

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

PAR
PHILIPPE BRODEUR

CALIBRATION VIRTUELLE D'UN SITE ÉOLIEN EN TERRAIN COMPLEXE

MONTRÉAL, LE 15 AOÛT 2006

© droits réservés de Philippe Brodeur

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

**M. Christian Masson, Directeur de mémoire
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure**

**M. François Morency, Président du jury
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure**

**M. Claude Bédard, Examineur
Doyen, Décanat à la recherche et au transfert technologique, École de technologie
supérieure**

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

LE 21 JUILLET 2006

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

CALIBRATION VIRTUELLE D'UN SITE ÉOLIEN EN TERRAIN COMPLEXE

Philippe Brodeur

SOMMAIRE

L'essor de l'énergie éolienne moderne, c'est-à-dire la production d'électricité à grande échelle à partir de la force du vent, date du milieu des années 1970, ce qui en fait une forme d'énergie extrêmement récente. Sa croissance très rapide au cours des dernières années s'avère très encourageante car il s'agit d'une forme d'énergie propre et renouvelable. Mais cette croissance ne se fait pas sans difficulté. En effet, de plus en plus d'éoliennes sont installées un peu partout dans le monde, entre autre sur des terrains complexes qui se caractérisent par un aspect montagneux ou un couvert forestier important. L'effet de ces différents éléments complique énormément le travail de compréhension du vent. Or, cette compréhension est nécessaire pour exploiter au mieux la ressource éolienne.

Cette problématique est particulièrement apparente lors de l'évaluation des performances des éoliennes. La puissance disponible dans le vent est proportionnelle à sa vitesse au cube ($P \propto V^3$). Une connaissance très précise de la vitesse du vent, à la position exacte de l'éolienne si cette dernière n'était pas installée, est donc nécessaire. Or, il n'est pas possible de simplement mesurer la vitesse du vent à l'éolienne puisque la présence même de celle-ci influence grandement la vitesse du vent. Pour contourner ce problème, l'industrie éolienne utilise actuellement un concept nommé calibration de site, qui consiste à accumuler et analyser des données de vent. Il s'agit cependant d'un processus long et coûteux qui rebute les investisseurs. Il serait donc intéressant de pouvoir éliminer la calibration de site traditionnelle. L'objectif du présent mémoire est de développer une méthode très précise de simulation numérique de l'écoulement du vent sur des terrains complexes, sur de courtes échelles de distance, ce qui permettra de réaliser des calibrations virtuelles de sites éoliens.

Pour ce faire, une connaissance approfondie de la couche limite atmosphérique est nécessaire. L'étude de cette masse d'air, qui occupe le premier kilomètre au-dessus du sol, a donc été faite en portant une attention particulière à la théorie de similitude de Monin-Obukhov de même qu'à l'influence de la turbulence et du sol. De plus, comme l'objectif est de parvenir à simuler l'écoulement du vent au-dessus d'un terrain complexe, il est important de bien reproduire numériquement la surface étudiée. Différentes techniques de représentation surfacique ont donc été envisagées. Enfin, comme il a fallu valider la méthode développée, un site complexe réel a été retenu, soit le site de Rivière au Renard, en Gaspésie. L'étude statistique de données provenant de cinq tours anémométriques installées sur ce site a été réalisée, accordant une grande importance à l'analyse d'incertitude des données.

Le vent n'étant rien d'autre que de l'air qui se déplace, donc un fluide en mouvement, de nombreuses méthodes permettent d'en simuler l'écoulement. L'une des principales difficultés liées à la modélisation du vent est l'influence importante de la turbulence sur celui-ci. Plusieurs méthodes ont été envisagées et le choix final s'est porté sur la solution des équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps par l'approche de Reynolds et complétées par un modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ modifié.

La modélisation du vent sur un terrain tel que celui de Rivière au Renard représente un défi de taille. Pour l'étude de l'écoulement du vent sur un terrain complexe, imposer des conditions frontières est loin d'être un problème trivial. Le développement de conditions frontières viables à appliquer au modèle a ainsi constitué une étape majeure de la démarche. De plus, bien que plusieurs auteurs aient déjà réalisé des travaux traitant de la simulation du vent dans la couche limite atmosphérique, la présente recherche se distingue par le fait que les simulations effectuées se concentrent sur une très petite échelle de distance. L'ensemble de la méthode numérique développée a été implanté dans le logiciel commercial Fluent.

Pour valider la méthode élaborée, celle-ci a d'abord été comparée aux relations empiriques basées sur la théorie de Monin-Obukhov appliquée à l'écoulement du vent sur terrain plat. Une fois cette validation faite, comme l'objectif principal de ce mémoire est d'arriver à simuler l'écoulement du vent en terrain complexe, les simulations numériques ont également été comparées aux données expérimentales recueillies sur le site de Rivière au Renard. Le grand potentiel de la méthode développée est apparu, bien qu'une lacune majeure ait été identifiée, soit l'incapacité de la méthode à intégrer des variations de la rugosité du sol. Une troisième série de comparaisons a également été effectuée entre la méthode développée et le logiciel WAsP, qui est un logiciel grandement utilisé par l'industrie éolienne. Sans vouloir tirer de conclusions hâtives et en considérant que seules trois simulations distinctes ont été réalisées, il semble que la méthode développée soit supérieure aux résultats obtenus à l'aide de WAsP. Il est évident que des améliorations importantes seront apportées prochainement aux méthodes de simulation actuellement utilisées. Il semble clair qu'une méthode telle que celle proposée dans ce mémoire sera plus facilement adaptable aux terrains complexes qu'une approche de type WAsP.

Enfin, pour valider la méthode développée à l'aide d'une application utilisée par l'industrie éolienne, une comparaison entre la calibration traditionnelle du site de Rivière au Renard et une calibration virtuelle de ce site a été effectuée pour deux secteurs de vent. Les résultats obtenus sont très encourageants quant aux multiples possibilités de la méthode proposée.

VIRTUAL SITE CALIBRATION OVER COMPLEX TERRAIN

Philippe Brodeur

ABSTRACT

The rise of modern wind energy, that is the production of electricity on a large scale from the power of the wind, started in the 1970's, which makes this form of energy production still quite young. Its incredibly fast growth in the last few years is very encouraging, since it is both a non-polluting source of energy and renewable, but this fast growth has not been without its drawbacks. For example, as more and more wind parks are installed worldwide, the best sites are being taken and increasingly turbines now have to be installed on complex terrains characterised by mountains or forested fields. Their different effects complicate seriously our understanding of the wind, which is necessary to optimally exploit this resource.

