans la CLA sur le sillage éolien, a permis l'estimation des pertes de performance, à partir du déficit de vitesses obtenu pour chaque condition de stratification. Cette estimation correspond à un taux des pertes de performances qui peut être intégré au calcul de la puissance produite par une éolienne isolée.

### **2-Perspectives**

Cette étude a ouvert la voie à des perspectives de développement pour notre travail à venir. Parmi ces perspectives, nous envisageons les suivantes :

-Pour le modèle d'extrapolation du profil vertical du vent, un ensemble d'algorithmes d'optimisation de la fonction coût est en cours de test, afin d'améliorer les performances du réseau de neurones artificiels utilisé. D'un autre côté, il est important de s'intéresser à l'élaboration d'une base de données des mesures du vent qui soit fiable pour les calculs d'apprentissage dans le modèle de RNA.

-Améliorer le modèle hybride employé en explorant le concept de la ligne active [79], ce qui offrirait une visualisation plus approfondie des tourbillons marginaux ainsi que de leur diffusion. Cette approche pourrait permettre d'identifier avec précision la structure détaillée du sillage en aval d'un rotor, mais également pour un alignement d'éoliennes.

-Introduire un modèle de turbulence plus performant à savoir le modèle Large Eddy Simulation afin de capter plus d'échelles de longueurs de turbulence

-Enfin en ce qui concerne l'étude de l'influence de la stratification thermique sur le profil vertical du vent dans le sillage éolien, des perspectives d'étude en soufflerie sont en cours de développement en collaboration avec d'autres laboratoires.

-Un futur projet consisterait à élaborer de nouveaux programmes qui décrivent les profils de vitesses et de températures à utiliser comme conditions aux limites lors de la résolution numérique du sillage éolien au sein de l'écoulement dans la couche limite atmosphérique stratifiée. Un programme en forme d'une User-Defined Function (UDF) serait défini du code de calcul Fluent.

Nous espérons que ces conclusions vont contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes qui se déroulent dans la couche limite

Annexe A

**Annexe A**

## 1-Modélisation du rotor éolien

La modélisation de l'interaction d'un rotor HAWT avec un milieu stratifié de l'atmosphère terrestre, sera modélisée par la théorie du disque actif. Les conditions de l'écoulement amont seront modélisées par le modèle de Panofsky et Dutton 1984, où le profil vertical de vitesse du vent sera imposé.

### 1.1-Modèle du disque Actif

Nous pouvons représenter un rotor éolien à partir de la modélisation d'un saut de pression sur un disque contenu dans un tube de courant avec une épaisseur  $dr$  (FIG. 1)

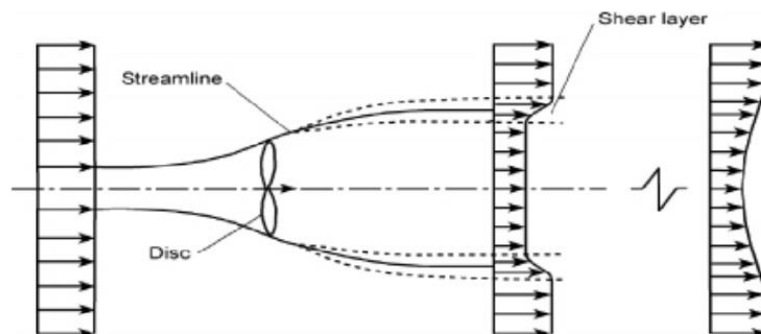


FIG.1. Sillage éolien obtenu à partir de la méthode du disque actif. [13]

La théorie du disque actif a été introduite par Froude-Rankine, elle utilise les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est stationnaire et incompressible.
- L'écoulement forme un tube de courant autour du rotor.
- L'écoulement est Homogène incompressible et stationnaire
- La vitesse est constante sur le disque rotor et la poussée uniforme sur sa surface
- Le fluide est irrationnelle (la rotation du sillage induite par le disque est négligé).

La théorie du disque actif permet d'établir la relation entre la variation de la pression du fluide qui traverse le rotor et la vitesse en aval. Cependant ce modèle ne permet pas d'analyser l'écoulement autour des pales et de tenir compte de la géométrie réelle du rotor. C'est la théorie de l'élément de pale qui donne la possibilité d'utiliser les caractéristiques de profil et d'analyser en détail l'écoulement le long de la pale.

