

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.**

**PAR
ETIENNE BIBOR**

**VALIDATION DE LA TECHNIQUE D'ANÉMOMÉTRIE À LA NACELLE
EN TERRAIN COMPLEXE**

MONTRÉAL, le 12 SEPTEMBRE 2005

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Christian Masson, directeur de thèse
Département de génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Louis Lamarche, président du jury
Département de génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. François Morency, examinateur
Département de génie Mécanique, École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 SEPTEMBRE 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

VALIDATION DE LA TECHNIQUE D'ANÉMOMÉTRIE À LA NACELLE EN TERRAIN COMPLEXE

Etienne Bibor

RÉSUMÉ

Dans l'industrie éolienne, les normes proposées par l'International Electrotechnical Commission (IEC) constituent la référence internationale. Cependant, certains aspects demeurent encore mal définis, notamment la vérification des performances d'un parc éolien sur terrain complexe. Cette étape soulève des difficultés importantes reliées à l'anémométrie à la nacelle. Le but de la présente étude est d'évaluer la précision de cette technique sur des terrains complexes. Afin d'analyser cette problématique, des installations expérimentales ont été déployées sur le site très complexe de Rivière-Au-Renard en Gaspésie. Une analyse expérimentale y fut menée afin d'obtenir les corrélation entre les vitesses à la nacelle V_{nac} et les vitesses non perturbées de l'écoulement V_{inf} . L'influence du terrain a ainsi pu être analysée. Finalement, un modèle numérique a été développé en utilisant le logiciel commercial FLUENT afin de mieux comprendre l'effet des différents paramètres présents dans la problématique de l'anémométrie à la nacelle.

VALIDATION DE LA TECHNIQUE D'ANÉMOMÉTRIE À LA NACELLE EN TERRAIN COMPLEXE

Etienne Bibor

SOMMAIRE

Différents enjeux critiques de notre époque expliquent la grande popularité que connaît l'énergie éolienne depuis les dernières décennies. Afin d'améliorer les performances de ce type d'énergie, ainsi que dans le but de diminuer les conflits entre les différents intervenants, des normes ont été développées. Celles proposées par l'International Electrotechnical Commission (IEC) constituent la référence internationale. Cependant, plusieurs aspects traités dans ces normes ne sont pas parfaitement bien compris ou reposent sur des hypothèses inappropriées. Par exemple, la vérification des performances d'un parc éolien sur terrain complexe soulève des difficultés importantes reliées à l'anémométrie à la nacelle. La pierre d'assise de cette technique est de trouver une corrélation, sur l'éolienne de référence, entre la lecture de l'anémomètre situé à la nacelle (V_{nac}) et la vitesse non perturbée de l'écoulement (V_∞). L'hypothèse stipulant que cette corrélation peut être appliquée à toutes les autres machines du parc est valable uniquement pour des terrains plats. Le but de la présente étude est d'évaluer la précision de cette technique sur des terrains complexes.

Afin d'analyser cette problématique, des installations expérimentales ont été déployées sur le site très complexe de Rivière-Au-Renard en Gaspésie. Plus précisément, trois tours météorologiques, instrumentées à quatre hauteurs différentes, ont été installées autour de l'éolienne de référence du Parc Éolien Rivière-Au-Renard (PÉR). De plus, une tour de référence était déjà présente sur le site. En plus des données provenant des quatre tours météorologiques, celles de l'éolienne de référence étaient également disponibles.

Dans un premier temps, un résumé des procédures actuelles de tests de performances a été effectué. Par la suite, une analyse expérimentale fut menée afin d'obtenir une corrélation entre $V_{nac} \Leftrightarrow V_\infty$, soit la base de l'anémométrie à la nacelle. Cette dernière fut comparée à la corrélation fournie par le manufacturier, mesurée sur un terrain plat. Des différences considérables allant jusqu'à $1.59 m/s$ ont été mesurées. Cet écart illustre l'influence non négligeable du terrain et de l'environnement sur cette corrélation. Lors d'un test de performance, l'utilisation de la corrélation du manufacturier mène à des résultats irréalistes, avec des coefficients de puissance (C_P) supérieurs à la limite théorique. Ces résultats confirment l'invalidité d'une corrélation commune à toutes les éoliennes d'un même type, indépendamment du terrain. Cette différence entraîne des erreurs lors de l'estimation de V_∞ , ayant des répercussions significatives dans le contrôle actif de l'éolienne.

Cet enchaînement de problèmes explique en partie pourquoi les performances de l'éolienne sont plus basses que celles prévues.

Dans un deuxième temps, l'influence du terrain a été investigué en calculant des corrélations pour chaque secteur valide de 10 deg, plutôt que d'utiliser une seule corrélation générale. Il est ainsi possible de vraiment quantifier l'effet du terrain sur l'anémométrie à la nacelle. Entre les secteurs, des différences importantes ont été trouvées. Deux courbes de puissances ont ensuite pu être calculées en utilisant les corrélations par secteurs, ou en prenant celle générale, tel qu'effectué dans l'industrie. Encore une fois, des différences non négligeables, variant entre -10% et 10%, ont été observées. Cependant, lors du calcul de la production annuelle énergétique (AEP), les écarts s'amenuisent jusqu'à 0.65%. Ceci s'explique par un effet compensatoire dû au fait que certains écarts sont positifs et d'autres négatifs. Bien qu'entraînant des erreurs ponctuelles très marquées, l'utilisation d'une corrélation générale n'engendre pas d'erreurs majeures sur une longue période.

Finalement, un modèle numérique a été développé en utilisant le logiciel commercial FLUENT. Cette approche numérique a permis de mieux comprendre l'effet des différents paramètres présents dans la problématique de l'anémométrie à la nacelle. Une des conclusions de cette analyse, est que l'anémométrie à la nacelle est grandement influencée par la section à l'emplanture de la pale, et très peu par les profils aérodynamiques situés plus hauts. Une autre conclusion est que l'une des causes majeures influençant la corrélation provient de l'accélération de l'écoulement provoquée par le système de fixation de l'anémomètre. Si un tel système ne peut être évité, alors la calibration de l'anémomètre devrait se faire avec le système entier en soufflerie.

POWER PERFORMANCE VIA NACELLE ANEMOMETRY ON COMPLEX TERRAIN

Etienne Bibor

ABSTRACT

Various critical factors of our time explain the great popularity that the wind power industry has experienced in the last decades. In order to improve the performance of this type of energy and to reduce the discrepancies between concerned parties, standards have been developed. Those proposed by the International Electrotechnical Commission (IEC) constitute the international reference. However, several aspects treated in these standards are not perfectly well understood or are based on inappropriate assumptions. For example, the power performances verification of a wind park on complex terrain raises significant difficulties related to the technique of nacelle anemometry. The basis of this technique is to establish a relationship between the nacelle wind speed (V_{nac}) and the free-stream wind speed (V_∞) of the reference wind turbine. The assumption stipulating that this correlation can be applied to all the other machines in the park is only valid for flat terrain. The goal of this study is to evaluate the precision of this technique on complex terrain.

To perform this study, experimental installations have been deployed on a very complex site in Rivière-Au-Renard in Gaspésie. More precisely, three meteorological masts, instrumented at four different heights, were installed around the reference wind turbine of the Wind Park Rivière-Au-Renard (PÉR). In addition, a reference tower was already present on the site. To complement the data from the four meteorological masts, those of the reference wind turbine were also available.

Initially, a summary of the current procedures of power performance verification has been carried out. Thereafter, an experimental analysis has been realized in order to obtain a correlation between V_{nac} and V_∞ , which is the base of nacelle anemometry. The latter was compared with the correlation provided by the manufacturer, measured on flat terrain. Considerable differences up to $1.59m/s$ were measured. This variation illustrates the significant influence of the terrain and the environment on this correlation. During power performance testing, the use of the manufacturer's correlation leads to unrealistic results, with power coefficients (C_P) higher than the theoretical limit. These results confirm the inappropriateness in using a common correlation for all wind turbines of the same type, in complex terrain. This difference involves errors during the estimate of V_∞ , having significant repercussions in the active control of the wind turbine (WT). This sequence of problems explains partly why the performances of the WT are lower than those predicted.

In the second stage, the influence of the ground was investigated by calculating correlations for each valid sector of 10 deg, rather than using only one general correlation. It is

thus possible to quantify the effect of the ground on nacelle anemometry. Between the sectors, significant differences were found. Then, two power curves have been calculated by using the correlations by sectors, or by taking the general correlation, as carried out in industry. Once again, considerable differences were observed, varying between -10% and 10%. However, during the calculation of the annual energy production (AEP), the variations were reduced to 0.65%. This is explained by a compensatory effect due to the fact that certain variations are positive and other negative. Although involving very marked specific errors, the use of a general correlation does not generate major errors over a long period.

Finally, a numerical model was developed using the commercial software FLUENT. This numerical approach allows a better understanding of the effect of the different parameters present in nacelle anemometry. One of the conclusions of this analysis, is that the correlation is largely influenced by the section at the root of the blade, and very little by the airfoils located higher. Another conclusion is that one of the major causes influencing the correlation comes from the acceleration of the flow caused by the attachment unit of the anemometer. If such a system cannot be avoided, then the calibration of the anemometer should be done with the whole system.

REMERCIEMENTS

Ces deux dernières années ont été formidables, tant par le travail accompli, les défis réalisés, que par les amitiés qui se sont créées. Je veux prendre le temps de remercier les personnes qui ont contribuées à rendre cette période si mémorable.

Dans un premier temps, je tiens à remercier M. Christian Masson, professeur à l'École de technologie supérieure, qui a su me donner un bon encadrement, de judicieux conseils, tout en me laissant une liberté très appréciée.

De plus, il va sans dire que ces deux années n'auraient pas été aussi plaisantes sans le support, les encouragements et les rires de mes collègues et amis : Jean-Daniel, Jonathon, Philippe B., Cédric, Idriss, Florence, Marie-Claude, Guillaume, Philippe V., Andréanne, Christophe, Benoit, Annie, Nathalie et tous les autres.

Finalement, je tiens à remercier particulièrement mes parents, mon frère et Marielle pour leurs présences et leurs amours.

Merci.... Gracias... Thanks... Shiché...

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Historique des éoliennes	1
1.2 Fonctionnement des éoliennes modernes	2
1.3 Objectifs du mémoire	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
2.1 Test de performance	7
2.1.1 Calibration de site	8
2.1.2 Courbe de puissance	9
2.2 Pertinence de l'anémométrie à la nacelle	9
2.2.1 Performance des parcs d'éoliennes	11
2.2.2 Contrôle	12
2.2.3 Entretien	12
2.2.4 Calibration de site avec une éolienne	13
2.3 Influence du terrain complexe	13
2.3.1 Influence sur l'écoulement	14
2.3.2 Influence sur l'anémomètre	15
2.3.3 Influence sur les performances des éoliennes	17
2.4 Rotor optimal	17
2.4.1 Théorie du disque actuateur	18
2.4.2 Limite de Betz	20
2.4.3 Correction de Glauert	22
2.4.4 Limite considérant le nombre fini de pales et la traînée	24

CHAPITRE 3 INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES	25
3.1 Description des éoliennes Jeumont J48	25
3.1.1 Propriétés de fonctionnement	25
3.1.2 Performances de l'éolienne	27
3.2 Objectifs des installations expérimentales	30
3.3 Description des installations	31
3.3.1 Description d'une tour	31
3.3.1.1 Position des systèmes de fixation	33
3.3.1.2 Système de fixation pour hauteurs intermédiaires	34
3.3.1.3 Système de fixation pour le sommet de la tour	35
3.3.1.4 Distribution des instruments aux différentes hauteurs	36
3.3.1.5 Direction de positionnement des 3 tours	37
3.3.2 Positionnement des tours	37
3.3.2.1 Description du site	37
3.3.2.2 Position des tours	39
3.3.2.3 Possibilités d'exploitation - Calibration de site	41
3.3.2.4 Autres possibilités d'exploitation	42
CHAPITRE 4 ANALYSE EXPÉRIMENTALE	44
4.1 Traitements des données	44
4.1.1 Secteurs invalides	44
4.1.2 Filtrage des données	45
4.1.3 Correction de la puissance en densité	46
4.2 Calibration de site	47
4.2.1 Description des normes en vigueur	48
4.2.2 Méthodologie	48
4.3 Anémométrie à la nacelle	49
4.3.1 Synchronisation entre les tours et la turbine	49
4.3.2 Données provenant de l'éolienne	50
4.3.3 Méthodologie	55
CHAPITRE 5 MODÈLE MATHÉMATIQUE	57
5.1 Équations fondamentales	57
5.1.1 Équations du mouvement	57
5.1.2 Équations de Navier-Stokes moyennées	59
5.1.3 Modèle de turbulence	61
5.1.3.1 Hypothèse de Boussinesq	61
5.1.3.2 Justification du choix du modèle	62
5.1.3.3 Description du modèle $k - \epsilon$	63
5.1.4 Simulation axisymétrique	64
5.2 Modélisation du rotor	67
5.2.1 Théorie du disque actuateur	67

5.2.2	Théorie de l'élément de pale (BEM)	68
5.3	Modifications aérodynamiques	71
5.3.1	Pertes de bout de pales	71
5.3.2	Modèle de retard du décrochage statique	72
5.3.3	Coefficient de traînée de la partie cylindrique	73
CHAPITRE 6	MÉTHODE NUMÉRIQUE	75
6.1	Description de la méthode	75
6.2	Domaine de calcul et maillage	77
6.3	Modélisation numérique du rotor	78
6.4	Paramètres de FLUENT	80
6.4.1	Domaine de calcul	81
6.4.2	Conditions frontières	81
CHAPITRE 7	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	84
7.1	Corrélation générale	84
7.1.1	Calibration de site	84
7.1.2	Corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ obtenue	86
7.1.3	Comparaison avec Jeumont	87
7.1.3.1	Validation des corrélations avec les courbes C_P	88
7.1.3.2	Influence de l'anémométrie à la nacelle sur le contrôle actif des éoliennes	89
7.2	Influence du terrain complexe	93
7.2.1	Influence sur les tests de performance	96
7.2.2	Influence sur la prévision du productible	99
7.2.2.1	Évaluation du potentiel du site	99
7.2.2.2	Calcul de la production énergétique annuelle	99
7.2.3	Influence sur le contrôle de la machine	101
7.3	Validation à l'aide du modèle numérique	103
7.3.1	Accélération autour de la nacelle	103
7.3.2	Influence du rotor	104
7.3.3	Influence de la partie cylindrique	107
7.3.4	Résumé des corrélations	109
7.3.5	Influence du système de fixation de l'anémomètre	110
CHAPITRE 8	CONCLUSION	113
8.1	Résumé du mémoire	113
8.2	Principales contributions du mémoire	116
8.2.1	Installations expérimentales	116
8.2.2	Résultats	116
8.2.3	Recommandations et suggestions	119

ANNEXES :

1. Paramètres FLUENT	120
2. Sensibilité du modèle numérique	124
BIBLIOGRAPHIE	136

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I Résumé des positions des installations sur le site	38
Tableau II Décalages obtenus entre les horloges de la tour et de l'éolienne . .	50
Tableau III Résumé des différentes équations exprimées sous la forme générale	76
Tableau IV Résumé des corrélations obtenues lors de la calibration de site . .	85
Tableau V Résumé des corrélations obtenues lors de la calibration de site . .	92
Tableau VI V_∞ et écarts obtenus entre l'utilisation de la corrélation générale et de celles par secteurs	95
Tableau VII Valeur des productions énergétiques annuelles calculées avec des corrélations différentes	100
Tableau VIII V_{nac} associée à différentes V_∞	102
Tableau IX V_∞ trouvées en utilisant différentes corrélations	102
Tableau X Valeurs des différentes constantes utilisées dans le modèle $k - \epsilon$. .	131

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Parc éolien de Palm Spring en Californie en 1980	2
Figure 2 Évolution de la grosseur des éoliennes	3
Figure 3 Fonctionnement d'un éolienne moderne typique	3
Figure 4 Parc éolien de Rivière-au-Renard en Gaspésie	6
Figure 5 Étapes principales d'une calibration de site	10
Figure 6 Représentation de la théorie du disque actuateur ($V_0 = V_\infty$)	18
Figure 7 Mesure du C_T et de C_P pour une éolienne idéale	20
Figure 8 Évolution du sillage en fonction de C_T pour une éolienne idéale ($V_0 = V_\infty$)	21
Figure 9 Mesure du C_T en fonction de a ainsi que le type de sillage associé	22
Figure 10 Vitesses en jeu en amont et en aval de la pale	23
Figure 11 Limite de Betz et correction de Glauert en fonction de la vitesse spécifique	23
Figure 12 C_P en fonction de la vitesse spécifique, pour différents rotors à 3 pales .	24
Figure 13 Éolienne Jeumont J-48	26
Figure 14 Courbe de puissance de la Jeumont J-48	27
Figure 15 Vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse infinie	28
Figure 16 Courbe C_P de la Jeumont J-48	29
Figure 17 Courbe C_P en fonction de la vitesse spécifique pour la Jeumont J-48 .	29
Figure 18 Tour météorologique installée sur le site de Rivière-au-Renard	32
Figure 19 Positionnement des systèmes de fixation	33

Figure 20	Description des systèmes de fixation	34
Figure 21	Système de fixation au sommet de la tour	35
Figure 22	Positionnement des instruments à chaque hauteur	36
Figure 23	Positionnement des haubans	37
Figure 24	Description du site de Rivière-au-Renard	38
Figure 25	Position de la tour 1	39
Figure 26	Position de la tour 2	40
Figure 27	Position de la tour 3	40
Figure 28	Influence sur la puissance de la correction en densité	47
Figure 29	Exemple de décalage entre les données de la tour et de l'éolienne	51
Figure 30	Dispersion des données avec et sans décalage	51
Figure 31	Comparaison entre les corrélations expérimentales et Jeumont	52
Figure 32	Courbes C_P utilisant différentes corrélations	53
Figure 33	Trajet du signal de l'anémomètre à la nacelle	54
Figure 34	Courbes C_P utilisant l'hypothèse que $V_\infty = V_{fichier}$	55
Figure 35	Nacelle de la Jeumont J-48	65
Figure 36	Description du disque actuateur avec un angle de conicité γ	68
Figure 37	Description des forces aérodynamiques présentes sur une pale	69
Figure 38	Illustration de la pale et du maillage adjacent	79
Figure 39	Modélisation numérique du rotor	80
Figure 40	Domaine de calcul à l'étude	82
Figure 41	Visualisation du domaine de calcul tri-dimensionnellement	83
Figure 42	Corrélations provenant de la calibration de site	85

Figure 43	Données brutes et corrélation générale trouvée	86
Figure 44	Comparaison entre les différentes corrélations	87
Figure 45	Courbes C_P mesurées à partir de deux corrélations	88
Figure 46	Exemple d'une courbe de performance aérodynamique pour une pale	89
Figure 47	Vitesses spécifiques en fonction de V_∞ trouvées à partir de deux corrélations	91
Figure 48	C_P en fonction de la vitesse spécifique trouvées à partir de deux corrélations	92
Figure 49	Graphiques des données et des corrélations pour les secteurs valides	94
Figure 50	Comparaison entre les corrélations des secteurs valides ayant un nombre de points suffisants et la corrélation générale	95
Figure 51	Comparaison entre les courbes de puissance obtenues avec les corrélations des secteurs extrêmes 22 et 32	97
Figure 52	Écart sur les puissances (%) obtenus avec les corrélations des secteurs extremes 22 et 32	97
Figure 53	Comparaison entre les différentes courbes de puissance obtenues avec la corrélation générale et celle par secteur	98
Figure 54	Écart sur les puissances (%) obtenus avec la corrélation générale et celle par secteur	98
Figure 55	Distribution annuelle du vent sur le site de Rivière-au-Renard	100
Figure 56	Calcul de la production énergétique annuelle (AEP)	100
Figure 57	Distribution des vitesses axiales et corrélation sans rotor	104
Figure 58	Forme générale de la pale de la Jeumont J-48	105
Figure 59	Distribution des vitesses axiales et corrélation avec rotor à Δp variable	106
Figure 60	Distribution des vitesses axiales et corrélation obtenue avec rotor C_d variable ou constant pour la partie cylindrique	108
Figure 61	Comparaison entre les corrélations numériques et expérimentales	109

Figure 62	Photo du système d'attache de l'anémomètre à la nacelle sur la J-48	110
Figure 63	Distribution des vitesses axiales autour de la nacelle, avec barre en U	111
Figure 64	Comparaison entre les corrélations expérimentales et numériques avec barre en U	112
Figure 65	Fenêtre provenant de Fluent : choix du modèle de résolution	121
Figure 66	Fenêtre provenant de Fluent : choix du modèle de turbulence	122
Figure 67	Fenêtre provenant de Fluent : caractéristiques du fluide à l'entrée du do- maine de calcul	122
Figure 68	Fenêtre provenant de Fluent : modélisation du rotor	123
Figure 69	Fenêtre provenant de Fluent : modélisation du fluide	123
Figure 70	Taille du domaine à l'étude	125
Figure 71	Optimisation du domaine de calcul pour l'étude de l'écoulement autour de la nacelle ; amont, aval et haut	126
Figure 72	Optimisation du domaine de calcul pour l'étude de l'écoulement autour du rotor ; amont, aval et haut	127
Figure 73	Distribution des vitesses axiales et corrélation avec rotor à Δp variable et pertes en bout de pales	129
Figure 74	Distribution des vitesses axiales et corrélation avec rotor à Δp variable et décrochage statique	130
Figure 75	Influence des constantes	132
Figure 76	Distribution de k et de $V_{\infty \text{ axial}}$ sur le domaine	133
Figure 77	Influence des termes sources sur les distributions de k et ϵ	135

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

a	Facteur d'induction axiale
a'	Facteur d'induction de vitesse circonférentielle
\mathcal{A}	Surface du volume de contrôle
A_b	Distance en séparant 2 instruments selon IEC
\mathcal{A}_T^R	Intersection entre le disque actuateur et le volume de contrôle
A_{rot}	Surface balayée par le rotor
A_{proj}	Surface projetée du rotor
B	Nombre de pale
B_{10min}	Pression absolue moyennée sur une période de 10 minutes
c	Corde du profil aérodynamique
C_l	Coefficient aérodynamique de portance
C_d	Coefficient aérodynamique de traînée
C_P	Coefficient de puissance
C_T	Coefficient de poussée
d	Diamètre du bras du système de fixation sur un mat météorologique
D	Diamètre du mat météorologique
D_{rot}	Diamètre du rotor de l'éolienne
f_n^R	Composante normale des forces surfaciques du rotor
f_T^R	Composante tangentielle des forces surfaciques du rotor
F	Facteur correctif de Prandtl
F_{tip}	Facteur correctif pour le bout de pale
F_{hub}	Facteur correctif pour la section près du moyeu
\mathcal{F}_{ext}^{VC}	Somme de toutes les forces instantanées agissant sur un volume de contrôle donné

\mathcal{F}_{surf}^{VC}	Force surfacique
\mathcal{F}_{vol}^{VC}	Force volumique
\mathcal{F}_{mec}^{VC}	Force engendrée par la présence du rotor de l'éolienne
F_L	Force aérodynamique de portance
F_D	Force aérodynamique de trainée
F_N	Force normale
F_T	Force tangentielle
h	Hauteur entre le sommet de la tour et l'instrument
H_i	Hauteur verticale de l'instrument
H_{wt}	Hauteur du moyeu de l'éolienne
H_{bras}	Hauteur verticale du bras de mesure
H_{tot}	Hauteur verticale du bras de mesure et de l'instrument
H_b	Hauteur entre les deux instruments au sommet
k	Énergie cinétique turbulente
$K = 0.4$	Constante de von Karman
L_b	Longueur du bras au sommet
L_T	Longueur caractéristique de turbulence
n_i	Vecteur unitaire
P	Puissance
r	Rayon locale sur la pale
R	Rayon de la pale
\mathcal{R}	Constante des gaz parfaits, 287.05 J/(kg K)
R_{hub}	Distance entre l'axe de symétrie et la fin de partie cylindrique de la pale
Re	Nombre de Reynolds
t	Temps
T	Période

T	Force de poussée du rotor
T_{10min}	Température absolue moyennée sur une période de 10 minutes
$U(z)$	Vitesse moyenne à une hauteur z
u_*	Vitesse de friction
u	Composante de vitesse parallèle à la direction à l'étude
u_i	Vitesse instantanée dans la direction i
u_j	Vitesse instantanée dans la direction j
v	Composante de vitesse horizontalement perpendiculaire à la direction à l'étude
w	Composante de vitesse verticalement perpendiculaire à la direction à l'étude
\mathcal{V}	Volume de contrôle
V_∞	Vitesse non-perturbée de l'écoulement
V_{nac}	Vitesse de l'anémomètre à la nacelle
V_{ref}	Vitesse de l'anémomètre à la tour référence
V_{temp}	Vitesse de l'anémomètre à la tour temporaire
$V_{fichier}$	Vitesse enregistrée dans les fichier Excel provenant du Groupe Ohméga
$V_{rel,1}$	Vitesse relative en amont de la pale
$V_{rel,2}$	Vitesse relative en aval de la pale
V_{rot}	Vitesse de rotation locale en m/s
V_n	Vitesse normalisée pour une densité de référence
V_{10min}	Vitesse moyennée sur une période de 10 minutes
V_T	Vitesse caractéristique de turbulence
z	Hauteur à l'étude
z_o	Hauteur de rugosité
ρ	Densité

ρ_0	Densité de référence, $1.225 kg/m^3$
ρ_{10min}	Densité moyennée sur une période de 10 minutes
θ	Angle d'inclinaison de l'écoulement
Ω	Vitesse de rotation en rad/s
λ	Vitesse spécifique
λ_r	Vitesse spécifique locale
ϵ	Taux de dissipation de l'énergie turbulente
τ_{ij}	Tenseur de Reynolds
τ_w	Cisaillement à la paroi
μ	Viscosité dynamique
μ_T	Viscosité turbulente
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
ψ	Propriété du fluide
$\bar{\psi}$	Valeur moyenne
ψ'	Valeur de fluctuation
ψ_i	Valeur instantanée
$\psi^*(x, y, z)$	Perturbations d'une variable dues à la présence du rotor
$\tilde{\psi}_0(z)$	Différence entre les valeurs de ψ à une hauteur z et h (hauteur moyeu)
φ	Angle relatif
α	Angle d'attaque
$\theta_{p,o}$	Angle de calage
θ_T	Angle de vrille local
σ'	Solidité locale de la pale
$C_{\epsilon 1}$	Constantes du modèle $k - \epsilon$
$C_{\epsilon 2}$	Constantes du modèle $k - \epsilon$
$C_{\epsilon 3}$	Constantes du modèle $k - \epsilon$

C_μ	Constantes du modèle $k - \epsilon$
Δp	Chute de pression causée par le rotor
$\frac{\partial}{\partial t}$	Dérivé partielle temporelle

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Historique des éoliennes

Depuis les dernières décennies, les éoliennes font fréquemment partie de l'actualité, autant québécoise qu'internationale. En effet, différents enjeux critiques de notre époque, tels l'accroissement des gaz à effet de serre ainsi que la diminution des réserves de carburants fossiles, expliquent l'engouement pour la technologie éolienne.

Cependant, il est important de se rappeler que bien qu'étant aujourd'hui d'actualité, cette technologie est utilisée depuis très longtemps. C'est vers le XIIe siècle qu'apparaissent, en Europe, les premiers moulins à vent [1]. Leurs utilités étaient à l'époque de moudre le grain ou de pomper de l'eau, remplaçant ainsi les animaux. Les moulins étaient alors composés d'un imposant bâtiment central, d'un rotor multi-pales en bois, ainsi que d'un système de transmission permettant d'accomplir la tâche désirée. Les premiers rotors, positionnés dans une direction fixe, ressemblaient à des échelles, sur lesquelles on venait installer des voiles de différentes envergures, dépendamment de l'intensité du vent. Par la suite, des moulins avec une partie mobile ont été conçus afin de pouvoir faire face au vent en tout temps. C'est en France, vers 1845, que les voiles ont cédé la place à des pales rigides, composées de lattes en bois mobiles.

C'est aux États-unis, au milieu des années 1980 qu'ont vu le jour les premiers parcs d'éoliennes modernes produisant de l'électricité. C'est un programme californien favorisant l'énergie éolienne qui a été l'instigateur de cette popularité soudaine. Comme les moulins à vent, les éoliennes installées à cette époque étaient à axe horizontal, fixées au sommet d'une structure en treillis. Les machines avaient alors une puissance d'environ 55kW. La figure 1 représente un de ces parcs, situé à Palm Spring en Californie, regroupant plus de 1000 machines [2].



Figure 1 Parc éolien de Palm Spring en Californie en 1980

La technologie des éoliennes à axe vertical a également été explorée par certains manufacturiers. Plusieurs avantages y sont associés, notamment que les composantes lourdes se situent au sol, et que le rotor permet de capter le vent provenant de toutes les directions. Cependant, malgré ses avantages potentiels, plusieurs problèmes ont été répertoriés, notamment la grande surface d'occupation au sol ainsi que la surcharge présente sur le roulement. De nos jours, aucune éolienne de grande puissance utilisant cette technologie est disponible sur le marché.

En effet, tous les manufacturiers ont convergé vers une conception similaire, c'est-à-dire des éoliennes à axe horizontal, avec un rotor tri-pales, utilisant une tour tubulaire. Il ne faut pourtant pas croire que cette industrie est stagnante, bien au contraire. Tel qu'illustré à la figure 2, les dimensions des éoliennes ont évolué de manière incroyable au cours des dernières années [2]. De nombreuses innovations concernent le système de contrôle des éoliennes, permettant d'opérer les machines de façon beaucoup plus optimale.

1.2 Fonctionnement des éoliennes modernes

Tel que mentionné à la section précédente, presque toutes les éoliennes modernes sont du type à axe horizontal avec trois pales. La figure 3 illustre les principales composantes

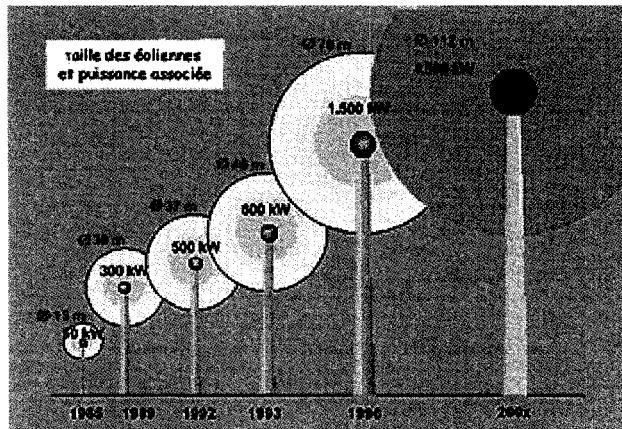


Figure 2 Évolution de la grosseur des éoliennes

d'une telle machine. Il est à noter qu'entre le rotor et la génératrice, une boîte d'engrenage est souvent présente afin de démultiplier la vitesse de rotation de l'arbre.

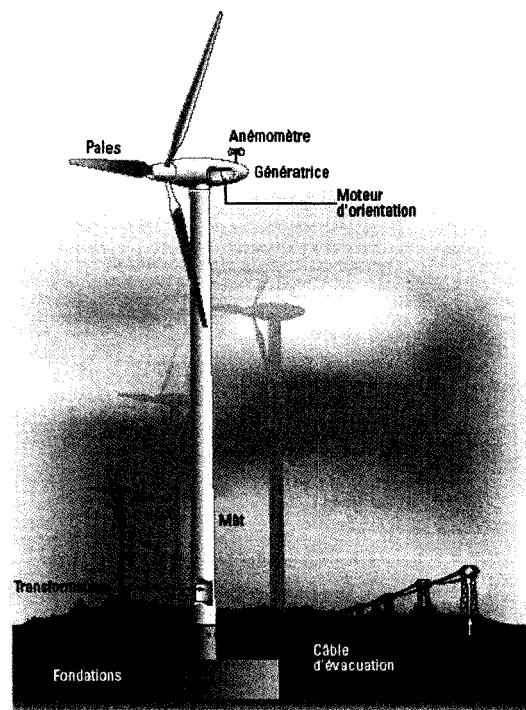


Figure 3 Fonctionnement d'un éolienne moderne typique

Le rotor de la machine, composé des trois pales, tourne autour de l'axe de rotation horizontal situé à la hauteur de la nacelle. Ce rotor extrait une partie de l'énergie cinétique disponible dans le vent. Les pales sont composées de profils aérodynamiques, générant une force de portance qui permet de les faire tourner.

Toutes les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité sur une certaine plage de vitesse, habituellement entre $3m/s$ et $25m/s$. Il est inutile de faire la conception pour des vents supérieurs, car ils sont peu fréquents, et nécessiteraient un surdimensionnement de toutes les composantes. Aux environs de $15m/s$, il est nécessaire de diminuer volontairement l'efficacité de la machine afin d'éviter des bris. C'est ce que l'on appelle le contrôle de l'éolienne. Ce contrôle se base sur les vitesses lues à l'anémomètre sur la nacelle, afin de déterminer la vitesse de l'écoulement non perturbé, pour effectuer les correctifs nécessaires.

Auparavant, le contrôle des éoliennes se faisait par décrochage aérodynamique, de façon passive. Ce type de machine a un angle de calage des pales fixe, et une vitesse de rotation constante du rotor. Au fur et à mesure que le vent augmente, la pale entre graduellement en décrochage, ce qui entraîne une diminution de la puissance.

Les machines plus récentes sont du type à contrôle actif, grâce à des systèmes à pas variables ou à rotation variable. Ces systèmes actifs permettent d'atteindre de meilleures performances. En effet, sur toute la plage de vitesse, l'angle de calage ou la vitesse de rotation peut être ajusté afin d'opérer à un point optimal. Un système d'asservissement, basé sur les lectures de la puissance de sortie et de la vitesse du vent, permettent d'effectuer le contrôle.

1.3 Objectifs du mémoire

Le domaine éolien est en pleine croissance, et la tendance future laisse envisager un avenir prometteur. La rentabilité d'un parc éolien est directement reliée au potentiel de vent disponible du site. C'est donc majoritairement la vitesse des vents qui dicte le choix des emplacements, et non leurs types de terrains ou leurs proximités. Plusieurs parcs ont vu

le jour sur des terrains montagneux, appelés complexes. Sur ces types de terrains, certains problèmes, reliés à la sous production des éoliennes par rapport aux prévisions, surviennent fréquemment [3]. Il est maintenant généralement reconnu que les performances des machines sont plus faibles dans ces milieux. Cependant, un problème important subsiste encore : pour un site en particulier, est-ce que les sous-performances proviennent d'un problème sur les machines, ou bien est-ce uniquement relié à la localisation sur un terrain complexe ?

Les techniques utilisées pour effectuer des tests de performances sur terrains plats sont assez précises et bien documentées. Ces mêmes méthodes sont également utilisées sur les terrains complexes, se basant sur les mêmes hypothèses. La précision des résultats obtenus associée à cette façon de faire est encore mal connue. Ce projet se penchera sur cette problématique, plus spécifiquement sur la validité de la technique d'anémométrie à la nacelle. Afin d'y parvenir, des installations expérimentales situées sur un site complexe seront utilisées. De plus, un modèle numérique sera développé afin d'avoir une meilleure compréhension de l'anémométrie à la nacelle.

Le site expérimental utilisé dans cette étude est celui de Rivière-au-Renard, en Gaspésie. Situé en terrain très complexe (variations topographiques et couvert forestiers importants), ce parc contient trois éoliennes Jeumont J-48 de 750kW (figure 4). À l'été 2004, trois tours météorologiques ont été déployées autour de l'éolienne de référence. Une tour de référence était déjà présente car une calibration de site a été effectuée avant l'installation des éoliennes. Le premier volet de cette maîtrise a donc été de procéder à la conception ainsi qu'au positionnement des tours.

Une fois l'installation complétée, les données sont enregistrées et accumulées. Plusieurs mois de données sont nécessaires afin de pouvoir tirer des conclusions représentatives du terrain. Par la suite, la technique d'anémométrie à la nacelle peut être appliquée sur l'éolienne de référence. À l'aide de la calibration de site effectuée précédemment, une corrélation entre $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ est trouvée. Cette corrélation est validée et comparée à celle fournie par Jeumont.

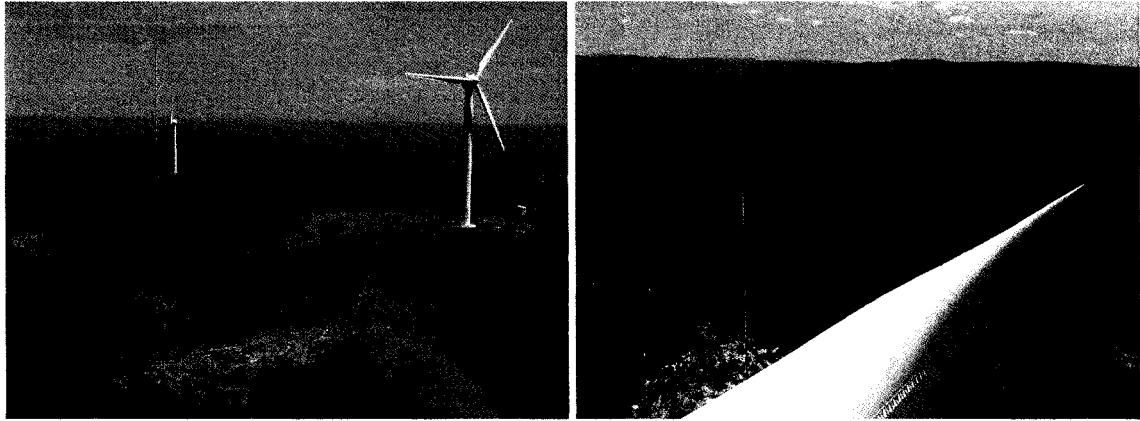


Figure 4 Parc éolien de Rivière-au-Renard en Gaspésie

Il est maintenant possible de démontrer la précision de cette technique en terrain complexe. Habituellement, une seule corrélation générale est trouvée, utilisant les données de tous les secteurs valides. Afin de quantifier l'effet du terrain, une corrélation sera trouvée pour chaque secteur valide de 10° . L'erreur associée à l'utilisation d'une corrélation générale pourra ainsi être déterminée. Une étude des répercussions sur les courbes de puissance ainsi que sur les prévisions de la production annuelle sera menée.