This problem is particularly apparent when evaluating the performance of wind turbines. The power available in the wind is proportional to the cube of wind velocity, i.e. $P \propto V^3$. A precise measure of the wind speed is therefore needed, but is impossible to attain at the wind turbine location since the latter will have an important influence on the local flow. To bypass this problem, the wind energy industry uses, for the moment, a concept called site calibration, which consist of accumulating and analyzing spatially correlated wind data. However, this is a long and expensive process which discourages investors. It would therefore be interesting to replace the traditional site calibration process. The objective of this Master's thesis is to develop a very accurate numerical method capable of simulating the wind over complex terrain, on short distances, which will allow to perform virtual site calibrations.

To achieve this goal, a fundamental understanding of the atmospheric boundary layer is necessary. The study of this mass of air, which occupies the first kilometer over the ground, has been thorough with particular attention to Monin-Obukhov similarity theory (MOST), turbulence and ground effects. Also, since the objective is to be able to simulate the flow field over complex terrain, it is important to accurately reproduce the studied surface numerically, and therefore different techniques of surface modelization are investigated. Finally, it is necessary to validate the developed numerical method, and therefore a real complex site is analyzed, that is Rivière au Renard, in Gaspésie, and a statistical analysis of data recorded by instruments located on five towers installed on this site is performed.

The wind being nothing else but a displacement of air, i.e. a moving fluid, many methods are available to simulate its flow patterns. One of the biggest difficulties related to modeling wind is the significant influence of turbulence. Many methodologies are consequently

investigated, the final choice being to use CFD via the Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, complemented by a modified $\kappa - \epsilon$ turbulence closure model.

Wind modelling over a terrain like that found at Rivière au Renard is clearly a challenge. In fact, for the study of wind flow over complex topography, where only the ground position is known *a priori*, the treatment of the boundaries is far from being a trivial problem. Emphasis is placed on the development of viable boundary conditions for the numerical model. Although many authors have worked on atmospheric boundary layer flow modelling, the present work distinguishes itself as the simulations are concentrated over very short distances. The proposed numerical method is implemented within the commercial software Fluent.

To verify the model's validity, it is first compared to the empirical relations based on MOST for wind flow over flat terrain. Once this validation is complete, and since the main goal is to be able to simulate wind flow over complex terrain, numerical simulations have been compared to experimental data gathered at Rivière au Renard. In this application, the large potential of the method becomes evident, even though a major drawback is identified, that is the incapacity of the method to account for varying roughness length. Also, comparisons between the proposed method and the software WASP, which is a model frequently used by the wind energy industry, was performed. It cannot be concluded from this study that the CFD approach is preferable to the WasP one, since only three distinct simulations are compared. However, the results obtained undoubtedly suggest that major improvements in windflow analysis still remain for the future, and one can foresee that CFD methods will be more easily adaptable than linear approaches like those used by WASP.

Finally, to validate the developed method with an industrial application, a comparison between Rivière au Renard's traditional and virtual site calibration was done for two different wind orientations. The obtained results show very encouraging possibilities for the proposed method.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de mémoire, le Professeur Christian Masson, pour m'avoir proposé un sujet si intéressant, pour ses commentaires toujours pertinents et ses judicieuses questions lors de nos rencontres, pour les défis qu'il m'a permis de relever. Merci également à Cédric Alinot pour son aide technique indispensable en début de projet, de même que pour les discussions si stimulantes par la suite.

Une immense pensée à ces beaux mecs que j'ai eu la chance de côtoyer pendant ces trois années, Jonathon, Étienne, Jean-Daniel et Idriss, en espérant que ce n'était là que le début d'une longue amitié...

Merci à tous ces professeurs modèles qui ont su si bien m'inspirer en prenant un plaisir évident à transmettre leurs connaissances, je pense à Christian, au Professeur Baliga, au Professeur Landry, à Eva Monteiro.

Merci à tous mes amis qui, bien que peu familiers avec le travail de recherche que j'effectue, ont toujours été intéressés et curieux. Merci à Claudine, Marie-Ève, Jonathan, Philippe V., Renaud, Loïc, Sarah, Myriam, Ginette, Jean-Claude et tous les autres. Merci également à ma famille, mes parents, ma soeur, mon grand-père, pour leur fierté face à mon travail.

Enfin, à Anne-Marie, merci. Merci pour ton soutien pendant ces trois années. Mais surtout, surtout, merci pour ta curiosité si brillante, pour tes remises en question qui m'obligent à donner le meilleur de moi-même. Merci d'être là, tout simplement.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	x
Liste des sigles et abréviations	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Généralités sur l'énergie éolienne	1
1.2 Parcs éoliens en terrains complexes	2
1.3 Objectifs et méthodologie	4
1.4 Structure du mémoire	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
2.1 Description du test de performance et de la calibration de site	7
2.1.1 Test de performance	7
2.1.2 Calibration de site traditionnelle	9
2.2 Simulation numérique de l'écoulement du vent	10
2.2.1 Modèle WAsP	12
2.2.1.1 Limitations du modèle WAsP	14
2.2.2 Mécanique des fluides assistée par ordinateur : équations de Navier-Stokes et modélisation de la turbulence (RANS)	16
2.2.3 Mécanique des fluides assistée par ordinateur : équations de Navier-Stokes et calcul explicite des grands tourbillons (LES)	17
2.3 Synthèse sur les simulations en terrains non plats déjà réalisées	18
2.3.1 Terrains complexes idéalisés : collines et escarpements	19
2.3.2 Terrains réels	22
2.4 Choix du modèle	23
CHAPITRE 3 CONCEPTS PHYSIQUES	25
3.1 Écoulement en couche limite atmosphérique	25