### 1-2-Théorie de l'élément de pale

La méthode la plus utilisée pour calculer la charge appliquée par l'écoulement sur une éolienne et le comportement d'une éolienne, consiste à utiliser

le bilan de quantité de mouvement appliqué à un élément de pale (Blade Element Momentum BEM). Cette méthode est basée sur la division de l'écoulement en volumes de contrôle annulaires d'épaisseur  $dr$ , auxquels on applique le bilan de quantité de mouvement et d'énergie. Ces anneaux s'étendent de l'infini amont jusqu'à l'infini aval par rapport au rotor :

### a- Conservation de la masse

Sur le tube de courant de section de surface  $2\pi r dr$ , (FIG. 2), la conservation du débit massique à travers le tube de courant, est donnée comme suit :

$$U_0 r_0 dr = U_1 r dr = U_\infty r_\infty dr_\infty \quad (1)$$

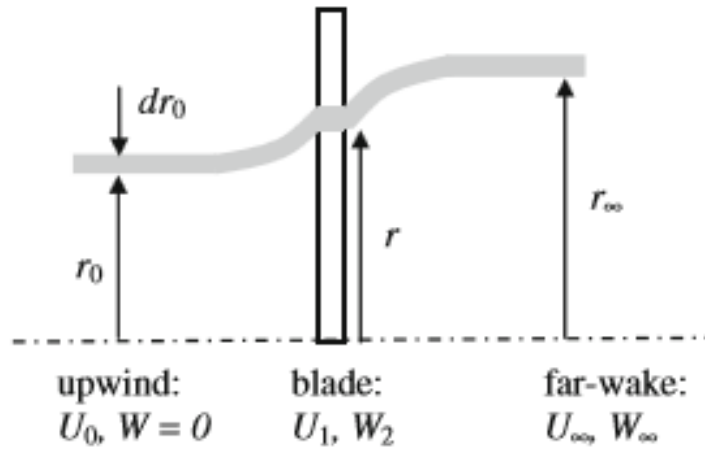


FIG.2. Tube de courant annulaire de rayon  $dr$ .

### b- Conservation de la quantité de mouvement

Les forces qui nous intéressent sont dans le sens du vent et de l'axe de la turbine, la portance peut être exprimée dans le tube de courant et suivant l'axe de rotation

Par contribution de la portance dans le tube de courant,

$$dT = \rho U_0 U_0 2\pi r_0 dr_0 - \rho U_\infty U_\infty 2\pi r_\infty dr_\infty \quad (2)$$

$$dT = \rho 2\pi U_1 r (U_0 - U_\infty) dr \quad (3)$$

$$dT = 4\pi r \rho U_0^2 a(1-a) dr \quad (4)$$

Avec  $a = 1 - \frac{U_1}{U_0}$ .

$dT$  représente l'ensemble des forces qui agissent sur les  $N$  éléments dans le tube de courant. " $a$ " est le facteur d'induction axial, il représente le taux d'absorption de l'énergie cinétique par l'éolienne.

### c- Conservation du moment angulaire

Le couple agissant sur l'élément de pale dans le tube de courant. On obtient le couple  $Q$  dans l'axe de rotation

$$dQ = \rho r_{\infty} W_{\infty} U_{\infty} 2\pi r_{\infty} dr_{\infty} \quad (5)$$

Le moment angulaire est conservé en aval de l'écoulement  $rW_2 = r_{\infty}W_{\infty}$

$$dQ = 2\pi\rho U_0(1-a)W_2 r^2 dr \quad (6)$$

$$dQ = 4\pi\rho U_0(1-a)a'\Omega r^3 dr \quad (7)$$

Où  $W_2 = 2a'\Omega r$ , avec  $a'$  le facteur d'induction tangentiel.

et

$$W = \frac{W_0 + W_2}{2} = \frac{W_2}{2} = a'\Omega r \quad \text{Avec } W_0 = 0$$

$$W = a'\Omega r \quad (8)$$

### 1.3- Les Forces agissant sur l'élément de pale

Le concept de diviser le rotor en plusieurs éléments de surfaces cylindriques, et d'y intégrer les forces aérodynamiques, correspond à la théorie de l'élément de pale telle qu'elle a été formulée initialement par Froude [63]. Ainsi, il est possible d'obtenir indépendamment les forces de la traînée  $dD$  et de la portance  $dL$  appliquées sur chaque tranche, sans tenir compte de l'écoulement dans les tranches voisines. Puis en intégrant les efforts élémentaires on peut calculer les caractéristiques aérodynamiques intégrales du rotor.