Finalement, un modèle numérique sera développé afin de mieux comprendre l'influence de différents paramètres sur la corrélation à l'étude. Plus précisément, les effets de la géométrie de la nacelle, du rotor et du système de fixation de l'anémomètre seront étudiés. Le modèle numérique sera validé à l'aide des résultats obtenus expérimentalement.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'industrie éolienne a connu une croissance phénoménale depuis les deux dernières décennies. Des manufacturiers de grandes turbines, ainsi que des parcs éoliens importants ont vu le jour dans plusieurs régions du monde. Cette diversité a contribué à l'essor très rapide de la technologie éolienne, améliorant les performances des machines, et du même coup la rentabilité de cette source d'énergie. Une autre conséquence de cette diversité est l'absence de procédures et de normes généralisées concernant la vérification des performances, ce qui peut entraîner certains malentendus et conflits entre les différents partis [3]. Il y a présentement un effort commun afin d'uniformiser les pratiques et les standards de l'industrie. À l'heure actuelle, les normes de la Commission Internationale Electrotechnique (IEC) 61400 – 12 [4] représente la référence. Cependant, plusieurs approches suggérées dans cette norme se sont révélées imprécises et contestées. Une révision de cette norme IEC est présentement en cours [5], tentant d'éclaircir certains aspects encore mal connus dans le domaine. Cet ouvrage traite principalement d'une de ces zones grises, soit l'influence du terrain complexe sur les tests de performances d'une éolienne. Les sections suivantes décriront les procédures de tests actuelles, l'influence du terrain complexe sur l'écoulement ainsi que les performances idéales d'une éolienne.

2.1 Test de performance

Les investissements nécessaires afin de développer des parcs éoliens sont de l'ordre de plusieurs centaines de milliers de dollars. Afin de déterminer si le projet à l'étude est économiquement rentable, une campagne de mesure de vent doit être entreprise. En parallèle, un manufacturier d'éolienne doit être choisi. Ces derniers offrent des machines de grandeur, de coût et de type de contrôle très différents. Une courbe de puissance définit la production d'électricité garantie par le manufacturier en fonction de la vitesse du vent. Avec ces informations, la rentabilité du projet peut être calculée, et des choix peuvent être effectués quant à la viabilité du projet. Comme tous les calculs sont basés sur la courbe de puissance, son importance est capitale. En effet, si les performances des machines ins-

tallées ne concordent pas avec cette courbe, la rentabilité du projet peut être grandement compromise. C'est pourquoi après quelques mois d'opération, un test de performance est effectué. Des enjeux importants de garanties, tant pour les propriétaires des parcs que pour les manufacturiers, sont reliés à ces tests de vérifications [3].

Voici une description de la procédure utilisée dans l'industrie pour mesurer les performances d'une éolienne [4].

2.1.1 Calibration de site

Le but du test de performance est de déterminer expérimentalement la courbe de puissance de la machine à l'étude, afin de la comparer à celle fournie par le manufacturier. La vitesse utilisée dans les courbes de puissance est celle dite non perturbée V_∞ . Celle-ci se définit comme étant la vitesse qu'aurait l'écoulement à l'emplacement de l'éolienne si cette dernière n'était pas présente. Comme la machine influence grandement l'écoulement, la lecture de V_∞ ne peut être obtenue directement par un anémomètre situé sur la machine. C'est à l'aide de la calibration de site qu'elle pourra être estimée.

Dans le cas où le terrain présente de faible variation topographique, inférieure à $3H_{wt}/40\%$ [4], il est considéré comme idéal. H_{wt} consiste en la hauteur du moyeu de l'éolienne. Pour ce type de terrain, les distorsions de l'écoulement produites par la topographie sont considérées comme étant faibles. Il n'est donc pas nécessaire de réaliser une calibration de site. La procédure est alors d'installer une tour météorologique, nommée tour référence, ayant un anémomètre situé à la hauteur H_{wt} . Cette tour doit être située à une distance entre $2D_{rot}$ et $4D_{rot}$ de l'éolienne, où D_{rot} est le diamètre du rotor de l'éolienne. La lecture de vent mesurée à la tour référence (V_{ref}) est alors supposée être la même que V_∞ pour les secteurs valides.

Les secteurs valides sont définis comme étant ceux où l'écoulement n'est pas perturbé par des obstacles situés à proximité. Plusieurs causes sont possibles, telles la présence d'un bâtiment quelconque ou encore d'une éolienne en opération à proximité. Les lectures de l'anémomètre seront alors faussées, et la corrélation avec V_∞ ne sera plus exacte. Ces

secteurs, nommés invalides, doivent donc être exclus de l'analyse. Les détails des calculs nécessaires seront présentés à la section 4.2.

On qualifie un terrain de complexe lorsque ce dernier présente des variations topographiques plus importantes. La distorsion de l'écoulement produite par la topographie n'est plus négligeable, et l'hypothèse que la vitesse lue à la tour référence est la même qu'au moyen n'est plus applicable. Une calibration de site est donc nécessaire. Pour se faire, avant l'installation des éoliennes, une campagne de mesure de vent doit être effectuée. En plus de la tour référence, une tour temporaire doit être installée à l'endroit de la future éolienne de référence. La lecture de la vitesse à la tour temporaire V_{temp} correspond donc à V_∞ , car l'anémomètre est situé à la position éventuelle de l'éolienne, à une hauteur H_{wt} . Le but de cette opération est de bâtir des corrélations entre $V_{ref} \Leftrightarrow V_{temp}$ pour chaque secteur valide. Une fois les corrélations trouvées, la tour temporaire laissera place à la machine de référence, et V_∞ pourra être déterminée indirectement grâce aux lectures de la tour référence. La figure 5 illustre ces étapes.

2.1.2 Courbe de puissance

Une fois que V_∞ est connue en tous temps, il est possible de procéder au test de performance. Dans un premier temps, il est important de procéder à la correction en densité des données. Cette étape est nécessaire car l'énergie disponible dans l'écoulement est directement proportionnelle à la densité. En effet, la courbe de puissance fournie par le manufacturier est normalisée pour une atmosphère standard ISO. Les détails des calculs nécessaires pour cette opération seront présentés à la section 4.1.3.

Lorsque le nombre de données accumulées est suffisant, la courbe de puissance expérimentale de la machine de référence peut être trouvée. En général, les courbes de puissances trouvées ont une grande incertitude, de l'ordre de 5 à 10 %, et ce en terrain plat [3].

2.2 Pertinence de l'anémométrie à la nacelle

La section précédente a permis de comprendre le bien fondé des tests de performances, ainsi que les enjeux importants qui y sont reliés. La procédure pour calculer les perfor-

mances de la machine de référence en terrain complexe a également été explicitée. Mais qu'en est-il pour toutes les autres machines du parc éolien ? Comment vérifier que leurs performances répondent à celles garanties ? La technique d'anémométrie à la nacelle propose une méthode afin d'estimer V_∞ pour toutes les éoliennes d'un parc [6].

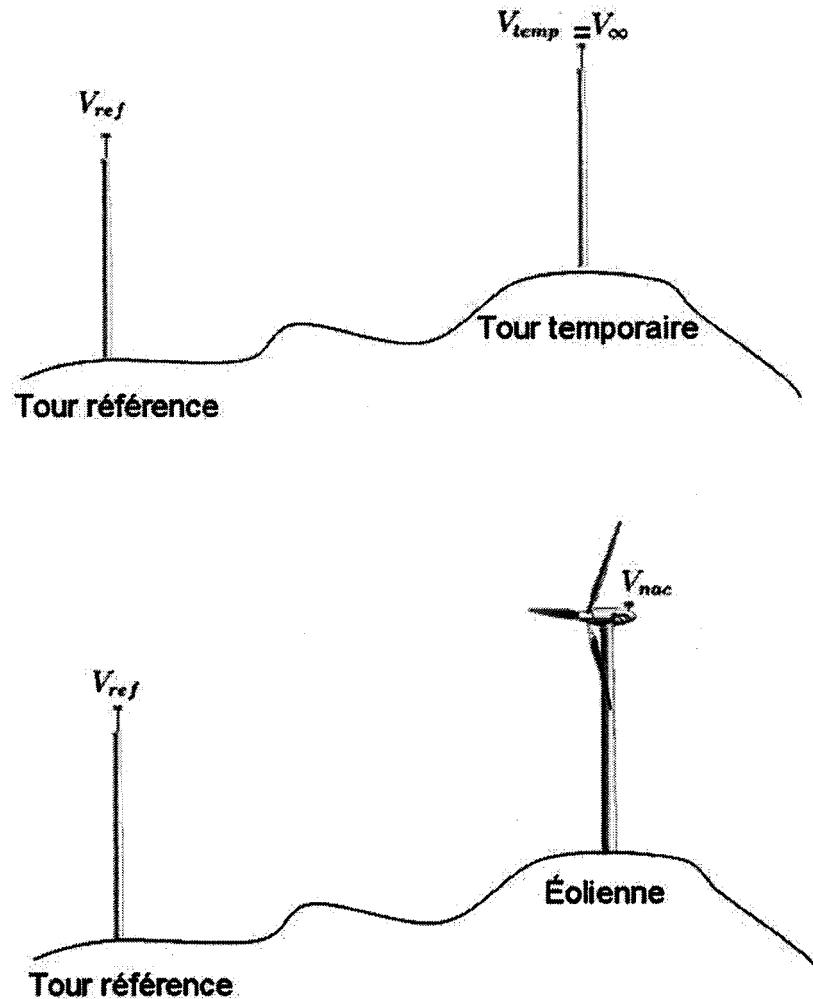


Figure 5 Étapes principales d'une calibration de site

2.2.1 Performance des parcs d'éoliennes

La base de cette technique consiste à établir une corrélation entre la lecture de l'anémomètre à la nacelle V_{nac} et la vitesse non perturbée V_∞ . Cette corrélation est spécifique à chaque type d'éolienne car elle est principalement influencée par la géométrie de la nacelle ainsi que la forme des pales. Dans un premier temps, cette relation est construite à l'aide de la machine référence du parc. Par la suite, on pose l'hypothèse que cette corrélation est applicable sur toutes les machines du parc. Il est alors possible de mesurer la courbe de puissance pour toutes les éoliennes. Cette technique évite donc l'installation d'une tour de référence pour chaque éolienne, ainsi que toute la procédure longue et coûteuse de la calibration de site.

Bien que déjà utilisée dans l'industrie, l'influence de plusieurs paramètres sur cette technique est toujours mal connue. Une étude du Riso [6] s'est penchée sur certains de ces aspects. Par exemple, le type de corrélation à utiliser a été étudié. La technique des tiroirs (bins) [4] a été utilisée afin de déterminer la vraie relation entre les deux anémomètres. Les résultats obtenus démontrent qu'une régression linéaire entraîne des erreurs allant jusqu'à 3% sur la vitesse comparativement à moins de 1% pour une régression polynomiale du 5^e ordre. L'étude conclut donc que la technique des tiroirs doit être utilisée lors des tests de performances utilisant l'anémométrie à la nacelle.

Cette même étude compare également les courbes de puissances obtenues par la méthode traditionnelle (utilisant une tour référence et une calibration de site) et par la technique d'anémométrie à la nacelle. La différence entre les deux courbes est inférieure à 2%, ce qui est très faible. En effet, cet écart est plus faible que l'incertitude de la courbe de référence elle-même. Ces résultats démontrent la validité de cette technique sur terrain plat. La définition d'un terrain plat est formulée dans les normes IEC. Un des critères est que le pourcentage de la pente du terrain doit être inférieur à $3 H/40$ (H est la hauteur de la nacelle de l'éolienne), sur une distance de $2 L$ (L est la distance entre la tour de mesure et l'éolienne). Si le terrain ne respecte pas ces critères, il est alors considéré comme complexe.

2.2.2 Contrôle

Plusieurs autres applications justifient une meilleure connaissance de l'interaction de la nacelle et du rotor sur l'anémomètre de la machine. En effet, le contrôle de la machine se fait à partir de cet anémomètre. L'éolienne est maintenue à l'arrêt pour des vitesses inférieures à celle de démarrage, qui pour la plupart des éoliennes est de $3m/s$. Pour des vitesses plus faibles, l'énergie nécessaire pour démarer serait plus importante que celle produite. De plus, une vitesse d'arrêt est également programmée afin de freiner le rotor pour des vitesses extrêmes, qui sont habituellement celles supérieures à $25m/s$. Des raisons de sécurité sont associées à cette limite supérieure. Il ne serait pas rentable économiquement de surdimensionner toutes les composantes de l'éolienne pour pouvoir résister à ces événements peu fréquents.

Ces vitesses de contrôle sont celles de l'écoulement non perturbé V_∞ et non V_{nac} . Si la relation entre les deux vitesses est inconnue, et que l'on suppose $V_\infty = V_{nac}$, des pertes de production peuvent en découler. En effet, l'écoulement est accéléré autour de la nacelle. Lorsque $V_{nac} = 3m/s$ sera enregistré, l'éolienne va démarrer, même si en réalité V_∞ sera inférieure. L'éolienne consommera alors de l'électricité au lieu d'en produire tant et aussi longtemps que le vent n'augmentera pas. À l'opposé, pour des vents forts, le contrôle de l'éolienne peut freiner le rotor trop rapidement, entraînant encore une fois des pertes de production au régime nominal.

Comme mentionné à la section 1.3, les éoliennes modernes sont à contrôle actif. Cela signifie que l'angle de calage des pales ou la vitesse de rotation varie afin d'opérer le plus possible au point d'efficacité maximale. Tous ces ajustements sont effectués directement à partir de la lecture de V_{nac} . Encore une fois, si une erreur est présente lors de l'estimation de V_∞ , des baisses de production significatives peuvent être engendrées.

2.2.3 Entretien

Les performances d'une éolienne sont très sensibles à plusieurs paramètres. Par exemple, lorsque du givre se forme sur les pales de l'éolienne, la production d'électricité de l'éo-

lienne diminue drastiquement. Le même phénomène se produit lorsque des imperfections ou des saletés sont présentes sur le bord d'attaque des profils aérodynamiques. Dans ces deux cas, le décrochage aérodynamique de la pale surviendra beaucoup plus tôt que prévu, ce qui engendre une perte de portance importante.

L'anémométrie à la nacelle pourrait être utile dans le cadre d'un programme d'entretien préventif. En effet, de rapides tests de performances (sans nécessairement respecter les durées prescrites dans les normes en vigueur) pourraient être effectués à intervalles réguliers. En comparant les courbes de puissances ainsi obtenues, il serait possible de détecter la présence de problèmes, et la nécessité d'un entretien.

Toutes ces raisons justifient la pertinence d'approfondir les connaissances actuelles quant à l'interaction de la nacelle et du rotor sur l'anémomètre à la nacelle.

2.2.4 Calibration de site avec une éolienne

La pertinence d'effectuer une calibration de site en terrain complexe est bien acceptée dans l'industrie. Cependant, les coûts ainsi que les délais reliés à cette pratique causent beaucoup d'ennuis aux propriétaires des parcs. De plus, si l'éolienne est déjà installée, il est impossible de procéder à une calibration de site. Des efforts ont donc été déployés afin de trouver une nouvelle technique moins fastidieuse.

Une méthode proposée consiste à utiliser une éolienne à l'arrêt au lieu d'une tour temporaire. Des coûts et des délais sont ainsi évités. La corrélation trouvée sera entre $V_{ref} \Leftrightarrow V_{nac}$. Afin de retrouver V_∞ à partir de V_{nac} , plusieurs techniques peuvent être utilisées, notamment en soufflerie avec un modèle réduit ou numériquement. Cette technique est encore peu utilisée, mais plusieurs études tentent d'évaluer sa précision [6].

2.3 Influence du terrain complexe

Comme illustré jusqu'à présent, les procédures pour mesurer des courbes de puissances en terrain plat sont bien connues et documentées. Cependant, de plus en plus de parcs éoliens sont installés en terrain complexe, où très peu de détails sur la précision des techniques

de validation des performances sont documentés. Même sur ces terrains, comme l'oblige plusieurs éléments reliés aux garanties [7], les performances des machines du parc doivent être vérifiées. Cette section a pour but de détailler l'influence du terrain complexe sur l'écoulement, l'anémomètre et les performances des éoliennes.

2.3.1 Influence sur l'écoulement

L'écoulement de l'air est grandement influencé par le climat, la rugosité de la surface ainsi que la topographie du terrain. La région d'intérêt est la couche limite atmosphérique, s'étendant jusqu'à 2km de la surface. Dans cette région, l'écoulement est ralenti par la rugosité de surface, créant un profil de vitesse [8]. Une bonne approximation de ce profil peut être obtenue à l'aide de la loi logarithmique de Prandtl [9].

$$U(z) = \left(\frac{u_*}{K} \right) \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (2.1)$$

Où $U(z)$ est la vitesse moyenne à une hauteur z , $K = 0.4$ est la constante de von Karman, z_o est la hauteur de rugosité et u_* est la vitesse de friction :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.2)$$

Où τ_w est le cisaillement à la paroi.

La turbulence, qui peut être d'origine mécanique ou thermique, crée un échange vertical de quantité de mouvement. Lorsque la turbulence est élevée, le mélange entre les différentes couches se fait plus rapidement. Le profil de vitesse a donc un gradient très important près du sol (vitesse et turbulence nulles au sol), suivi rapidement d'un profil plat (loin du sol).

Un terrain très complexe est caractérisé principalement par des changements rapides d'inclinaison et d'élévation. Sur l'écoulement, ceci se traduit par des changements de direction ainsi que des zones d'accélération et de recirculation. La turbulence moyenne du site sera donc plus élevée que celle d'un terrain plat. Une étude expérimentale menée au CRES [10]

a permis d'identifier certaines caractéristiques reliées au terrains complexes : des profils de vitesses plats (turbulent), l'intensité de turbulence diminue en fonction de la hauteur (de 4% entre 33m et 100m), l'inclinaison de l'écoulement ne peut être considérée comme toujours présents (ex. au sommet d'une colline).

2.3.2 Influence sur l'anémomètre

Les anémomètres à coupoles représentent le standard dans l'industrie éolienne pour les mesures de vent. Leurs simplicités, leurs robustesses ainsi que leurs faibles coûts expliquent qu'ils soient si répandus. Cependant, la précision de ces instruments a fait l'objet de nombreuses investigations depuis l'essor du domaine éolien.

Par exemple, dans le projet de SiteParIden [11], plusieurs comparaisons expérimentales ont été effectuées entre différents types d'anémomètres à coupoles. Des différences importantes entre les instruments ont été enregistrées, et ce même s'ils avaient tous été calibrés en soufflerie selon les mêmes conditions [12]. Les écarts mesurés sur les sites extérieurs ont donc été associés au caractère turbulent de l'écoulement atmosphérique. D'autres expériences ont été menées sur différents terrains, tant plats que complexes. Les différences entre les lectures des anémomètres se sont révélées être différents pour chaque site. Cependant, même sur des terrains plats, des différences allant jusqu'à 2% ont été observées [13]. Ces écarts importants sur les lectures de vitesse engendrent des écarts sur la production énergétique annuelle variant entre 3% et 7% [14].

Deux solutions permettraient de régler ces divergences présentes dans l'industrie. La première serait d'utiliser le même type d'anémomètre pour toutes les applications reliées au domaine. La faisabilité de cette solution est très faible, due à tous les enjeux monétaires qui y sont reliés. La seconde consiste à développer un système de classification des anémomètres à coupoles. Deux anémomètres appartenant à une même classe doivent avoir des différences de lectures très faibles. Cette solution est plus faisable, c'est donc cette dernière qui sera mise en place.

D'ailleurs, une méthode de classification est déjà proposée [15]. Tous les anémomètres sont divisés en deux catégories. La *catégorie normale*, moins restrictive, peut être utilisée sur les terrains idéaux. La seconde, nommée *catégorie étendue*, est reliée aux sites complexes. Dans les normes futures, dépendamment du type de terrain, des classes précises d'anémomètres pourront être imposées.

Plusieurs phénomènes peuvent expliquer les différences obtenues lors des mesures sur le terrain [16]. Pour chaque anémomètre, la friction du rotor varie différemment en fonction de la température. Leur comportement diffère également sous des conditions extrêmes de neige, de givre et de glace. De plus, la distorsion de l'écoulement due au montage est non négligeable, et les normes doivent être respectées [4]. L'inclinaison de l'écoulement, phénomène très fréquent en terrain complexe, influence la réponse des anémomètres. Une étude, menée sur huit types d'anémomètres, a été effectuée en soufflerie [17]. Deux grandes catégories d'anémomètres existent : la première mesure les composantes vectorielles du vent et la seconde les composantes horizontales. Pour ces deux types, la réponse théorique idéale à un angle d'inclinaison devrait respectivement être constante et cosinusoïdale. Pour tous les anémomètres testés, les réponses dévient du comportement idéal théorique. Les principales sources d'erreurs proviennent des interférences du corps et du cou des anémomètres ainsi que du blocage entre les coupoles du rotor.

Cependant, l'effet le plus marqué provient du phénomène de survitesse (*overspeeding*). On définit ce phénomène comme la réponse asymétrique du rotor de l'anémomètre à des changements rapides, tant positif que négatif, de la vitesse du vent. Des études ont conclu que des erreurs entre 5% et 10% peuvent être associées à ce phénomène [18]. L'ouvrage de Kristensen [19] propose un modèle théorique permettant de quantifier l'erreur d'un anémomètre en milieu turbulent. Quatre différents effets contribuent au phénomène : l'erreur en u (survitesse classique), l'erreur en v (fluctuation de direction), puis celle en w (fluctuation verticale). Contrairement à la croyance populaire, la principale source d'erreur ne provient pas de la composante u , mais bien de v . L'effet de cette dernière peut être diminué en utilisant une girouette lors du traitement des données [20].

2.3.3 Influence sur les performances des éoliennes

L'influence du terrain complexe sur l'écoulement général et sur la réponse des anémomètres a été étudié, mais comment est-ce que cela affecte les performances des éoliennes ? L'angle d'inclinaison de l'écoulement joue un rôle important sur ces dernières. Afin d'aider à la compréhension du phénomène, le rotor peut être modélisé par un disque de surface A_{rot} . Ce disque correspond à la surface balayée par les pales. Lorsque l'écoulement arrive avec un angle θ par rapport à la normale au disque, la surface projetée A_{proj} est réduite, soit $A_{proj} = A_{rot}\cos(\theta)$. L'hypothèse que la puissance de l'éolienne diminuera avec une tendance cosinusoidale est cependant trop optimiste. La baisse de production observée expérimentalement est plus importante encore [3]. Un autre facteur vient expliquer cette différence. En effet, uniquement la composante horizontale de la vitesse doit être prise en considération, ajoutant un autre facteur $\cos(\theta)$. La diminution de production suivra donc une tendance selon $\cos^2(\theta)$, se rapprochant plus des résultats expérimentaux.

2.4 Rotor optimal

Le rôle du rotor de l'éolienne est de capter une partie de l'énergie cinétique disponible dans le vent et de la transformer en énergie mécanique. Théoriquement, l'efficacité d'un rotor ne peut dépasser une certaine limite, appelée limite de Betz. Une correction additionnelle, celle de Glauert, prend en considération la rotation du sillage et se rapproche plus de la réalité. Ces dernières seront explicitées dans cette section. Ces limites théoriques seront utiles dans notre analyse expérimentale, afin de valider les résultats obtenus. Si l'analyse conduit à des performances sur le terrain meilleures que celles idéales, cela indiquera clairement la présence d'erreurs.

Les modèles utilisés afin de représenter le rotor sont détaillés à la section 5.2. Cependant, certaines notions sont toutefois nécessaires afin de comprendre ces limites théoriques de performances.

2.4.1 Théorie du disque actuateur

Cette théorie modélise le rotor comme étant un disque, absorbant une partie de l'énergie de l'écoulement lors de son passage [21]. Une force de poussée T est donc appliquée par le rotor sur l'air. Une discontinuité en pression Δp à travers le disque doit être présente pour que l'air traverse le rotor (figure 6). Dans cette théorie, on suppose un nombre infini de pales, on néglige également l'effet du sol (écoulement axisymétrique stationnaire) ainsi que la rotation du rotor.

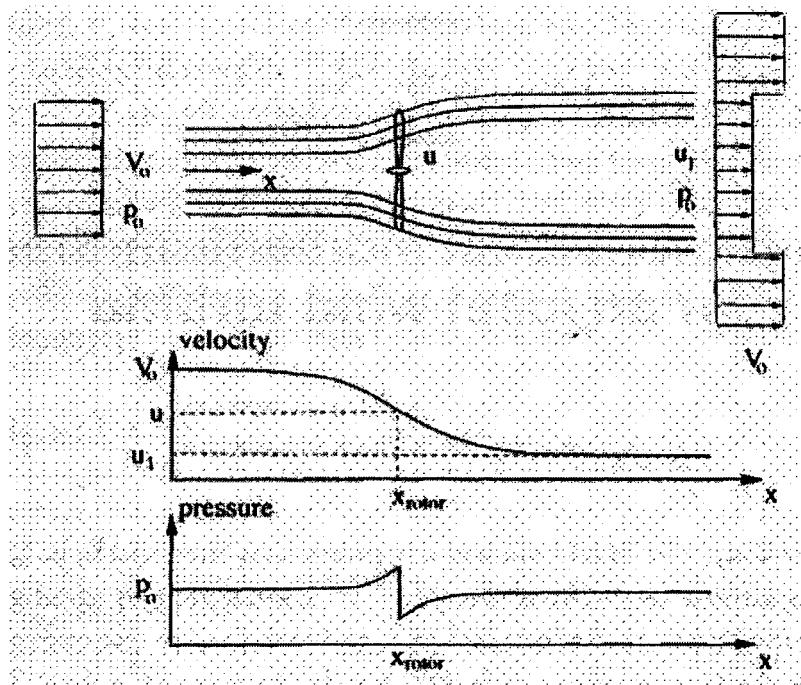


Figure 6 Représentation de la théorie du disque actuateur ($V_0 = V_\infty$)

Une analyse par volume de contrôle peut être effectuée en appliquant les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. L'équation de Bernouilli peut être utilisée en amont et en aval du rotor, car aucune discontinuité de pression est présente dans ces sections et l'écoulement est non-visqueux. La dernière équation, nécessaire pour venir fermer notre système d'équations, est reliée à la force de poussée T du rotor. La poussée est directement reliée à la chute de pression.

$$T = \Delta p A_{rot} \quad (2.3)$$

L'écoulement de l'air, ayant initialement une vitesse V_∞ , ralentit progressivement à l'approche du disque, agissant comme un obstacle. La vitesse sur le disque est nommée $u = V_\infty(1 - a)$, où a , le facteur d'induction axiale, caractérise ce ralentissement. Une analyse par quantité de mouvement permet de définir la chute de pression de la manière suivante $\Delta p = \rho u V_\infty - \rho u u_1$. Dans cette expression, u_1 représente la vitesse moyenne dans le sillage lointain. En substituant ces deux relations dans l'équation(2.3), on obtient l'expression de la poussée.

$$T = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A_{rot} 4a(1 - a) \quad (2.4)$$

Également, comme $P = Tu$, on peut exprimer la puissance (P) comme :

$$P = \frac{1}{2} \rho V_\infty^3 A_{rot} 4a(1 - a)^2 \quad (2.5)$$

L'utilisation du coefficient de performance C_P comme mesure d'efficacité d'une éolienne est souvent utilisée dans l'industrie. Ce dernier se définit comme le ratio entre la puissance produite par la machine (P) et la puissance disponible dans le vent P_{disp} .

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho V_\infty^3 A_{rot} \quad (2.6)$$

L'équation de C_P peut s'exprimer sous les deux formes suivantes :

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^3 A_{rot}} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.7)$$

2.4.2 Limite de Betz

La limite de Betz détermine la valeur maximale théorique de C_P qui peut être atteinte par une éolienne idéale. Ceci consiste à trouver le point d'infexion de l'équation(2.7). On différentie l'équation de C_P par rapport à a .

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) \quad (2.8)$$

L'efficacité maximale théorique d'une éolienne est donc $C_{P,max} = 16/27 \approx 0.59$, qui est atteinte pour un $a = 1/3$. C'est cette limite qui est appellée la limite de Betz. Cette dernière utilise l'hypothèse qu'aucune mouvement de rotation est présent dans le sillage. La figure 7 illustre le comportement de C_P et C_T en fonction de a .

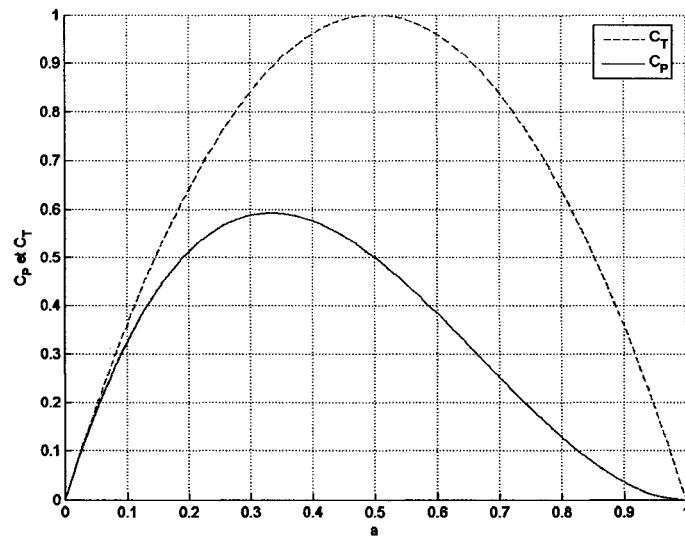


Figure 7 Mesure du C_T et de C_P pour une éolienne idéale

La théorie développée jusqu'ici considérait le rotor comme étant idéal, c'est-à-dire sans traînée et sans génération de vitesses de rotation dans le sillage. Des expériences ont prouvé que ces hypothèses sont valides pour des valeurs de a inférieures à 0.4.

Des valeurs importantes de C_T signifient que beaucoup d'énergie a été captée, ce qui est associé à un ralentissement important de l'écoulement (valeurs de a élevées). Ceci se produit pour des vitesses de vent V_∞ faibles. Dans ces cas, la différence de vitesse entre l'intérieur et l'extérieur du sillage est très grande. Une partie non-négligeable de l'écoulement extérieur est dirigé dans le sillage, cet état est appellé sillage turbulent (figure 8). La théorie d'une éolienne idéale n'est plus valide dans ces cas.

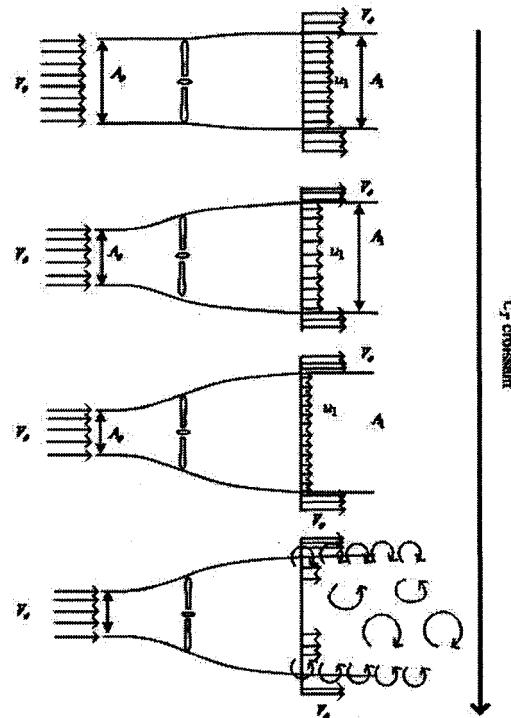


Figure 8 Évolution du sillage en fonction de C_T pour une éolienne idéale ($V_0 = V_\infty$)

Une relation empirique a été proposée par Glauert [22] afin de corriger la valeur de C_T pour des $a > 1/3$ (figure 9).

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a) & a \leq \frac{1}{3} \\ 4a\left(1 - \frac{1}{4}(5 - 3a)a\right) & a > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (2.9)$$

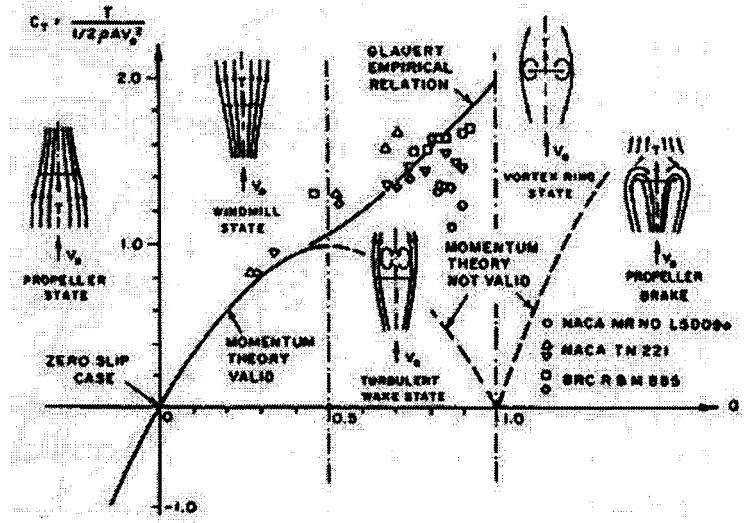


Figure 9 Mesure du C_T en fonction de a ainsi que le type de sillage associé

2.4.3 Correction de Glauert

La correction de Glauert prend en considération la rotation dans le sillage de l'éolienne, ce qui permet d'obtenir une estimation plus réaliste des performances théoriques d'une éolienne. De manière similaire à a , on introduit la notion de facteur d'induction de vitesse circonférentielle (a'). En amont de la pale, la vitesse relative de l'écoulement $V_{rel,1}$ sera composée de la vitesse axiale u et de celle de rotation du rotor $V_{rot} = \Omega r$, où Ω est en rad/s. En aval, une composante additionnelle vient se rajouter, soit la composante de vitesse circonférentielle induite dans le sillage. Cette dernière se définit comme étant $2a'\Omega r$. La vitesse relative en aval $V_{rel,2}$ sera donc différente (voir figure 10).

À partir de ce triangle des vitesses, une nouvelle équation C_P est obtenue (2.10). Celle-ci, appelée limite de Glauert, est comparée à la limite de Betz à la figure 11.

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.10)$$

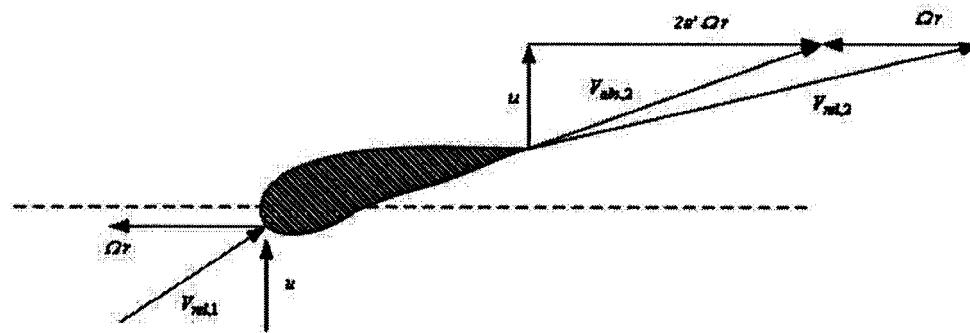


Figure 10 Vitesses en jeu en amont et en aval de la pale

Où la vitesse spécifique λ est définie comme $\Omega R / V_\infty$. Ω représente la vitesse de rotation en rad/s et R est le rayon du rotor. λ_r est la vitesse spécifique locale, calculée avec $\Omega r / V_0$. Ce nombre adimensionnel est fréquemment utilisé dans l'industrie car il intègre à la fois la vitesse de l'écoulement et celle de rotation du rotor.

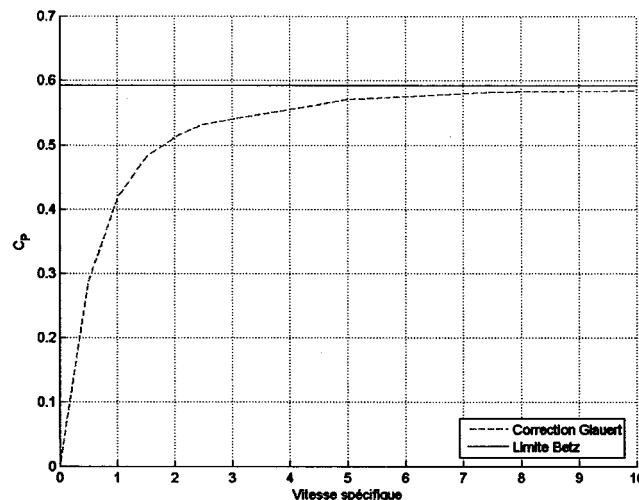


Figure 11 Limite de Betz et correction de Glauert en fonction de la vitesse spécifique

2.4.4 Limite considérant le nombre fini de pales et la traînée

Le dernier modèle présenté se rapproche de la réalité en considérant la rotation dans le sillage. Cependant, il n'est pas encore représentatif d'une éolienne car il considère un nombre infini de pales ainsi qu'une traînée nulle. Wilson et al. [23] ont proposé un modèle qui prédit les performances d'un rotor optimal, ayant un nombre fini de pales et qui inclut la traînée aérodynamique. Leur modèle est valide pour des finesse (ratio de C_l/C_d) entre 25 et l'infini, puis pour des nombres de pales entre 1 et 3.

$$C_{P,max} = \frac{16}{27\lambda} \left[\lambda + \frac{1.32 + \left(\frac{\lambda-8}{20} \right)^2}{B^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - \frac{0.57\lambda^2}{\frac{C_l}{C_d} \left(\lambda + \frac{1}{2B} \right)} \quad (2.11)$$

Selon ce modèle, une éolienne tri-pale ayant un profil aérodynamique dont la finesse est de 100, pourrait obtenir un rendement aérodynamique maximal de $C_P = 0.5$ (figure 12). Ceci n'inclue pas les pertes électriques dues au couplage avec la génératrice, ou les pertes mécaniques à travers la boîte de transmission.