3.1.1	Description de la troposphère	26
3.1.2	Notion de stratification thermique	29
3.1.3	Théorie de Monin-Obukhov	30
3.1.3.1	Représentation du champ de vitesse	32
3.1.3.2	Influence de la végétation sur la couche limite atmosphérique	33
3.2	Modélisation du sol	35
3.2.1	Données provenant de Géobase	36
3.2.2	Carte topographique numérique	36
3.2.3	Téledétection	37
3.2.4	Construction d'un MNA à partir de photographies aériennes	39
CHAPITRE 4 MODÈLE MATHÉMATIQUE		42
4.1	Équations du mouvement	42
4.2	Modélisation de la turbulence	45
4.2.1	Modèle $\kappa - \epsilon$ standard avec modifications aux constantes	45
4.3	Conditions aux frontières	47
4.3.1	Distribution de la turbulence atmosphérique	47
4.3.2	Loi de la paroi	49
CHAPITRE 5 MÉTHODE NUMÉRIQUE		51
5.1	Description de la méthode employée	51
5.1.1	Discrétisation du domaine de calcul	52
5.1.2	Construction du maillage	52
5.1.2.1	Méthode d'enchâssement de domaines	53
5.1.3	Discrétisation des équations de transport	55
5.1.4	Résolution du système d'équations linéaires résultant	56
5.1.5	Vérification de la convergence	57
5.1.6	Schéma d'interpolation de la pression	58
5.2	Conditions aux frontières sur le grand domaine	58
5.2.1	Sol	59
5.2.2	Entrée du domaine	62
5.2.2.1	Termes sources à introduire dans les équations de transport de la turbulence	64
5.2.3	Sortie du domaine	66
5.2.4	Frontières latérales	66
5.2.5	Partie supérieure du domaine	68
5.3	Conditions frontières sur le petit domaine	68
5.4	Initialisation de la solution	69
5.5	Résumé des paramètres employés dans FLUENT	71
CHAPITRE 6 ÉTUDE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES		73
6.1	Présentation détaillée du site de Rivière au Renard	73

6.2	Installations sur le site	73
6.2.1	Positionnement des différents équipements	75
6.2.2	Détails concernant les instruments utilisés	78
6.3	Traitement statistique des données	80
6.3.1	Méthodologie employée	80
6.3.2	Analyse des données	82
6.4	Analyse d'incertitude	88
6.4.1	Incertitudes de type A	88
6.4.1.1	Incertitude standard combinée de type A	90
6.4.2	Incertitudes de type B	90
6.4.2.1	Incertitude standard combinée de type B	96
6.4.3	Incertitude standard combinée	97
6.5	Exemple de calcul : le cas de l'orientation du vent 295°	97
CHAPITRE 7 RÉSULTATS ET DISCUSSION		100
7.1	Validation du modèle proposé sur terrain plat	100
7.1.1	Écoulement perpendiculaire au plan : entrée du domaine	101
7.1.2	Écoulement dans le plan : frontière latérale du domaine	102
7.2	Comparaison des simulations numériques aux données expérimentales	108
7.2.1	Cas 1 : orientation du vent 5°	110
7.2.2	Cas 2 : orientation du vent 15°	111
7.2.3	Cas 3 : orientation du vent 255°	114
7.3	Comparaison de la méthode CFD proposée au logiciel WAsP	116
7.4	Calibration virtuelle du site de Rivière au Renard	118
CONCLUSION		125
ANNEXE 1 PARAMÈTRES FLUENT		130
BIBLIOGRAPHIE		151

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Longueur de rugosité pour différentes surfaces 28
Tableau II	Constantes du modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ utilisées dans le cadre de ce mémoire 47
Tableau III	Signification de ϕ , Γ et S pour chacune des équations 56
Tableau IV	Positions des installations sur le site 76
Tableau V	Perturbations dues au sillage des éoliennes à proximité 80
Tableau VI	Vitesses de vent observées à la tour 1, orientation 5° 88
Tableau VII	Exemple d'incertitude standard associée à la lecture de l'anémomètre 93
Tableau VIII	Incertitudes étendues 97
Tableau IX	Incertitudes pour chacun des paramètres 99
Tableau X	Comparaison des facteurs d'accélération prédits par WAsP et par la méthode numérique développée 117
Tableau XI	Erreurs relatives observées sur les données 124

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Première éolienne servant à produire de l'électricité 2
Figure 2	Site éolien installé en mer 3
Figure 3	Exemple d'un site complexe 4
Figure 4	Photos du site de Rivière au Renard 5
Figure 5	Courbe de puissance typique d'une éolienne de 1,5MW 8
Figure 6	Topographie du site de Rivière au Renard 10
Figure 7	Mâts permanent et temporaire installés à Rivière au Renard 11
Figure 8	Fonctionnement du modèle WAsP 15
Figure 9	Différentes collines étudiées par Ferreira et al. 19
Figure 10	Zones de recirculation obtenues par Ferreira et al. pour différentes collines 20
Figure 11	Colline et escarpement étudiés par Lun et al. 21
Figure 12	Colline Askervein 23
Figure 13	Profils de vitesse numériques et expérimentaux obtenus par Eidsvik, colline Askervein 24
Figure 14	Structure de l'atmosphère 26
Figure 15	Composition de la troposphère 27
Figure 16	Profils de température potentielle virtuelle pour différents cas de stratification thermique 31
Figure 17	Influence du paramètre d sur le profil vertical de vitesse du vent 35
Figure 18	Image satellite basse résolution du site de Rivière au Renard 38
Figure 19	Photographies aériennes du site de Rivière au Renard 40

Figure 20	Modèle numérique d'altitude du site de Rivière au Renard	41
Figure 21	Étapes pour construire le maillage de la surface	53
Figure 22	Exemple de maillage du domaine	54
Figure 23	Enchâssement des deux domaines de calculs	55
Figure 24	Configuration du maillage près du sol	61
Figure 25	Solution obtenue pour un écoulement complètement développé en entrée, profil de vitesse u	63
Figure 26	Vecteurs de vitesse du vent pour un écoulement 2D sur une frontière laté- rale	67
Figure 27	Valeurs de vitesse et turbulence provenant du grand domaine imposées sur le petit domaine	69
Figure 28	Exemple d'initialisation de la solution : profil de vitesse u	70
Figure 29	Localisation de Rivière au Renard dans la province de Québec	74
Figure 30	Parcelle de terrain à l'étude	75
Figure 31	Rose des vents du site de Rivière au Renard	76
Figure 32	Position des différents équipements sur le site	77
Figure 33	Photographie des tours de mesure sur le site de Rivière au Renard	78
Figure 34	Secteurs à exclure selon la norme IEC61400-121	79
Figure 35	Détails des instruments installés sur les tours de 58m	81
Figure 36	Exemple de corrélation entre deux anémomètres d'une même tour (sec- teur 305°)	85
Figure 37	Procédure pour établir la relation de vitesse entre les différents anémo- mètres	85
Figure 38	Forêt observée du haut d'une éolienne à Rivière au Renard	87
Figure 39	Graphique de calibration d'un anémomètre	91