Les forces aérodynamiques sont distribuées sur chaque élément de volume sur un ensemble d'anneaux coaxiaux. Chaque anneau est décomposé en une multitude de volume de contrôle, de dimension  $(\delta r \times \delta \theta \times h)$ , comme le montre la FIG.1. Avec  $h$  est l'épaisseur du disque représenté et elle est égale à  $h = c \sin \beta$ . Où  $\beta$  est l'angle de calage (mesuré entre la ligne de portance nulle du profil (axe de la corde) et le plan de rotation) (FIG.3) [66].

Les forces axiales et tangentielles locales sont calculées en fonction de la géométrie de la pale et des données du profil aérodynamique.

La vitesse de l'écoulement dans l'axe de rotation  $U_T$  et la vitesse circonférentielle est la somme de  $W$  et  $\Omega r$  en faisant la somme vectorielle de ces vitesses on obtient :

$$U_T^2 = (1-a)^2 + [(1+a')\lambda_r]^2 \quad (9)$$

$$\text{avec } \lambda_r = \frac{\Omega r}{U_0} = \frac{\lambda r}{R}$$

$U_T$  est la vitesse relative ou vitesse totale, perçu par l'élément de pale,  $\alpha$  est l'angle d'attaque,  $\theta$  est l'angle entre l'axe de rotation de l'élément de pale et la corde du profile de pale. et  $\phi$  est l'angle entre  $U_T$  est le plan de rotation (Fig. 3). On a :

$$\theta + \alpha = \phi \quad (10)$$

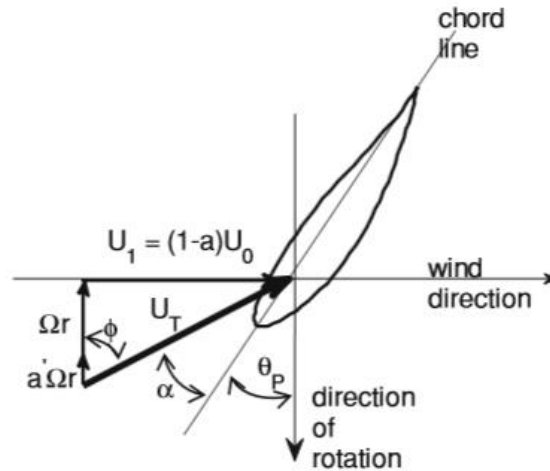


FIG. 3. Triangle des vitesses pour un élément de pale.

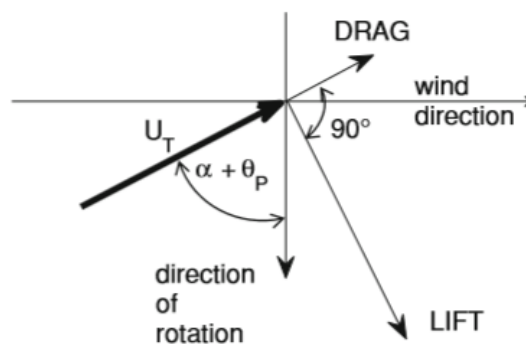


FIG. 4. Direction de la poussée et de la trainée par rapport à la vitesse effective  $U_T$ .

La trainée fait en sorte de réduire le couple créé par la poussée,

Parce que les éoliennes fonctionnent à des valeurs élevées de  $\lambda$ , généralement dans la plage de 7 à 10,  $\Omega r$  à la pointe est environ dix fois supérieure à  $U_1$ . Au moyeu,  $\Omega r$  est presque nul, de sorte que  $\theta$  doit varier de façon significative avec le rayon pour maintenir l'angle d'attaque,  $\alpha$ , à des valeurs raisonnables pour éviter la séparation des flux. Le fonctionnement efficace des éoliennes se produit sur une plage limitée de  $\alpha$ .

L'hypothèse de base est que la trainée et la poussée agissant sur l'élément de pale sont les mêmes que ceux sur un profil aérodynamique des même section, l'angle d'attaque et la vitesse effective. On exprime la poussée et trainée qui s'exercent sur un profil aérodynamique comme suit :

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_l U_T^2 c \quad (11)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d U_T^2 c \quad (12)$$

Il sera nécessaire alors d'exprimer la poussée et la trainée en composantes axiale et circonférentielle, pour un profil d'éolienne et pour N éléments.