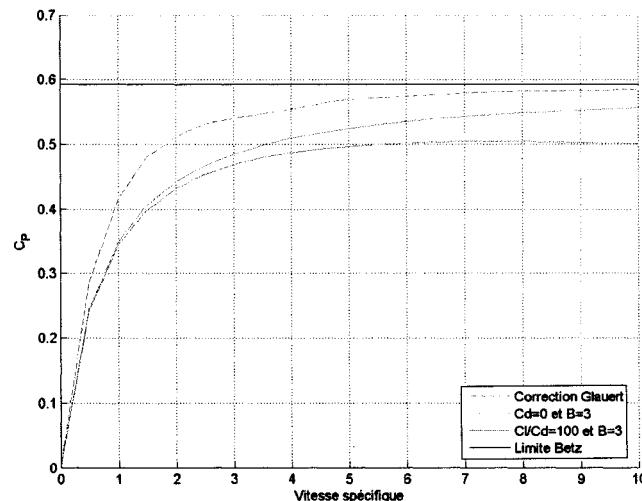


Figure 12 C_P en fonction de la vitesse spécifique, pour différents rotors à 3 pales

CHAPITRE 3

INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES

Le volet expérimental constituait une partie importante de cette maîtrise. Le site expérimental à l'étude est celui de Rivière-Au-Renard, situé en Gaspésie. Trois éoliennes Jeumont J-48 sont présentes dans ce parc.

Dans un premier temps, trois tours météorologiques devaient être installées autour de l'éolienne de référence. Le choix des instruments, la conception des systèmes de fixation ainsi que le positionnement des tours ont dû être effectués.

Par la suite, l'étude expérimentale, portant sur l'influence du terrain complexe sur la technique d'anémométrie à la nacelle, a été entamée. La méthodologie ainsi que les différentes normes à suivre seront décrites dans ce chapitre.

3.1 Description des éoliennes Jeumont J48

Les éoliennes présentes sur le site de Rivière-au-Renard sont des Jeumont J-48. Le manufacturier français a démarré la production de ce type d'éoliennes en 2001. Une cinquantaine de machines ont été fabriquées jusqu'à ce jour.

Ces machines de $750kW$ ont un rotor de $48m$ de diamètre, et la nacelle est située à une hauteur de $46m$. La figure 13 représente une de ces éoliennes.

3.1.1 Propriétés de fonctionnement

Le marché de l'énergie éolienne est en pleine expansion et une forte compétition existe entre les manufacturiers. Les différences entre les produits offerts se situent souvent au niveau du contrôle de l'éolienne. Jeumont propose un système innovateur du côté électrique. En effet, la J-48 est à attaque directe, avec génératrice de type discoïde synchrone à aimants permanents. Ceci signifie qu'aucun arbre de transmission, ou de boîte d'engrenage ne sont présents. La partie rotative de la génératrice est couplée directement au rotor.

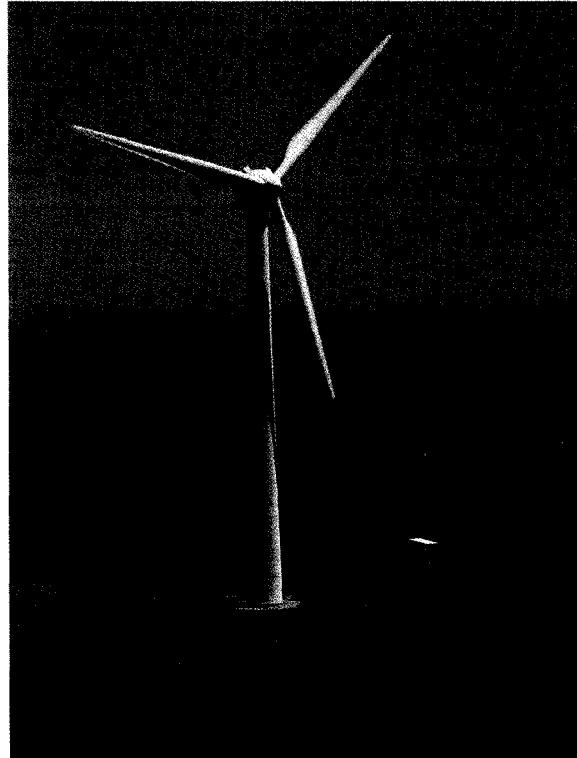


Figure 13 Éolienne Jeumont J-48

Le courant alternatif triphasé ainsi produit varie en fréquence en fonction de la vitesse de rotation du rotor. Ce dernier est alors envoyé dans un redresseur afin d'obtenir du courant continu. Finalement, le passage dans l'ondulateur permet d'obtenir la fréquence désirée, soit 60 Hz.

Cette éolienne est à contrôle actif, à vitesse variable, avec un angle de calage fixe des pales. La vitesse de rotation est ajustée afin d'opérer à un C_P maximal sur une plus grande plage de vitesse possible. Les vitesses de rotation varient entre 8.5 et 24.8 rotations par minutes (rpm).

Des aérofreins sont présents afin de pouvoir rapidement freiner le rotor. Le fonctionnement de ces derniers consiste à basculer de 90° le bout des pales. Ceci entraîne une grande trainée et un ralentissement drastique du rotor.

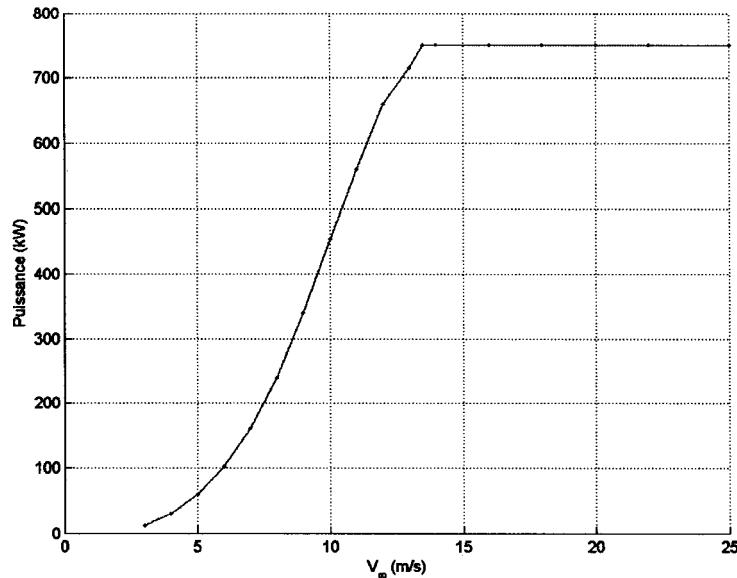


Figure 14 Courbe de puissance de la Jeumont J-48

3.1.2 Performances de l'éolienne

Les courbes suivantes permettent de décrire les performances de l'éolienne. Ces informations ont été obtenues dans une brochure publicitaire de la Jeumont J-48. Ceci ne provient donc pas des courbes de performances garanties que l'on retrouve normalement dans un contrat commercial.

Les figures 14 et 15 illustrent l'information directement fournies, soit la courbe de puissance ainsi que les vitesses de rotation associées à chaque vitesse de vent. L'éolienne a une puissance nominale de 750kW, constante à partir de 13.5m/s. La plage d'opération est entre 3 et 25m/s. La vitesse de rotation du rotor passe de 8.5 à 24.8 rpm entre 3 et 10m/s. Pour les vitesses de vents supérieurs, la vitesse de rotation demeure constante à 24.8 rpm.

Afin d'évaluer l'efficacité des éoliennes, il est plus pratique de tracer les courbes du coefficient de puissance (figure 16). Un C_P maximal de 0.425 est atteint pour des vitesses de vent non-perturbées inférieures à 9m/s. Cette caractéristique constitue l'avantage des

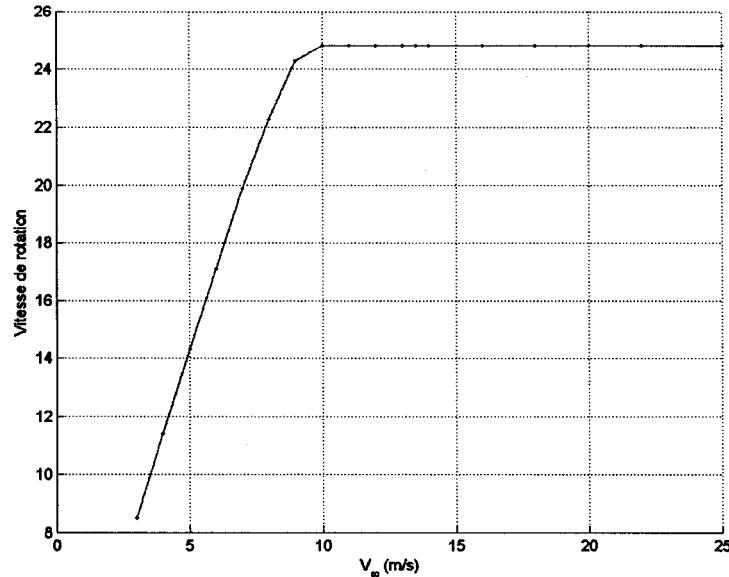


Figure 15 Vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse infinie

machines à contrôle actif, qui permettent d'opérer au C_P optimal sur une grande plage de vent. La figure 17 illustre que cette opération optimale est obtenue pour des vitesses spécifiques d'environ 7.2.

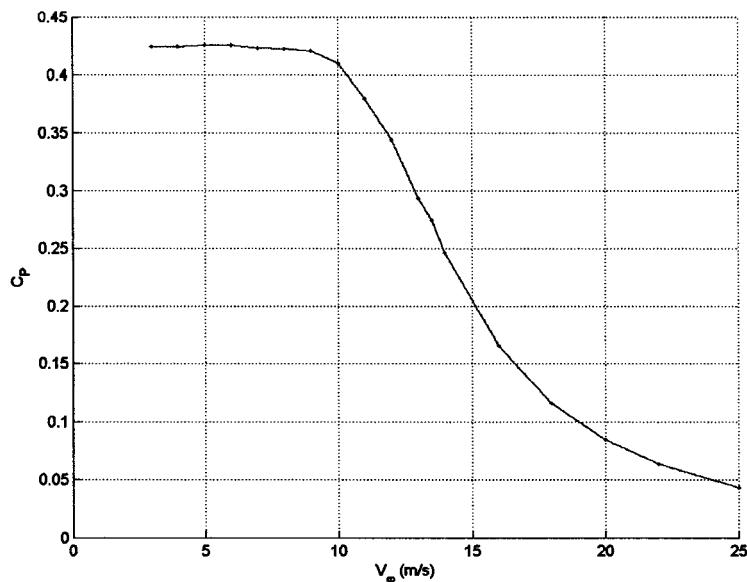


Figure 16 Courbe C_P de la Jeumont J-48

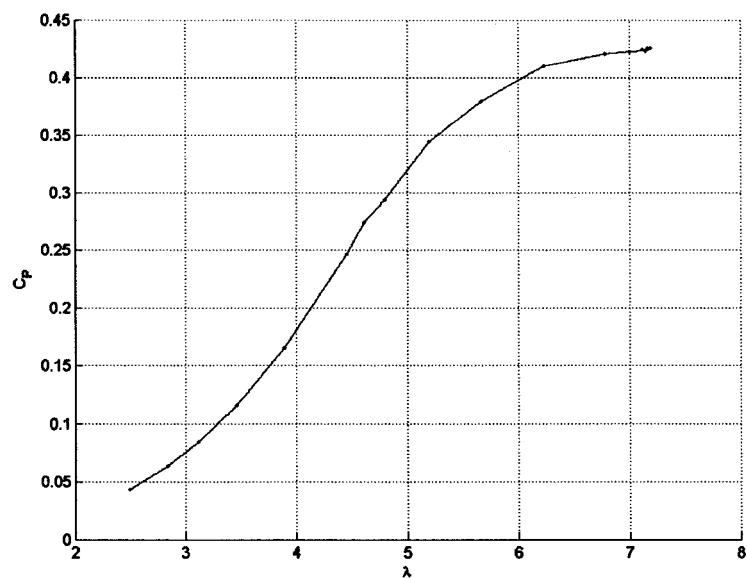


Figure 17 Courbe C_P en fonction de la vitesse spécifique pour la Jeumont J-48

3.2 Objectifs des installations expérimentales

La première étape du projet est de positionner de façon stratégique 3 tours météorologiques sur le site de Rivière-au-Renard. Il faut optimiser leurs positions afin de pouvoir par la suite étudier efficacement certaines problématiques reliées au domaine de l'éolien (pour des études futures). Deux principaux thèmes pourront ainsi être traités, soit la calibration de site et les tests de performances.

Calibration de site

La calibration de site est une étape nécessaire dans presque tous les parcs éoliens. Des coûts et des délais importants y sont toujours attachés. Deux méthodes innovatrices pourront être étudiées sur ce site.

- La première consistera à simuler numériquement les écoulements dans un parc éolien situé sur un terrain complexe. De nombreuses calibrations entre deux tours, selon la norme IEC 61400-12, devront être effectuées afin de pouvoir valider cette modélisation.
- Une autre approche consiste à utiliser l'éolienne au lieu d'une tour temporaire. Dans ce cas, l'anémomètre à la nacelle est utilisé. En modélisant l'écoulement autour de la nacelle numériquement, la corrélation avec la vitesse infinie peut être trouvée. Nous pourrons par la suite comparer ces résultats avec ceux obtenus lors de la vraie calibration, selon les normes IEC 61400-12, et conclure sur la précision de la méthode.

Tests de performance

Les tests de performance constituent une étape importante de tout développement éolien. Pour toutes les éoliennes autres que celle de référence, cette étape implique une utilisation fréquente de l'anémométrie à la nacelle. Cette dernière est influencée par de nombreux facteurs dont plusieurs pourront être étudiés sur ce site :

- application de l'anémométrie à la nacelle pour des éoliennes opérant dans le sillage d'une autre turbine en opération.
- influence d'un site complexe sur l'anémométrie à la nacelle. Notre étude permettra ainsi de déterminer si les relations trouvées peuvent s'appliquer aux autres éoliennes.
- influence de l'utilisation de différents anémomètres (à coupole vs soniques) sur les tests de performance.

3.3 Description des installations

L'installation de tours météorologiques nécessite une quantité importante d'étapes et de procédures à respecter. Voici un résumé des différentes autorisations nécessaires avant même d'entamer les travaux.

- Navigation Canada
- Transport Canada
- Autorisation de la ville
- Négociation avec les propriétaires si les terrains sont privés
- Ministère des Ressources Naturelles de la Faune et des Parcs

En parallèle avec ces procédures, la conception des tours et le choix de leurs positionnements peuvent être mis en branle. Tous les choix de conception sont basés sur les normes IEC 61400-12, le standard dans l'industrie.

3.3.1 Description d'une tour

Les trois tours ont une conception identique, à l'exception de l'une d'entre elles qui possède deux capteurs de température, dans le but de pouvoir étudier la stabilité atmosphérique. Les autres en contiennent uniquement un, situé à la hauteur de la nacelle. Les sections suivantes décrivent en détails les tours. La figure 18 illustre une des trois tours qui a été érigée sur le site.

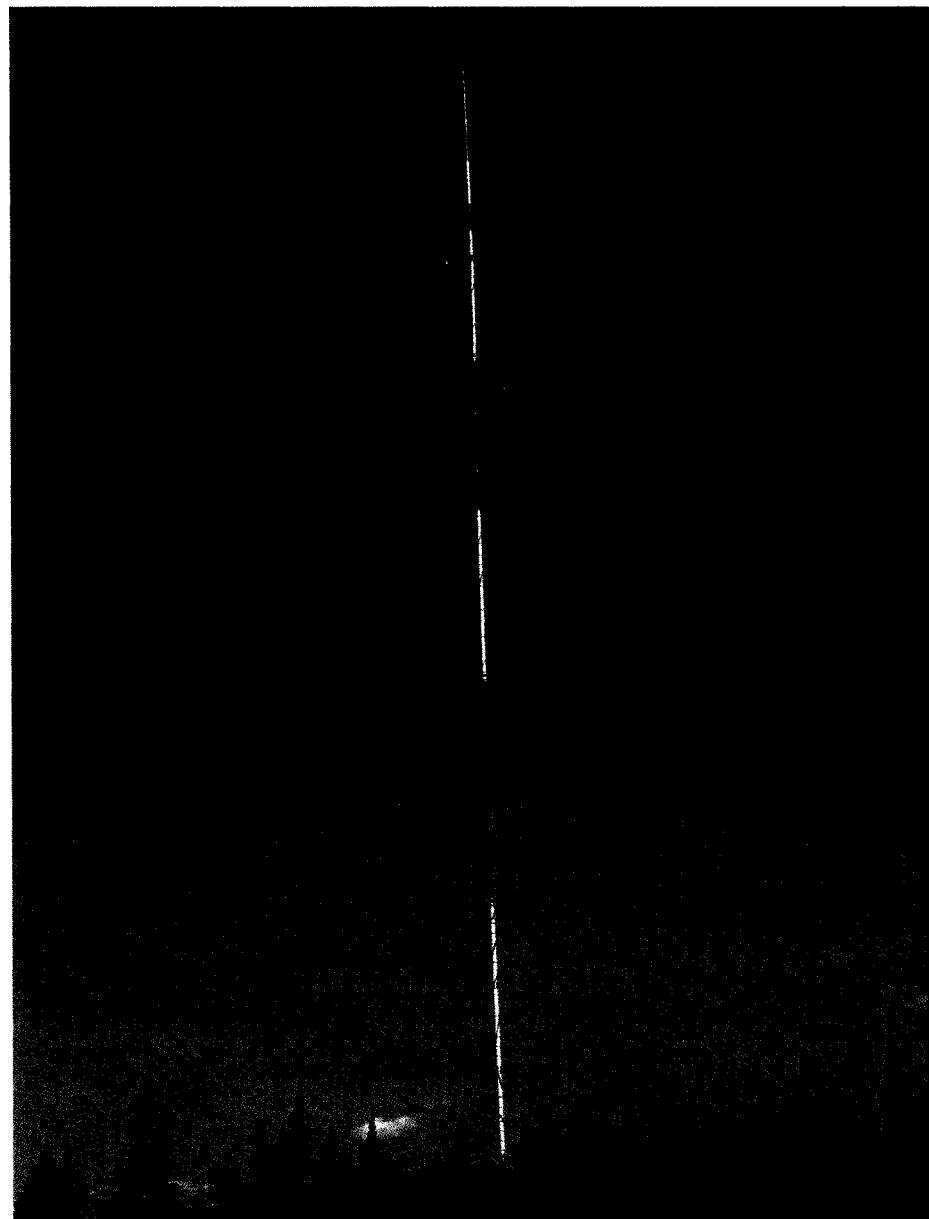


Figure 18 Tour météorologique installée sur le site de Rivière-au-Renard

3.3.1.1 Position des systèmes de fixation

L'écoulement du vent est influencé par la forme du mat. Dans le cas d'un mat tubulaire, les zones les moins perturbées se situent à 45° de la direction d'où provient le vent [24]. Les systèmes de fixations des instruments seront installés selon la configuration illustrée à la figure 19. Sur le site, la direction principale provient du nord-ouest, soit 315° (le nord correspond à 0°).

Direction du vent à étudier

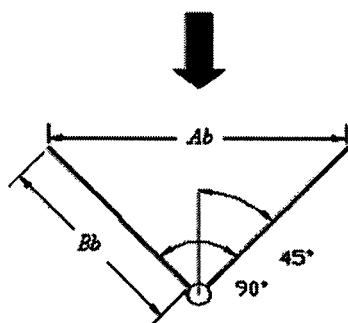


Figure 19 Positionnement des systèmes de fixation

A_b : Les deux instruments de mesures doivent être séparés par au moins 2m (79")

B_b : Doit être supérieur à 7D (D étant le diamètre du mat météorologique)

Avec notre configuration, afin qu'une distance de 2m (79") sépare les deux instruments, les bras doivent avoir une longueur B_b de 1.35m (53"). Dans ce cas, la distance A_b doit être égale à 2.02m (79.2") (en incluant le rayon de la tour dans les calculs).

3.3.1.2 Système de fixation pour hauteurs intermédiaires

La figure 20 illustre la configuration du système de fixation pour les hauteurs intermédiaires.

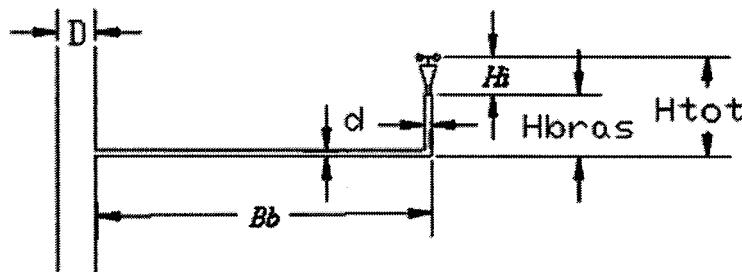


Figure 20 Description des systèmes de fixation

- La longueur B_b doit être supérieure à $7D$
- La hauteur H_{tot} doit être supérieure à $15d$ (d étant le diamètre du bras)
- La hauteur H_i des différents instruments :
 - anémomètre NRG standard 6"
 - anémomètre NRG chauffant 9"
 - girouette NRG 4.3"
 - girouette chauffée NRG 9"

Certains instruments sont plus lourds que d'autres et nécessitent un système de fixation plus robuste. Ces derniers sont les instruments chauffants et les anémomètres soniques. Deux systèmes ont donc été conçus, soit un système robuste et l'autre normal.

Système robuste

Le diamètre d du support est de 1"

- La longueur B_b a été fixée précédemment, soit $B_b=53"$
- H_{tot} doit être supérieure à 15"

- Hbras doit donc être de 11" de manière à ce que tous les instruments répondent aux normes

Système normal

Le diamètre d du support est de 0.75"

- La longueur B_b a été fixée précédemment, soit $B_b=53"$
- Htot doit être supérieure à 11,25"
- Hbras doit donc être de 7,5" de manière à ce que tous les instruments répondent aux normes

3.3.1.3 Système de fixation pour le sommet de la tour

La figure 21 illustre la configuration du système de fixation pour les instruments situés au sommet de la tour.

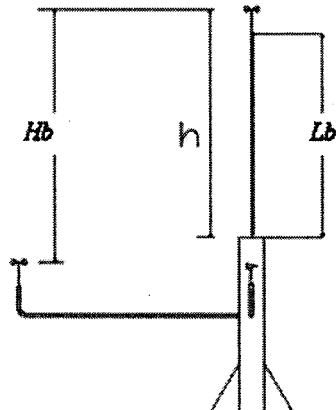


Figure 21 Système de fixation au sommet de la tour

- La hauteur H_b entre les coupoles doit être comprise entre 1.5m (59.06") et 2.5m (98.43").
- La hauteur h doit être supérieure à 0.75m (29.53").

La longueur L_B du bras est fixée à $L_B=1.25\text{m}$ (49.21")

3.3.1.4 Distribution des instruments aux différentes hauteurs

Les tours sont équipées de 5 niveaux d'instrumentation, permettant d'étudier avec précision le profil de l'écoulement (figure 22). Voici la distribution des instruments à chaque hauteur.

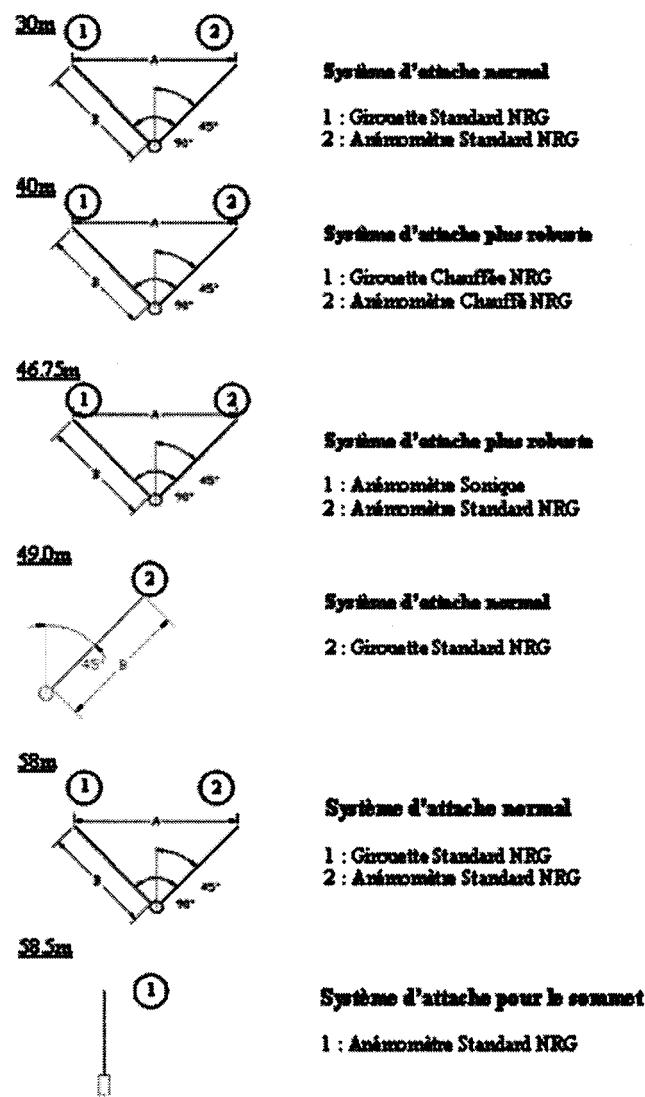


Figure 22 Positionnement des instruments à chaque hauteur

3.3.1.5 Direction de positionnement des 3 tours

Les trois tours doivent être positionnées de manières optimales, de façon à ce que les instruments ne soient pas perturbés dans la direction principale à l'étude. Ceci veut dire que les deux bras d'attaches doivent être installés à 45° de cette direction (figure 19). Pour nos trois tours, la direction principale à l'étude sera de 315° .

Les haubans peuvent perturber de manière significative l'écoulement de l'air, et entraîner des erreurs si les instruments de mesures sont dans leurs sillage. La hauteur des instruments a été déterminée de manière à minimiser l'effet des haubans sur l'écoulement (figure 23).

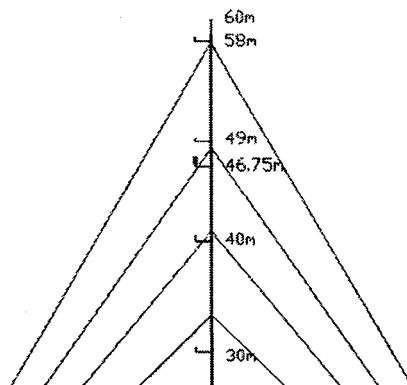


Figure 23 Positionnement des haubans

3.3.2 Positionnement des tours

3.3.2.1 Description du site

Le site de Rivière-au-Renard est un terrain complexe dont la topographie est illustrée à la figure 24. Trois éoliennes sont présentement installées sur ce site, leurs positions ainsi que la rose des vents sont également illustrées. La calibration du site a été effectuée à l'aide d'une tour de référence ainsi qu'une tour temporaire placée à la position de l'éolienne 3. Le tableau I résume les positions exactes des différentes installations initialement présentes.

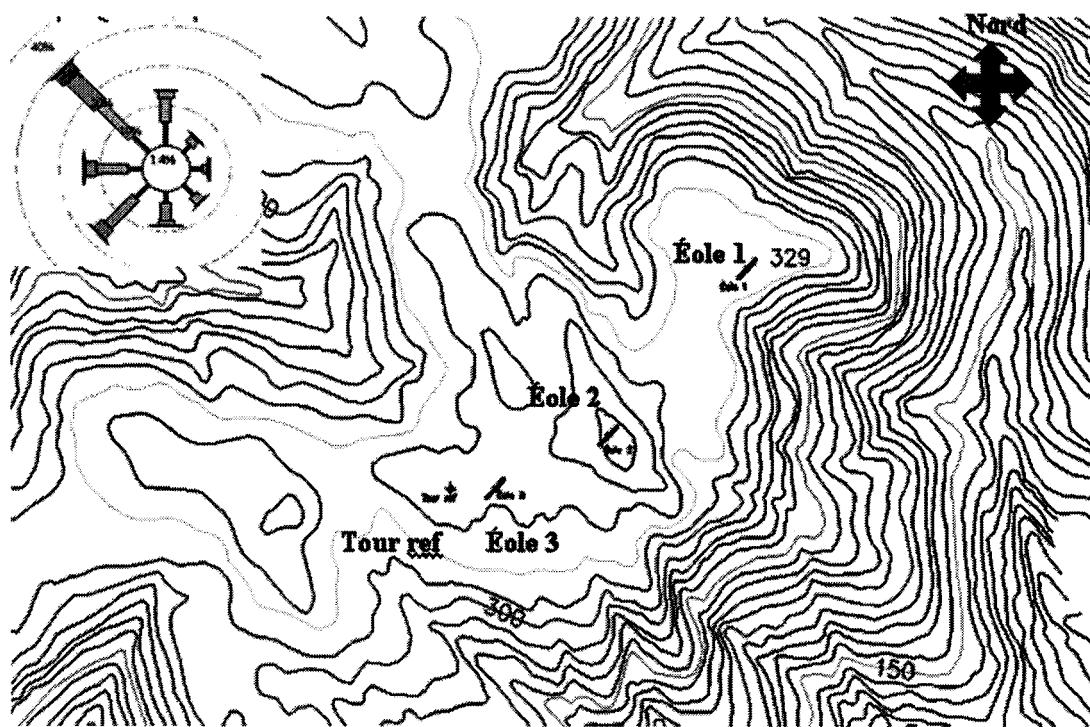


Figure 24 Description du site de Rivière-au-Renard

Tableau I

Résumé des positions des installations sur le site

Éolienne	Easting	Northing	Longitude	Latitude	Altitude
1	308800	5428025	-64 - 26 - 43	48 - 59 - 26	328
2	308500	5427700	-64 - 26 - 58	48 - 59 - 15	351
3	308260	5427597	-64 - 27 - 10	48 - 59 - 12	330
Tour ref	308164	5427597	-64 - 27 - 15	48 - 59 - 12	330

D_{rot} est le diamètre de la turbine, soit 48m.

Éole1 - Éole2 : 441,5m (9.2 D_{rot})

Éole2 - Éole3 : 260,5m (5,4 D_{rot})

Tour référence - Éole3 : 96m (2,0 D_{rot})

3.3.2.2 Position des tours

Tour 1

Située à une distance de 100m ($>2D_{rot}$) de Éole3, faisant un angle de 135° par rapport à celle-ci. Elle se situe donc dans le sillage de Éole3 dans la direction principale du vent (figure 25).

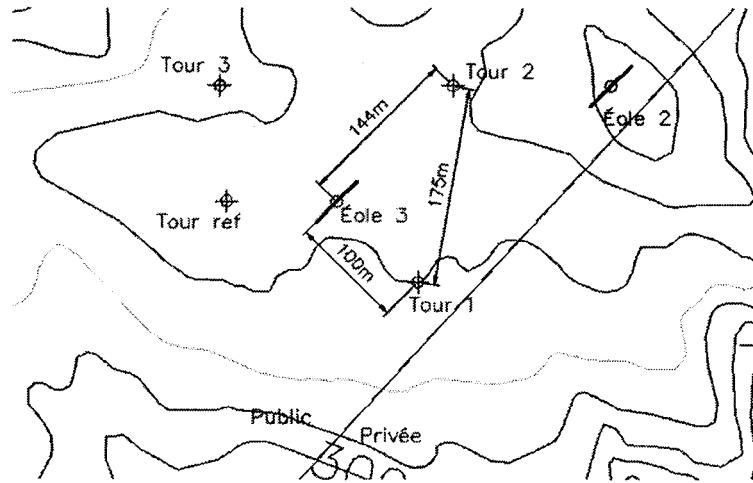


Figure 25 Position de la tour 1

Tour 2

Située à une distance de $3D_{rot}$ (144 m) de Éole3, faisant un angle de 45° par rapport à celle-ci. Elle se situe donc dans le sillage de Éole3 dans la seconde direction principale du vent (figure 26).

Tour 3

Située à environ 144m ($3D_{rot}$) de Éole3, faisant un angle de 315° avec celle-ci. Elle se situe donc à l'avant de Éole3 dans la direction principale du vent (figure 27).

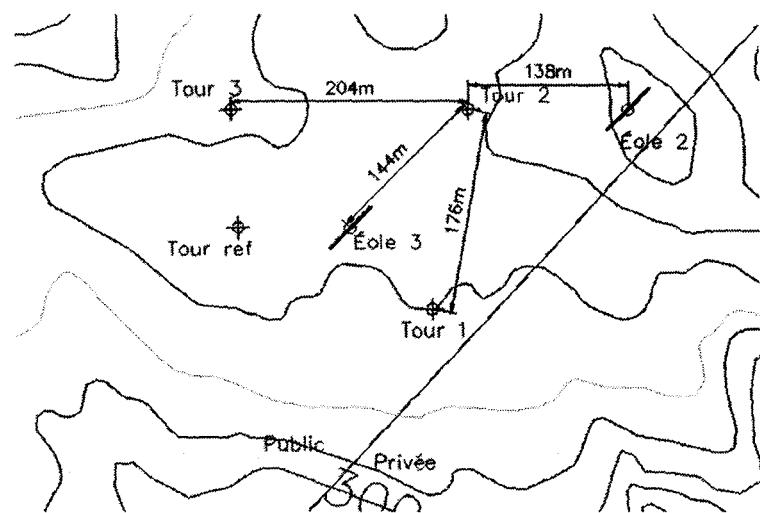


Figure 26 Position de la tour 2

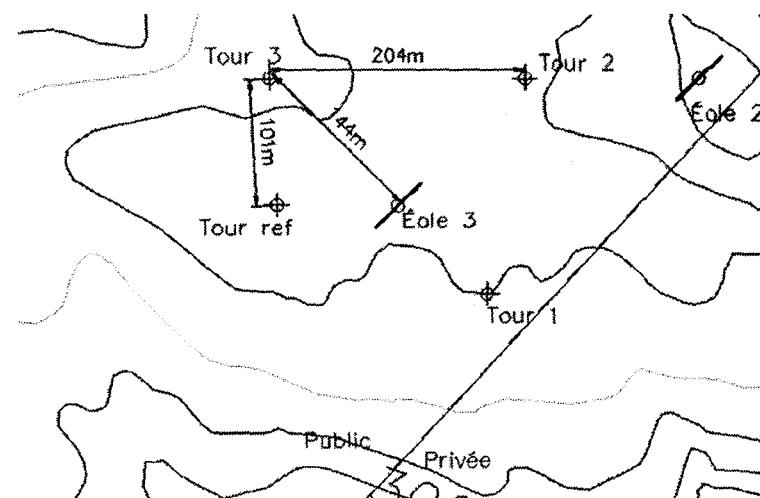


Figure 27 Position de la tour 3

3.3.2.3 Possibilités d'exploitation - Calibration de site

Validation du modèle de calibration numérique

Afin de valider le modèle numérique, plusieurs calibrations de sites seront effectuées, selon les normes IEC 61400-12. Ces calibrations seront effectuées entre deux tours, bien qu'aucune éolienne ne sera jamais installée à ces endroits, elles pourront être comparées aux modèles numériques.

- Une simulation de calibration pourrait être effectuée entre les tours 1 et 2.

$$Dist = 176m \Rightarrow (2D_{rot} < Dist < 4D_{rot})$$

- Une simulation de calibration pourrait être effectuée entre les tours 2 et 3.

$$Dist = 204m \Rightarrow (Dist > 4D_{rot}) \rightarrow \text{donc ne respecte pas la norme IEC}$$

- Une simulation de calibration pourrait être effectuée entre la tour référence et la tour 3

$$Dist = 101m \Rightarrow (2D_{rot} < Dist < 4D_{rot})$$

Calibration en utilisant l'anémomètre à la nacelle

Si les éoliennes pouvaient être utilisées comme tour temporaire avec précision, des délais importants pourraient être sauvés. Les calibrations ainsi effectuées pourront être comparées à celle qui a été réalisée selon la norme IEC 61400-12 afin de déterminer la précision de cette méthode. Pour réaliser cette étude, Éole 3 devra être arrêtée pour une certaine période.

- Une calibration entre Éole3 et la tour 1 pourrait être effectuée.

$$Dist = 100m \Rightarrow (2D_{rot} < Dist < 4D_{rot})$$

- Une calibration entre Éole2 et la tour 2 pourrait être effectuée.

$$Dist = 138m \Rightarrow (2D_{rot} < Dist < 4D_{rot})$$

- Une calibration entre Éole3 et la tour 2 pourrait être effectuée.

$$Dist = 144m \Rightarrow (2D_{rot} < Dist < 4D_{rot})$$

- Une calibration entre Éole3 et la tour 3 pourrait être effectuée.

$$Dist = 144m \Rightarrow (2D_{rot} < Dist < 4D_{rot})$$

3.3.2.4 Autres possibilités d'exploitation

Étude du sillage

- La tour 1 est située dans le sillage de Éole3 lorsque le vent provient de la direction principale Nord Ouest 315° . Une analyse du profil de l'écoulement dans le sillage, à une distance de $3D_{rot}$, pourra ainsi être effectuée.
- Éole2 se situe directement dans le sillage de Éole3 lorsque le vent provient de la direction 245° . Les performances de Éole2 pourraient être évaluées dans deux situations différentes : lorsque Éole3 est en opération et lorsqu'elle est en arrêt. Ceci nous permettrait d'analyser l'influence sur l'anémométrie à la nacelle lorsqu'une turbine opère dans le sillage d'une autre.
- La tour 2 est située dans le sillage de Éole3 lorsque le vent provient de la seconde direction principale Sud Ouest. Une analyse du profil de l'écoulement dans le sillage, à une distance de $2.5D_{rot}$ pourra ainsi être effectuée.

Influence du type d'anémomètre

Une étude pourra être menée afin de déterminer l'influence du type d'anémomètre utilisé sur les tests de performance. Sur les tours, 3 types d'anémomètres sont présents : le NRG 40 calibré, le NRG IcefreeII et le sonique RM Young.

Influence en terrain complexe

L'étude de l'influence du terrain complexe se fera en comparant les corrélations trouvées entre *Eole 3 ↔ tour 1*, *Eole 3 ↔ tour 2*, *Eole 3 ↔ tour 3* et *Eole 3 ↔ tour reference*. Sur un terrain plat, ces corrélations seraient identiques. Cette étude sera très révélatrice de l'influence d'un terrain complexe.

Influence de l'inclinaison de l'écoulement

Dans la direction principale du vent, 315° , la tour 3 est située à l'avant de Éole3. Les caractéristiques du vent, dont l'inclinaison verticale, seront connues et pourront être utilisées afin d'analyser les performances de Éole3.