Figure 40	Distribution uniforme du nombre d'impulsions lues par le SAD	95
Figure 41	Régression linéaire reliant la vitesse de deux anémomètres	98
Figure 42	Maillage bidimensionnel employé pour solutionner l'écoulement sur l'entrée du domaine	102
Figure 43	Comparaison : profils théoriques et de simulation pour l'écoulement à l'entrée du domaine	103
Figure 44	Comparaison : profils théoriques et de simulation pour l'écoulement de l'un des côtés du domaine	104
Figure 45	Contours obtenus pour la simulation d'un côté du domaine, terrain plat avec entrée provenant de simulation	105
Figure 46	Zoom sur la faible valeur de κ à la base de l'entrée du domaine	106
Figure 47	Profils de simulation pour l'écoulement de l'un des côtés du domaine, entrée idéale respectant exactement la théorie de Monin-Obukhov	107
Figure 48	Contours obtenus par simulation d'un côté du domaine, terrain plat avec entrée Monin-Obukhov	108
Figure 49	Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 5° sans la méthode d'enchâssement de domaine	110
Figure 50	Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 5° avec la méthode d'enchâssement de domaine	111
Figure 51	Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 15° sans la méthode d'enchâssement de domaine	112
Figure 52	Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 15° avec la méthode d'enchâssement de domaine	113
Figure 53	Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 255° sans la méthode d'enchâssement de domaine	114
Figure 54	Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 255° avec la méthode d'enchâssement de domaine	115
Figure 55	Base de données brutes, tours référence et temporaire	120
Figure 56	Calibration virtuelle, direction du vent 305°	122

Figure 57 Calibration virtuelle, direction du vent 315° 123

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a_P	Coefficient associé à la variable ϕ au point P (centroïde du volume de contrôle considéré)
a_{nb}	Coefficient associé à la variable ϕ aux points voisins du volume de contrôle considéré
b	Constante dans l'équation de ϕ , qui dépend de S_C
$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_\mu$	Constantes du modèle de turbulence $k - \epsilon$
C_s	Constante de rugosité de Fluent
<i>CFD</i>	<i>Computational fluid dynamics</i>
d	Hauteur de déplacement [m]
D, D_e	Diamètre de l'éolienne [m]
DEM	<i>Digital elevation model</i>
e, w	Frontière Est et Ouest (<i>west</i>) d'un volume de contrôle
E_{num}	Erreur relative reliée à la prédiction de la méthode numérique [%]
E_{incert}	Erreur relative reliée à l'incertitude des données expérimentales [%]
g	Accélération gravitationnelle [m/s^2]
G_B	Génération d'énergie cinétique turbulente due aux forces de flottement [$kg/(m \cdot s^3)$]
G_k	Génération d'énergie cinétique turbulente due aux forces de cisaillement [$kg/(m \cdot s^3)$]
h_c	Hauteur de la canopée d'une forêt [m]
k	Facteur de couverture permettant d'associer un niveau de confiance à une distribution statistique
K	Constante de Von Karman, $K = 0.42$
K_s	Hauteur de rugosité pour Fluent [m]
L	Longueur de Monin-Obukhov [m]

L_e	Distance séparant une tour de mesure d'un obstacle [m]
LES	<i>Large eddy simulation</i>
MNA	Modèle numérique d'altitude
n	Nombre total de volumes de contrôle dans le domaine
N_I	Nombre d'impulsions de l'anémomètre
p	Pression [Pa]
P, nb	Volume de contrôle concerné, par opposition aux volumes de contrôles adjacents (<i>neighbors</i>)
R	Constante des gaz parfaits pour l'air sec [$287 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$]
RANS	<i>Reynolds averaged Navier-Stokes equations</i>
R^ϕ	Somme sur l'ensemble du domaine des résidus normalisés
S	Terme source
SAD	Système d'acquisition de données
S_C	Fraction du terme source indépendante de ϕ
S_ϵ	Terme source dans l'équation de transport de la dissipation d'énergie cinétique turbulente ϵ
S_κ	Terme source dans l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente κ
S_P	Fraction du terme source dépendante de ϕ
S_u, S_c, S_p	Dimensions du volume de contrôle [m]
t	Temps [s]
T_v	Température virtuelle [K]
$u_a(V_i)$	Incertitude standard de type B associée à la lecture de l'anémomètre [m/s]
$u_A(V_i)$	Incertitude standard combinée de type A pour la vitesse i [m/s]
$u_B(V_i)$	Incertitude standard combinée de type B pour la vitesse i [m/s]
$u_c(V_i)$	Incertitude standard combinée pour la vitesse i [m/s]
$U_c(V_i)$	Incertitude standard étendue pour la vitesse i [m/s]

UDF	<i>User-defined functions</i> (fonctions définies par l'utilisateur) dans Fluent
UDS	<i>User-defined scalar</i> (scalaire défini par l'utilisateur) dans Fluent
u, v, w	Composantes de la vitesse [m/s]
u_*	Vitesse de frottement [m/s]
u_{*l}	Vitesse de frottement locale [m/s]
u_{*s}	Vitesse de frottement au sommet [m/s]
$u(x)$	Incertitude standard associée à la variable x [les unités seront les mêmes que celles de la variable x]
u'_i	Composante turbulente de la vitesse [m/s]
$\overline{u'_i u'_j}$	Contrainte de Reynolds [m ² /s ²]
U_j	Représente les trois composantes de la vitesse, u , v et w [m/s]
$V_{pos,p}$	Valeur prédite de la vitesse à une certaine position pour le point p [m/s]
x, y, z	Composantes de la position [m]
x_j	Représente les trois composantes de la position, x , y et z [m]
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
z_0	Longueur de rugosité [m]
α	Facteur de correction de l'écoulement, qui permet de relier la vitesse en un point par rapport à une vitesse référence
χ	Ordre de grandeur de l'espace à simuler, soit la distance entre deux tours météorologiques, environ 200m
δ	Delta du Kronecker
$\Delta x_e, \Delta x_w$	Distance entre deux centroïdes adjacents (Est et Ouest)
ϵ	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente [m ² /s ³]
ϵ_{ijk}	Tenseur unitaire
Γ	Coefficient de diffusion
κ	Énergie cinétique turbulente [m ² /s ²]