La résultante de la portance est définie comme suit :

$$dT = \frac{1}{2} \rho U_T^2 c N (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr = \frac{1}{2} \rho U_T^2 c N C_a dr \quad (13)$$

Avec  $C_a = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$

Et le couple due aux forces circonférentielles est donné par :

$$dQ = \frac{1}{2} \rho U_T^2 c N (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr = \frac{1}{2} \rho U_T^2 c N C_{a'} r dr \quad (14)$$

Avec  $C_{a'} = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$

Les équations ci-dessus sont les équations basiques de la théorie de l'élément de pale.

Pour déterminer  $C_a$  et  $C_{a'}$ , une relation permet de définir l'angle  $\phi$  à partir du triangle de vitesse

$$\tan \phi = \frac{U_1}{\Omega r (1+a')} = \frac{(1-a)}{\lambda_r (1+a')} \quad (15)$$

$\lambda_r$  varie de zéro de l'axe de rotation jusqu'à  $\lambda$  à la pointe de la pale  $\lambda_r = \frac{\lambda r}{R}$ .

Pour  $\lambda_r \in [0, \lambda]$

- les valeurs de  $a$  et  $a'$  sont connues,

- On détermine  $\phi$  (éq 15)

- Puis  $C_l$  et  $C_d$  déterminés en fonction de l'angle d'attaque (données caractéristiques de la pale, données par le constructeur).

C'est un processus itératif par lequel on peut déduire les valeurs  $a_n$  à partir des équations (4) et (13), par l'expression suivante :

$$a_n (1 - a_n) = f_n = \frac{U_T^2 C_a \sigma}{4 U_0^2} (n-1) \quad (16)$$

Où  $\sigma$  est défini comme la solidité locale :

$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (17)$$

Ainsi, il est facile de modifier l'équation (16) pour la région de poussée élevée. On peut déterminer à partir des équations de conservation du moment angulaire et de la composante de force circonférentielle la relation suivante :

$$a' = a \frac{c_{a'}}{c_a \lambda_r} \quad (18)$$

Les équations ci-dessus permettent de calculer les efforts (dT, dQ) qu'exerce le vent sur les pales de l'éolienne, et ainsi calculer la différence de pression qui se produit au niveau du disque actif. On représente l'éolienne par l'influence d'un écoulement à travers un disque où s'établit un saut de pression et de ce fait on peut observer le sillage induit par cet écoulement.

#### 1.4-Coefficient de puissance

D'après le bilan de quantité de mouvement à travers un tube de courant parcouru par un flux on peut écrire :

$$(P_d^+ - P_d^-)A_d = (V_2 - V_1)\rho A_d V_d \quad (19)$$

Car les seuls efforts exercés sur le disque sont la différence de pression.

En appliquant la loi de Bernoulli on obtient l'expression de la différence de pression, au niveau du disque, en fonction des pressions  $P_1$  en amont et en aval du disque  $P_2$ , il en résulte :

$$\Delta P_d = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) \quad (20)$$

Avec  $V_2 = (1 - 2a)V_1$

On peut déduire alors l'expression de la force  $F$  appliquée sur le disque qui s'écrit comme suit :

$$F = \Delta P_d A_d = 2\rho A_d V_1^2 a(1 - a) \quad (21)$$

On calcule la puissance du rotor par la formule suivante :

$$P = FV_d = 2\rho A_d V_1^3 a(1 - a)^2 \quad (22)$$

À partir de l'expression de la puissance, le coefficient de puissance peut être exprimé par le rapport de la puissance et de la puissance d'entrée à travers la surface balayée par le rotor :

$$C_p = \frac{2\rho A_d V_1^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho A_d V_1^3} \quad (23)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (24)$$

### 1.5-Limite Betz :

On définit comme limite à la puissance du rotor la valeur de Betz qui est déduite par :

$$\frac{dC_p}{da} = 4a(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (24)$$

Pour  $a=1/3$ ,

$$C_{p\max} = \frac{16}{25} = 59\% \quad (25)$$

Ce coefficient correspond à la valeur maximum de la puissance qu'on peut extraire du vent par un rotor en mouvement et qu'on appelle limite de Betz.