CHAPITRE 4

ANALYSE EXPÉRIMENTALE

La section précédente a permis de se familiariser avec le site à l'étude, ainsi qu'avec les installations présentes. Au cours de cette maîtrise, seulement quelques-uns des sujets de recherches possibles énumérés plus tôt seront abordés. Plus précisément, l'influence du terrain complexe sera étudié.

Tel que décrit précédemment, une tour météorologique doit être installée dans le voisinage de l'éolienne de référence. Le but de cette tour est de déterminer la vitesse de l'écoulement de l'air V_∞ actionnant le rotor. La tour doit être située assez près de l'éolienne pour avoir une bonne corrélation, mais assez loin pour que l'écoulement ne soit pas perturbé par la machine. Les normes IEC 61400-12, représentant le standard international dans l'industrie éolienne, seront utilisées dans cet ouvrage. La tour doit être positionnée à une distance entre $2D_{rot}$ et $4D_{rot}$ de l'éolienne, idéalement $2.5D_{rot}$, où D_{rot} est le diamètre du rotor.

Le but de cet exercice est de valider les performances de l'éolienne, il est donc crucial de s'assurer de la qualité des données. En effet, lorsque le vent provient de certaines directions, l'écoulement peut être perturbé par des obstacles, ou par l'éolienne elle-même. Ces secteurs seront considérés comme étant invalides et devront être retirés lors du filtrage des données.

4.1 Traitements des données

4.1.1 Secteurs invalides

Lors des tests de performance, la tour de référence ainsi que l'éolienne ne doivent pas être influencées par les autres machines du parc. En effet, le sillage en aval d'une éolienne est non-négligeable et influencerait sans contredit les résultats du test. Ces directions doivent donc être proscribes. Afin de calculer la dimension des secteurs à exclure, il faut connaître le diamètre de l'éolienne D_n ainsi que la distance L_n les séparant.

D'autres obstacles peuvent être présents, tel que des bâtiments et des arbres. De la même manière, certaines lectures seront perturbées et ne devront pas être utilisées dans le test. Un diamètre équivalent D_e de l'obstacle doit être déterminé afin de calculer les secteurs à proscrire.

$$D_e = \frac{2I_h I_w}{I_h + I_w} \quad (4.1)$$

où I_h est la hauteur de l'obstacle et I_w est la largeur. L'équation 4.2 détermine les secteurs invalides α , en degrés, en utilisant L (L_n ou L_e) et D (D_n ou D_e).

$$\alpha = 1.3 \arctan \left(\frac{2.5D}{L} + 0.15 \right) + 10 \quad (4.2)$$

4.1.2 Filtrage des données

Le test doit refléter les performances de l'éolienne sous conditions normales. Un traitement serré des données est donc nécessaire. Les données suivantes seront rejetées :

- l'éolienne est à l'arrêt dû à un problème de fonctionnement
- l'éolienne est arrêtée manuellement, en test ou en entretien
- problème de l'équipement de test (ex. givre)
- vent provenant des secteurs invalides (calculé à la section précédente)
- vent provenant des secteurs invalides lors de la calibration de site

Les données restantes doivent être classées en utilisant la méthode des tiroirs (bins). Les vitesses sont classées en tiroirs de $0.5m/s$. La collecte de données est considérée complète lorsque :

- chaque tiroir contient un minimum de 30 minutes de données
- la base de données contient un minimum de 180 heures de données

4.1.3 Correction de la puissance en densité

La puissance de sortie de l'éolienne est grandement dépendante de la densité de l'air. Au Québec, cette variation, qui est fonction de la température et de la pression, n'est pas négligeable. Ainsi, lorsque les manufacturiers garantissent une puissance donnée pour un vent donné, il est crucial de connaître la densité associée à ces performances. La norme IEC 61400-12 propose donc une normalisation des données, pour une densité de référence (ρ_0), soit celle d'une atmosphère standard ISO de 1.225 kg/m^3 .

La première étape est donc de calculer la densité pour chacune de nos périodes de 10 minutes.

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{\mathcal{R} T_{10min}} \quad (4.3)$$

où \mathcal{R} est la constante des gaz parfaits, 287.05 J/(kg K) , T_{10min} et B_{10min} sont respectivement la température absolue et la pression de l'air, moyennée sur une période de 10 minutes.

La tour référence, utilisée pour obtenir les corrélations, n'est pas équipée d'un capteur de pression. Il n'est donc pas possible d'associer chaque période de 10 minutes à une densité. Toutefois, les trois tours installées par l'ETS sont équipées de tels instruments. Donc, il sera possible de mesurer la densité moyenne, par mois, présente sur le site. Une correction sur nos données sera alors effectuée, en utilisant cette densité moyenne mensuelle. L'utilisation de cette densité n'est évidemment pas aussi précise que si la densité pour chaque période de 10 minutes avait été utilisée. Cependant, elle permet de prendre en considération l'effet de variation globale lors des saisons, ce qui est déjà une amélioration. Comme la turbine à l'étude est à contrôle actif, la formule corrective est la suivante [4].

$$V_n = V_{10min} \left(\frac{\rho_{mensuel}}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.4)$$

où V_n est la vitesse normalisée.

La figure 28 illustre l'influence sur la puissance de sortie de l'éolienne de la correction en densité.

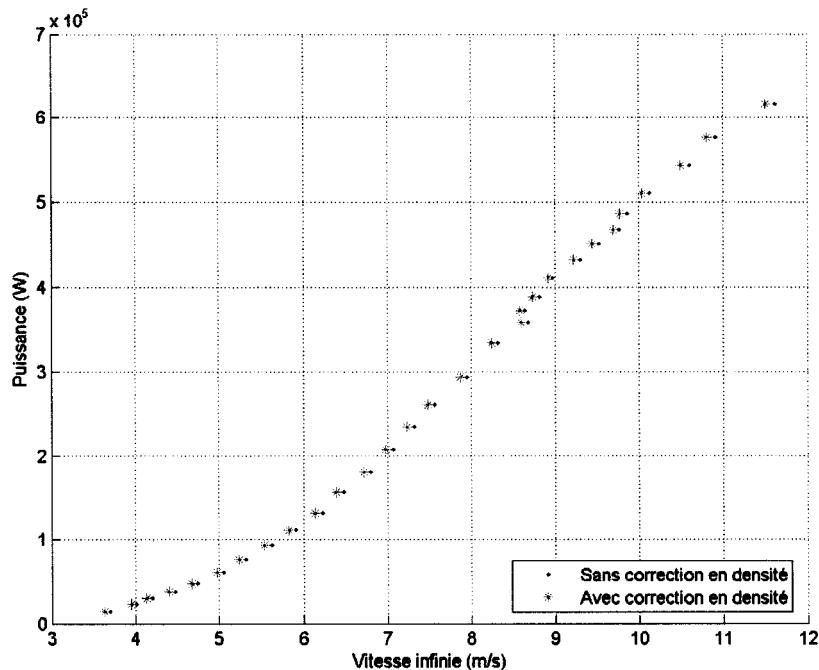


Figure 28 Influence sur la puissance de la correction en densité

4.2 Calibration de site

Un paramètre crucial lors de l'évaluation des performances d'une éolienne, est la vitesse de l'écoulement non perturbée à l'éolienne V_∞ . Cette dernière représente la vitesse qui serait mesurée à la position de l'éolienne si cette dernière était absente. Sur un terrain plat, pour les secteurs valides, V_∞ est supposée égale à V_{ref} . Cependant, sur un terrain complexe, cette hypothèse n'est plus valide, et une calibration de site est nécessaire. Le but de cette opération est de trouver les corrélations entre $V_{ref} \Leftrightarrow V_\infty$.

4.2.1 Description des normes en vigueur

La tour temporaire doit être installée à une distance inférieure à $0.2 H_{wt}$ de la location de la future éolienne, où H_{wt} est la hauteur du moyeu. De plus, l'anémomètre de référence présent sur chacune des tours doit être situé à $\pm 2.5\%$ de H_{wt} . Tous les anémomètres doivent être du même type, et avoir été calibrés durant la même campagne.

Les données doivent également être classées en utilisant la méthode des tiroirs, mais cette fois par secteurs en direction de 10° . Uniquement les données en fonctionnement normal doivent être conservées. En plus des critères restrictifs énoncés précédemment, quelques-uns additionnels s'ajoutent :

- les vitesses moyennes entre $4 < V < 16 m/s$ sont conservées
- chaque tiroir valide doit contenir au moins 24 heures de données
- chacun de ces tiroirs doit contenir au moins 6 heures de données ayant des vitesses moyennes supérieures à $8 m/s$ et 6 heures de vitesses inférieures à $8 m/s$

4.2.2 Méthodologie

L'analyse expérimentale permettant d'effectuer la calibration de site peut être résumée par les étapes suivantes :

- importer en fichiers mensuels Matlab les fichiers journaliers Excel provenant de Groupe Ohmega, pour les tours temporaire et permanente (référence).
- calculer les moyennes aux 10 minutes à partir des moyennes à la minute.
- les matrices de données pour les deux tours sont associées, en s'assurant que les dates-heures-minutes de chacune coincident.
- aucun décalage n'est présent entre les deux tours car elles utilisent la même horloge.
- filtrer les N/A et les valeurs inappropriées. Filtrer également les valeurs démesurées. Uniquement les valeurs de vitesses entre $4 m/s < V < 16 m/s$ sont conservées.
- classer les données en tiroirs de direction, basés sur la girouette de la tour temporaire à une hauteur H (46m).

- déterminer les secteurs valides, selon la norme IEC 61400-12, selon les obstacles et des quantités de données disponibles. Seules les données provenant de ces secteurs seront utilisées.
- trouver les corrélations linéaires pour chaque secteur valide entre $V_{ref} \leftrightarrow V_{temp}$, qui est équivalent à $V_{ref} \leftrightarrow V_\infty$.

4.3 Anémométrie à la nacelle

La technique d'anémométrie à la nacelle consiste à établir une corrélation entre la vitesse lue par l'anémomètre à la nacelle et la vitesse de l'écoulement non perturbé ($V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$). C'est cette relation qui est fournie par le manufacturier.

4.3.1 Synchronisation entre les tours et la turbine

Toutes les tours présentes sur le site de Rivière-au-Renard utilisent la même horloge, réinitialisée à minuit à tous les jours. Les tours entre elles peuvent donc facilement être synchronisées. Cependant, les éoliennes utilisent une horloge différente, dont les détails ne sont pas disponibles. Cette information est pourtant cruciale pour déterminer la corrélation désirée. En effet, si un écart entre les deux horloges est présent, la synchronisation des données sera erronée, ainsi que les corrélations trouvées.

Afin de remédier à ce problème, un sous-programme est utilisé. Une fonction mathématique XCORR, disponible dans Matlab, permet de déterminer le décalage entre deux signaux. Pour ce faire, on garde un signal fixe, et on décale l'autre successivement de différentes positions. Pour chacune, on multiplie les deux signaux. Le décalage réel correspond à la position où la multiplication des deux signaux est maximale.

Les données provenant de l'éolienne sont moyennées aux 10 minutes, comparativement à chaque minute pour la tour de référence. Ces dernières doivent donc également être moyennées aux 10 minutes, afin que la synchronisation entre les deux fichiers soit possible. Encore une fois, le problème d'horloges différentes vient compliquer le travail. Il est possible que les minutes 0 à 9 de la tour référence ne correspondent pas avec le premier 10 minutes de l'éolienne. En effet, si un décalage de 3 minutes est présent entre les

deux horloges, et bien c'est les minutes 3 à 12 qui devraient y correspondre. Donc, le fichier de la tour référence est moyenné sur 10 minutes, de 10 manières différentes, soit pour un décalage nul, allant jusqu'à un décalage de 9 minutes.

De cette manière, notre programme permet de déterminer le décalage présent entre les deux signaux. Ce dernier est trouvé pour chaque mois (Tableau II).

Tableau II

Décalages obtenus entre les horloges de la tour et de l'éolienne

Mois	décalage (min)
<i>mars</i>	21
<i>avril</i>	25
<i>mai</i>	23
<i>juin</i>	21
<i>juillet</i>	20
<i>aout</i>	21
<i>septembre</i>	23
<i>octobre</i>	21
<i>novembre</i>	20

La figure 29 illustre bien le décalage présent entre les horloges des tours et de l'éolienne. Une fois le décalage appliqué, les points d'inflexions des deux signaux coïncident. C'est ce qui est attendu, car sur une période de 10 minutes, la distance séparant les deux instruments est négligeable. Les variations de vitesses doivent donc survenir en même temps. De plus, on observe que la dispersion des données est plus faible lorsque l'on applique le décalage, ce qui vient encore une fois confirmer la validité de nos résultats (figure 30).

4.3.2 Données provenant de l'éolienne

Un problème est survenu au cours de l'analyse expérimentale des données. En effet, la corrélation obtenue sur le site de Rivière-au-Renard, après le traitement des données, est très différente de celle fournie par le manufacturier (figure 31).

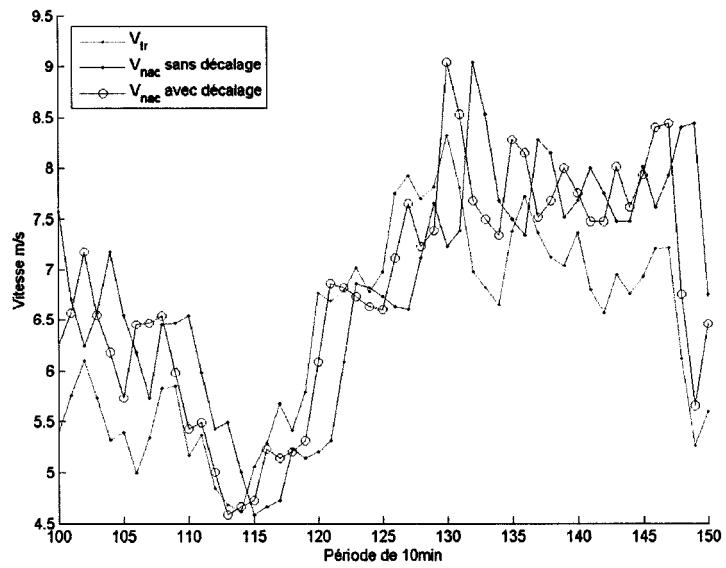


Figure 29 Exemple de décalage entre les données de la tour et de l'éolienne

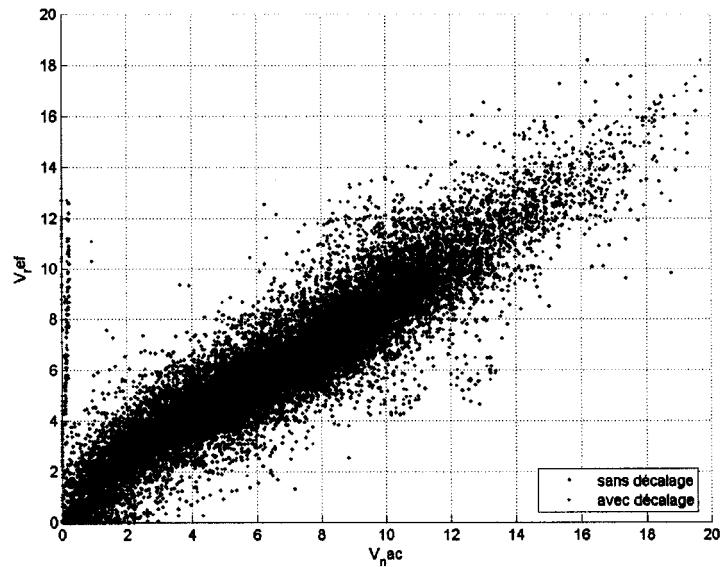


Figure 30 Dispersion des données avec et sans décalage

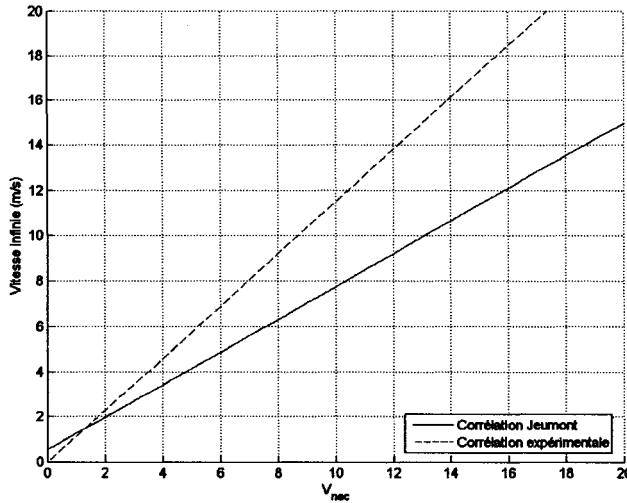


Figure 31 Comparaison entre les corrélations expérimentales et Jeumont

Afin de valider laquelle des corrélations est la plus réaliste, les courbes de puissances et de C_P peuvent être utilisées. Les résultats obtenus avec chacune des deux corrélations seront comparés avec les courbes garanties.

Plusieurs données provenant de l'éolienne sont disponibles, notamment celles de vitesses à la nacelle et de puissance de sortie. À partir de V_{nac} et en appliquant les deux corrélations (celle trouvée expérimentalement et celle fournie par Jeumont), il sera possible d'obtenir V_∞ . Ainsi, deux courbes C_P sont tracées (figure 32).

Comme mentionné dans la revue de la littérature, la limite idéale théorique, pour un rotor à 3 pales, prédit un C_P maximal de 0.5. Avec des $C_P > 1$, la figure 32 démontre clairement qu'une erreur est présente.

On pourrait croire dans un premier temps que c'est la corrélation de Jeumont qui est erronée. Cependant, une information additionnelle permet de comprendre la source de l'erreur. En effet, à l'intérieur du système d'acquisition (Data Logger), une fonction de transfert est appliquée au signal provenant de l'anémomètre à la nacelle, soit un décalage de 0.7 et une

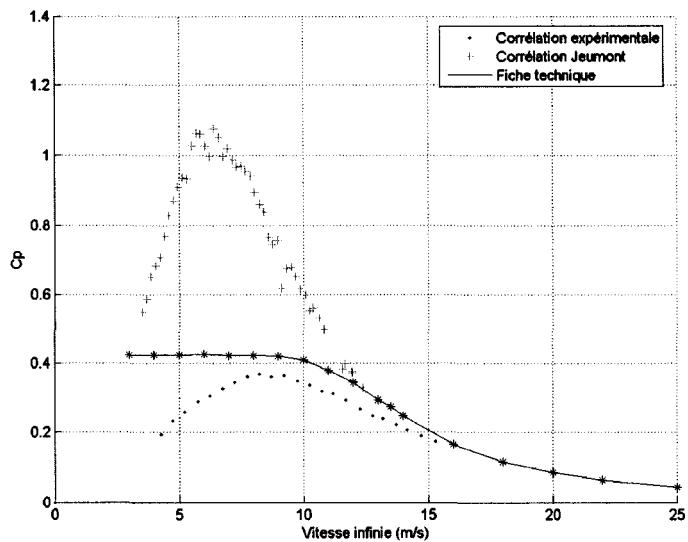


Figure 32 Courbes C_P utilisant différentes corrélations

pente de 0.7. La figure 33 résume le traitement du signal électrique entre l'anémomètre et les fichiers de données.

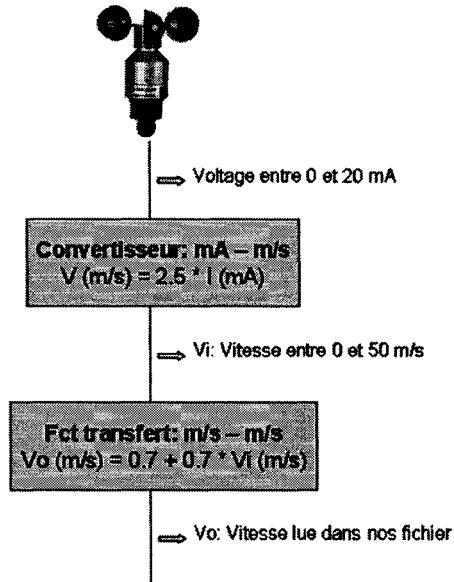


Figure 33 Trajet du signal de l'anémomètre à la nacelle

Cette corrélation s'apparente étrangement à celle fournie par Jeumont : $V_\infty = 0.536 + 0.723 V_{nac}$. Tout semble indiquer que la lecture lue dans les fichiers ($V_{fichier}$), étant identifiée comme celle à la nacelle, est en fait déjà corrigée pour être V_∞ .

$$V_\infty \cong V_{fichier} = 0.7 + 0.7 V_{nac} \quad (4.5)$$

Une nouvelle courbe C_P est tracée en utilisant cette hypothèse (figure 34). Les résultats obtenus sont maintenant beaucoup plus réalistes.

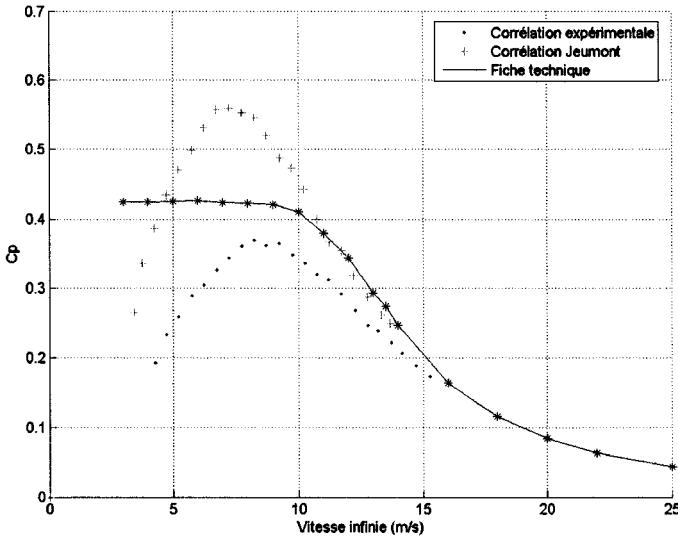


Figure 34 Courbes C_P utilisant l'hypothèse que $V_\infty = V_{fichier}$

4.3.3 Méthodologie

L'analyse expérimentale permettant d'étudier la technique d'anémométrie à la nacelle peut être résumée par les étapes suivantes :

- importer en fichier mensuels Matlab les fichiers journaliers Excel provenant de Oh-mega.
- moyenner les données aux 10 minutes si elles nous sont données à chaque minute.
- associer les matrices de données de la tour référence et de la turbine, en s'assurant que les dates-heures-minutes de chacune coincident.
- corriger les données avec les décalages entre les tours et l'éoliennes trouvés précédemment.
- filtrer les N/A et les zéros inappropriés. Filtrer également les valeurs démesurées. Uniquement les valeurs de vitesses entre $4m/s < V < 16m/s$ sont conservées.
- classer les données en bins de direction, basés sur la girouette de la tour temporaire à 46m.

- déterminer les secteurs valides, selon la norme IEC 61400-12. Seules les données provenant de ces secteurs seront étudiées.
- importer les corrélations entre $V_{ref} \leftrightarrow V_\infty$ provenant de la calibration de site.
- appliquer ces corrélations afin de trouver V_∞ à partir de V_{ref} .
- trouver les corrélations entre $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ pour chaque secteur valide.

CHAPITRE 5

MODÈLE MATHÉMATIQUE

Le modèle mathématique présenté dans ce chapitre a pour but de représenter l'écoulement de l'air autour de la nacelle et du rotor d'une éolienne. La turbulence associée à un tel écoulement a des caractéristiques tridimensionnelles et instationnaires. Les équations de Navier Stokes peuvent être utilisées afin de prédire le comportement d'un tel fluide. Cependant, la complexité d'un système d'équations de ce genre est incroyable et engendrerait des temps de calculs faramineux. Des hypothèses simplificatrices seront donc posées afin de rendre la résolution plus accessible, tout en offrant une précision acceptable. La turbulence sera modélisée avec la technique de moyennage temporel de Reynolds des équations de continuité et de quantité de mouvement (RANS).

L'éolienne utilisée lors de simulations numériques sera la Jeumont J48, soit celle présente sur notre site expérimental de Rivière-au-Renard. Les dimensions ainsi que la géométrie de la nacelle sont connues. La modélisation du rotor est beaucoup plus complexe à simuler, principalement due à la rotation de ce dernier qui entraîne des effets aérodynamiques multiples. La méthode utilisée sera également explicitée dans cette section.

5.1 Équations fondamentales

5.1.1 Équations du mouvement

Le théorème de transport permet de décrire les équations qui gouvernent l'écoulement en utilisant une approche Eulérienne, c'est-à-dire basée sur l'analyse par volumes de contrôle. Le fluide est supposé incompressible, hypothèse valide due aux faibles vitesses présentes dans la couche limite terrestre.

Les équations du mouvement sont obtenues en appliquant la loi de conservation sur un volume de contrôle \mathcal{V} . Ce dernier est immobile et indéformable. Un vecteur unitaire n_i , perpendiculaire à la surface \mathcal{A} , est orienté vers l'extérieur de \mathcal{V} . L'équation de conservation

de la masse, également appelée équation de continuité, stipule que la variation dans le temps de la masse du système est nulle.

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_A u_i n_i \rho dA = 0 \quad (5.1)$$

Due à l'hypothèse d'un fluide incompressible, c'est à dire avec une densité constante dans le temps, il est possible de simplifier cette équation.

$$\int_A u_i n_i dA = 0 \quad (5.2)$$

La seconde loi de Newton stipule que la somme des forces agissant sur un volume de contrôle doit égaler sa variation de quantité de mouvement.

$$\int_V \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} dV + \int_A \rho u_i u_j n_i dA = \mathcal{F}_{ext}^{VC} \quad (5.3)$$

Dans ces équations, u_i et u_j représentent des vitesses instantanées. Le terme \mathcal{F}_{ext}^{VC} représente la somme de toutes les forces instantanées agissant sur un volume de contrôle donné. Ces dernières peuvent se décomposer en forces surfaciques (\mathcal{F}_{surf}^{VC}) et volumiques (\mathcal{F}_{vol}^{VC}). Les forces surfaciques sont celles de pression et de friction, tandis que la gravité agit sur le volume en entier. Le terme de pression peut être redéfini de manière à intégrer le terme de gravité. Les forces appliquées par le rotor de l'éolienne sont nommées \mathcal{F}_{mec}^{VC} et seront étudiées plus en profondeur à la section 5.2. Ces forces surfaciques peuvent être décomposées en composantes normale et tangentielle à la surface balayée par les pales, f_n^R et f_t^R .

$$F_{mec}^{VC} = \int_{A_T^R} ((f_n^R)_i + (f_t^R)_i) dA \quad (5.4)$$

La surface \mathcal{A}_T^R fait référence à l'intersection entre le disque actuateur et le volume de contrôle (voir section 5.2).

En utilisant l'hypothèse que le fluide en jeu est incompressible, on peut réécrire l'équation de quantité de mouvement.

$$\int_V \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} dV + \int_A \rho u_i u_j n_i dA = \int_A \left[-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] n_i dA + \int_{\mathcal{A}_T^R} ((f_n^R)_i + (f_t^R)_i) dA \quad (5.5)$$

Les variables indépendantes de ce système sont les trois composantes de la vitesse u, v, w ainsi que la pression p . Si les F_{mec}^{VC} sont connues, ce système peut donc être résolu, donnant ainsi les caractéristiques de l'écoulement partout dans le domaine, à chaque instant t . Cependant, la résolution d'un tel système, 3-D et instationnaire demanderait des temps de calculs beaucoup trop importants. C'est pourquoi d'autres hypothèses seront posées afin de simplifier le problème. Premièrement, on suppose que l'écoulement autour de la nacelle de l'éolienne est axisymétrique par rapport à l'axe de rotation. Cette hypothèse sera discutée plus en profondeur à la section 5.1.4.

L'instationnarité de l'écoulement autour du rotor provient principalement de la génération de tourbillons en bout de pales. Dans notre étude, le modèle du disque actuateur, qui remplace le rotor par un disque uniforme composé d'un nombre infini de pales, sera utilisé. Ceci permet de considérer l'écoulement comme stationnaire et de représenter le rotor par des forces externes [25].

5.1.2 Équations de Navier-Stokes moyennées

Un écoulement turbulent peut être décrit comme étant aléatoire et désordonné. Cependant, lorsqu'il est stationnaire, cela signifie que les quantités moyennes sont constantes dans le temps, permettant ainsi d'en faire l'étude. La technique de moyennage temporel des équations instantanées de Navier-Stokes (RANS) sera utilisée dans cet ouvrage.

Les valeurs instantanées des différentes propriétés du fluide peuvent être décomposées en une valeur moyenne $\bar{\psi}$ et une valeur de fluctuation ψ' .

$$\psi_i = \bar{\psi}_i + \psi'_i \quad (5.6)$$

Si l'on moyenne dans le temps sur une période T , on obtient les expressions moyennes en effectuant la sommation de toutes les valeurs instantanées sur cette période.

$$\bar{\psi}_i = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \psi_i dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (\bar{\psi}_i + \psi'_i) dt \quad (5.7)$$

On injecte ces nouvelles valeurs moyennées dans les équations instantanées de Navier-Stokes 5.2 et 5.5 afin d'obtenir de nouvelles équations moyennées.

$$\int_A \bar{u}_i n_i dA = 0 \quad (5.8)$$

$$\int_A \rho \bar{u}_i \bar{u}_j n_i dA = - \int_A \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' n_i dA + \int_A \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] n_i dA + \int_{A_T^R} ((\bar{f}_n^R)_i + (\bar{f}_t^R)_i) dA \quad (5.9)$$

Les quantités moyennées remplacent maintenant les valeurs instantanées. En plus, un nouveau terme, $\int_A \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' n_i dA$, apparaît dans l'équation de la quantité de mouvement, évoquant le caractère turbulent de l'écoulement. Plus particulièrement, $\tau_{ij} = -\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ est appelé le tenseur de Reynolds. Ce nouveau terme vient injecter 6 contraintes additionnelles, appelées contraintes de Reynolds, dont trois sont normales et les trois autres agissent en cisaillement. Le nombre d'équations disponibles n'est donc plus suffisant pour parvenir à résoudre notre système. Des équations supplémentaires seront nécessaires afin de réaliser l'étude de notre écoulement turbulent stationnaire. Ces dernières seront traitées à la section suivante.

5.1.3 Modèle de turbulence

La résolution des équations de Navier-Stokes permet la résolution d'un écoulement turbulent, mais demande des temps de calculs beaucoup trop importants. La technique de moyennage temporel de Reynolds permet d'analyser ce système de manière statistique et indépendante du temps. Cependant, cette méthode fait apparaître d'autres variables indépendantes. Un modèle de turbulence est donc nécessaire afin de venir fermer notre système d'équation.

5.1.3.1 Hypothèse de Boussinesq

Une analogie peut être faite entre le phénomène de turbulence et celui de viscosité. C'est en 1877, que Boussinesq formule le concept de viscosité turbulente μ_T , relié aux contraintes de Reynolds.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \rho \delta_{ij} \quad (5.10)$$

Le dernier terme peut être inclu dans la définition de la pression en posant que $p^* = p + \frac{2}{3} k \rho$. On peut réécrire l'équation(5.9) en utilisant cette hypothèse. On obtient alors :

$$\int_A \rho \bar{u}_i \bar{u}_j n_i dA = \int_A \left[-\bar{p}^* \delta_{ij} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] n_i dA + \int_{A_t^R} ((\bar{f}_n^R)_i + (\bar{f}_t^R)_i) dA \quad (5.11)$$

Dans ces équations, k représente l'énergie cinétique turbulente.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (5.12)$$

La viscosité turbulente n'est pas une propriété du fluide (comparativement à la viscosité du fluide), mais de l'écoulement. La majorité du temps, $\mu_T \gg \mu$, sauf lorsque l'on se situe très près des parois où la vitesse de l'écoulement est presque nulle.

Toujours par analogie avec la viscosité laminaire, résultant de collisions moléculaires, la viscosité turbulente peut être exprimée sous la forme suivante.

$$\mu_T = (\text{const}) \rho V_T L_T \quad (5.13)$$

où V_T et L_T représentent une vitesse et une longueur caractéristiques. Différentes approches peuvent être utilisées afin de déterminer ces deux valeurs caractéristiques. La première s'appelle le modèle à zéro équation, ou modèle algébrique. Par exemple, la viscosité turbulente peut être considérée comme étant constante, c'est-à-dire que le taux de production d'énergie cinétique doit égaler son taux de dissipation en tous points. Cette technique peut donner des résultats acceptables pour des écoulements simples, mais est inacceptable pour des systèmes plus complexes comme celui à l'étude. De plus, de nouvelles constantes doivent être trouvées pour chaque écoulement.

Les modèles à une équation utilisent une équation différentielle pour résoudre k et une algébrique pour L_T . Certains problèmes sont ainsi résolus, mais la plupart des inconvénients des modèles algébriques sont toujours présents, tel que le manque de généralité. Les modèles à deux équations permettent de prédire la distribution de L_T , contrairement aux deux approches précédentes. C'est un modèle de ce type qui a été choisi, plus précisément celui $k - \epsilon$.

5.1.3.2 Justification du choix du modèle

Tel que vu précédemment, plusieurs modèles existent, leurs complexités ainsi que leurs précisions variant grandement d'un à l'autre. Le modèle à deux équations $k - \epsilon$ est complet, simple et offre une bonne précision. Ce modèle est rapidement devenu un des plus populaires pour plusieurs applications d'ingénierie, dû à sa robustesse et aux bons résultats

obtenus sur une grande plage d'écoulement turbulent. Différents modèles de ce type ont été proposés, notamment ceux de Jones et Launder [26], Lumley [27] ainsi que Harlow et Nakayama [28]. En utilisant le premier modèle, les recherches de Crespo et al. [29] ont mené à de bons résultats pour caractériser le sillage d'une éolienne. C'est donc le modèle proposé Jones et Launder [26] qui sera utilisé dans cet ouvrage.

Deux nouvelles équations de transport seront développées pour les variables k et ϵ .

5.1.3.3 Description du modèle $k - \epsilon$

Ce modèle propose les valeurs de vitesses et de longueurs caractéristiques suivantes.

$$V_T = k^{1/2} \quad (5.14)$$

$$L_T = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (5.15)$$

où ϵ représente le taux de dissipation de l'énergie turbulente.

L'expression finale de la viscosité turbulente est donc :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.16)$$

Les deux équations sont obtenues à partir des équations de transport, puis en les moyennant dans le temps. Pour un volume de contrôle \mathcal{V} ayant une surface \mathcal{A} , les équations du modèle sont les suivantes [26] :

$$\int_{\mathcal{A}} \rho k \bar{u}_i n_i d\mathcal{A} = \int_{\mathcal{V}} (P_t - \rho \bar{\epsilon}) d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{A}} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_i} n_i d\mathcal{A} \quad (5.17)$$

$$\int_{\mathcal{A}} \rho \epsilon \bar{u}_i n_i d\mathcal{A} = \int_{\mathcal{V}} \left(C_{\epsilon 1} \frac{\bar{\epsilon}}{k} P_t - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\bar{\epsilon}^2}{k} \right) d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{A}} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_j} n_i d\mathcal{A} \quad (5.18)$$

P_t représente la production d'énergie cinétique turbulente.

$$P_t = -\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (5.19)$$

Dans le modèle original [26], les valeurs de toutes les constantes ont été trouvées expérimentalement afin de représenter la physique de l'écoulement. Les valeurs sont les suivantes :

$$C_{\epsilon 1} = 1.44 \quad C_{\epsilon 2} = 1.92 \quad C_{\epsilon 3} = 1.0 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad \sigma_k = 1.0 \quad (5.20)$$

5.1.4 Simulation axisymétrique

Comme mentionné précédemment, un des objectifs de cet ouvrage est de développer un modèle numérique simple permettant de reproduire le comportement du fluide autour d'une éolienne en opération. Afin de diminuer les temps de calculs, un modèle axisymétrique sera utilisé. En effet, la forme très arrondie de la nacelle permet de poser cette hypothèse (figure 35).

Jusqu'à présent, les équations qui ont été développées considèrent un écoulement tri-dimensionnel dans la couche limite atmosphérique. Dans un tel écoulement, un profil de vitesse est présent, dû à la condition de vitesse nulle au sol. La turbulence provient de ce cisaillement de l'écoulement, qui favorise le mélange du fluide.