μ	Viscosité [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]
μ_t	Viscosité turbulente [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]
Ω	Paramètre de Coriolis
ρ	Densité [kg/m^3]
σ	Écart-type d'une distribution statistique
$\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon$	Constantes du modèle de turbulence $k - \epsilon$
τ	Flux de quantité de mouvement [$kg/m \cdot s^2$]
τ_{ij}	Tenseur de contraintes [N/m^2]
Θ_v	Température potentielle virtuelle [K]

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Généralités sur l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est utilisée depuis plusieurs centaines d'années, que l'on pense simplement aux bateaux à voiles, qui ont vu le jour bien avant le début de notre ère. Cette source d'énergie a connu de multiples applications : pompage de l'eau, mouture du grain et, plus récemment, production d'énergie électrique. Le présent mémoire se concentrera sur un aspect très pointu de cette dernière application ; le lecteur intéressé pourra se référer à un ouvrage tel que "*Wind energy explained*", par Manwell et al. [1] pour plus de détails concernant l'histoire de l'énergie éolienne.

La première machine servant à convertir l'énergie du vent en électricité a vu le jour vers la fin du 19^e siècle ; elle est présentée à la figure 1. Mais le réel début de l'industrie de l'énergie éolienne date d'à peine 35 ans. Dans les années 1970, des machines de dimensions intéressantes (puissance de l'ordre de 100 à 300kW) ont commencé à se vendre. Mieux encore, au niveau de la recherche, certains projets ont mené à l'érection d'éoliennes de très grande capacité dont, entre autres, l'éolienne de 3.2MW Boeing MOD-5B avec son rotor d'une envergure de 98m [1]. Le renouveau dans le monde de la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne a notamment été motivé par la crise de l'énergie du milieu des années 1970.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne connaît une croissance très rapide, poussée d'abord par des considérations environnementales, mais également par une industrie en pleine expansion au niveau de la fabrication d'éoliennes géantes. La technologie étant de mieux en mieux maîtrisée, la production de machines pouvant générer entre 1.5MW et 3MW est devenue courante, ce qui permet d'effectuer d'importantes économies d'échelles. Il en résulte qu'aujourd'hui, la production d'énergie électrique à partir d'éoliennes est économiquement compétitive par rapport aux sources d'énergie plus traditionnelles (telles que l'énergie fossile ou l'hydroélectricité). Depuis 30 ans, la rentabilité de la production d'énergie éolienne reposait principalement sur les subventions gouvernementales. La nou-

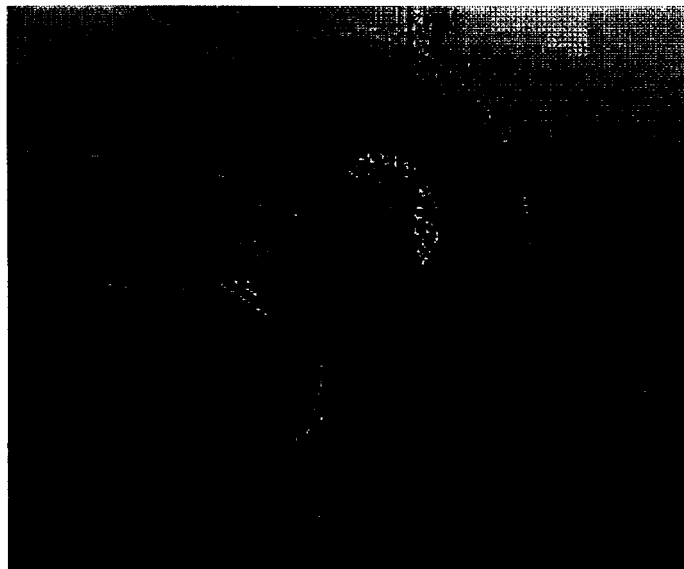


Figure 1 Première éolienne servant à produire de l'électricité, construite par Charles F. Brush en 1887-88 (Tirée de [2])

velle compétitivité des éoliennes ne pourra que propulser plus encore cette source d'énergie très disponible et non polluante.

Vu son caractère aléatoire occasionné par la variabilité du vent, l'énergie éolienne ne pourra jamais devenir notre unique source d'énergie. Mais sa rentabilité laisse espérer qu'elle prendra de plus en plus de place dans le paysage énergétique du Québec.

1.2 Parcs éoliens en terrains complexes

Au départ, les éoliennes étaient généralement installées sur des terrains simples, par exemple une plaine côtière avec peu de végétation. Cependant, le développement rapide de l'énergie éolienne s'accompagne désormais du besoin de trouver toujours plus d'espace pour installer les aérogénérateurs. L'une des solutions trouvées est d'implanter les machines en mer, présentant, de façon générale, l'avantage de ne déranger personne, en plus de profiter de vitesses de vent très élevées. La figure 2 présente un tel site. Une autre possibilité envisagée est l'installation des éoliennes sur des terrains complexes. Par exemple, les 990MW récemment octroyés par Hydro-Québec pour la production d'énergie éolienne seront implantés en Gaspésie, sur des terrains composés de petites montagnes et collines,

où plaines, champs et forêts se côtoient. Ce type de terrain amène certaines complications quant à l'évaluation des performances des éoliennes.



Figure 2 Site éolien installé en mer (Tirée de [2])

En effet, sur des terrains simples, l'écoulement du vent est considéré comme étant horizontalement homogène, c'est-à-dire que le profil vertical du vent se maintient dans l'espace, ce qui facilite la réalisation de tests de performance. En terrain complexe, cette hypothèse n'est pas appropriée. Par exemple, sur la figure 3, il est évident que l'écoulement du vent ne sera pas horizontalement homogène : la présence d'une imposante falaise près des éoliennes aura un impact important sur le vent. Il faut alors procéder à une calibration de site avant de pouvoir réaliser le test de performance. La calibration de site permet de connaître la vitesse du vent à l'éolienne à partir de la mesure de la vitesse du vent en un second point de mesure. Les détails de la calibration de site sont décrits à la section 2.1. Pour le moment, il est seulement nécessaire de souligner que traditionnellement, la calibration de site est un processus expérimental qui coûte plusieurs dizaines de milliers de dollars et qui a le désavantage de retarder de plusieurs mois l'implantation de l'éolienne. Ce délai est souvent très problématique pour un promoteur de parcs éoliens.