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1]. Atwoli L, Erhabor GE, Gbakima AA, Haileamlak A, Ntumba J-MK, Kigera J et al. Conférence COP27 sur le changement climatique: des mesures d'urgence sont nécessaires pour l'Afrique et pour le monde entier. Rev Panam Salud Publica. 2022 ; 46 : e211. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.211>
- [2] National Renewable Energy Laboratory. (2013). Wind Energy Time line. Récupéré le 1er mars 2023, de <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57405.pdf>
- [3] <https://globalwindatlas.info/fr/about/introduction>
- [4] İsmet Akova, « Development potential of wind energy in Turkey », EchoGéo, 16 | 2011, mis en ligne le 04 juillet 2011, consulté le 25 août 2021. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/12457>.
- [5] Nachida KASBADJI MERZOUK. Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. PhD thèse. Université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen
- [6] F. Chellali, Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie, PhD thèse, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- [7] S.M. Boudia. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2013.
- [8] H. Daaou Nedjari, S. Kheder Haddouche, A. Balehouane, O. Guerri. Optimal windy sites in Algeria: Potential and perspectives. Energy 147 (2018) 1240e1255.
- [9] European Wind Energy Association (EWEA). (2013). The European Wind Energy Industry - Key trends and statistics 2012.
- [10] Li, X., & Yang, H. (2018). A review on the optimization methods for wind farm layout design. Journal of Cleaner Production, 177, 848-861.
- [11] Sørensen, J. D., & Shen, W. Z. (2002). Numerical investigation of wind turbine wake characteristics in yawed conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(10), 1301-1319.)
- [12] Renewable Energy and Energy Efficiency Program. MEM. <[http:// www.mem-algeria.org/francais/uploads/enr/Programme\\_ ENR\\_et\\_efficacite\\_energetique\\_en.pdf](http://www.mem-algeria.org/francais/uploads/enr/Programme_ENR_et_efficacite_energetique_en.pdf)> March 2011.
- [13] Ivanell S. Numerical computation of wind turbine wakes. PhD Thesis, KTH Mechanics, Royal Institute of Technology, 2009.
- [14] S. Adjiri1, I. Dobrev, A. Benzaoui, H. Nedjari-Daaou1 and F. Massouh. New Actuator Disk Model for the Analysis of Wind Turbines Wake Interaction with the Ground. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 16, No. 1, pp. 75-88, 2023.

## Références bibliographiques

- [15] Jens N. Sørensen et al. Analysis and Validation of Glauert Rotor Design. 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2265 032047
- [16]. G. Gualtieri. A comprehensive review on wind resource extrapolation models applied in wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102 (2019) 215–233
- [17] M. Optis, N. Bodini, M. Debnath, P. Doubrawa. New methods to improve the vertical extrapolation of near-surface offshore wind speeds. Publications on behalf of the European Academy of Wind Energy.
- [18] P. Lu et al. Review of meta-heuristic algorithms for wind power prediction: Methodologies, applications and challenges. *Applied Energy* 301 (2021) 117446.
- [19] A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity" de Warren McCulloch et Walter Pitts (1943)].
- [20] Nawal Cheggaga. A new artificial neural network–power law model for vertical wind speed extrapolation for improving wind resource assessment. *Wind Engineering* (1–13), (2017)
- [21] H. Liu et al. Forecasting models for wind speed using wavelet, wavelet packet, time series and Artificial Neural Networks. *Applied Energy* 107 (2013) 191–208
- [22] Mortensen, N. G., Landberg, L., Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1993). Wind atlas analysis and application program (WAsP).
- [23] Laurent Laporte. Application d'un code de CFD atmosphérique à l'estimation du productible éolien en terrain complexe. PhD thèse. Paris-Est, 2008.
- [24] Pierre-Elouan Réthoré. Verification and validation of an actuator disc model. *Wind Energy*. 2014; 17:919–937.
- [25] Sørensen, J., Myken, A., Unsteady actuator disc model for horizontal axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 39(1), 139-149, 1992.
- [26] Fernando Porte´ -Agel. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99 (2011) 154–168.
- [27] B. Sanders. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. *Wind Energy*. 2011; 14:799–819.
- [28] Dobrev, I., Massouh, F., Rapin, M., Actuator surface hybrid model, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 75, No. 1, p. 012019, 2007
- [29] Dobrev, I, Maalouf, B, Troldborg, N, and Massouh, F (2008) Investigation of the wind turbine vortex structure. 14th Int Symp on Appl of Laser Tech to Fluid Mech, Lisbon, Portugal, 1-7