Dans un modèle axisymétrique, le sol n'est pas modélisé et l'écoulement a un profil uniforme à l'entrée du domaine. Malgré des conditions frontières de k et ϵ imposées, la turbulence ne sera pas conservée dans le domaine. Les équations doivent donc être reformulées afin d'être utilisées dans un domaine axisymétrique. Afin d'y parvenir, Leclerc et al. ont

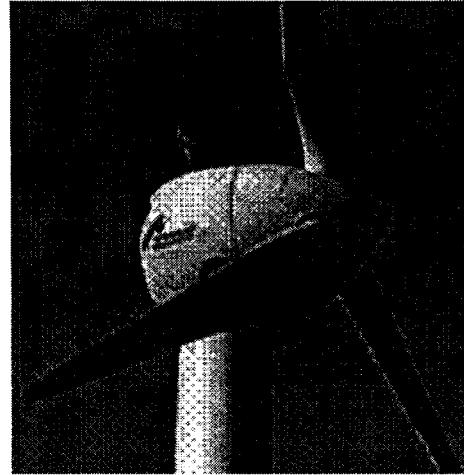


Figure 35 Nacelle de la Jeumont J-48

étudié un rotor immergé dans la couche limite atmosphérique [30]. Les variables dépendantes ψ (u_i, p, k, ϵ) peuvent être exprimées de la manière suivante :

$$\psi(x, y, z) = \psi^*(x, y, z) + \tilde{\psi}_0(z) \quad (5.21)$$

Le premier terme $\psi^*(x, y, z)$ se définit comme la somme des perturbations dues à la présence du rotor et de la valeur de l'écoulement non perturbé à la hauteur du moyeu (h).

$$\psi^*(x, y, z) = \psi_{rotor}(x, y, z) + \psi_0(h) \quad (5.22)$$

Le second terme $\tilde{\psi}_0(z)$ représente la différence entre les valeurs de ψ de l'écoulement non perturbé à une hauteur quelconque (z) et à la hauteur du moyeu (h).

$$\tilde{\psi}_0(z) = \psi_0(z) - \psi_0(h) \quad (5.23)$$

À proximité du rotor, les variations des propriétés $\psi^*(x, y, z)$ dues au rotor sont supposées être beaucoup plus importantes que celle de l'écoulement libre $\tilde{\psi}_0(z)$. Les simplifications suivantes seront donc appliquées :

$$\tilde{\psi}_0 \ll \psi^* \quad (5.24)$$

$$\nabla \tilde{\psi}_0 \ll \nabla \psi^* \quad (5.25)$$

Ces simplifications sont valides uniquement lorsque $h/R \gg 1$, où R est le rayon du rotor. On injecte ce changement de variable ainsi que les simplifications dans les équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement, de k et ϵ (équations(5.8), (5.11), (5.17), (5.18)). On obtient les équations suivantes :

$$\int_{\mathcal{A}} \bar{u}_i^* n_i d\mathcal{A} = 0 \quad (5.26)$$

$$\int_{\mathcal{A}} \rho \bar{u}_i^* \bar{u}_j^* n_i d\mathcal{A} = \int_{\mathcal{A}} \left[-\bar{P}^* \delta_{ij} + (\mu + \mu_T^*) \left(\frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j^*}{\partial x_i} \right) \right] n_i d\mathcal{A} + \int_{\mathcal{A}_I^R} ((\bar{f}_n^R)_i + (\bar{f}_T^R)_i) d\mathcal{A} \quad (5.27)$$

$$\int_{\mathcal{A}} \rho k^* \bar{u}_i^* n_i d\mathcal{A} = \int_{\mathcal{V}} (P_t^* - \rho \epsilon^* + \rho \epsilon_0(H)) d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{A}} \left(\mu + \frac{\mu_T^*}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k^*}{\partial x_i} n_i d\mathcal{A} \quad (5.28)$$

$$\int_{\mathcal{A}} \rho \epsilon^* \bar{u}_i^* n_i d\mathcal{A} = \int_{\mathcal{V}} \left(C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon^*}{k^*} P_t - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^{*2}}{k^*} + C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon_0(H)^2}{k_0(H)} \right) d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{A}} \left(\mu + \frac{\mu_T^*}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon^*}{\partial x_j} n_i d\mathcal{A} \quad (5.29)$$

avec

$$P_t^* = \mu_T^* \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i} \quad (5.30)$$

$$\mu_t^* = \rho C_\mu \frac{k^* 2}{\epsilon^*} \quad (5.31)$$

On sait que lorsque l'on se situe loin en amont et en aval du rotor, les propriétés sont celles de l'écoulement non-perturbé $\tilde{\psi}_0(z)$. Dans ces cas, on a

$$\psi(x, y, z) = \psi^*(x, y, z) + \tilde{\psi}_0(z) = \psi_0(z) \quad (5.32)$$

En substituant la définition de $\tilde{\psi}_0(z)$, on obtient la relation suivante :

$$\psi^*(x, y, z) = \psi_0(h) \quad (5.33)$$

Le système d'équations présentées dans cette section ont donc la propriété que, si les forces exercées sur le rotor sont axisymétriques, la solution des variables dépendantes ψ^* seront également axisymétriques. L'utilisation de la théorie du disque actuateur permet de supposer les forces appliquées sur le rotor comme étant axisymétriques.

5.2 Modélisation du rotor

5.2.1 Théorie du disque actuateur

Cette théorie a déjà été présentée à la section 2.4.1. Le rotor, modélisé par un disque perméable, absorbe une partie de l'énergie de l'écoulement lors de son passage. Une force de poussée T est appliquée par le rotor, créant ainsi une discontinuité en pression (figure 6).

La vitesse de l'écoulement V_∞ décroît au fur et à mesure qu'elle s'approche du rotor, où elle atteint une vitesse u . À l'inverse, la pression augmentera près du rotor, puis soudainement une chute surviendra.

Comme mentionné précédemment, le rotor peut être modélisé par une distribution de forces surfacique sur la surface du disque A_{rot} . Les rotors de certaines éoliennes ne sont pas parfaitement perpendiculaire à l'axe de rotation, ils présentent un certain angle de conicité γ . La surface du disque se présente alors comme un cone, tel qu'illustré à la figure 36. Il faut noter que l'angle d'inclinaison a été exagéré, et qu'il se situe habituellement entre 0 deg et 10 deg. Les forces exercées sur le rotor peuvent être décomposées en composantes normales, tangentielles et radiales (f_n^R , f_t^R et f_r^R).

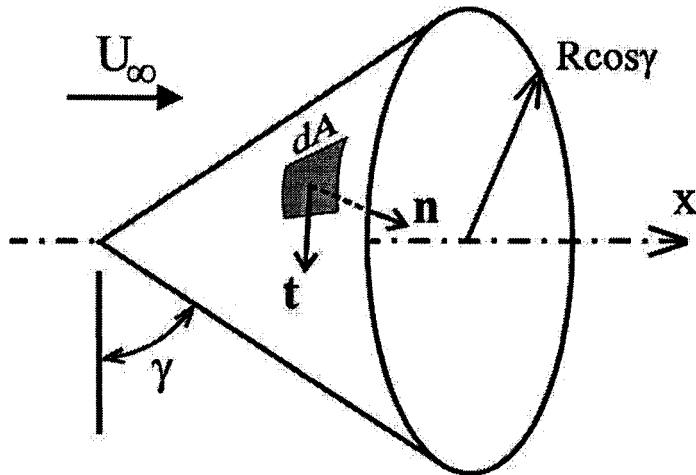


Figure 36 Description du disque actuateur avec un angle de conicité γ

5.2.2 Théorie de l'élément de pale (BEM)

Une seconde théorie, celle de l'élément de pale, est nécessaire dans notre modélisation du rotor afin de tenir compte des effets aérodynamiques de la pale. Les pales sont décomposées en plusieurs éléments de longueur dr , dont la sommation constitue les forces totales en jeu sur une pale. Certaines hypothèses sont encore une fois conditionnelles à l'utilisation de cette méthode. La première stipule un comportement bi-dimensionnel, c'est-à-dire

que toutes les forces en jeu sont dans le plan normal à l'allongement de la pale. Concrètement, ceci signifie que la composante radiale de la force f_r^R sera négligée et supposée nulle. Également, à l'intérieur d'un élément de pale, les forces sont supposées constantes. Les forces aérodynamiques de portance (F_L) et de traînée (F_D) sont respectivement perpendiculaires et parallèles à la vitesse relative de l'écoulement (U_{rel}) (figure 37).

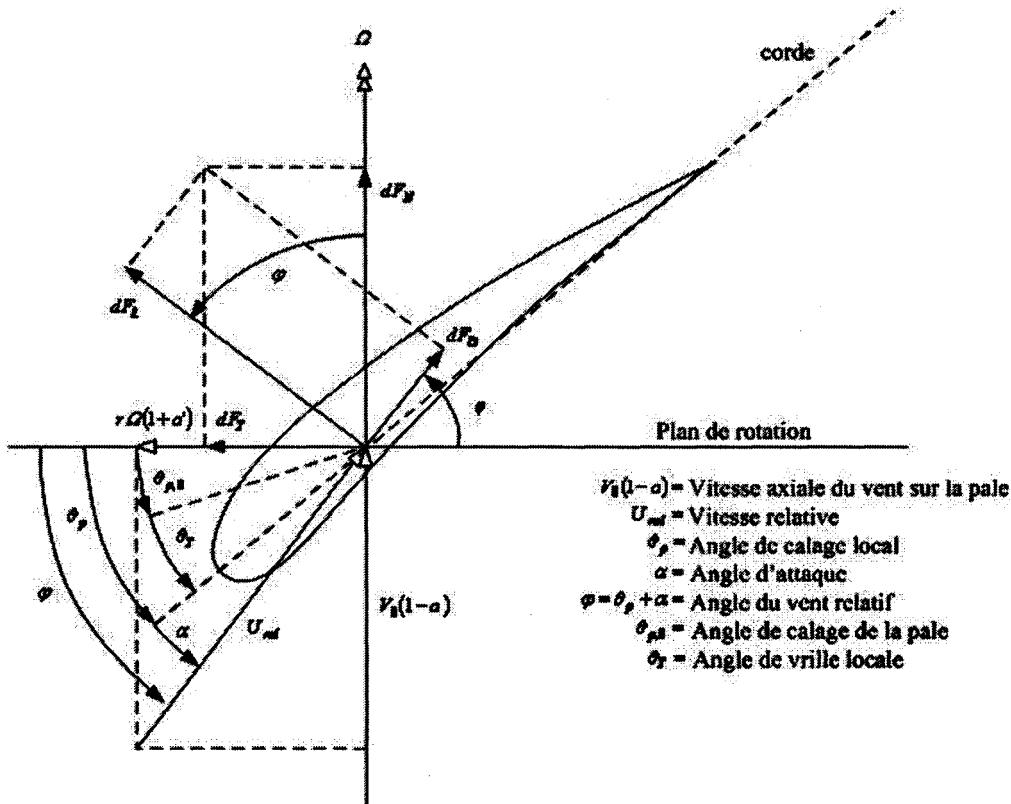


Figure 37 Description des forces aérodynamiques présentes sur une pale

Sur chaque élément de pale, la contribution en portance et en traînée peut être facilement calculée si les coefficients C_l et C_d sont connus.

$$dL = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_l c dr \quad (5.34)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_d c \ dr \quad (5.35)$$

Nous connaissons la géométrie (c est la corde) de la pale de l'éolienne J48 ainsi que les coefficients de portance et de traînée des profils utilisés (C_l et C_d), qui sont donnés en fonction de l'angle d'attaque α . La vitesse relative de l'air sur la pale U_{rel} est composée de la vitesse locale de l'écoulement et de la vitesse de rotation, $U_{rel} = \sqrt{(V_\infty(1-a))^2 + (\Omega r(1+a'))^2}$. L'angle φ est celui formé entre U_{rel} et le plan de rotation. Ce dernier peut se décomposer, on obtient $\varphi = \alpha + \theta_{p,o} + \theta_T$. L'angle d'attaque α est celui formé entre le plan de rotation et la corde du profil. $\theta_{p,o}$ et θ_T sont respectivement l'angle de calage de la pale et l'angle de vrille local.

La projection de ces deux forces sur l'axe du plan de rotation ainsi que sur l'axe perpendiculaire à ce dernier permet de trouver les expressions des forces normales F_N et tangentielles F_T (figure 37). Ces forces sont celles présentes sur une seule pale. Pour trouver les forces sur le rotor complet, il est nécessaire de multiplier par le nombre de pale B . De plus, elles sont divisées par l'aire de l'anneau d'épaisseur dr afin d'obtenir les forces surfaciques f_n^R et f_t^R .

$$f_n^R = \frac{\sigma' \rho U_{rel}^2 c_n}{2} \quad (5.36)$$

$$f_t^R = \frac{\sigma' \rho U_{rel}^2 c_t r}{2} \quad (5.37)$$

où la solidité locale $\sigma' = (B c)/(2\pi r)$, le coefficient normal $c_n = C_l \cos(\varphi) + C_d \sin(\varphi)$ et le coefficient tangentiel $c_t = C_l \sin(\varphi) + C_d \cos(\varphi)$.

Dans cet ouvrage, nous supposons que la contribution tangentielle a' est nulle. En effet, l'anémométrie à la nacelle est principalement influencée par la région de la pale située près de la nacelle, qui pour l'éolienne à l'étude, est constituée d'une section cylindrique de 5.5

m. L'écoulement autour du cylindre contribuera donc peu à engendrer un mouvement de rotation dans le sillage. Pour ces raisons, a' est négligé afin de simplifier le modèle.

5.3 Modifications aérodynamiques

5.3.1 Pertes de bout de pales

Comme la pale est de longueur finie, certains phénomènes aérodynamiques viennent modifier l'écoulement. La portance d'un profil est développée par la différence de pression entre l'intrados et l'extrados. En bout de pale ainsi qu'à la base (changement entre les sections cylindriques et profilées), ce différentiel de pression engendre un mouvement de circulation d'air, dit tourbillons. En ces régions, une partie de l'énergie cinétique est donc perdue dans la génération de tourbillons plutôt que dans la portance. Pour tenir compte de ce phénomène, Prandtl a développé une correction permettant de diminuer la quantité d'énergie convertie par le rotor. La correction totale peut être décomposée en deux, une pour l'extrémité F_{tip} et une pour la section près du moyeu F_{hub} .

$$F = F_{tip} \cdot F_{hub} \quad (5.38)$$

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-B \frac{R - r}{2r \sin(\varphi)} \right) \right] \quad (5.39)$$

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-B \frac{r - R_{hub}}{2R_{hub} \sin(\varphi)} \right) \right] \quad (5.40)$$

Dans ces expressions, r représente la position de l'élément de pale à l'étude et R_{hub} la distance entre l'axe de rotation et la fin de la partie cylindrique de la pale. Pour la pale de la Jeumont J-48, cette distance est de 5.5m.

Le facteur de correction est appliqué sur les termes de forces en divisant le coefficient de portance C_l , c'est à dire C_l/F .

5.3.2 Modèle de retard du décrochage statique

Comme mentionné précédemment, la théorie de l'élément de pale considère les forces dans le plan, et néglige donc les effets aérodynamiques tri-dimensionnels. En réalité, une vitesse radiale est présente due à la rotation du rotor. En considérant cet effet, le décrochage surviendra à des angles d'attaques plus importants et la traînée et la portance seront augmentées.

Un modèle de retard de décrochage a été proposé par Du et Selig [31], ajoutant un terme correctif à la traînée et à la portance, afin de tenir compte du phénomène 3D.

$$C_{l,3d} = C_{l,2d} + \Delta C_{l,2d} = C_{l,2d} + f_L (C_{l,p} - C_{l,2d}) \quad (5.41)$$

$$C_{d,3d} = C_{d,2d} + \Delta C_{d,2d} = C_{d,2d} - f_D (C_{d,2d} - C_{d,0}) \quad (5.42)$$

On réalise que la correction appliquée à la portance est additionnée, augmentant ainsi la portance en 3D, correspondant à l'effet réel. Cependant, pour la traînée, le correctif est soustrait, allant en sens contraire de l'effet désiré.

Donc, pour calculer le $\Delta C_{d,2d}$, un autre modèle, proposé par Eggars [32], sera utilisé. Ce dernier propose une correction de coefficient tangentiel (C_T) basée sur le coefficient normal (C_N). À partir de cette corrélation, il est possible de venir trouver celle entre ΔC_d et ΔC_l .

$$\Delta C'_T = 0.12 \Delta C'_N \quad (5.43)$$

Cette corrélation est basée sur un système d'axe différent de celui utilisé jusqu'à présent dans cet ouvrage. C'_T est projeté sur l'axe de la corde contrairement à habituellement, où la

projection est effectuée sur l'axe du plan de rotation. Afin de garder la même convention, une nouvelle relation est trouvée.

$$\Delta C_T = X \Delta C_N = \left(\frac{0.12 \cos(\theta_p) + \sin(\theta_p)}{\cos(\theta_p) - 0.12 \sin(\theta_p)} \right) \Delta C_N \quad (5.44)$$

En établissant les relations géométriques avec les coefficients de portance et de traînée, une valeur de ΔC_d selon Eggars est obtenue.

$$\Delta C_d = \left(\frac{\sin(\varphi) - X \cos(\varphi)}{X \sin(\varphi) + \cos(\varphi)} \right) \Delta C_l \quad (5.45)$$

Ce terme représente $\Delta C_{d,2d}$ dans l'équation 5.42. La contribution de l'effet 3D augmentera la traînée.

5.3.3 Coefficient de traînée de la partie cylindrique

La conception d'une pale idéale stipule, entre autres, que la corde augmente jusqu'à la nacelle. Cependant, les faibles gains de performance d'une telle pale ne justifient pas les coûts additionnels associés à ce design. Pour ces raisons, la région à l'emplanture de la majorité des pales, dont celle de la Jeumont, est cylindrique. La portance de cette section est nulle, tandis que la traînée est souvent supposée égale à 1.2. Cependant, le coefficient de traînée d'un cylindre varie en fonction du nombre de Reynolds. Pour un cylindre de longueur infini :

$$C_d^{cyl,\infty} = \begin{cases} 1.18 + \frac{6.8}{Re_d^{0.89}} + \frac{1.96}{\sqrt{Re_d}} - \frac{0.0004 Re_d}{1+3.64 \cdot 10^{-7} Re_d^2} & Re_d \leq 2.0 \cdot 10^5 \\ 1.6 - 3.04348 \cdot 10^{-6} Re_d & 2.0 \cdot 10^5 < Re_d \leq 4.6 \cdot 10^5 \\ 0.14321 + 0.1234568 \cdot 10^{-6} Re_d & 4.6 \cdot 10^5 < Re_d \leq 4.5 \cdot 10^6 \\ 0.7 & Re_d > 4.5 \cdot 10^6 \end{cases} \quad (5.46)$$

De plus, comme la pale n'est pas de longueur infinie, la valeur de C_d doit être corrigée [33].

$$C_d^{cyl,AR} = (0.624 + 0.0077AR) C_d^{cyl,\infty} \quad (5.47)$$

Avec $AR = \frac{R}{d'}$ où d' est le diamètre du cylindre et $R=R_{tot}$.

CHAPITRE 6

MÉTHODE NUMÉRIQUE

Le modèle mathématique développé précédemment, permettant de modéliser le rotor d'une éolienne dans un écoulement turbulent stationnaire est complexe. Il est donc évident de se tourner vers des méthodes numériques afin de faire la résolution de cet imposant système d'équations. Le logiciel commercial FLUENT a été choisi pour effectuer nos simulations. FLUENT est reconnu comme étant un logiciel complet et efficace, offrant une très grande variété de possibilités d'étude, tant sur les types d'écoulements que sur les méthodes de résolutions à utiliser. De plus, une grande flexibilité est possible par le biais de l'utilisation de *Fonctions Utilisateurs* (FU). Ceci permet à l'utilisateur de venir programmer des fonctions spécifiques, par exemple la modélisation des forces présentes sur un rotor (présenté à la section 5.2), qui seront par la suite appelées par le logiciel.

6.1 Description de la méthode

Le logiciel FLUENT est basé sur une méthode numérique de calculs aux volumes finis. Le but de cette technique est de déterminer la valeur des variables dépendantes qui nous intéressent (vitesses, pression, etc) en un nombre fini de points du domaine. Pour ce faire, les équations intégrales de conservations développées à la section 5.1 doivent être discrétisées. Cela signifie qu'elles doivent être écrites sous forme algébriques, reliant la variable dépendante ϕ avec celles des points voisins. La forme générale des équations discrétisées qui sera utilisée est celle proposée par Patankar [34].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho\phi) dV + \int_A (\rho u_j \phi) n_j dA = \int_A \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] n_j dA + \int_V S_\phi dV \quad (6.1)$$

Chaque terme de cette équation a une signification particulière :

$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho\phi) dV$: Représente le caractère instationnaire de l'écoulement, le taux d'accumulation de ϕ .

$\int_A (\rho u_j \phi) n_j dA$: Représente l'échange convectif, soit le taux de transport sortant de \mathcal{V} .

$\int_A \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] n_j dA$: Constitue l'échange par diffusion, soit le taux de transport à l'intérieur de \mathcal{V} . Le terme Γ_ϕ est appelé coefficient de diffusion et représente les propriétés du fluide, telle sa viscosité ou sa conductivité thermique. Pour des écoulements turbulents, Γ_ϕ est souvent associé à la viscosité turbulente μ_t .

$\int_V S_\phi dV$: Représente le terme source, de génération à l'intérieur de \mathcal{V} (chaleur, réaction chimique, etc). Il permet également de contenir tous les autres termes qui n'entrent pas dans les trois premières catégories.

Les équations de continuité, de quantité de mouvement et $\kappa - \epsilon$ doivent être reformulées selon cette forme générale. Le tableau suivant résume les valeurs de Γ_ϕ et S_ϕ pour chacune des variables dépendantes.

Tableau III

Résumé des différentes équations exprimées sous la forme générale

Équations	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Eqt. Continuité	1	0	0
Eqt. qté mouvement	u_i	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x_i} (-P \delta_{ij})$
Eqt. de κ	κ	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\kappa}$	$(P_t - \rho \epsilon + \rho \epsilon_0(H))$
Eqt. de ϵ	ϵ	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon}$	$C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} P_t + C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} + C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon_0^2(H)}{\kappa_0(H)}$

La méthodologie générale employée pour résoudre des problèmes numériquement est la suivante :

- trouver les équations fondamentales du système
- discréttisation du domaine de calcul en plusieurs volumes de contrôle, création du maillage.
- déterminer des fonctions d'interpolations pour les variables dépendantes, pour chaque élément du maillage.
- discréttisation des équations de conservations pour les différentes variables ϕ nécessaires à la résolution de notre système. Cette étape s'effectue en modifiant les

équations intégrales afin d'obtenir la forme générale, comme effectuée précédemment.

- résolution du système d'équations discrétisées.
- interprétation des résultats.

6.2 Domaine de calcul et maillage

La qualité du maillage joue un rôle capital dans la précision et la validité des résultats obtenus. Plusieurs types de maillage peuvent être utilisés. On peut séparer en deux grandes catégories ces derniers : les maillages structurés et non-structurés. Chacun présente des avantages et des inconvénients. Les maillages non-structurés sont faciles à mettre en oeuvre, même pour des géométries complexes. De l'autre côté, les maillages structurés permettent de raffiner certaines régions dans une direction particulière, sans créer un nombre faramineux de points dans les autres directions. Par exemple, ceci est grandement utile pour saisir un gradient de vitesse important à la paroi. À cause de tous ces avantages, un maillage structuré sera utilisé, malgré sa difficulté d'implantation pour notre géométrie complexe.

Partout dans le domaine, les mailles doivent être déformées le moins possible. Plus particulièrement, elles doivent demeurées rectangulaires et avoir un ratio longueur sur largeur inférieure à 10. C'est dans la section autour de la nacelle que ces conditions sont les plus difficiles à respecter. Pour y parvenir, les mailles doivent toutes être orthogonale par rapport à la surface de la nacelle. Cette approche est appellée maillage en C.

Cependant, cette approche entre en conflit avec un autre critère important afin d'assurer une bonne précision des résultats. L'orientation du maillage doit suivre la direction des lignes de courants de l'écoulement. Pour notre application, un maillage de type C ne respecte pas cette condition.

Plusieurs autres aspects sont à considérer :

- la transition de grosseur des mailles entre les différentes zones doit être régulière.

- la couche limite près la paroi doit être très raffinée afin de capter les changements importants qui surviennent dans cette région. Afin de quantifier si la résolution du maillage est assez fine, le concept de hauteur de première maille y^+ a été introduit.

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (6.2)$$

où u_* est la vitesse de friction, y est la hauteur physique de la première maille et ν est la viscosité dynamique. Si l'hypothèse de la loi de la paroi est utilisée, une valeur de y^+ de 30 est acceptable. Si les calculs sont effectués jusqu'à la paroi, des y^+ inférieurs 5 doivent être obtenues.

- les zones près du rotor et du système de fixation de l'anémomètre doivent également être raffinées.
- le nombre de points total du maillage doit être le plus faible possible. Une expansion graduelle de la grosseur des mailles dans les régions plus éloignées doit être utilisée judicieusement.

Le maillage final tente de respecter le plus possible ces conditions. Il utilise une approche de type C sur une région rapprochée autour de la nacelle, permettant d'avoir des mailles orthogonales. Pour les régions un peu plus éloignées, un maillage respectant les directions des lignes de courant est utilisé. Le résultat est présenté à la figure 38.

6.3 Modélisation numérique du rotor

Un des avantages du logiciel FLUENT est sa grande flexibilité. Bien qu'aucun module éolien ne soit directement implanté dans celui-ci, certaines options permettent d'effectuer la modélisation du rotor. En effet, l'option "*Fan Model*" de FLUENT permet de prescrire une discontinuité de pression dans un écoulement. Cette discontinuité peut être tant positive que négative, ce qui permet de modéliser autant les modes ventilateurs que turbines.

Tel que décrit dans la théorie du disque actuateur, le rotor d'une éolienne peut justement être modélisé par une chute de pression, représentant l'énergie captée par le rotor. L'option "*Fan Model*" de FLUENT permet de prescrire un saut de pression constante ou variable le

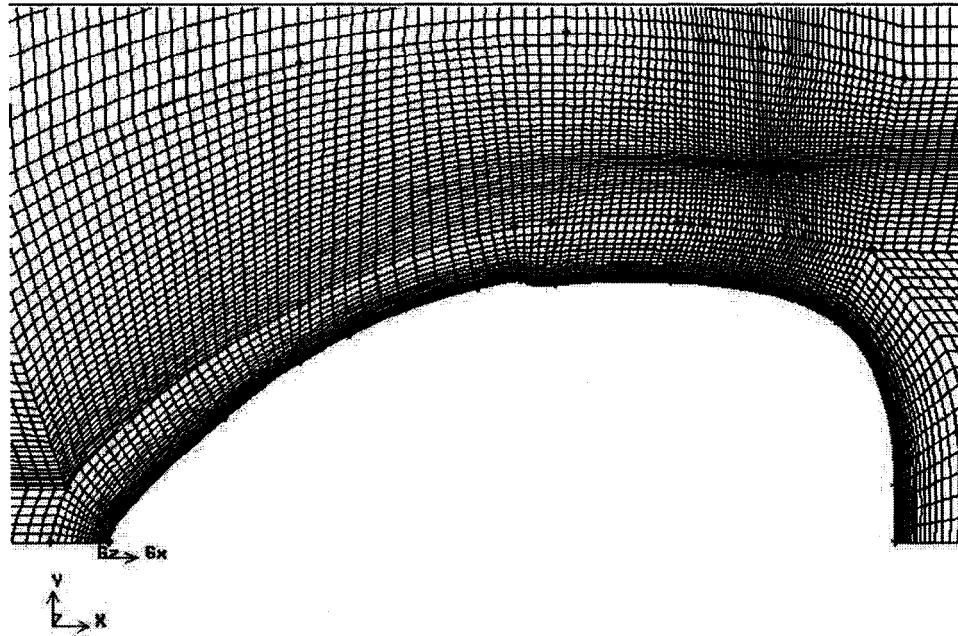


Figure 38 Illustration de la pale et du maillage adjacent

long de la pale. Pour une éolienne, la chute de pression varie grandement en fonction de sa position et des profils aérodynamiques.

Une *Fonction Utilisateur* (FU) sera donc utilisée afin de calculer le Δp de chaque élément de pale (chaque maille). Dans le maillage, la pale a une épaisseur nulle et elle se situe sur une face commune à deux cellules (39).

Le saut de pression peut être calculé à l'aide de la force normale surfacique créée par le rotor.

$$\Delta p = f_n^R = \frac{\sigma' \rho U_{rel}^2 c_n}{2} \quad (6.3)$$

La notion de vitesse relative U_{rel} est présente dans cette formule. Comme l'épaisseur de la pale est nulle numériquement, la moyenne des vitesses entre les cellules en amont et en aval est utilisée dans les calculs (voir figure 39).

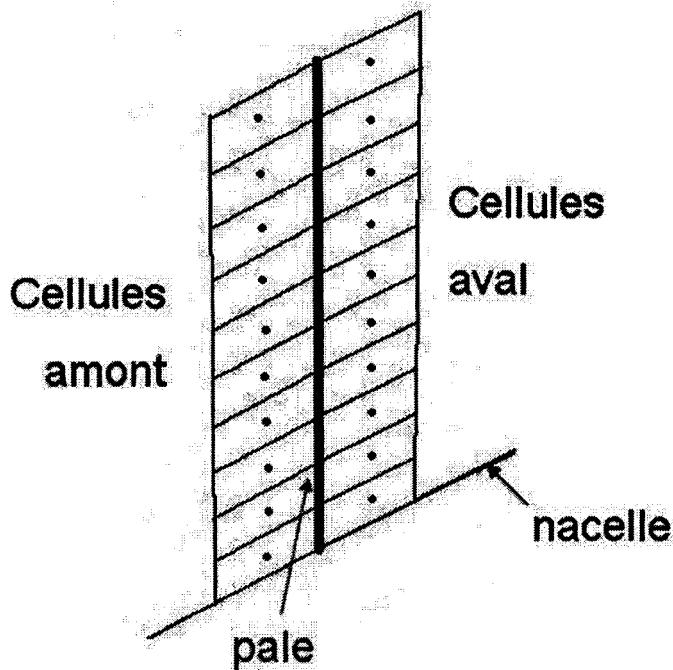


Figure 39 Modélisation numérique du rotor

6.4 Paramètres de FLUENT

Dans cette section, tous les paramètres de FLUENT utilisés lors des simulations sont explicités.

- Le modèle de résolution séquentiel-axisymétrique
- Le modèle de turbulence $k - \epsilon$, standard est développé jusqu'à la paroi
- Les constantes du modèle ont été modifiée, tel que proposé par Allinot et Masson [35] : $C_\mu = 0.0333$ et $C_{\epsilon 1} = 1.176$
- Pour calculer le saut de pression dans le "Fan Model", la FU "udf pressure drop" est appelée

- Dans la définition du fluide, deux termes sources sont ajoutés dus au modèle axisymétrique
- Pour les conditions frontières, des vitesses axiales uniquement sont injectées. Les valeurs de k et ϵ sont dépendantes de l'intensité de turbulence IT

$$\epsilon = \frac{u^*{}^3}{KH_{wt}} \quad (6.4)$$

avec $u^* = IT U_\infty / \sqrt{5.48}$

$$\kappa = IT^2 U_\infty \quad (6.5)$$

Plus de détails sont disponibles en ANNEXE.

6.4.1 Domaine de calcul

Le choix des dimensions du domaine de calcul doit faire l'objet d'une attention particulière.

Une étape importante de la résolution numérique consiste à déterminer la taille optimale du domaine de calcul. En effet, des conditions frontières sont imposées tout au long de la simulation. Un domaine trop petit peut donc forcer l'écoulement et entraîner des changements importants. De l'autre côté, si le domaine de calcul est trop grand, la précision sera bonne, mais les temps de calculs seront plus longs inutilement. L'optimisation du domaine sera effectuée afin d'avoir le plus petit domaine possible, dont les conditions frontières n'influencent pas les résultats (voir Annexe).

6.4.2 Conditions frontières

Les conditions frontières constituent la base de toute simulation numérique. Différents types de frontières existent, et leur choix est dicté par le problème à résoudre, le type de

modèle choisi ainsi que l'information disponible. La figure 40 illustre le domaine à l'étude ainsi que les différentes frontières présentes.

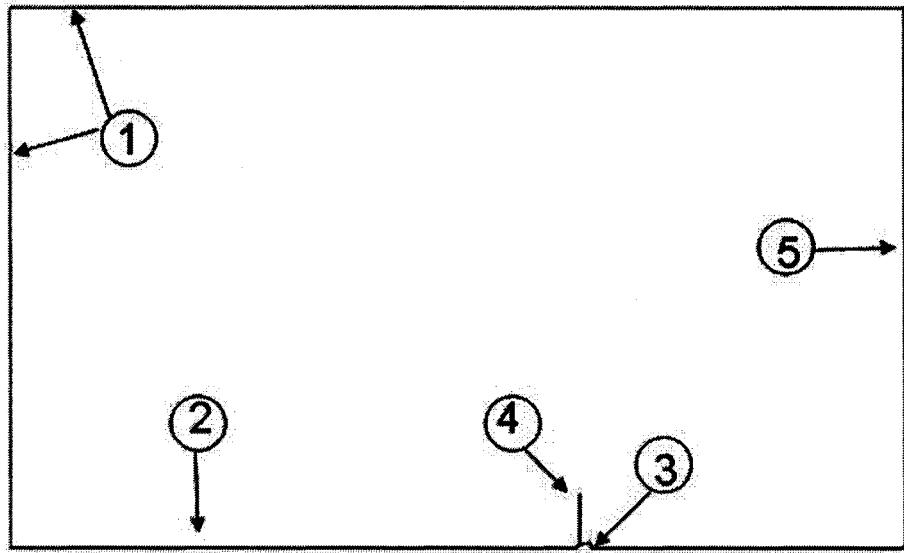


Figure 40 Domaine de calcul à l'étude

entrée #1

Cette frontière représente l'entrée du domaine ainsi que le haut de celui-ci. Des conditions de vitesses sont imposées, représentant la vitesse non-perturbée V_∞ . Seule une composante axiale de la vitesse est prescrite. L'écoulement est donc perpendiculaire à l'entrée du domaine et parallèle au haut du domaine.

Axe #2

Cette frontière représente un axe de symétrie. Évidemment ce dernier coïncide avec le centre de la nacelle.

Nacelle #3

À la surface de la nacelle, une vitesse nulle est imposée à la paroi.

Rotor #4

Le rotor de l'éolienne nécessite un traitement spécial afin de modéliser les forces aérodynamiques. Ce traitemant a été détaillé à la section 6.3.

Sortie #5

La condition de sortie utilisée est celle proposée par Patankar [34].

La figure 41 offre une représentation du domaine après qu'une révolution soit effectuée autour de l'axe de symétrie z.

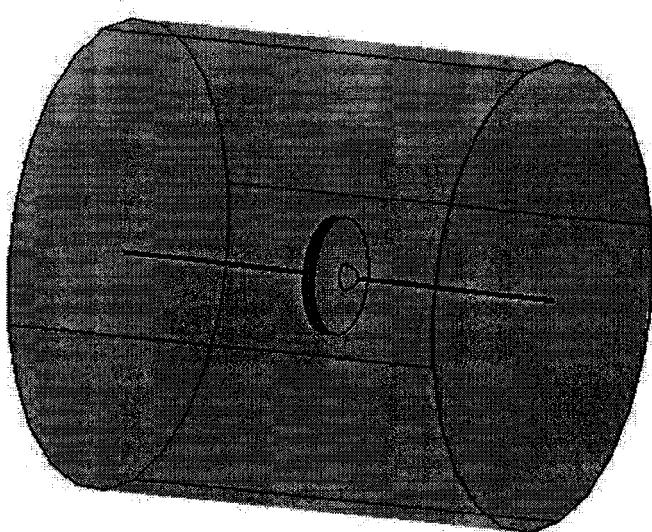


Figure 41 Visualisation du domaine de calcul tri-dimensionnellement

CHAPITRE 7

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le sujet de recherche traité dans ce mémoire concerne la technique d'anémométrie à la nacelle. La pierre d'assise de cette technique est l'utilisation de la corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$. Est-ce que cette méthode est valide en terrain complexe ? Quelle est l'influence pour une éolienne d'opérer sur un terrain complexe ? Est-ce qu'un modèle numérique simplifié permet d'obtenir une bonne approximation de cette corrélation ? Les sections suivantes décrivent les différents résultats obtenus, ainsi que les discussions permettant d'analyser ces questions.

7.1 Corrélation générale

Les manufacturiers fournissent à leurs clients une corrélation générale, indépendante de la direction, comme sur un terrain plat. Dans cette section, la même stratégie est adoptée, c'est-à-dire de trouver une seule corrélation à partir de tous les secteurs valides.

La procédure à suivre a été décrite à la section 4.3.3. Une fois que la synchronisation entre la tour et l'éolienne est effectuée, le filtrage des données doit être effectué. La corrélation entre $V_{nac} \leftrightarrow V_{ref}$ peut ensuite être trouvée.

7.1.1 Calibration de site

Afin d'obtenir la corrélation désirée, il est nécessaire de relier V_∞ à V_{ref} . Ceci est possible par l'intermédiaire de la calibration de site, effectuée avant l'installation des machines. Comme détaillés à la section 4.2, plusieurs critères restrictifs permettent d'éliminer les secteurs jugés invalides. Cela peut être dû à la présence d'obstacles, ou au fait que le nombre d'échantillons dans cette direction est insuffisant. Les résultats obtenus sont des corrélations linéaires de la forme $y = a + bx$. Pour tous les secteurs valides, ces dernières sont présentées à la figure 42 et sont détaillées au tableau V.

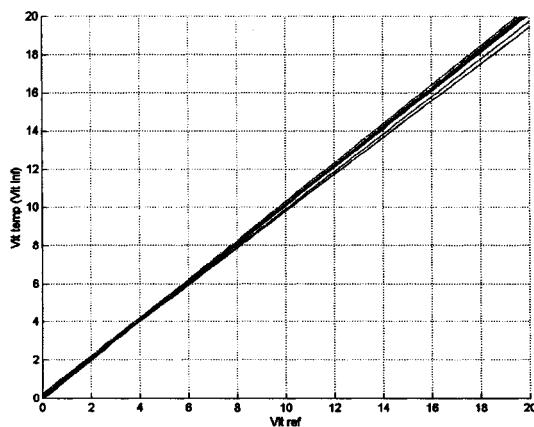


Figure 42 Corrélations provenant de la calibration de site

Tableau IV

Résumé des corrélations obtenues lors de la calibration de site

Directions (deg)	a	σ_a	b	σ_b	r
200 – 210	0.1178	0.3481	0.9812	0.0457	-0.943
210 – 220	0.0490	0.2560	1.0163	0.0338	-0.943
220 – 230	0.2368	0.2102	0.9973	0.0307	-0.951
230 – 240	0.1248	0.2496	1.0193	0.0405	-0.966
280 – 290	-0.0629	0.2287	1.0220	0.0329	-0.943
290 – 300	0.0326	0.1844	1.0053	0.0243	-0.935
300 – 310	0.0485	0.1989	1.0033	0.0238	-0.948
310 – 320	0.2424	0.1751	0.9593	0.0204	-0.942
320 – 330	0.1545	0.1909	0.9645	0.0208	-0.925
330 – 340	0.0185	0.2041	1.0141	0.0250	-0.937
340 – 350	0.1004	0.3168	1.0034	0.0490	-0.963

7.1.2 Corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ obtenue

Il suffit d'appliquer ces relations sur les données provenant de la tour référence, afin d'obtenir les valeurs de V_∞ pour chaque période de 10 minutes. En synchronisant avec les données de l'éolienne de référence, la corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ peut maintenant être trouvée.