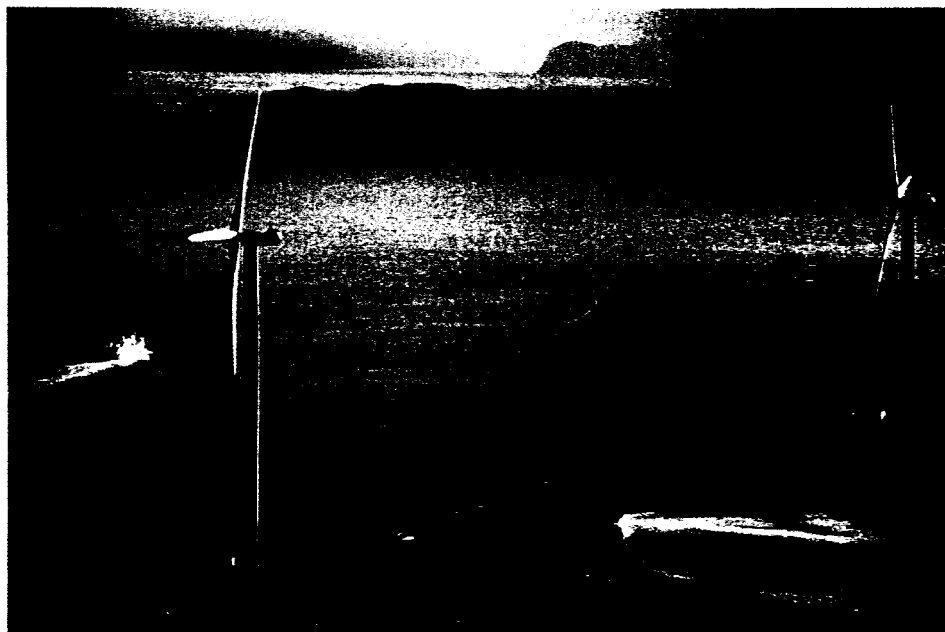


Figure 3 Exemple d'un site complexe (Tirée de [2])

1.3 Objectifs et méthodologie

Le but premier du présent travail consiste donc à développer une méthode qui permet de simuler l'écoulement du vent sur un terrain complexe de manière très précise. Cette méthode permettra par la suite de remplacer la calibration de site traditionnelle par une calibration virtuelle. L'approche préconisée est de reproduire l'écoulement du vent à l'aide d'une méthode numérique. La démarche développée présente la particularité suivante : les simulations sont effectuées sur une très petite échelle de distance par rapport aux simulations méso-échelle pour fins de prévisions météorologiques. Le modèle mathématique permettant de simuler un écoulement atmosphérique sera implanté dans le logiciel Fluent. Pour valider la méthode développée, les résultats numériques obtenus seront comparés à une campagne de prise de mesures effectuée sur un site complexe réel. Le site de Rivière au Renard, près de Gaspé, en Gaspésie, a été choisi à cette fin. La figure 4 présente le site. Il s'agit d'un site montagneux où plusieurs tours de mesures ont été installées. Pour arriver à simuler le vent sur ce site avec la plus grande précision possible, différentes approches de modélisation surfacique ont été envisagées. La représentation fidèle du terrain de Rivière au Renard a finalement été réalisée à partir de cartes topographiques numérisées.

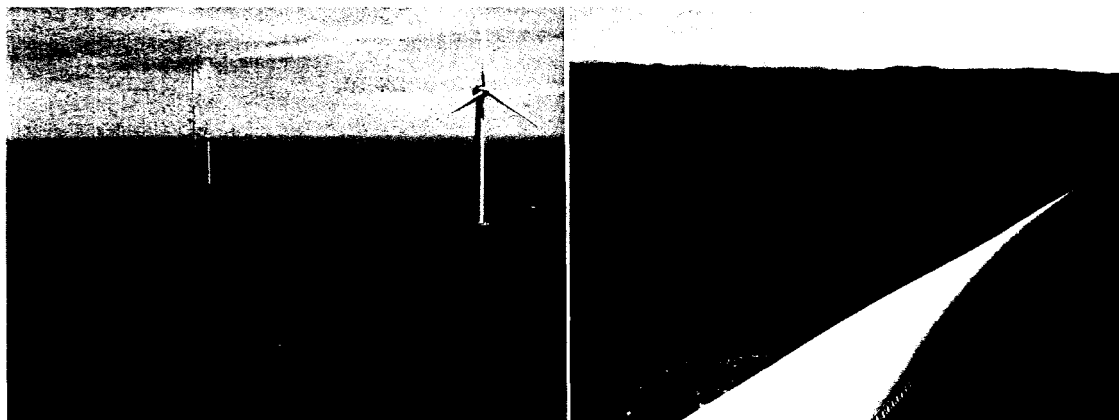


Figure 4 Photos du site de Rivière au Renard

L'écoulement en couche limite atmosphérique est tridimensionnel, ce qui implique la nécessité de définir un domaine en trois dimensions pour bien capter l'ensemble des détails de l'écoulement. L'implantation des conditions frontières sera donc une tâche importante à accomplir lors du développement de la méthode numérique.

Les retombées possibles de ce projet sont nombreuses. Grâce à cette technique, l'installation d'une tour anémométrique temporaire ne sera plus nécessaire et l'éolienne pourra donc être installée beaucoup plus rapidement. Le projet vise également à accroître la connaissance de l'écoulement du vent, ce qui pourrait permettre un meilleur positionnement des éoliennes : sur un terrain sélectionné pour le développement d'un parc éolien, les éoliennes seraient positionnées là où la vitesse du vent serait la plus élevée, ce qui augmenterait la production énergétique des machines. Sur le plan commercial, les gains sont évidents. La diminution des coûts et l'augmentation des performances reliées à l'installation d'un parc éolien ne peuvent que favoriser le développement de cette forme d'énergie qui tendra à croître de plus en plus, diminuant proportionnellement l'usage d'autres sources d'énergie beaucoup plus polluantes.