## Références bibliographiques

- [30] Jiarong Hong. Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2.5-MW wind turbine. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/ncomms5216
- [31] Iván Herráez<sup>1</sup>. Detailed analysis of the blade root flow of a horizontal axis wind turbine. *Wind Energy. Sci.* 2016.
- [32] A. S. Hussein & H. E. El-Shishiny. Modeling And Simulation Of Micro-Scale Wind Farms Using High Performance Computing. *International Journal of Computational Methods* Vol. 9, No. 2 (2012) 1240025.
- [33] Yu-Ting Wu. Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations. *Boundary-Layer Meteorol* (2011) 138:345–366.
- [34] Panofsky HA, Dutton JA. *Atmospheric Turbulence*. Wiley: New York, 1984.
- [35] Crespo A, Manuel F, Moreno D, Fraga E, Hernández J. Numerical analysis of wind turbine wakes. In *Proceedings of Delphi Workshop on Wind Energy Applications*, Delphi, 1985; 15–25.
- [36] Chen YS, Kim SW. Computation of turbulent flow using an extended turbulence closure model. Technical Report CR-179204, NASA, 1987.
- [37] El Kasmi A, Masson C. An extended  $k_{\text{eff}}$  model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2008; 96: 103–122.
- [38] Launder BE. An introduction to single-point closure methodology. In *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*, Gatski TB, Hussaini MY, Lumley JL (eds). Oxford University Press: New York, 1996; 243–310.
- [39] M. Paul van der Laan, Niels N. Sørensen, Pierre-Elouan Réthoré, Jakob Mann, Mark C. Kelly, Niels Troldborg, J. Gerard Schepers and Ewan Machefaux. An improved  $k_{\text{eff}}$  model applied to a wind turbine wake in atmospheric turbulence. *Wind Energy*. 2015; 18:889–907.
- [40] Jimenez A, Crespo A, Migoya E. Application of a LES technique to characterize the wake deflection of a wind turbine in yaw. *Wind Energy* 2010; 13: 559–572.
- [41] Wußow S, Sitzki L, Hahm T. 3D-simulation of the turbulent wake behind a wind turbine. In *The Science of Making Torque from Wind*. Journal of Physics: Conference Series, vol. 75. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2007.
- [42] J. Breedts, L. Louw, I.H. de Kock, Demand forecasting for network capacity planning in electrical utilities – a review of existing methods considering the evolving technologies of the energy arena. *saie29 Proceedings*, 24th – 26th of October 2018, Spier, Stellenbosch, South Africa © 2018 SAIIE

## Références bibliographiques

- [43] M. Dörenkämper, (2015) The impact of stable atmospheric boundary layers on wind-turbine wakes within off-shore wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.144(2015)146–153.
- [44] Simley, E., Pao, L. Y., Brasseur, J. G., &Lundquist, J. K. (2019). Atmospheric stability effects on wind turbine wake characteristics: an LES investigation. *Wind Energy Science*, 4(1), 39-53
- [45] Porté-Agel, F., M. Bastankhah, and S. Shamsoddin (2020). Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology* 174:1–59.
- [46] Wu, Y. T., Hong, J. K., & Lee, S. J. (2019). Influence of atmospheric stratification on wind turbine wakes in a large wind farm. *Renewable Energy*, 139, 100-111
- [47] Van Der Berg G (2008) Wind turbine power and sound in relation to atmospheric stability. *Wind Energy* 11:151–169
- [48] Ohya Y, Nakamura R, Uchida T (2008) Intermittent bursting of turbulence in a stable boundary layer with low-level jet. *Boundary-Layer Meteorol* 126:349–363
- [49] Porté-Agel, F. (2011). Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99 154–168.
- [50] Vollmer, L., & Steinfeld, G. (2019). Effects of atmospheric stability on the wake of a model wind turbine in a wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 191, 102-110
- [51] Cédric Alinot, *Analyse Aérodynamique Des Parcs Eoliens Immergés Dans Une Couche Limite Terrestre Ayant Différentes Conditions De Stabilité Thermique*. PhD thèse, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, Montréal. Canada.
- [52] Giovanni de Cillis, Stefania Cherubini, Onofrio Semeraro, Stefano Leonardi, Pietro de Palma. The influence of incoming turbulence on the dynamic modes of an NREL-5MW wind turbine wake. *Renewable Energy*, 2022, 183, pp.601 - 616. [ff10.1016/j.renene.2021.11.037](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.037). [ffhal-03498440f](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.037)
- [53] J. C. KAIMAL, J. J. FINNIC AN. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. New York, Oxford, OXFORD UNIVERSITY PRESS (1994).
- [54] Jonathon Sumner. *Influence de la stabilité atmosphérique sur les pratiques du secteur éolien*. MONTRÉAL, LE 6 JUIN 2006.
- [55] Ferial Adli & al. Vertical wind speed extrapolation: Modelling using a response surface methodology (RSM) based on unconventional designs. *Wind Engineering* (1–9), (2021). DOI: [10.1177/0309524X211046380](https://doi.org/10.1177/0309524X211046380)