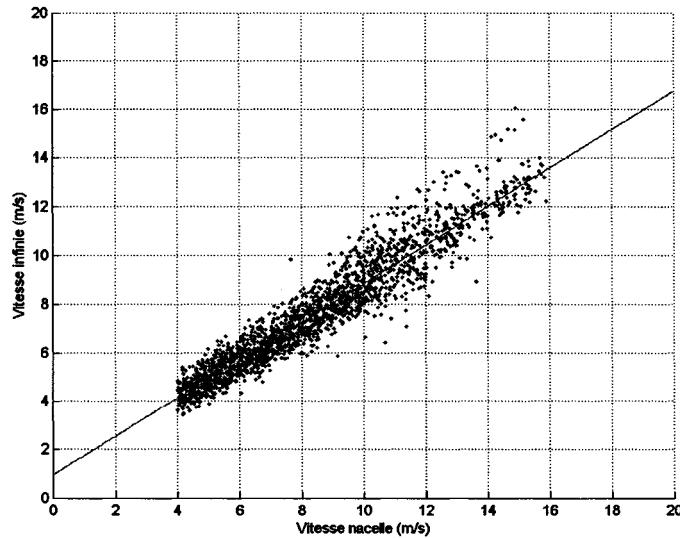


Figure 43 Données brutes et corrélation générale trouvée

La figure 43 illustre la nouvelle corrélation ainsi que le nuage de points associés. On dénote une forte accélération de l'écoulement autour de la nacelle, où une vitesse de 20m/s est enregistrée pour un écoulement libre d'environ 16.5m/s . Il est pertinent de noter que cette corrélation est obtenue uniquement lorsque l'éolienne est en fonction. Ceci signifie que même avec la présence du rotor en rotation, diminuant nécessairement la vitesse de l'écoulement, une accélération importante est présente.

L'équation de la corrélation générale obtenue est la suivante :

$$V_\infty = 0.953 + 0.791 V_{nac} \quad (7.1)$$

7.1.3 Comparaison avec Jeumont

Les manufacturiers d'éoliennes fournissent habituellement une telle corrélation pour chaque modèle d'éolienne, permettant d'appliquer l'anémométrie à la nacelle. Celle fournie pour la machine Jeumont J-48 est la suivante [36] :

$$V_\infty = 0.536 + 0.723 V_{nac} \quad (7.2)$$

Il est pertinent de comparer cette corrélation avec celle obtenue précédemment (figure 44).

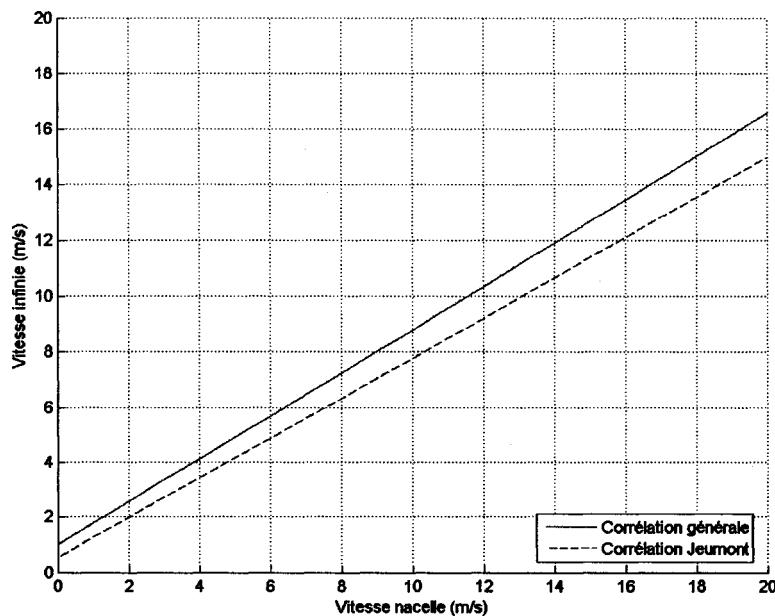


Figure 44 Comparaison entre les différentes corrélations

La comparaison entre les deux corrélations soulève plusieurs questions. En effet, leurs pentes sont similaires, mais le décalage vertical entre les deux est considérable. Pour une vitesse $V_{nac} = 20m/s$, les vitesses V_∞ associées sont respectivement de $14.99m/s$ (Jeumont) et de $16.58m/s$ (expérimentalement). Cette différence de $1.59m/s$ peut engendrer des conséquences énormes sur les tests de performance de l'éolienne.

7.1.3.1 Validation des corrélations avec les courbes C_P

En analysant les courbes C_P obtenues à partir des deux corrélations, il sera possible de déterminer la validité de ces dernières. Les deux courbes ainsi que la limite de Glauert sont illustrées à la figure 45.

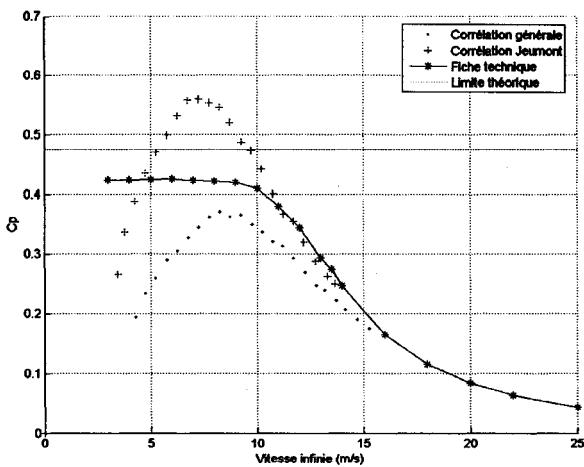


Figure 45 Courbes C_P mesurées à partir de deux corrélations

Tel que décrit à la section 2.4.3, les performances idéales réalistes d'une éolienne peuvent être calculées avec la limite de Glauert ainsi qu'en prenant en considération la traînée et le nombre fini de pale. Pour l'éolienne à l'étude, avec une finesse C_l/C_d de 100, la valeur de C_P maximale est de 0.5. Ceci correspond au maximum aérodynamique uniquement. À cela doit être retranché le rendement électrique, qui est habituellement évalué à 95%. La performance maximale réaliste de l'éolienne à l'étude serait donc un $C_P=0.475$.

Selon le graphique précédent, en utilisant la corrélation de Jeumont, des C_P de 0.566 son atteints. Cette information permet d'affirmer avec confiance que la corrélation fournie par Jeumont n'est pas valide pour cette éolienne. En effet, elle fournit des vitesses non-perturbées (V_∞) plus faible que la réalité, ce qui entraîne des valeurs de C_P trop importantes.

L'utilisation de la corrélation générale fournit des résultats qui sont plausibles, mais qui semblent faibles avec des valeurs de C_P maximales de 0.37.

Selon les fiches techniques de la Jeumont J-48, les C_P maximaux attendus sont de 0.425. Ces performances sont celles des machines lorsqu'elles sont positionnées sur un terrain plat. En considérant que le site à l'étude est complexe, que des problèmes d'ajustement sont survenus et que d'autres éoliennes peuvent produire un effet de sillage, les C_P de 0.37 obtenus sont tout à fait réalistes.

7.1.3.2 Influence de l'anémométrie à la nacelle sur le contrôle actif des éoliennes

Afin de mieux expliquer les faibles performances obtenues par l'éolienne à l'étude, une analyse du contrôle de l'éolienne sera effectuée.

Selon la théorie de l'élément de pale, pour une pale donnée, avec un angle de calage donné, les coefficients de performances sont régis par une courbe unique. Cela signifie que peu importe la vitesse V_∞ et la vitesse de rotation Ω , l'efficacité de la pale est déterminée par la même courbe. La figure 46 illustre un exemple d'une telle courbe, exprimée sous la forme de C_P en fonction de la vitesse spécifique λ .

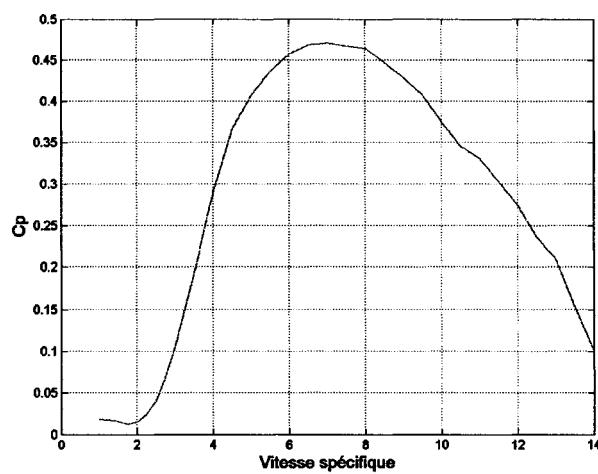


Figure 46 Exemple d'une courbe de performance aérodynamique pour une pale

Il est important de rappeler la définition de vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_\infty}$$

Ainsi, un événement de fort vent et Ω élevé, peut correspondre au même λ qu'un vent faible avec un Ω moins important. Pour ces deux événements, la valeur de C_P devrait être la même.

Selon la figure 17 (section 3.1.2), la vitesse spécifique optimale de l'éolienne est de 7.2. Cela signifie que le C_P optimal de la pale doit également survenir aux alentours de ce λ .

À partir des données provenant de l'éolienne, soit la vitesse lue à la nacelle V_{nac} , la vitesse de rotation Ω et la puissance, il est possible d'étudier son fonctionnement. Afin de calculer les vitesses spécifiques, il est nécessaire de connaître V_∞ . Dans le contrôleur (Data Logger) de l'éolienne, la fonction de transfert suivante est utilisée : $V_\infty = 0.7 + 0.7 V_{nac}$. Les valeurs obtenues avec cette fonction sont donc celles supposées réelles par l'éolienne. Elles sont comparées avec celles prédictes par le manufacturier à la figure 47. Les deux courbes concordent sur une bonne plage de vitesse. Cependant, pour des vitesses inférieures à 8 m/s, Ω devrait être ajusté de manière à avoir un $\lambda = 7.2$. En pratique, ce comportement n'est pas vraiment respecté. Cela signifie que le contrôle actif de la machine n'est pas bien ajusté.

De plus, il a été prouvé à la section précédente que la corrélation décrivant l'anémométrie à la nacelle est $V_\infty = 0.953 + 0.791 V_{nac}$, et non $V_\infty = 0.7 + 0.7 V_{nac}$. Les vitesses spécifiques calculées par le contrôleur l'éolienne sont donc erronées. Les valeurs obtenues avec la bonne corrélation sont également tracées sur la figure 47. Lorsque l'éolienne croit opérer à une vitesse spécifique de 7.2, elle est plutôt de 6.2. Ceci ne correspond plus au point d'opération optimal de la pale. Le système de contrôle force donc l'éolienne à opérer à un point qui n'est pas le bon. Ceci permet en partie d'expliquer pourquoi les performances de l'éolienne sont plus faibles que celles prévues.

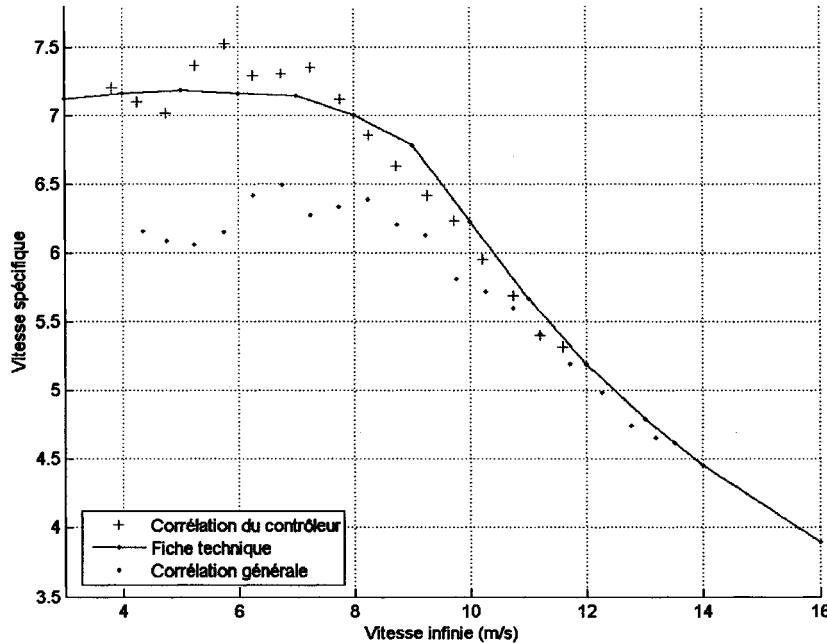


Figure 47 Vitesse spécifiques en fonction de V_∞ trouvées à partir de deux corrélations

Il est également intéressant d'étudier un autre graphique, celui des courbes C_P en fonction de λ (figure 48). Comme l'illustre la courbe provenant de la fiche technique, une seule valeur de C_P doit être présente pour chaque λ . Expérimentalement ce comportement n'est pas retrouvé. En effet, plusieurs valeurs de C_P sont présentes pour les valeurs de λ près de 7.2.

Ces points sont analysés afin de comprendre les raisons de ce comportement. Pour chacun, V_∞ , λ et C_P sont détaillés au Tableau V.

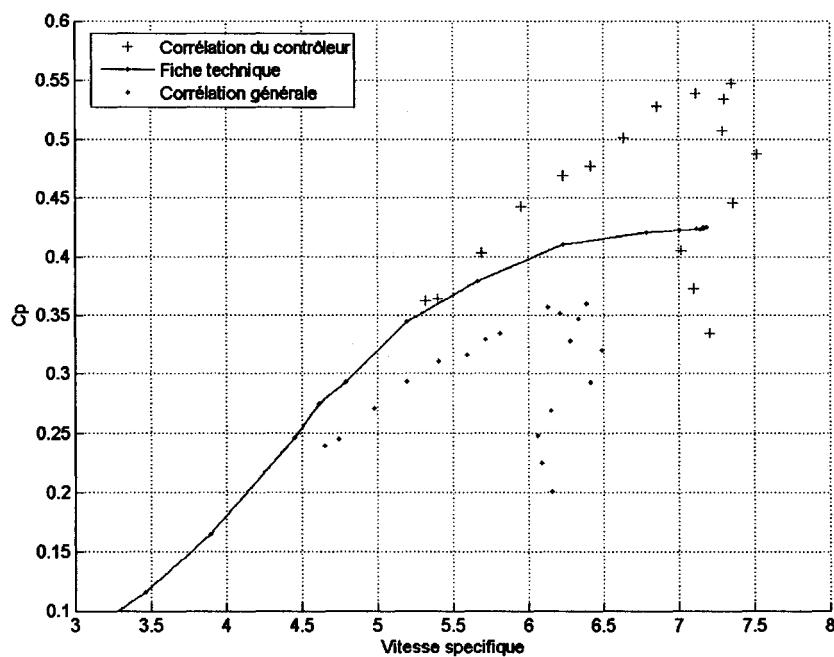
On réalise que les valeurs de C_P faibles sont associées à des V_∞ faibles. Ceci peut provenir du fait que la machine est contrôlée activement par la vitesse de rotation du rotor. Lorsque les vitesses de vent diminuent, le rotor doit être freiner afin d'opérer au point optimal, soit à des $\lambda = 7.2$. Une certaine quantité d'électricité est nécessaire pour ralentir et maintenir

Tableau V

Résumé des corrélations obtenues lors de la calibration de site

V_∞ (m/s)	λ	C_P
3.46	7.20	0.26
3.77	7.23	0.33
4.25	7.22	0.38
4.73	7.32	0.43
5.24	7.59	0.47
5.75	7.66	0.49
6.24	7.55	0.53
6.74	7.49	0.55
7.24	7.42	0.55
7.76	7.26	0.55

le rotor à cette vitesse. Ceci permettrait d'expliquer pourquoi les C_P obtenus à basses vitesses sont plus faibles.

Figure 48 C_P en fonction de la vitesse spécifique trouvées à partir de deux corrélations

7.2 Influence du terrain complexe

Jusqu'à présent, une corrélation générale a été utilisée, supposant quelle est valide pour toutes les directions. Cette approche est justifiée pour un terrain idéal. Dans ce cas, la corrélation serait effectivement la même, peu importe la direction du vent. Cependant, ce n'est pas applicable sur le site à l'étude. Même en enlevant les secteurs où des obstacles sont présents, les propriétés des secteurs valides varient considérablement. Les différences sont principalement dues à l'élévation et l'inclinaison variable du terrain, à la rugosité de la surface ainsi qu'à l'intensité de la turbulence.

Pour ces raisons, en terrain complexe, l'utilisation d'une corrélation générale peut entraîner des erreurs. Il est donc pertinent de calculer une corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ pour chaque secteur valide. Pour ce faire, il suffit de classer les données en secteurs de 10 degrés et d'appliquer pour chacun la même procédure que précédemment. L'analyse de ces différences permettra de mieux quantifier l'effet du terrain complexe.

Comme le nombre de données disponibles de l'éolienne de référence est limité, seulement les secteurs contenant assez de données seront étudiés. Les résultats obtenus pour ces derniers sont présentés à la figure 49. Toutes ces corrélations sont regroupées sur un graphique (figure 50) sur lequel a été superposé la corrélation générale.

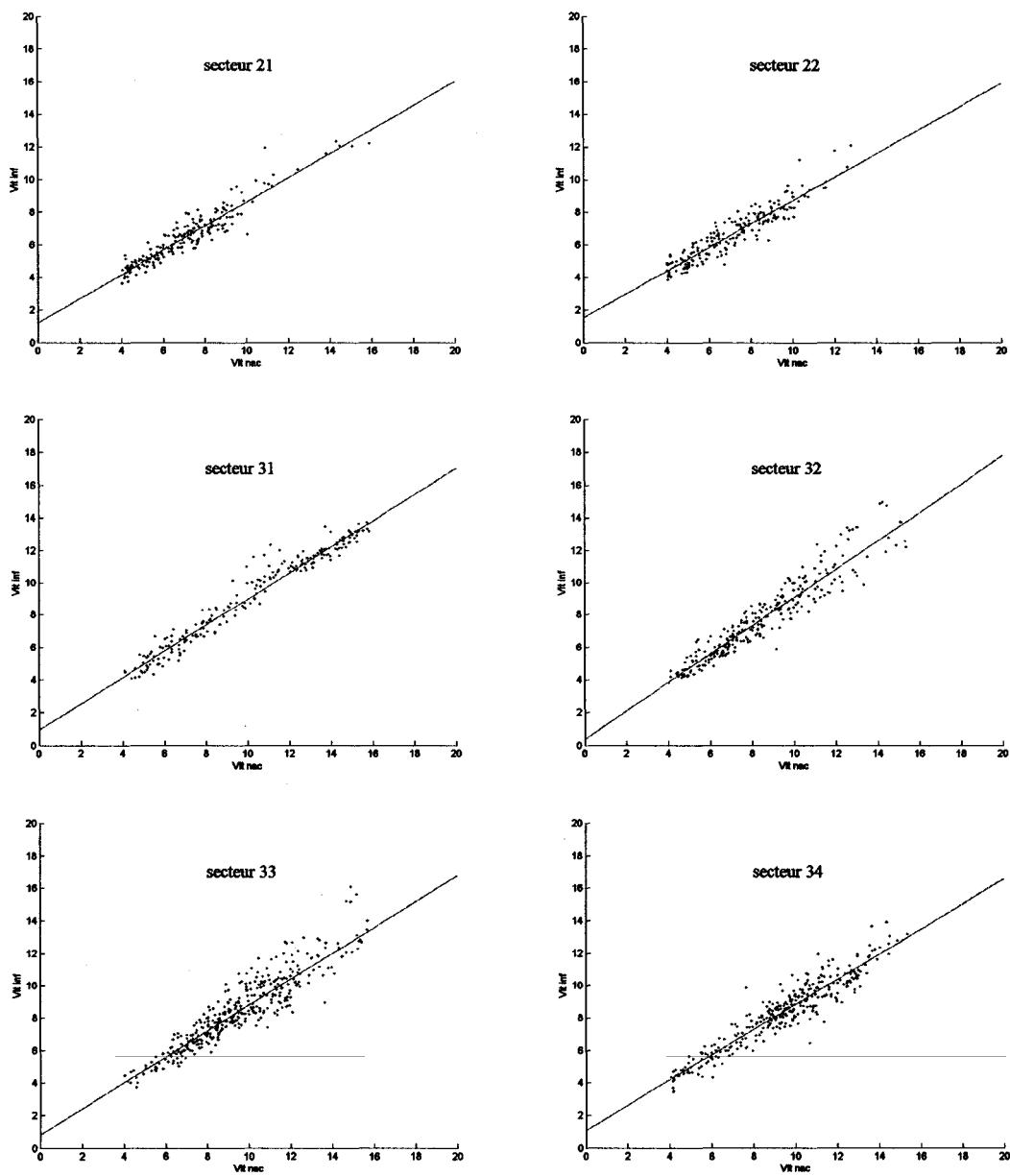


Figure 49 Graphiques des données et des corrélations pour les secteurs valides

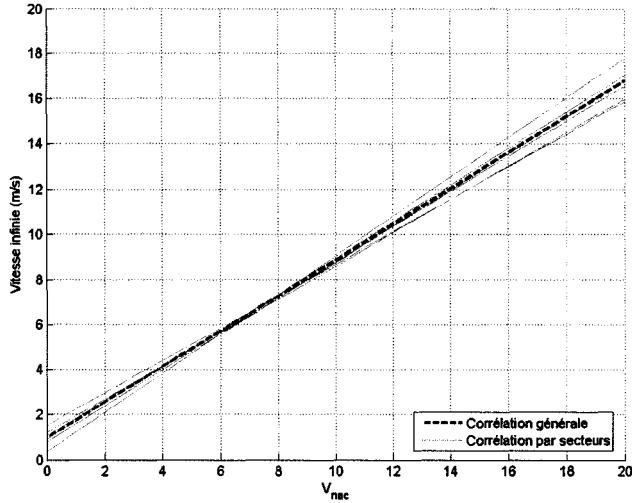


Figure 50 Comparaison entre les corrélations des secteurs valides ayant un nombre de points suffisants et la corrélation générale

Des écarts considérables sont présents entre les corrélations des différents secteurs (figure 50). Reste à savoir quelle imprécision est engendrée par l'utilisation d'une corrélation générale, plutôt que celles par secteurs. Pour des $V_{nac} = 4m/s$ et $V_{nac} = 16m/s$, les valeurs de V_∞ sont trouvées selon les deux méthodes. L'écart entre ces résultats est calculé et exprimé en pourcentage, ces derniers sont résumés dans le tableau VI.

Tableau VI

V_∞ et écarts obtenus entre l'utilisation de la corrélation générale et de celles par secteurs

Secteur	Orientation en degré	$V_{nac} = 4m/s$			$V_{nac} = 16m/s$		
		corrélations par secteur	corrélation générale	Écart (%)	corrélations par secteur	corrélation générale	Écart (%)
21	200-209	4.1721	4.1157	1.37	13.0316	13.0630	4.20
22	210-219	4.4013	4.1157	6.94	12.9982	13.0630	4.45
31	300-309	4.1447	4.1157	0.07	13.7938	13.0630	1.40
32	310-319	3.8442	4.1157	6.60	14.2952	13.0630	5.09
33	320-329	3.9870	4.1157	3.13	13.5638	13.0630	0.28
34	330-339	4.1725	4.1157	1.38	13.4521	13.0630	1.11

Des écarts allant jusqu'à 6.94% pour des vitesses de $4m/s$, et de 5.09% pour des vitesses de $16m/s$ sont atteints. Ces écarts représentent directement des erreurs qu'entraîne l'utilisation d'une corrélation générale. Ces dernières sont non négligeables sur les mesures instantanées. Il est maintenant pertinent d'étudier les conséquences sur les tests de performance ainsi que sur la prévision du productible.

7.2.1 Influence sur les tests de performance

Le but principal de la technique d'anémométrie à la nacelle est de pouvoir effectuer des tests de performance sur toutes les éoliennes d'un parc éolien. Il est donc pertinent de déterminer quelles sont les répercussions sur les courbes de puissance, entraînées par les écarts entre les corrélations.

Parmi les mêmes 6 secteurs que ceux utilisés précédemment (secteurs valides et nombre de données suffisantes), les deux corrélations extrêmes sont utilisées dans un premier temps. Pour ces deux secteurs (22 et 32), les courbes de puissance associées sont tracées à la figure 51. Encore une fois, le nombre restreint de données limite les courbes de puissance à des vitesses entre 0 et $12m/s$.

La différence entre les deux courbes de puissance est illustrée sous la forme de pourcentage à la figure 52. Les différences de puissance obtenues sont énormes, pouvant atteindre 40% pour des basses vitesses, et se situant à environ 15% pour des vitesses supérieures à $9m/s$.

Ces différences sont celles obtenues entre les deux corrélations extrêmes. En réalité, pour vraiment quantifier l'effet du terrain sur les courbes de puissance, il faut comparer celles obtenues avec la corrélation générale et avec l'utilisation de corrélations par secteur. Ces courbes sont présentées à la figure 53.

Encore une fois, les écarts en pourcentage sont illustrés à la figure 54. Évidemment, les différences sont moins marquées que dans le cas précédent. Tout de même, les écarts varient entre -10% et 10%, ce qui est considérable. Le caractère irrégulier des écarts provient de l'utilisation des différentes corrélations par secteurs.

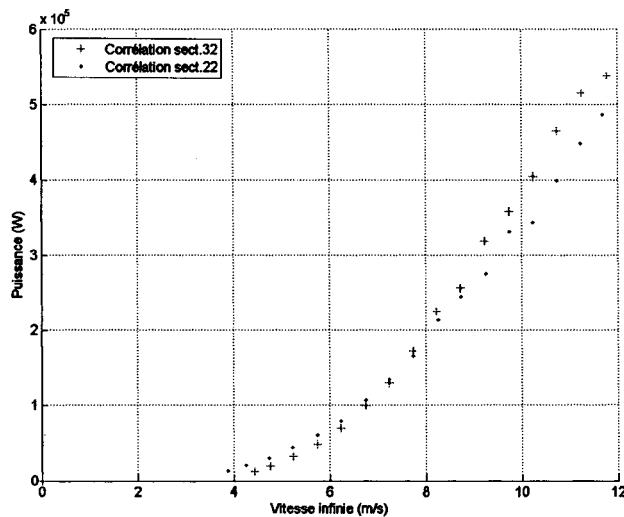


Figure 51 Comparaison entre les courbes de puissance obtenues avec les corrélations des secteurs extrêmes 22 et 32

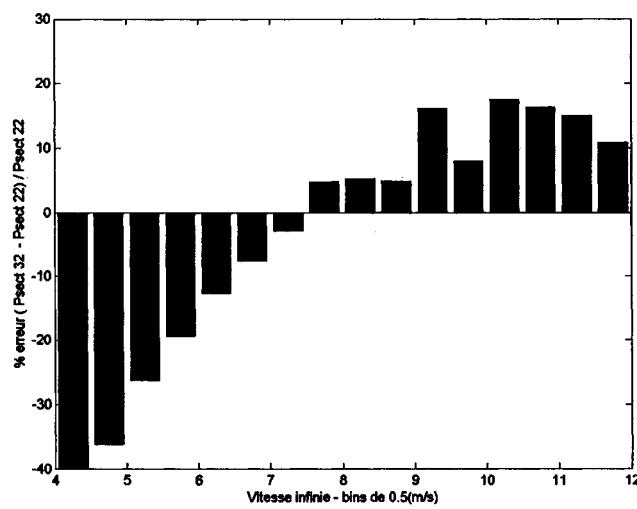


Figure 52 Écart sur les puissances (%) obtenus avec les corrélations des secteurs extrêmes 22 et 32

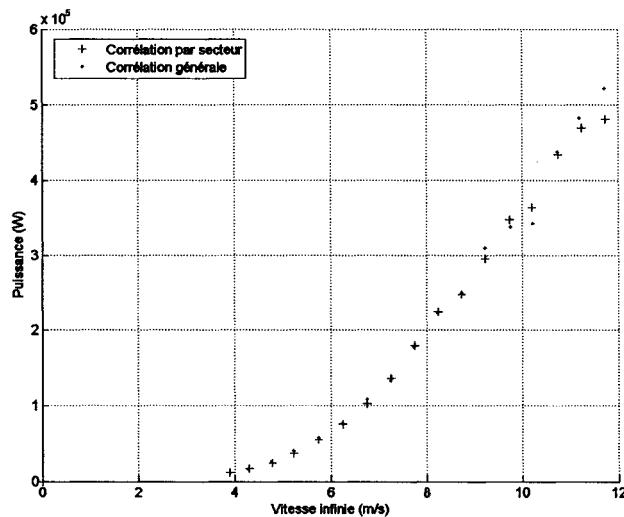


Figure 53 Comparaison entre les différentes courbes de puissance obtenues avec la corrélation générale et celle par secteur

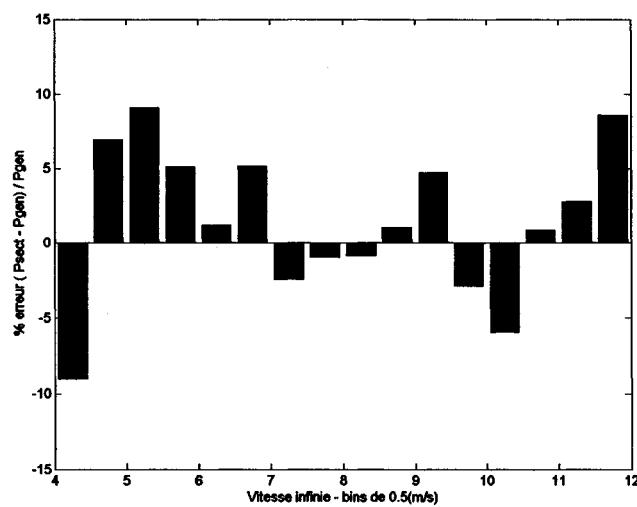


Figure 54 Écart sur les puissances (%) obtenus avec la corrélation générale et celle par secteur

7.2.2 Influence sur la prévision du productible

Les courbes de puissance sont utilisées pour valider les performances de l'éolienne, mais également pour faire l'évaluation de son productible. La production énergétique annuelle (Annual Energy Production AEP) est souvent utilisée pour y parvenir. Cette dernière consiste à évaluer la quantité d'énergie annuelle qui sera produite par l'éolienne, sur un site précis. Pour ce faire, l'évaluation du potentiel du site doit être connue. En combinant ces valeurs avec la courbe de puissance de la machine, la AEP peut être calculée.

Deux courbes de puissance différentes ont été trouvées à la section précédente. Il est maintenant intéressant de mesurer l'écart de productible entraîné par l'utilisation de ces deux courbes.

7.2.2.1 Évaluation du potentiel du site

Les caractéristiques du vent du site à l'étude doivent être connues avec précision afin de produire une estimation de qualité. Typiquement, une année de données est nécessaire à l'analyse. À partir de la tour de référence, assez de données sont disponibles afin de procéder à l'évaluation du potentiel. Les vitesses sont divisées en tiroirs de $0.5m/s$, pour lesquels sont calculés le nombre d'heures par année où ces événements surviennent. Ces résultats sont présentés à la figure 55.

7.2.2.2 Calcul de la production énergétique annuelle

Toutes l'information nécessaire au calcul de la production énergétique annuelle est maintenant disponible. Les deux courbes de puissance d'intérêt sont celles obtenues avec la corrélation générale et celles par secteur (figure 53). En les multipliant par la distribution annuelle de vent, on obtient le AEP (figure 56).

Comme les courbes de puissances sont disponibles pour des vents jusqu'à $12m/s$, les AEP qui seront trouvées ne correspondront pas à celles réellement produites par les éoliennes sur le terrain. Cependant, comme les deux courbes de puissance ont la même plage de vitesse, l'analyse comparative sera un bon indicateur des erreurs associées.

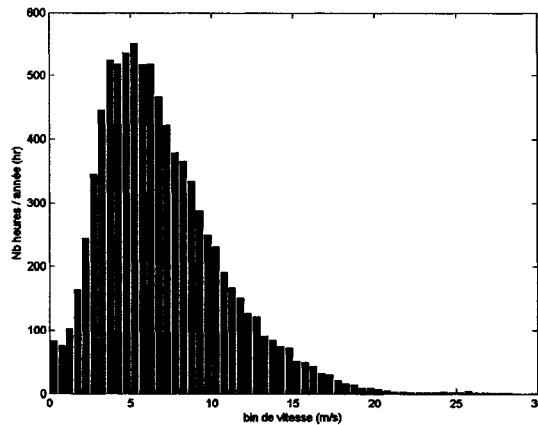


Figure 55 Distribution annuelle du vent sur le site de Rivière-au-Renard

Les valeurs des AEP sont présentées au Tableau VII.

Tableau VII

Valeur des productions énergétiques annuelles calculées avec des corrélations différentes

	AEP ($MW \cdot hr$)
Corrélation générale	1019.2
Corrélation par secteur	1012.6

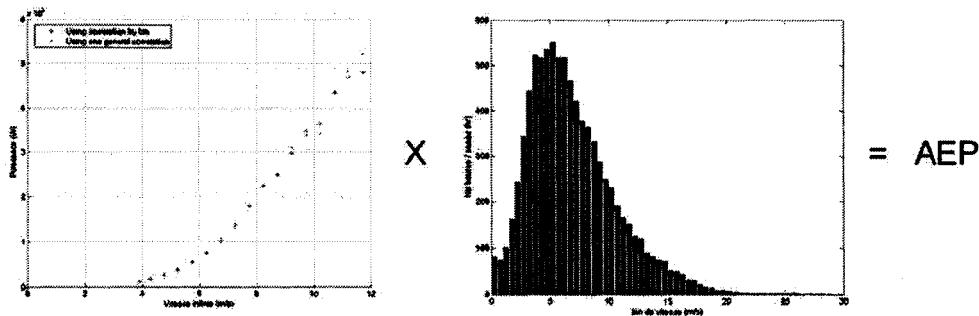


Figure 56 Calcul de la production énergétique annuelle (AEP)

$$\Delta AEP = \frac{AEP_{générale} - AEP_{secteur}}{AEP_{secteur}} = 0.652\%$$

La différence calculée dans le productible ΔAEP est assez faible, soit de 0.652%, et ce malgré des écarts allant jusqu'à 10% sur les courbes de puissance. C'est un effet compensatoire, causé par des ΔP parfois positifs et parfois négatifs (figure 54), qui explique cet écart faible.

De plus, la plage de vitesse étudiée est seulement de 0 à 12m/s. Comme on peut voir à la figure 50, à partir de 8m/s, l'écart entre les corrélations augmente avec la vitesse. De plus, une partie non négligeable de l'énergie disponible dans le vent est présente pour des vitesses supérieures à 12m/s. On peut donc supposer qu'en étudiant toute la plage de vitesse, les écarts de AEP seraient plus importants.

7.2.3 Influence sur le contrôle de la machine

L'éolienne Jeumont J-48 a une vitesse de démarrage de 3 m/s et une vitesse d'arrêt de 25m/s. Comme mentionné à la section 1.3, pour des vents plus faibles, l'éolienne consomme plus d'énergie qu'elle en produit. De plus, il est inutile de faire la conception pour des vents supérieurs à 25 m/s, car ils sont peu fréquents, et nécessiteraient un surdimensionnement de toutes les composantes. Les vitesses infinies en question sont calculées à partir de la lecture de V_{nac} et de la corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ utilisée.

La corrélation utilisée aura donc une influence sur le contrôle de la machine. Tel que présenté au début de la section 7.2, les corrélations varient en fonction de la direction. Si la corrélation générale est implantée dans le contrôleur de l'éolienne, les conséquences varieront également en fonction de la direction.

Lorsque la corrélation générale est implantée, les lectures de V_{nac} associées à des V_∞ de 3 et 25m/s sont résumées dans le Tableau VIII.

Tableau VIII

 V_{nac} associée à différentes V_∞

	$V_\infty = 3 \text{ (m/s)}$	$V_\infty = 25 \text{ (m/s)}$
Corrélation générale	2.59	30.42

Ces valeurs de vitesses seront comparées avec celles obtenues lors de l'utilisation des corrélations des deux secteurs extrêmes 22 et 32. Le but est de calculer quelles seront réellement les valeurs de V_∞ pour ces deux secteurs lorsque l'éolienne atteindra une des deux limites. Le Tableau IX résume les résultats obtenus.

Tableau IX

 V_∞ trouvées en utilisant différentes corrélations

	$V_{nac} = 2.59 \text{ (m/s)}$	$V_{nac} = 30.42 \text{ (m/s)}$
Corrélation générale	3.00	25.00
Corrélation secteur 22	2.62	23.33
Corrélation secteur 32	3.39	26.85

Secteur 22

Pour ce secteur, la vitesse de V_∞ sera égale à $2.62m/s$ lorsque le contrôle de l'éolienne ordonnera le démarrage. Hors, on sait que pour des vitesses inférieures à $3m/s$, l'éolienne consomme de l'énergie. Une consommation inutile d'électricité sera alors perdue jusqu'à ce que V_∞ atteigne réellement $3m/s$.

D'autre part, la vitesse de V_∞ sera égale à $23.33m/s$ lorsque l'éolienne sera arrêtée par mesure d'urgence. L'éolienne sera donc arrêtée prématurément, perdant ainsi une production d'énergie potentielle.

Secteur 32

Pour ce secteur, la vitesse de V_∞ sera égale à $3.39m/s$ lorsque le contrôle de l'éolienne ordonnera le démarrage. Cependant, une production d'électricité est possible à partir de $3m/s$. Une perte de production survient alors.

De plus, la vitesse de V_∞ sera égale à $26.85m/s$ lorsque l'éolienne sera arrêtée par mesure d'urgence. La limite pour laquelle l'éolienne a été conçue est cependant de $25m/s$. Cette opération à des grandes vitesses peut entraîner des bris dûs aux surcharges.

7.3 Validation à l'aide du modèle numérique

Les résultats expérimentaux démontrent qu'une accélération de l'écoulement est présente autour de la nacelle. Une analyse numérique est effectuée afin de mieux comprendre l'importance des différents paramètres.

7.3.1 Accélération autour de la nacelle

Dans un premier temps, l'étude porte sur l'écoulement de l'air autour de la nacelle uniquement, sans prendre en considération le rotor. Ceci correspond au cas spécifique où l'éolienne est à l'arrêt, et qu'aucune pale n'est positionnée à la verticale, laissant libre l'écoulement face à l'anémomètre. Cette première étude est simple, et permettra de valider rapidement le maillage choisi (voir section 2.1.1) et de déterminer les différentes constantes et propriétés du logiciel.

La première simulation numérique, sans rotor, permet de trouver également une accélération autour de la nacelle (figure 57).

La distribution des vitesses axiales permet de bien visualiser le ralentissement de l'écoulement en amont, dû à la présence d'un obstacle. Puis le fluide est accéléré autour de la nacelle pour finalement décélérer en aval de l'obstacle. Une zone recirculation, où des vitesses négatives sont enregistrées, est présente à l'arrière de la nacelle.