1.4 Structure du mémoire

Ce mémoire est subdivisé en six chapitres. Le chapitre 2 présente une revue de la littérature permettant de mettre en contexte les différents travaux effectués dans le domaine jusqu'à maintenant. Dans le chapitre 3, les différents concepts physiques associés à ce

projet, soit l'écoulement en couche limite atmosphérique et la représentation de la surface à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), sont étudiés. Les chapitres 4 et 5 sont consacrés au modèle mathématique développé pour représenter l'écoulement atmosphérique et à la méthode numérique employée pour résoudre les équations du modèle mathématique. Le site de Rivière au Renard, les différents équipements installés sur ce site et l'analyse des données expérimentales effectuée, comprenant entre autres une analyse d'incertitude détaillée, sont présentés au chapitre 6. Enfin, le chapitre 7, composé de quatre sections distinctes, est consacré aux résultats obtenus. Dans un premier temps, la méthode proposée est validée sur terrain plat. Puis, les données recueillies à Rivière au Renard permettent de valider la méthode sur un terrain complexe en comparant les profils de vent obtenus numériquement et expérimentalement. Une comparaison est également faite avec le logiciel WASP. Finalement, le chapitre 7 se termine avec la présentation d'une calibration virtuelle effectuée selon deux orientations de vent.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La calibration virtuelle d'un site éolien consiste à réaliser une simulation numérique de l'écoulement du vent dans le voisinage immédiat d'une éolienne. Bien qu'il soit possible de retrouver différentes informations à ce sujet dans la littérature [3], le consensus actuel dans l'industrie éolienne est que beaucoup de travail reste à accomplir avant qu'une calibration de site virtuelle fiable ne soit réalisée. Pour le moment, lorsque la complexité du terrain l'exige, seules des calibrations de site traditionnelles sont utilisées. L'objectif du présent chapitre est d'abord de présenter les concepts de test de performance et de calibration de site traditionnelle, pour ensuite présenter les différentes méthodes de simulation numérique d'écoulement du vent disponibles dans la littérature. Ces dernières permettront d'éclairer les choix réalisés quant à la méthodologie retenue dans le cadre de ce mémoire.

2.1 Description du test de performance et de la calibration de site

Le développement rapide de l'énergie éolienne est désormais associé à la nécessité de trouver toujours plus d'espace pour installer les aérogénérateurs. L'une des solutions à cette problématique est l'installation d'éoliennes sur des terrains complexes. Or, ce type de terrain amène certaines complications quant à l'évaluation des performances des éoliennes. Il faut alors procéder à une calibration de site avant de pouvoir réaliser un test de performance.

2.1.1 Test de performance

La puissance d'une éolienne est fonction de la vitesse du vent au cube. Une connaissance très précise de la vitesse du vent est donc un préalable essentiel. Il faut également savoir que la présence d'une éolienne sur un terrain influence énormément l'écoulement du vent et ce, même en amont de l'éolienne. De ce fait, il devient très difficile de savoir quelle est la véritable vitesse (ou vitesse non perturbée) du vent soufflant sur l'éolienne. Or, de nombreux types d'éoliennes sont fabriqués par différents manufacturiers. Le constructeur qui vend une éolienne doit garantir les performances de celle-ci, alors que le promoteur éolien

qui achète la machine veut s'assurer que les performances promises seront respectées. De ces motifs commerciaux est né le concept de test de performance.

Le test de performance consiste à enregistrer simultanément la vitesse du vent et la puissance fournie par l'éolienne. Plusieurs vitesses de vent sont soumises au test, permettant ainsi d'obtenir une courbe de puissance pour l'éolienne, telle que présentée à la figure 5. En terrains plats, l'écoulement du vent est considéré horizontalement homogène, c'est-à-dire que le profil vertical du vent se maintient dans l'espace. Il suffit alors de mesurer la vitesse du vent à une certaine distance de l'éolienne, à la hauteur du moyeu, et de supposer que cette vitesse est équivalente à la vitesse au point de contact de l'éolienne.