## Références bibliographiques

- [56] N. Cheggaga, Génération de profils de vent à basse altitude par des processus de mémoire en vue d'application éolienne, PhD thèse, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [57] W.P Jones, B.E Launder, The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 15, Issue 2, 1972, Pages 301-314.
- [58] M. Jourieh. Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier L'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. PhD thèse. Arts et Métiers ParisTech, 2007.
- [59] Shen W. Z, R. Mikkelsen, J. Nørkær Sørensen, and C. Bak. (2005). Tip loss corrections for wind turbine computations. <https://doi.org/10.1002/we.153>
- [60] Sørensen, N.J (2002, June). Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124.
- [61] Panofsky, H.A. (1988). The effect of averaging time on velocity variances. *Meteorol. Atmos. Phys.* 38, 64–69. <https://doi.org/10.1007/BF01029948>
- [62] Shen, W., J. Zhang, and J. Sørensen (2009). The actuator surface model: a new Navier–Stokes based model for rotor computations. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131(1), 011002.
- [63] Gualtieri G., S. Secci (2011). Wind shear coefficients, roughness length and energy yield over coastal locations in Southern Italy. *Renewable Energy* 36. 1081-1094.
- [64] Manwell, J.F., J.G. McGowan, A.L. Rogers (2009). *Wind Energy Explained*, second ed. Wiley.
- [65] Paskyabia M. B., (2015). Offshore Wind Farm Wake Effect on Stratification and Coastal Upwelling. *Energy Procedia* 80 131 – 140.
- [66] Roland B. Stull. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers (1988).
- [67] Dobrev, I. (2009). *Modèle hybride de surface active pour l'analyse du comportement aérodynamique des rotors éoliens a pales rigides ou déformables*. Engineering Sciences. Arts et Métiers Paris-Tech. French.
- [68] Patankar, S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation. New York.
- [69] Blocken, B., G. Dezsö, J. van Beeck, and J. Carmeliet (2010). Comparison of calculation models for wind-driven rain position on building facades. *Atmospheric Environment* 44. (14), 1714–1725.
- [70] <http://www.suna.org.ir/en/regions>

## Références bibliographiques

- [71] Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1991). Atlas Éolien Européen. Risø National Laboratory. Meteorology and Wind Energy Department.
- [72] Daaou Nedjari, H., O. Guerri, and M. Saighi (2017). CFD wind turbines wake assessment in complex topography. *Energy Conversion and Management* 138 224–236.
- [73] Kamada, Y. and T. Maeda (2011). Experimental studies on velocity field around wind turbine rotor. *Int Conf and Utility Exhibition on Power and Energy Systems (ICUE) IEEE 2011:1-7*.
- [74] Wu, YT. and F. Porté-Agel (2011). Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations. *Boundary-Layer Meteorol* 138:345–366.
- [75] Espanâ, G., S. Aubrun, S. Loyer, and P. Devinant (2012). Wind tunnel study of the wake meandering downstream of a modelled wind turbine as an effect of large-scale turbulent eddies. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 101 24–33.
- [76] Zhaohui, D. (1997). A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [77] C. Masson, C. Leclerc, and N. Dabin. Ab normal high-power output of wind turbine in cold weather: A quantitative analysis of temperature influence on power output. In *Proceedings of the 2001 ASME Wind Energy Symposium*, pages 123-133,2001.
- [78] Luca Oggiano. CFD simulations on the NTNU wind turbine rotor and comparison with experiments. *Energy Procedia* 58 (2014) 111 – 116
- [79] Gao, Z., Y. Li, T. Wang, W. Shen, X. Zheng, and S. Pröbsting (2021) . Modeling the nacelle wake of a horizontal-axis wind turbine under different yaw conditions. *Renewable Energy*, 172263-275.