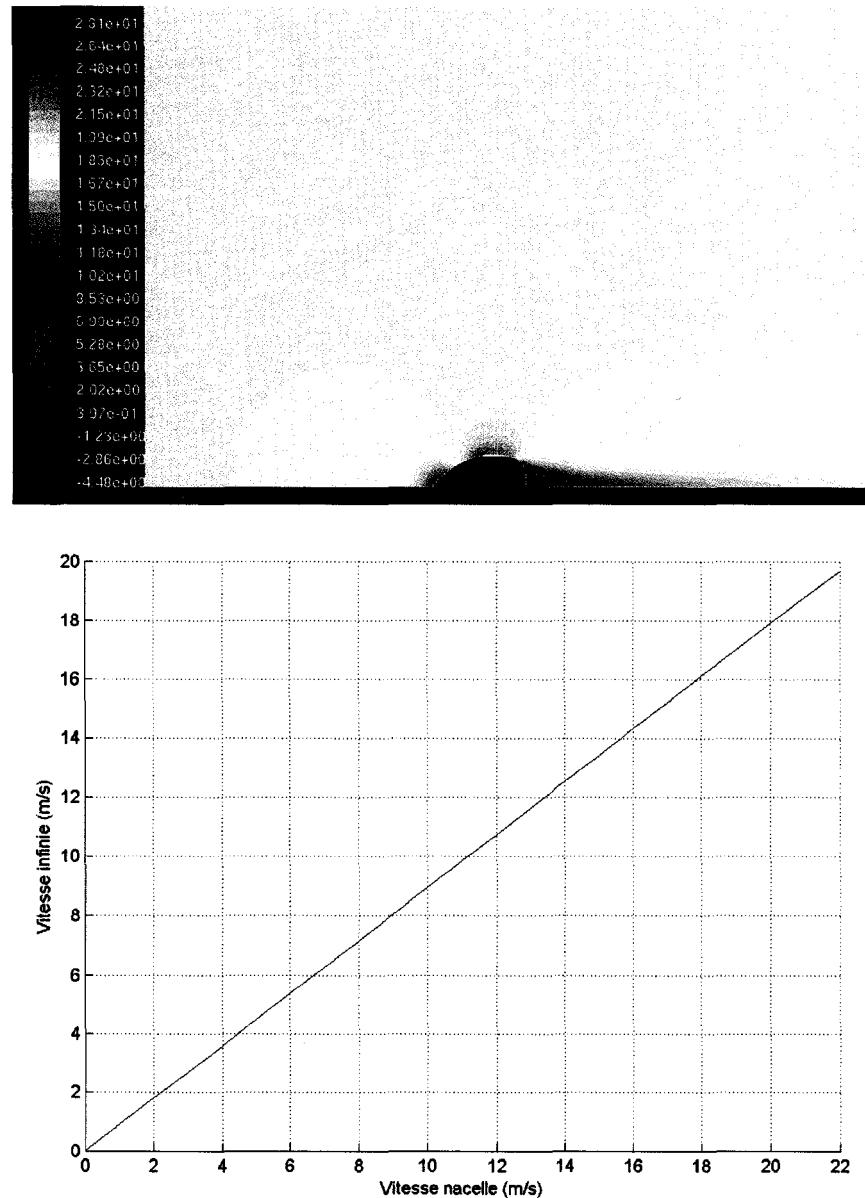


Figure 57 Distribution des vitesses axiales et corrélation sans rotor

7.3.2 Influence du rotor

Tout est maintenant en place pour simuler spécifiquement le rotor de la Jeumont J-48, avec un saut de pression qui varie pour chaque élément de pale. Pour ce faire, les formules déve-

loppées à la section 6.3 seront implantées dans le code. C'est dans une *fonction utilisateur* (FU) externe à Fluent que sera calculé la chute de pression.

La géométrie de la pale est connue, soit la corde c et l'angle de gauchissement θ_T , de l'emplanture jusqu'à l'extrémité. Également, pour les quatre différents profils utilisés, les caractéristiques aérodynamiques de portance (C_l) et de traînée (C_d) sont connues. La figure 58 illustre la forme générale de la pale.

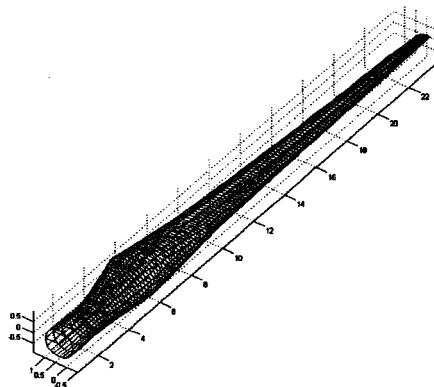


Figure 58 Forme générale de la pale de la Jeumont J-48

Pour chaque élément du maillage situé sur le rotor, la vitesse axiale de l'écoulement est calculée. Comme le rotor est situé sur une face, la moyenne des deux vitesses adjacentes est utilisée. La vitesse circonférentielle peut également être obtenue à partir de la position de l'élément et de la vitesse de rotation. L'angle relatif de l'écoulement φ est ainsi obtenu. Pour chacun des éléments de pale, les valeurs de θ_T , c , C_l et C_d peuvent être interpolées. Finalement, la chute de pression pour cet élément est calculée.

Le premier cinquième de la pale, à partir de l'emplanture est constitué d'un profil cylindrique. Aucune portance sera générée par cette section, cependant, une certaine traînée sera engendrée. La majorité de l'énergie cinétique du vent sera donc captée par le reste de la pale. La chute de pression est donc beaucoup moins grande dans la première section. Un effet venturi se crée entre la nacelle et le début des sections de pales profilées, accélér-

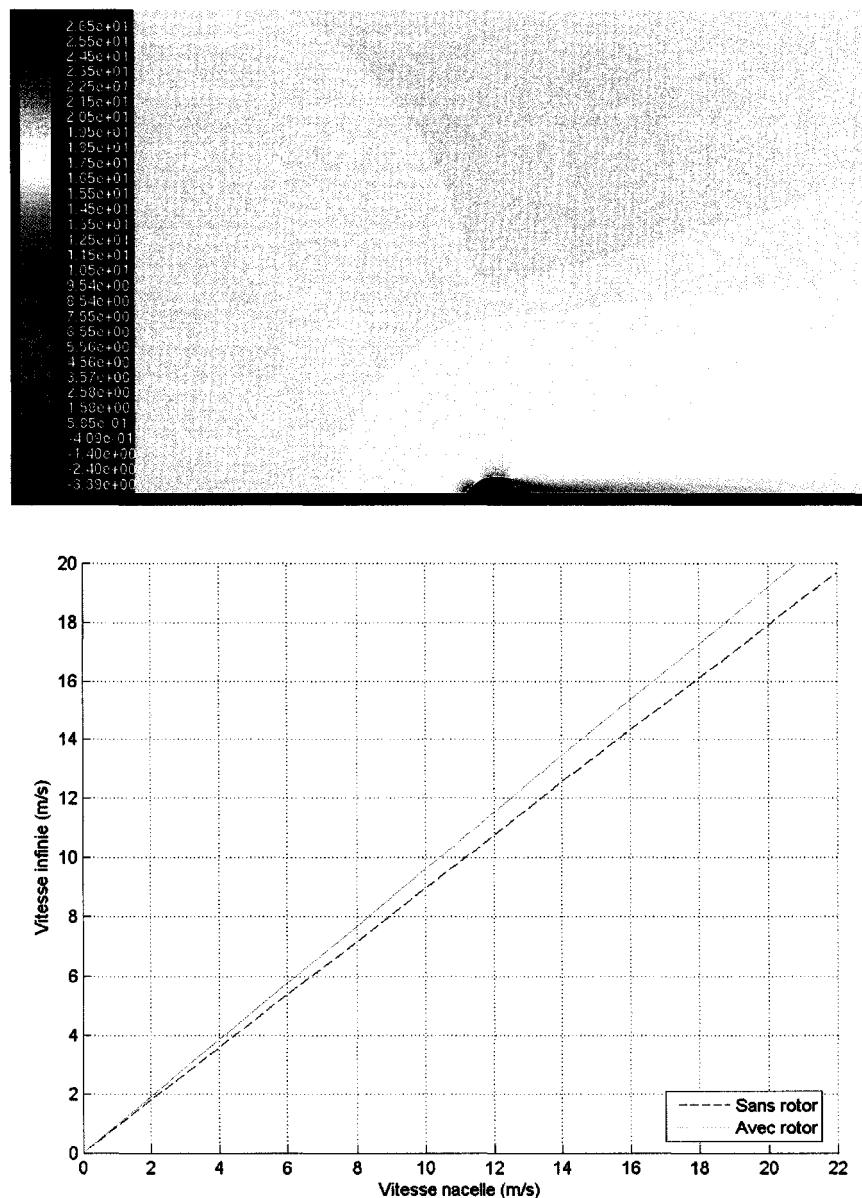


Figure 59 Distribution des vitesses axiales et corrélation avec rotor à Δp variable

rant ainsi l'écoulement dans la section cylindrique (figure 59). Cet effet n'est pas présent lorsque l'on pose l'hypothèse d'un Δp constant.

La corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$ trouvée est comparée à celle de la nacelle sans rotor (figure 59). Comme prévu, l'écoulement sera encore accéléré autour de la nacelle, mais la présence du rotor diminue cet effet.

7.3.3 Influence de la partie cylindrique

Jusqu'à présent, les valeurs de C_d utilisées pour la section cylindrique étaient de 1.2. Cependant, tel que mentionné à la section 5.3.3, le C_d varie en fonction du nombre de Reynolds. La figure 60 illustre les résultats obtenus en implantant les valeurs appropriées de C_d .

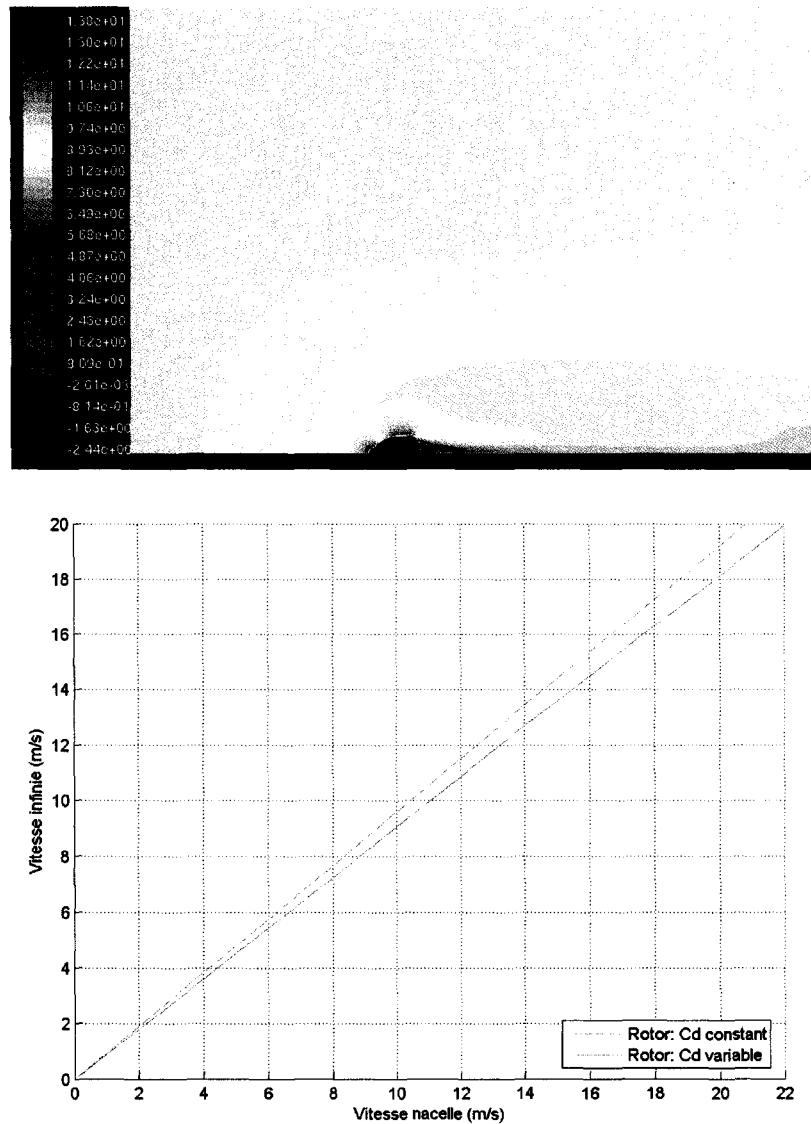


Figure 60 Distribution des vitesses axiales et corrélation obtenue avec rotor C_d variable ou constant pour la partie cylindrique

Dans l'étude, le AR est faible et l'écoulement est habituellement caractérisé par un nombre de Reynolds supérieur à $4.6e^5$. Ceci explique pourquoi le coefficient de traînée de la partie cylindrique est inférieur à 1.2. L'effet d'accélération est donc beaucoup plus marqué que dans les simulations précédentes.

7.3.4 Résumé des corrélations

La figure 61 résume les différentes corrélations obtenues numériquement jusqu'à présent. Malgré toutes les modifications effectuées au modèle numérique, un écart considérable est présent avec celles trouvées sur le terrain. Finalement, les investigations quant à la source d'erreurs du modèle numérique ont abouti dans une toute autre direction.

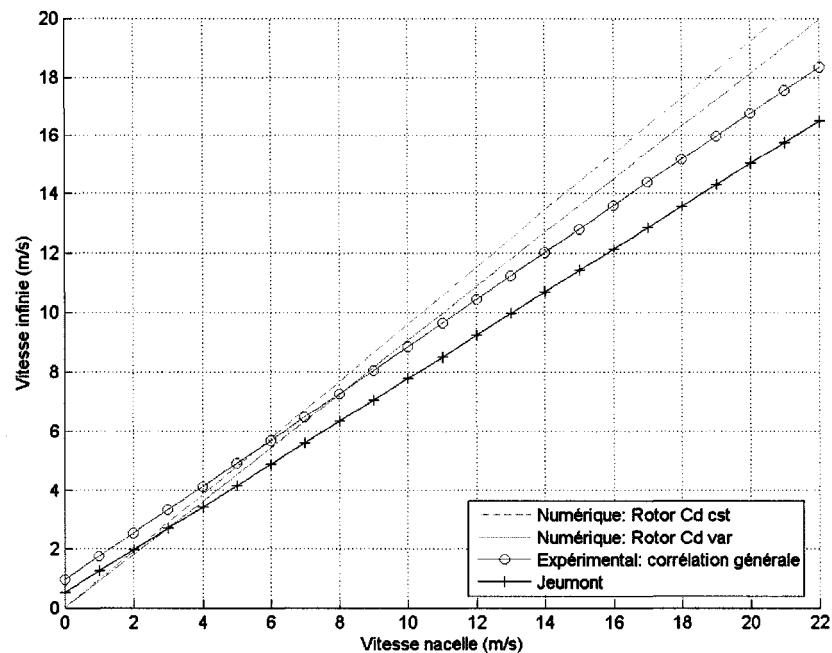


Figure 61 Comparaison entre les corrélations numériques et expérimentales

7.3.5 Influence du système de fixation de l'anémomètre

Une des possibilités potentielles d'erreurs est que la géométrie à l'étude diffère de la réalité. Depuis le début de cet ouvrage, l'hypothèse que le système d'attache de l'anémomètre à la nacelle ne perturbe pas l'écoulement est utilisée. En effet, habituellement dans le domaine éolien, la norme IEC 61400-12 est utilisée. Cette dernière régit des critères rigoureux pour les systèmes de fixation, permettant d'utiliser cette hypothèse. Par exemple, l'anémomètre doit être situé à au moins $15D$ de la barre de soutien horizontale (D est le diamètre de cette barre). Comme l'illustre la figure 62, la configuration de l'éolienne à l'étude ne respecte aucunement ces critères.

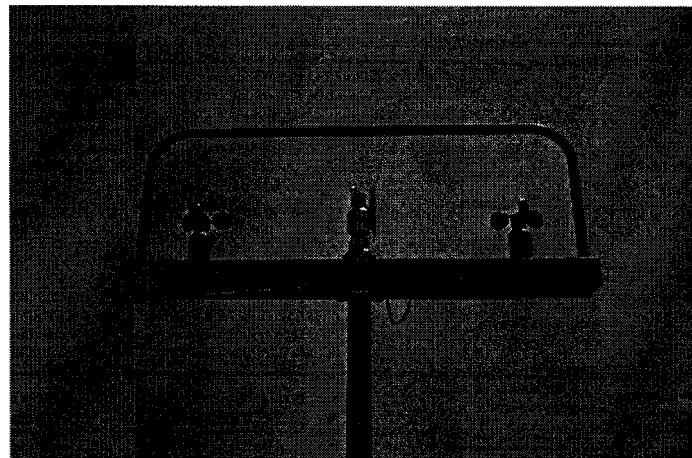


Figure 62 Photo du système d'attache de l'anémomètre à la nacelle sur la J-48

L'hypothèse utilisée jusqu'à maintenant est donc invalide. La barre de soutien en U, de dimensions non-négligeables, créera un effet d'obstruction sur l'écoulement au niveau de l'anémomètre. Un nouveau maillage est créé, incluant cette barre. Ce dernier est similaire à l'ancien maillage, mais est plus raffiné autour du système de fixation. Les résultats des simulations numériques effectuées sont présentés à la figure 63.

Les dimensions de la barre en U ainsi que son emplacement ne sont pas connus avec précision. Deux positions (U1 et U2), distantes de 60cm , ont donc été étudiées. Les résultats présentés à la figure 64 démontrent qu'en incluant le système de fixation, l'effet d'accélé-



Figure 63 Distribution des vitesses axiales autour de la nacelle, avec barre en U

ration de l'air est encore plus marqué. Ainsi, les résultats numériques se rapprochent plus de ceux expérimentaux. Bien que la distance entre les deux positions étudiées soit petite, les effets sur les corrélations sont considérables.

Le modèle numérique développé permet de mieux comprendre quels sont les paramètres déterminants, influençant l'anémométrie à la nacelle. Cependant, les corrélations numériques ne concordent pas parfaitement avec celles trouvées expérimentalement. Plusieurs raisons permettent d'expliquer ces différences :

- les dimensions ainsi que la position du système de fixation ne sont pas connus avec précision. Tel qu'analysé précédemment, une petite variation de ces paramètres entraîne des différences considérables dans les corrélations
- dans le système de fixation, seule la barre en U a été modélisée, sans tenir compte du tube entourant les instruments (voir figure 62). La présence du tube modifiera également l'écoulement.
- l'utilisation d'un modèle axisymétrique n'est pas toujours représentatif de la réalité :
 - le système de fixation modélisé aura alors l'aspect d'un beigne mince entourant la nacelle. De plus, les tubes latéraux ne peuvent être modélisés.
 - l'écoulement à l'entrée du domaine devrait avoir un profil logarithmique. Dû au modèle, il doit être uniforme.

- sur un terrain complexe, l’écoulement a souvent un angle d’inclinaison, ce qui ne peut être représenté
- les corrélations numériques passeront toujours par le point (0,0). Cependant, les corrélations expérimentales trouvées, ainsi que celles fournies par Jeumont, ont des ordonnées à l’origine qui sont non-négligeable
- la calibration de l’anémomètre à la nacelle n’est plus valide lorsqu’il est installé avec ce système d’attache. Si ce dernier ne peut être modifié, la calibration devrait être effectuée avec ce système.

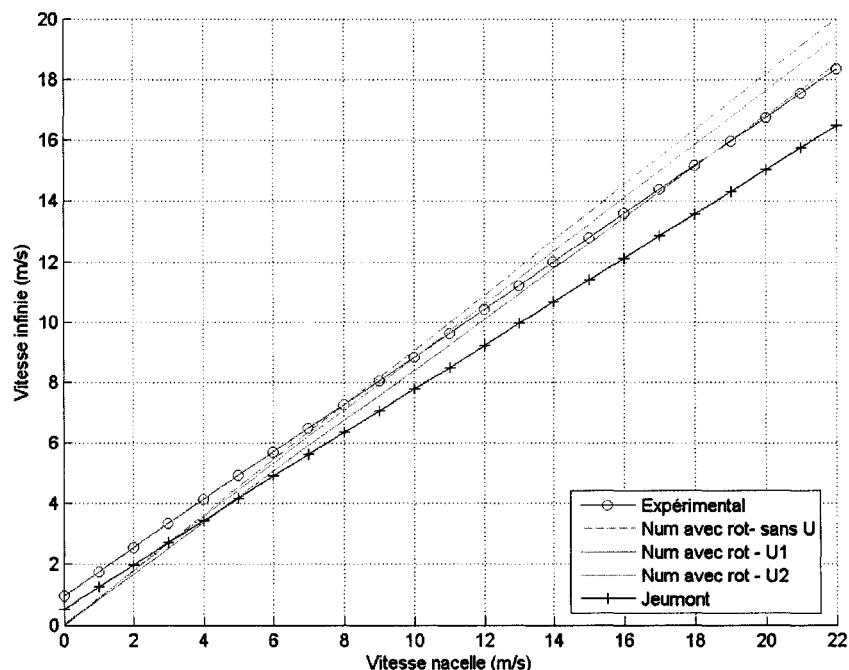


Figure 64 Comparaison entre les corrélations expérimentales et numériques avec barre en U

CHAPITRE 8

CONCLUSION

8.1 Résumé du mémoire

Depuis la dernière décennie, l'énergie éolienne s'est imposée comme étant une des solutions les plus prometteuses aux problèmes d'accroissement des gaz à effet de serre ainsi qu'à la diminution des réserves de carburants fossiles. Le désir d'installer les parc éoliens sur les sites les plus venteux expliquent pourquoi ils sont souvent situés sur des terrains montagneux, dits complexes. Les normes utilisées dans l'industrie sont précises et détaillées pour des terrains plats, idéaux. Les performances des éoliennes peuvent ainsi être calculées et comparées à celles garanties par le manufacturier. Cependant, pour les machines installées sur des terrains complexes, les normes sont inadéquates et imprécises. En effet, plusieurs hypothèses valides sur des terrains plats sont également utilisées en terrain complexe, ce qui entraîne des erreurs importantes.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la validité de la technique d'anémométrie à la nacelle en terrain complexe. Cette technique permet de calculer les performances de toutes les éoliennes d'un parc. La pierre d'assise de cette technique est d'utiliser pour toutes les éoliennes, une corrélation entre la lecture de l'anémomètre situé à la nacelle et la vitesse non perturbée de l'écoulement (V_∞), obtenue sur la machine de référence. Cette méthode est relativement précise sur des terrains idéaux, mais très peu d'études ont évalué son efficacité sur terrain complexe.

Afin d'étudier cette problématique, des analyses expérimentales et numériques ont été effectuées. Sur le site de Rivière-au-Renard en Gaspésie, des installations expérimentales ont été déployées. Plus précisément, trois tours météorologiques, instrumentées à quatre hauteurs différentes, ont été installées autour de l'éolienne de référence du Parc Éolien Rivière-au-Renard (PÉR). De plus, une tour de référence était déjà présente sur le site. Ce site très complexe est idéal pour mener cette étude. En plus des données des quatre

tours météorologiques, celles provenant de l'éolienne de référence étaient également disponibles.

Au début du mémoire, un résumé des procédures actuelles de tests de performances a été effectué. Une calibration de site permet de connaître en tout temps V_∞ à la position de l'éolienne de référence. Ceci est possible en établissant une corrélation avec la tour de référence. Par la suite, les performances de cette machine peuvent être estimées à partir de cette vitesse et de sa puissance de sortie. Cependant, sur un terrain complexe, les performances de toutes les autres éoliennes du parc ne peuvent être mesurées car V_∞ diffère. Ce que propose l'anémométrie à la nacelle est de trouver, pour l'éolienne de référence, une corrélation entre V_{nac} et V_∞ . Cette relation peut être construite à l'aide d'une calibration de site. Par la suite, cette corrélation est appliquée sur toutes les autres machines du parc. Comme la géométrie de toutes les éoliennes est la même, cette hypothèse est acceptable si l'on suppose que la qualité de l'écoulement est la même partout sur le parc. Sur un terrain complexe, cette supposition est fausse. L'analyse expérimentale effectuée dans cet ouvrage a pour but de quantifier les répercussions sur l'estimation des performances des éoliennes. Pour ce faire, les données provenant des tours et de l'éolienne ont été synchronisées. À l'aide de ces données et de la calibration de site effectuée précédemment, une corrélation entre V_{nac} et V_∞ a été trouvée et comparée à celle fournie par le manufacturier. Des différences importantes entre les deux sont présentes. Une analyse plus approfondie a permis de juger de la validité de chacune. De plus, dans le but de quantifier l'effet du terrain, une corrélation a été trouvée pour chaque secteur valides de 10 deg, au lieu de définir une corrélation générale pour tous les secteurs valides. L'analyse a permis de déterminer l'effet du terrain sur la technique d'anémométrie à la nacelle.

Un autre objectif important de ce projet consistait à développer un modèle numérique, permettant de mieux comprendre les phénomènes influençant l'anémométrie à la nacelle. Pour se faire, le logiciel commercial FLUENT a été utilisé. Les corrélations entre V_{nac} et V_∞ ont été obtenues numériquement, et ont pu être comparées à celles expérimentales. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, un écoulement turbulent a été simulé. Pour y parvenir, la technique de moyennage temporel de Reynolds (RANS) a été utilisée

sur les équations de continuité et de quantité de mouvement. Le modèle de turbulence à deux équations $k - \epsilon$ a permis de fermer le système d'équation. Le rotor de l'éolienne en rotation a été modélisé par des forces appliquées sur l'écoulement. La théorie du disque actuateur représente le rotor comme un disque perméable qui absorbe une partie de l'énergie de l'écoulement. Les forces exercées sur le rotor ont pu être décomposées en composantes normales, tangentielles et radiales. Afin de calculer ces forces, la théorie de l'élément de pale a été utilisée. La pale a été décomposée en plusieurs éléments, dont les caractéristiques physiques et aérodynamiques du profil étaient connues. Les forces de portances et de traînées ont pu être calculées. Une fois décomposées dans les repères appropriés, les forces en jeu sur le rotor ont été trouvées, et ont pu être injectées dans le système d'équation.

Le logiciel FLUENT ne contient pas de module éolien, cependant il offre la possibilité d'implanter une fonction utilisateur (*FU*), rendant possible la modélisation du rotor de l'éolienne. Ce dernier a été modélisé par un saut de pression, calculé à partir des forces trouvées précédemment. Dans le but de développer un modèle simple, et de profiter de la géométrie symétrique de la nacelle, un écoulement axisymétrique bi-dimensionnel a été étudié. Ceci implique que le sol ainsi que la tour de l'éolienne n'ont pas été modélisés. Afin que la turbulence soit conservée, malgré l'absence de cisaillement de l'écoulement, des termes sources ont dû être injectés dans les équations de k et ϵ . La taille du domaine de calcul a été optimisé afin que les résultats ne soient pas influencés par les conditions frontières, mais également que le temps de calcul soit le plus rapide possible.

Les résultats numériques obtenus peuvent se comparer à ceux trouvés expérimentalement. Les différentes simulations effectuées ont permis de mieux comprendre l'importance de certains paramètres qui au départ étaient considérés comme négligeables. Des améliorations importantes peuvent être proposées suite à cette étude.

8.2 Principales contributions du mémoire

8.2.1 Installations expérimentales

Bien que l'énergie éolienne est en plein essor, plusieurs aspects de cette technologie demeurent mal compris. Tel que décrit dans ce mémoire, les performances des éoliennes dans des terrains complexes suscitent la majorité de ces zones grises. Les tours météorologiques ayant été installées permettront d'analyser bon nombre de ces questions. En effet, leurs conceptions ainsi que leurs positionnements ont été réalisées dans le but de pouvoir traiter plusieurs aspects reliés aux écoulement en terrains complexes. Les tours sont instrumentées à quatre hauteurs différentes, ce qui permet de bien connaître le profil de l'écoulement. Les instruments choisis permettront d'analyser plusieurs aspects encore mal documentés, tels la précision reliée à l'utilisation d'instruments chauffés ainsi que d'anémomètre sonique. Les tours ont également été positionnées de manière stratégique. Dans les directions principales du vent, des tours en amont et en aval permettront de connaître l'influence sur l'écoulement du passage à travers une éolienne ainsi que les propriétés du sillage. Une tour située entre deux éoliennes permettra de déterminer l'influence sur les performances de fonctionner sous sillage d'une autre machine. Plusieurs simulations de calibration de site seront possibles entre les tours, ce qui permettra de valider les modèles numériques développés dans le groupe de recherche AEMN. Ces installations constituent donc une belle contribution à la progression du savoir relié à la technologie éolienne dans les prochaines années.

8.2.2 Résultats

Corrélation $V_{nac} \leftrightarrow V_\infty$

Plusieurs résultats reliés à l'anémométrie à la nacelle ont été obtenus. Dans un premier temps, une corrélation générale a été trouvée pour tous les secteurs valides. Cette dernière a été comparée à celle fournie par le manufacturier. Des différences importantes pouvant aller jusqu'à $1.59m/s$ sont présentes. Un tel écart est inacceptable compte tenu des répercussions que cela entraîne sur les courbes de puissance. Afin de déterminer la validité de

ces corrélations, leurs courbes de puissance sont tracées. Des performances supérieures à la limite théorique sont obtenues lors de l'utilisation de la corrélation de Jeumont. En effet, des C_P de 0.55 sont irréalistes, spécialement pour une éolienne située sur un terrain complexe. Les corrélations fournies par le manufacturier, mesurées sur un terrain plat, ne sont donc pas valides pour des terrains complexes.

Les performances de l'éolienne à l'étude sont assez faibles, avec des C_P maximal de 0.37, comparativement à ceux de 0.42 promis par le manufacturier. Une analyse plus poussée du contrôle de l'éolienne est effectuée afin d'essayer d'expliquer cette différence. Chaque pale est conçue afin d'obtenir des performances optimales pour une certaine vitesse spécifique λ . Lorsque le point d'opération s'éloigne de cette vitesse, les performances diminuent. Les nouvelles éoliennes à contrôle actif ajustent leurs paramètres d'opération (angle de calage ou dans ce cas, vitesse de rotation) afin d'opérer le plus souvent possible à ce λ . Cependant, si la corrélation $V_{nac} \Leftrightarrow V_{inf}$ est fausse, le calcul de λ sera erroné. C'est le cas dans cette étude, où des différences importantes sont présentes entre la corrélation programmée par le manufacturier et celle obtenue expérimentalement. Ceci permet donc de comprendre en partie pourquoi les performances de l'éolienne sont plus basses que prévue.

Influence du terrain

Afin de déterminer l'influence du terrain, des corrélations pour tous les secteurs valides de 10 deg ont été trouvées et comparées à la corrélation générale. Compte tenu du peu de données disponibles, seulement les corrélations provenant de 6 secteurs ont été conservées. Des écarts avec la corrélation générale pouvant aller jusqu'à 6.94% ont été atteints. Cette approche permet de quantifier l'effet du terrain sur l'anémométrie à la nacelle, ce que peu d'ouvrage avait permis de faire précédemment.

L'étape suivante a été de calculer quels sont les effets de ces différences sur l'évaluation des tests de performances des éoliennes. Lorsque les deux corrélations des secteurs extrêmes étaient utilisées, des écarts jusqu'à 40% sur la puissance ont été obtenus. Cette situation n'est cependant pas représentative de la réalité. Pour vraiment quantifier les vraies

conséquences, deux courbes de puissance ont été tracées. La première a été obtenue en utilisant la corrélation générale et la seconde en utilisant les corrélations correspondantes aux secteurs appropriés. Des écarts moindres, mais tout de même très importants, variant de -10% à 10%, sont obtenus.

La production annuelle énergétique (AEP) est un outil efficace afin de mesurer quel est l'impact réel de ces différences. En combinant la distribution annuelle du vent ainsi que les courbes de puissances, les AEP ont été obtenues. Un écart assez faible, d'environ 0.65% a été calculé, et ce malgré des différences de 10% sur les courbes de puissance. Ceci peut s'expliquer par un effet compensatoire provenant d'écarts parfois positifs et parfois négatifs. Cet effet de compensation sera toujours présent car la corrélation générale utilisée se rapprochera toujours de la moyenne des corrélations par secteur. Bien que créant des erreurs instantanées importantes, l'utilisation d'une corrélation générale n'engendre donc pas d'erreurs majeures sur une longue période.

Modélisation numérique

Un modèle numérique a été mis en oeuvre en implantant un module éolien dans le logiciel commercial FLUENT. Le but de cette approche numérique était de mieux comprendre l'effet des différents paramètres présents dans cette analyse. La géométrie de la nacelle ainsi que les caractéristiques de la pale étaient connues, permettant ainsi une étude représentative de la réalité. Une des conclusions de cette analyse, est que l'anémométrie à la nacelle est grandement influencée par la section à l'emplanture de la pale, et très peu par les profils aérodynamiques situés plus hauts. Une autre conclusion est que l'hypothèse que l'anémomètre est peu influencé par son système de fixation n'est pas valide pour l'éolienne J48. En effet, une des causes majeures influençant la corrélation provient de l'accélération de l'écoulement provoquée par son système de soutien. La calibration de l'anémomètre est donc invalide ce qui entraîne inévitablement que ces lectures sont erronnées. Si un tel système ne peut être évité, alors la calibration devrait se faire avec le système entier en soufflerie.

8.2.3 Recommandations et suggestions

Ce mémoire constitue un premier pas vers une meilleure compréhension des effets d'un terrain complexe. Les installations mises à la disposition des étudiants de la Chaire de Recherche AEMN offrent un énorme potentiel pour des recherches additionnelles. Un travail considérable reste encore à faire, mais éventuellement des modifications aux normes éoliennes en vigueur devront être adoptées. En effet, afin d'éviter les conflits, et ainsi de s'assurer de l'avenir de cette technologie verte, les normes internationales se doivent de s'adapter et de fournir les réponses aux problèmes reliés aux terrains complexes.

Un effort particulier devrait être fourni afin de développer des outils numériques précis et fiables, permettant ainsi de sauver temps et argent. En effet, en combinant des simulations d'écoulement en terrain complexe avec l'écoulement autour d'une éolienne, l'anémométrie à la nacelle pourrait être appliquée avec une grande précision.

Finalement, certaines propositions concernant l'anémométrie à la nacelle sur terrain complexe pourraient être proposées :

- la corrélation fournie par le manufacturier ne devrait pas être utilisée sur un terrain complexe. La corrélation devrait plutôt être trouvée expérimentalement, afin qu'elle soit représentative du site à l'étude.
- l'utilisation d'une corrélation générale pour tous les secteurs valides constitue une bonne approximation.
- une attention particulière devrait être portée au système de fixation de l'anémomètre à la nacelle. Si il ne respecte pas les normes IEC, il devrait être calibré avec le système entier.

ANNEXE 1

PARAMÈTRES FLUENT

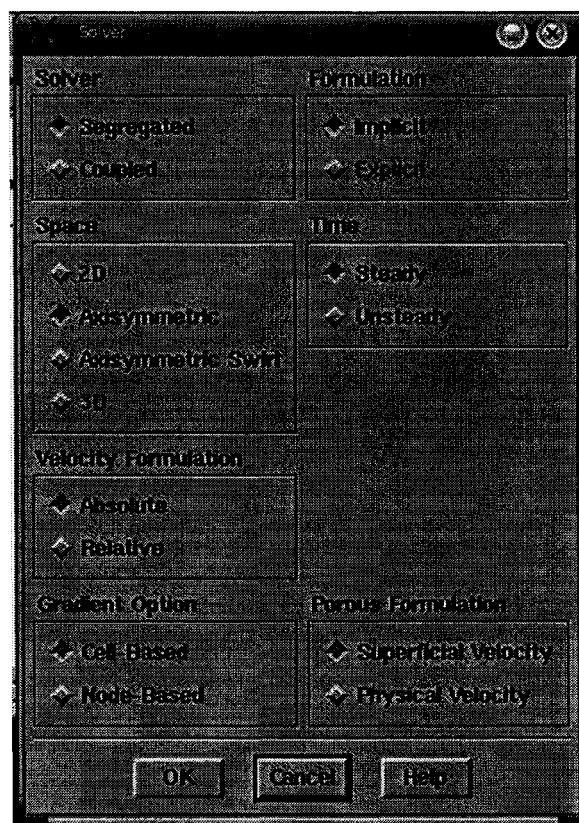


Figure 65 Fenêtre provenant de Fluent : choix du modèle de résolution

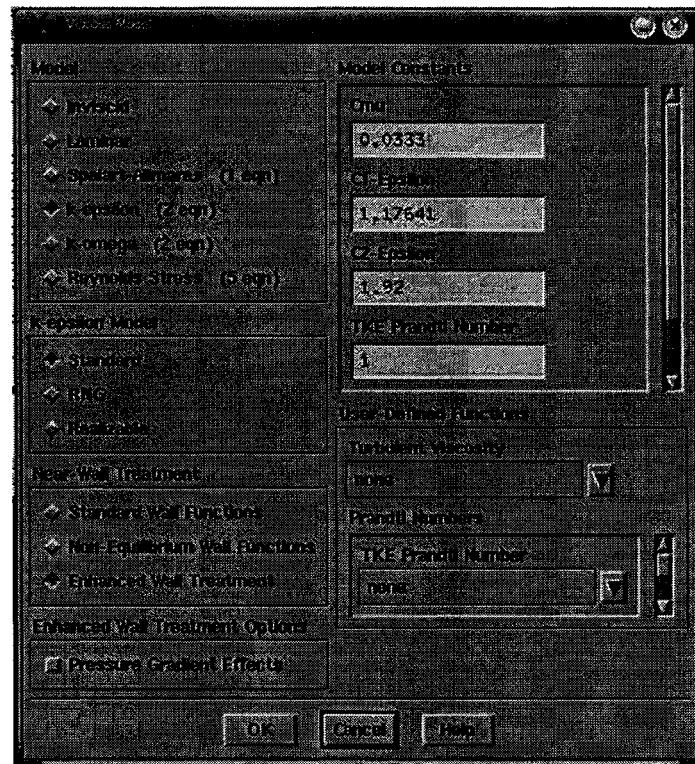


Figure 66 Fenêtre provenant de Fluent : choix du modèle de turbulence

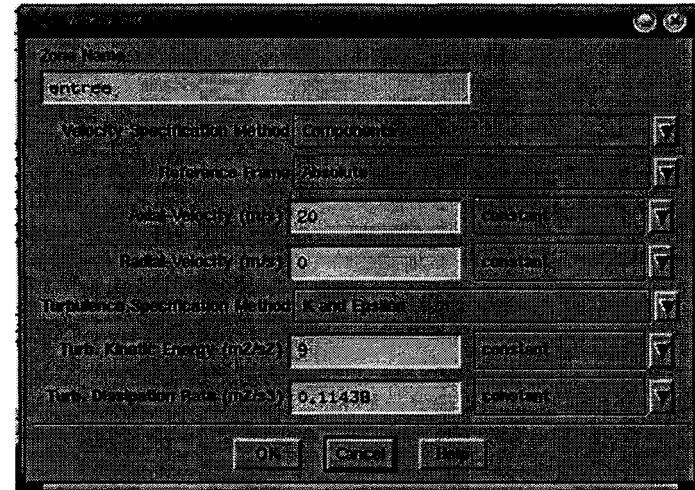


Figure 67 Fenêtre provenant de Fluent : caractéristiques du fluide à l'entrée du domaine de calcul

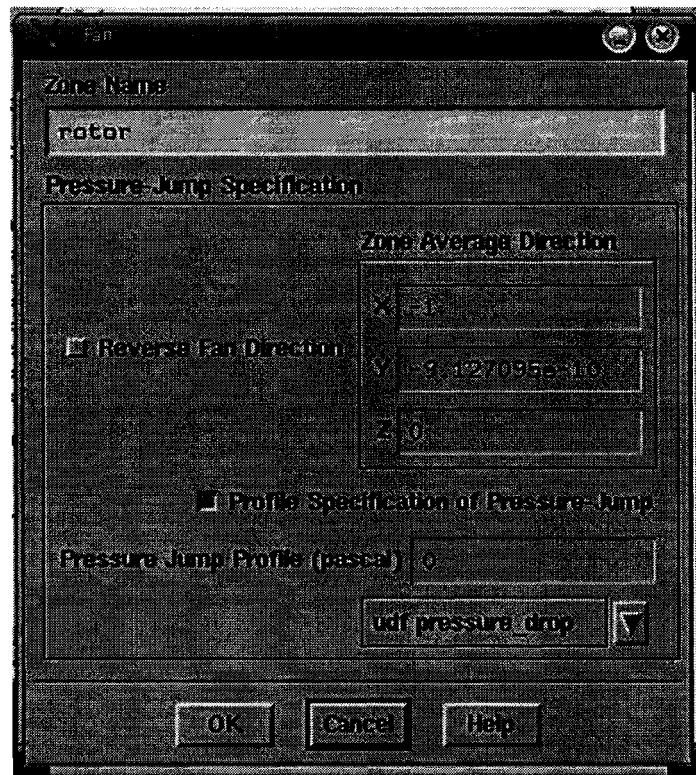


Figure 68 Fenêtre provenant de Fluent : modélisation du rotor

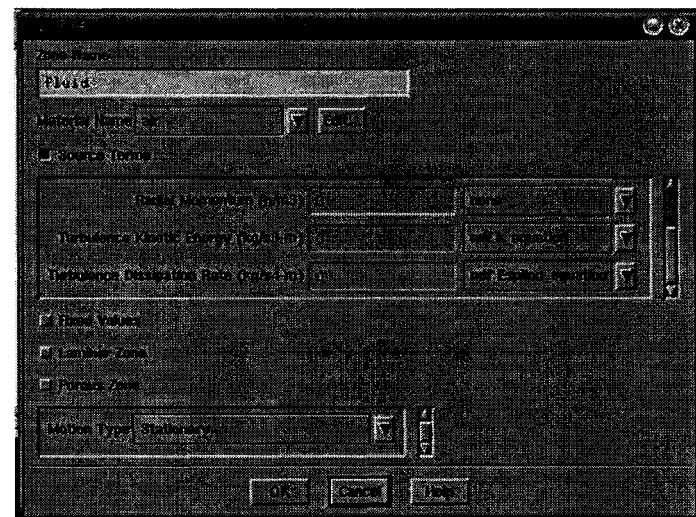


Figure 69 Fenêtre provenant de Fluent : modélisation du fluide

ANNEXE 2

SENSIBILITÉ DU MODÈLE NUMÉRIQUE

2.1 Sensibilité du modèle numérique

Plusieurs paramètres influencent les résultats numériques obtenus lors des simulations. L'analyse de ces derniers ont permis d'obtenir une meilleure précision ainsi qu'une plus grande confiance dans les résultats du modèle.

2.1.1 Optimisation du domaine

Une étape importante de la résolution numérique consiste à déterminer la taille optimale du domaine de calcul. Un domaine trop petit peut entraîner des changements sur l'écoulement. En effet, comme des conditions frontières sont imposées, si ces dernières sont trop rapprochées, des erreurs seront induites. De l'autre côté, si le domaine de calcul est trop grand, la précision sera bonne, mais les temps de calculs seront plus longs inutilement. Tel qu'illustre à la figure 70, la taille du domaine peut être défini par une distance en amont, en aval et en hauteur. Les longueurs sont mesurées en diamètre de rotor D_{rot} .

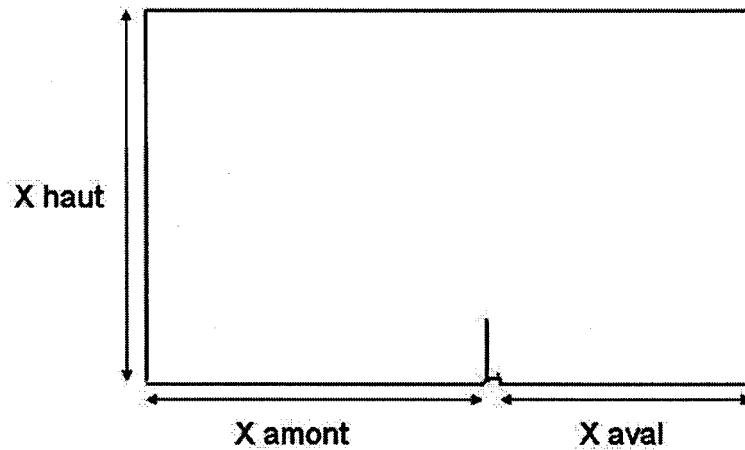


Figure 70 Taille du domaine à l'étude

2.1.1.1 Nacelle sans rotor

Dans un premier temps, l'écoulement autour de la nacelle uniquement a été étudié. Les trois directions du domaine, soit l'amont, l'aval et le dessus ont été tour à tour optimisées.

Chaque direction est successivement agrandie jusqu'à la convergence de la solution, qui dans ce cas est la vitesse de l'écoulement à la position de l'anémomètre $V_{nac\ num}$ (figure 71). Dans cette figure, les distances dans le domaine sont calculées en nombre de longueur de nacelle L_{nac} .

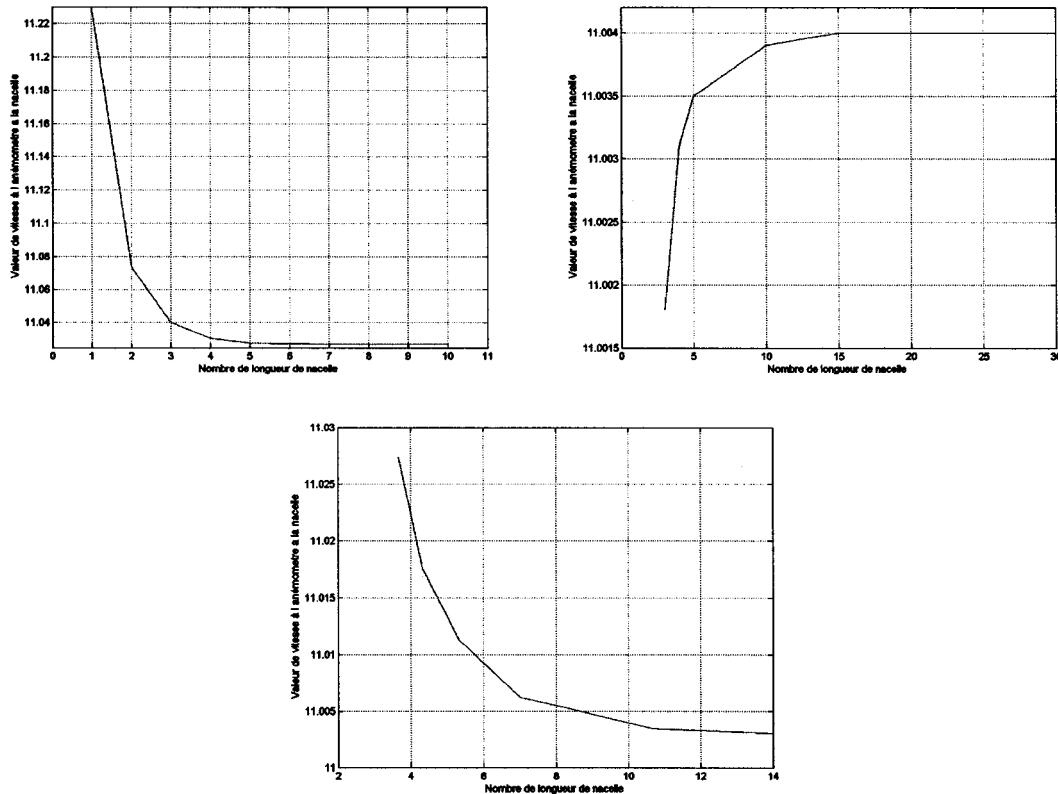


Figure 71 Optimisation du domaine de calcul pour l'étude de l'écoulement autour de la nacelle ; amont, aval et haut

Tel qu'illustre à la figure 71, les dimensions finales du domaine sont :

- Amont : 5 L_{nac}
- Aval : 10 L_{nac}
- Haut : 8 L_{nac}

2.1.1.2 Nacelle avec rotor

L'écoulement autour de l'éolienne en fonction, incluant le rotor en rotation, a par la suite été analysé. L'optimisation du domaine se fait de manière similaire à celle effectuée précédemment. La figure 72 illustre la convergence de la solution dans les trois directions. Les distances dans le domaine sont calculées en nombre de rayon du rotor R_{rot} .

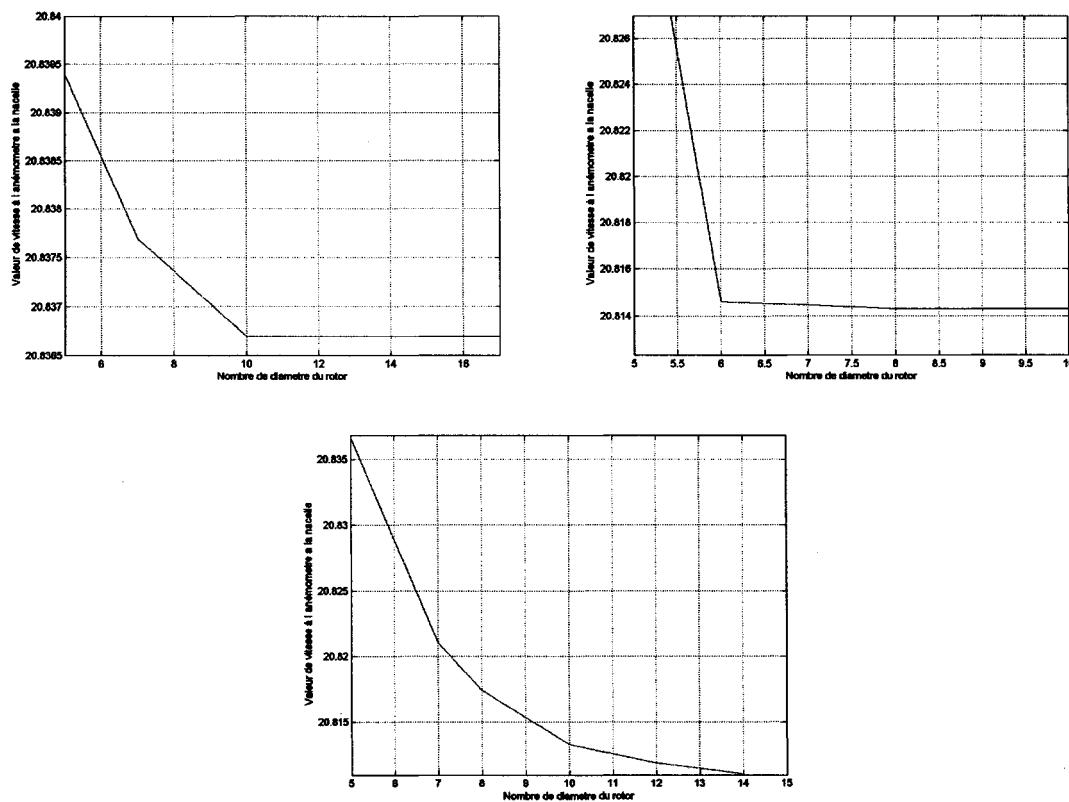


Figure 72 Optimisation du domaine de calcul pour l'étude de l'écoulement autour du rotor ; amont, aval et haut

Tel qu'illustre à la figure 72, les dimensions finales du domaine sont :

- Amont : $10 R_{rot}$
- Aval : $6 R_{rot}$
- Haut : $10 R_{rot}$

2.1.2 Influence du modèle aérodynamique

2.1.2.1 Pertes de bout de pales

Comme expliqué à la section 5.3.1, aux extrémités de la pale, une partie de l'énergie cinétique est perdue dans la génération de tourbillons. Le modèle de Prandtl a donc été implanté afin de tenir compte de ce phénomène.

L'écoulement autour de l'éolienne est différent lors de l'ajout du modèle de Prandtl dans les simulations. Cependant, ce changement n'a aucune influence sur les corrélations entre V_∞ et V_{nac} (figure 73).

2.1.2.2 Retard de décrochage statique

Le modèle de l'élément de pale utilise certaines hypothèses, notamment que la vitesse radiale le long de la pale est nulle. En réalité, des effets tri-dimensionnels sont présents, augmentant la portance et retardant le décrochage. Les formules présentées à la section 5.3.2 sont implantées dans la FU. Les résultats sont présentés à la figure 74.

Encore une fois, la distribution de vitesses axiales est perturbée, tandis que les corrélations demeurent inchangées. Les changements aérodynamiques effectués jusqu'à présent influencent les sections profilées de la pale, mais aucunement la section cylindrique. L'anémomètre se situe à environ 1m de la nacelle, tandis que la partie cylindrique de la pale est de 5m. Il est donc tout à fait normal que les lectures de l'anémomètre ne soient presque pas influencées par ces modifications.

2.1.2.3 Trainée de la partie cylindrique

Les modifications aérodynamiques décrites précédemment influencent peu les corrélations à l'étude. Cependant, le changement de C_d du cylindre en fonction de Re augmente considérablement l'accélération du fluide à l'anémomètre (figure 60). Comme l'anémomètre est situé à la hauteur de la partie cylindrique, il est normal que ces modifications aient un grand impact sur les corrélations.

Ce modèle est le plus réaliste, et c'est ce dernier qui est utilisé dans cet ouvrage.

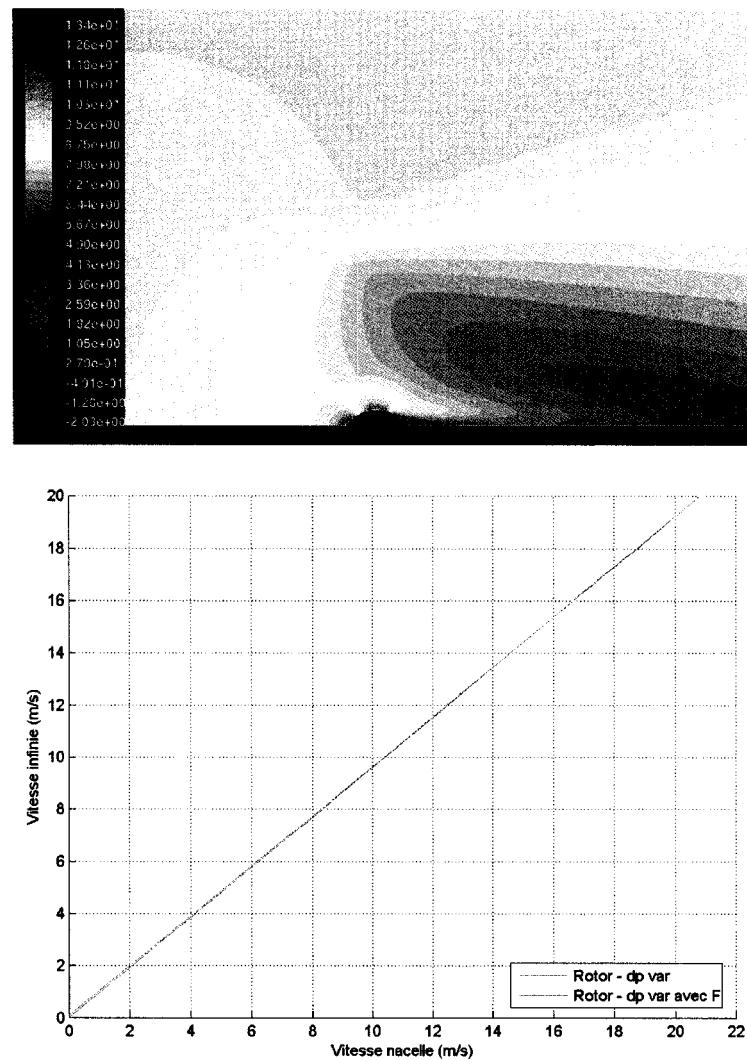


Figure 73 Distribution des vitesses axiales et corrélation avec rotor à Δp variable et pertes en bout de pales

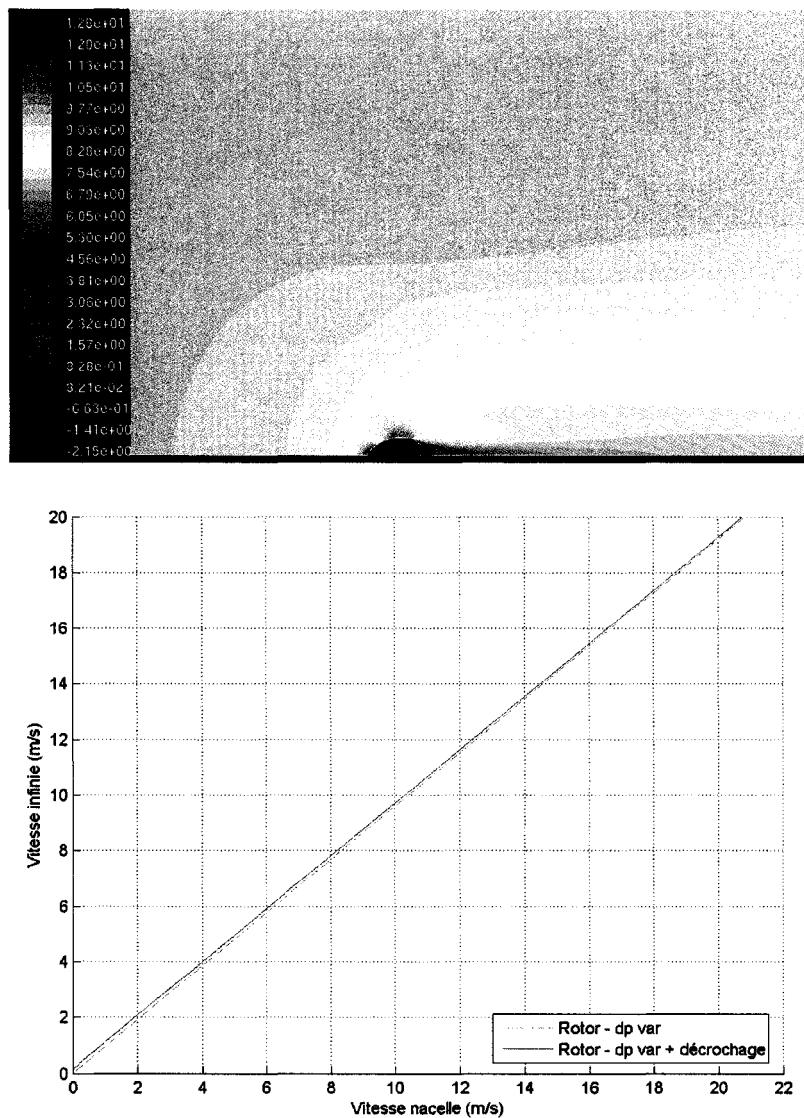


Figure 74 Distribution des vitesses axiales et corrélation avec rotor à Δp variable et décrochage statique

2.1.3 Influence du modèle de turbulence

2.1.3.1 Influence des constantes

Le modèle de turbulence choisi est $k - \epsilon$. Par défaut, des valeurs pour les différentes constantes sont proposées [26]. L'influence de ces constantes fait l'objet de cette section.

Des valeurs modifiées des constantes C_μ , $C_{\epsilon 1}$ et $C_{\epsilon 3}$ ont été proposées par (C.Allinot et Masson, 2005 [37]) afin de s'assurer que les expressions empiriques basées sur la théorie de Monin-Obukhov représentent la solution exacte du modèle de turbulence $k - \epsilon$ [35]. Les valeurs des constantes sont résumées dans le Tableau X.

Tableau X

Valeurs des différentes constantes utilisées dans le modèle $k - \epsilon$

	C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 3}$
Constantes originales	0.09	1.44	1.92
Constantes modifiées	0.0333	1.176	1.92

Des simulations ont été effectuées en utilisant les deux séries de constantes. Les corrélations obtenues sont illustrées à la figure 75. Une très petite différence est présente entre les deux résultats.

2.1.4 Conservations des termes de turbulence

Un des objectifs de cette maîtrise est de développer un modèle numérique se rapprochant le plus possible de la réalité, soit des résultats expérimentaux. Les différents paramètres à définir pour les frontières d'entrée du domaine sont la vitesse, l'énergie cinétique de turbulence k et de dissipation ϵ . Ces dernières sont fonction de l'intensité de turbulence et de la vitesse non perturbée. Toutes les cellules du domaine sont également initialisées avec ces valeurs, permettant une convergence plus rapide du système. De plus, le domaine de calcul doit être suffisamment grand pour obtenir l'indépendance du maillage. Cela se

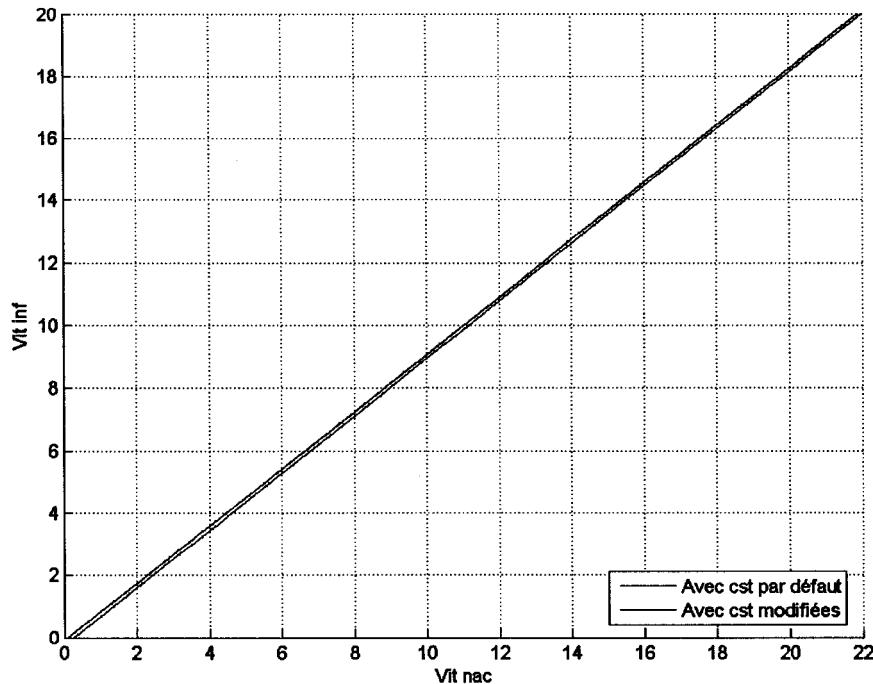


Figure 75 Influence des constantes

produit lorsque l'écoulement éloigné n'est plus perturbé, donc qu'il n'est plus influencé par les conditions frontières.

Selon cette logique, loin de la nacelle, à une hauteur considérable, la vitesse de l'écoulement, ainsi que les propriétés de turbulence k et ϵ devraient être imperturbées, soit égales aux valeurs des conditions frontières. Une vérification est effectuée afin de valider si notre modèle respecte cette règle (figure 76). Il est à noter que sur cette figure, le rotor apparaît, mais il n'applique aucune force sur l'écoulement (équivalent à aucun rotor).

On observe que la vitesse non perturbée est conservée loin de l'obstacle, mais que ce n'est pas le cas pour la turbulence. En effet, k s'atténue en fonction de la distance, ce qui est incorrect. Si aucun obstacle est présent, l'écoulement doit conserver ses propriétés constantes, et non varier en fonction du domaine.

Cette erreur provient de l'utilisation d'un modèle axisymétrique. Dans ce type de modèle, l'effet du sol est négligé. C'est pourtant ce dernier qui crée le cisaillement à l'origine d'un profil de vitesse non uniforme, et entraîne du même coup la propagation de la turbulence. Afin de corriger cet effet, des termes sources doivent être injectés dans les équations de turbulence (section 5.1.4). Une fois ces termes sources insérés dans le modèle, les valeurs de k et ϵ , loin de l'obstacle (à une hauteur de $7D_{rot}$), sont conservées sur toute la longueur

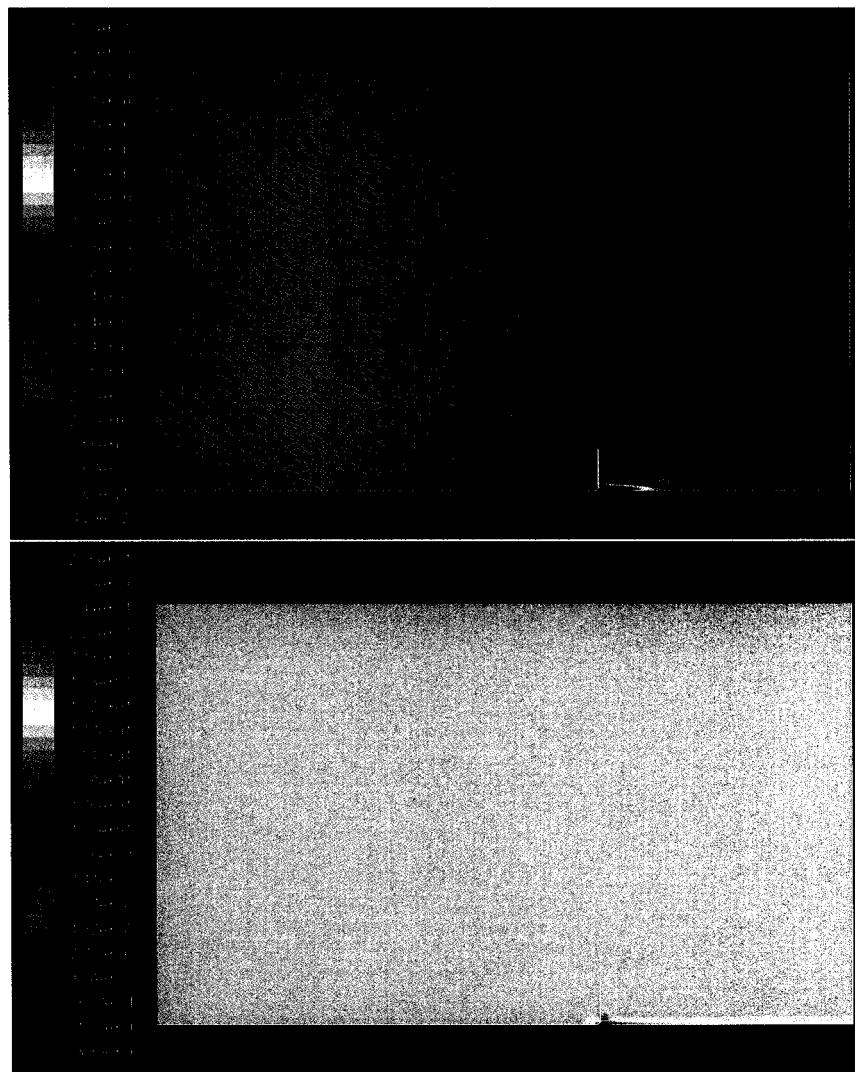


Figure 76 Distribution de k et de $V_{\infty axiale}$ sur le domaine

du domaine (figure 77). Pour le reste des simulations, ces termes sources seront donc toujours utilisés.

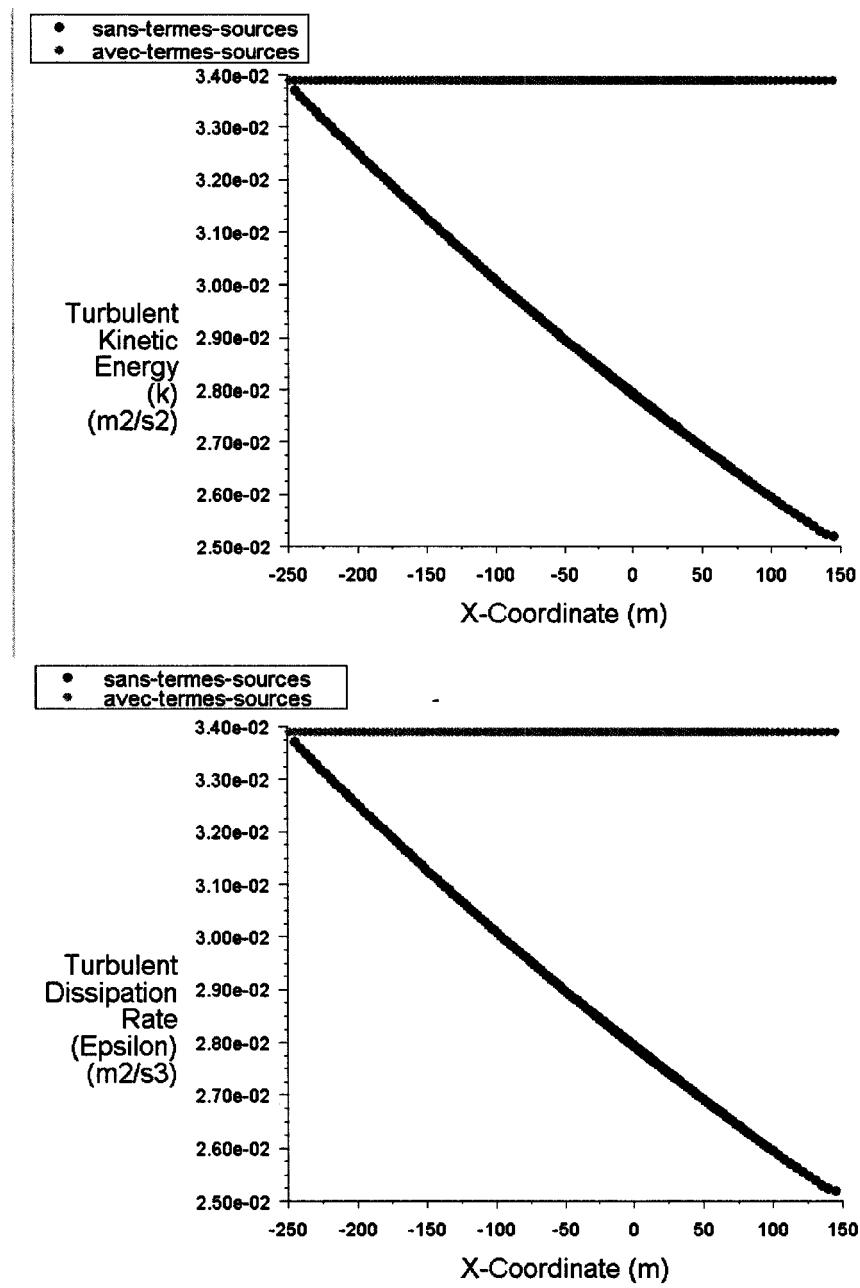


Figure 77 Influence des termes sources sur les distributions de k et ϵ

BIBLIOGRAPHIE

- [1] [http://www.eole.org/.](http://www.eole.org/)
- [2] [http://www.windpower.org/.](http://www.windpower.org/)
- [3] T.F. Pedersen, S. Gjerding, P. Ingham, P. Enevoldsen, J.K. Hansen, and Jørgensen H.K. Wind turbine power performance verification in complex terrain and wind farms. Technical Report Risø-R-1330(EN), Risø.
- [4] IEC 61400-12 Ed.1. Power performance measurements of grid connected wind turbines. Technical Report 61400-12, IEC, 1998.
- [5] nouvelle version IEC 61400-12. Power performance measurements of grid connected wind turbines. Technical Report 61400-12, part 121, IEC, 2004.
- [6] R. Hunter, T.F. Pedersen, P. Dunbabin, I. Antoniou, S. Frandsen, H. Klug, A. Albers, and W.K. Lee. Task 1 : Measurement method to verify wind turbine performance characteristics. Technical Report Risø-R-1209(EN), Risø, Danemark, 2001.
- [7] H. Klug. Contractual issues dealing with energy production warranties. In *Global Windpower Conference*, Paris, France, 2002.
- [8] J.C. Strataridakis. Turbulence measurement for wind turbine siting on a complex terrain. Technical Report AIAA-99-0054, University of California - Dept. of mechanical and Aeronautical Engineering, 1999.
- [9] E.J. Plate. Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers. 1971.
- [10] E. Binopoulos, M. Koulouvari, D. Foussekis, and F. Mouzakis. Experimental investigation of complex terrain boundary layer with a 100m mast.
- [11] A.P.W.M. Curvers and P.A. Van der Werff. Identification of variables for site calibration and power curve assesment in complex terrain. Technical Report ECN-C-01-102, ECN, Octobre 2001.
- [12] MEASNET. Measurement procedure cup anemometer calibrations. Technical report, 1997.
- [13] A. Albers, H. Klug, and D. Westermann. Outdoor comparison of cup anemometers. In *DEWEK-2000*, 2000.
- [14] A. Albers, H. Klug, and D. Westermann. Cup anemometry in wind engineering,

- struggle for improvement. *DEWI Magazin*, pages p.17–28, 18 February 2001.
- [15] T.F Pedersen. Development of a classification system for cup anemometers. Technical Report Risø-R-1348(EN), Risø, Danemark, 18 February 2001.
 - [16] N.C. Papadopoulos, K.H. and Stefanatos, U.S. Paulsen, and E. Morfidiakis. Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field. *Boundary-Layer Meteorology*, 101(1) :77–107, 2001.
 - [17] U. Folrichs and S. Glocker. Tilt angle sensitivity of different reference anemometers of measnet institutes. 1997.
 - [18] J.C. Kaimal and J.J. Finnigan. Atmospheric boundary-layer flows : Their structure and measurement. 1994.
 - [19] L. Kristensen. Cup anemometer behavior in turbulent environments. 1996.
 - [20] L. Kristensen. The perennial cup anemometer. 1999.
 - [21] H.A. Madsen. The actuator cylinder a flow model for vertical axis wind turbines. 1992.
 - [22] H. Glauert. Airplane propellers. *Aerodynamic Theory, Division L*, 4(1) :169–360, 1935.
 - [23] R. E. Wilson, P. B. Lissaman, and S. N. Walker. Aerodynamic performance of wind turbines. ERDA/NSF/04014-76/1, 1976.
 - [24] R. S. Hunter. Wind speed measurement and use of cup anemometry. 1999.
 - [25] G.R. Rajagopalan, D.E. Berg, and Klimas P.C. Development of a three-dimensional model for the darrieus rotor and its wake. *Journal of Propulsion and Power*, 11(2), 1995.
 - [26] W.P. Jones and B.E. Launder. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 15 :301–314, 1972.
 - [27] J.L. Lumley. Turbulence modelling. pages 1097–1103, 1983.
 - [28] F.H. Harlow and P.I. Nakayama. Transport of turbulence energy decay rate. Technical Report Report LA-3854, Los Alamos Sci. Lab., University of California, 1968.
 - [29] A. Crespo, F. Manuel, D. Moreno, E. Fraga, and J. Hernandez. Numerical analysis of wind turbine wakes. 1985.

- [30] C. Leclerc, C. Masson, I. Ammara, and I. Paraschivoiu. Turbulence modeling of the flow around horizontal axis wind turbines. *Wind Engineering*, 23(5), 1999.
- [31] Z. Du and M. S Selig. A 3-d stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction. In *Proc. of the 1998 ASME Wind Energy Symposium*, pages 9–19, 1998.
- [32] A.J. Eggers and K. Chaney. Approximate modeling of deep stall effects on yawed rotor loads. In *A Collection of the 2004 ASME Wind Energy Symposium*, pages 271–280, Reno, 2004.
- [33] A. Smaïli and C. Masson. On the rotor effects upon nacelle anemometry for wind turbines. *Wind Engineering*, 28(6) :695–714, 2004.
- [34] S.V. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow. 1980.
- [35] C. Alinot. Analyse aérodynamique des parcs éoliens immergés dans une couche limite terrestre ayant différentes conditions de stabilité thermique. 2002.
- [36] Bouaziz. Communication privée. 2001.
- [37] C. Alinot and C. Masson. $\kappa - \epsilon$ model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, mai 2005.

- [30] C. Leclerc, C. Masson, I. Ammara, and I. Paraschivoiu. Turbulence modeling of the flow around horizontal axis wind turbines. *Wind Engineering*, 23(5), 1999.
- [31] Z. Du and M. S Selig. A 3-d stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction. In *Proc. of the 1998 ASME Wind Energy Symposium*, pages 9–19, 1998.
- [32] A.J. Eggers and K. Chaney. Approximate modeling of deep stall effects on yawed rotor loads. In *A Collection of the 2004 ASME Wind Energy Symposium*, pages 271–280, Reno, 2004.
- [33] A. Smaïli and C. Masson. On the rotor effects upon nacelle anemometry for wind turbines. *Wind Engineering*, 28(6) :695–714, 2004.
- [34] S.V. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow. 1980.
- [35] C. Alinot. Analyse aérodynamique des parcs éoliens immergés dans une couche limite terrestre ayant différentes conditions de stabilité thermique. 2002.
- [36] Bouaziz. Communication privée. 2001.
- [37] C. Alinot and C. Masson. $\kappa - \epsilon$ model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, mai 2005.