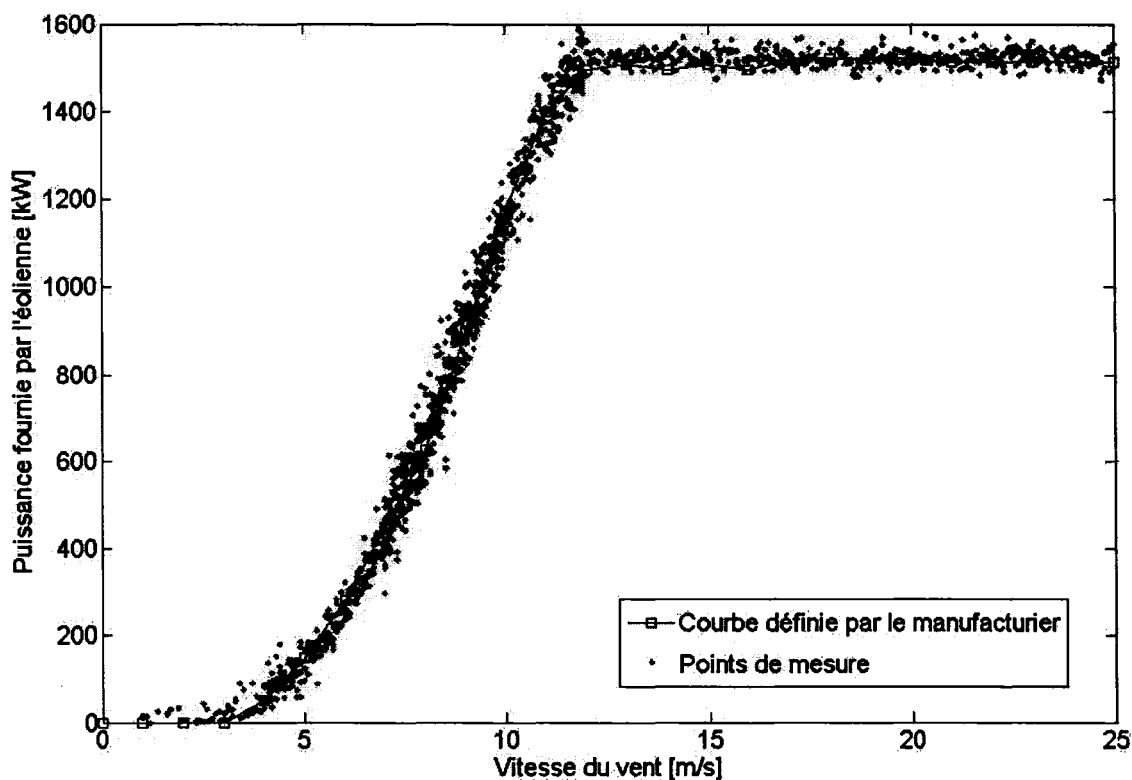


Figure 5 Courbe de puissance typique d'une éolienne de 1,5MW

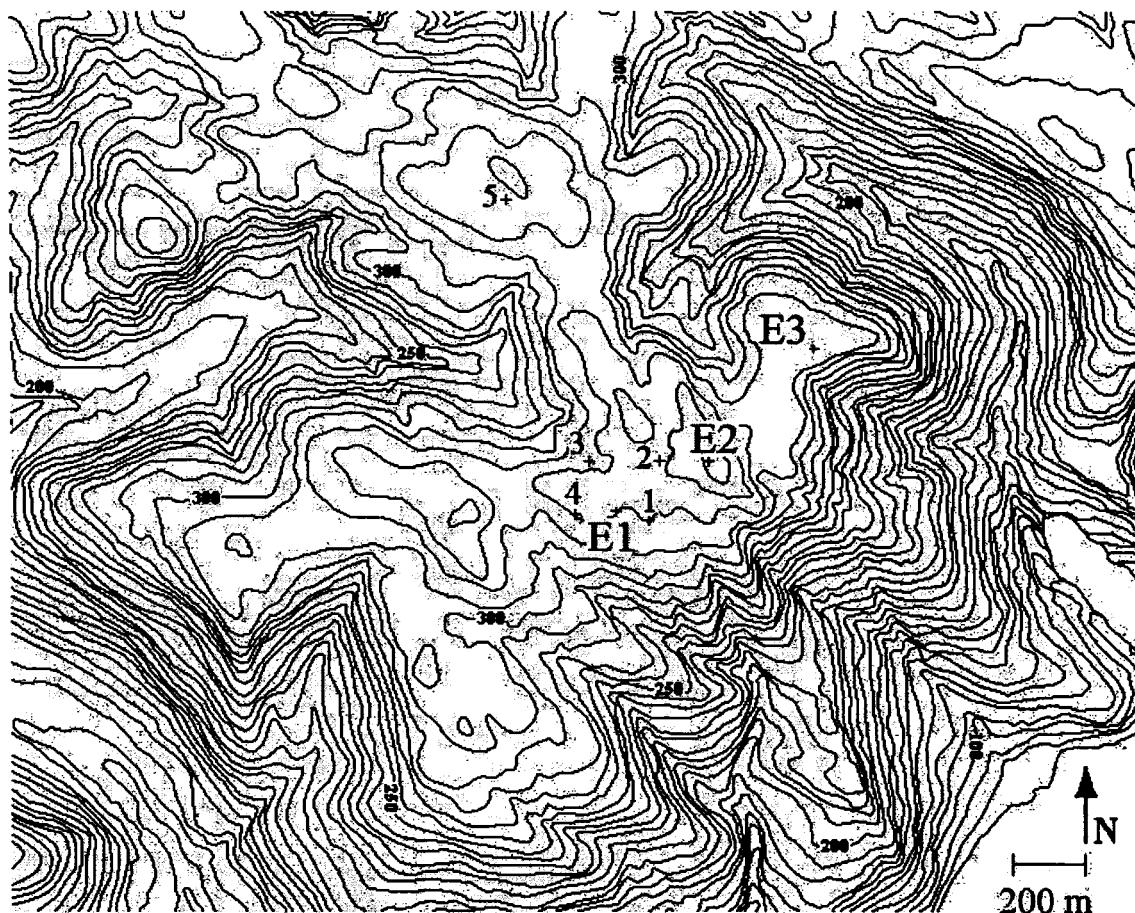
En général, la tour référence, qui permet de mesurer la vitesse non perturbée du vent, est positionnée de telle sorte que le vent dominant atteindra d'abord celle-ci pour ensuite

atteindre l'éolienne. La réalisation proprement dite du test de performance répond à une norme précise : la norme IEC61400-121 "*Wind turbines - Part 121 : Power performance measurements of grid connected wind turbines*" [4]. Cette norme exige que de nombreuses contraintes soient respectées, particulièrement en ce qui concerne les secteurs valides pour le test de performance. Il est nécessaire que le vent arrivant à la tour de référence ou à l'éolienne soit non perturbé, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir d'obstacle majeur en amont de la tour ou de l'éolienne. Ainsi, la tour référence ne doit pas se trouver dans le sillage de l'éolienne. La figure 6 présente la carte topographique du site de Rivière au Renard. Sur ce site, le test de performance pourra donc être réalisé sur l'éolienne E1 lorsque le vent vient de l'Ouest mais pas lorsqu'il vient de l'Est puisque dans cette direction, le vent arrivant à la tour référence (tour 4) est grandement perturbé par la présence de l'éolienne E1.

2.1.2 Calibration de site traditionnelle

En terrain complexe, l'hypothèse de l'écoulement horizontalement homogène n'est pas valable. Il faut procéder à une calibration de site. La calibration de site réalisée de manière traditionnelle consiste à installer deux tours météorologiques avant l'installation d'une éolienne : une première tour temporaire à la position exacte de la future éolienne et une seconde, appelée tour référence, située à une distance équivalente de deux à quatre D , où D représente le diamètre du rotor de l'éolienne. Les instruments installés sur ces deux tours (anémomètres et girouettes) recueillent les données qui permettent ensuite d'établir une relation statistique entre la vitesse du vent au sommet des deux tours. La relation obtenue permet donc, une fois la tour temporaire retirée et l'éolienne installée, de connaître avec précision la vitesse du vent à l'éolienne à partir de la mesure du vent à la tour référence et de pouvoir ainsi procéder au test de performance de la machine. On peut voir à la figure 7 les tours anémométriques installées à Rivière au Renard (Gaspésie).

Cette calibration traditionnelle comporte de nombreux désavantages : l'installation de la tour temporaire coûte environ 40 000\$. Mais plus encore, le temps nécessaire à la prise de données pour la calibration retarde l'installation de l'éolienne et, donc, la production énergétique de celle-ci. Pour un promoteur éolien, il s'agit d'un délai inutile. Enfin, si des modifications majeures survenaient sur le site, une forêt rasée par exemple, la calibration réalisée pourrait devenir caduque.



1 à 3 : Tour météo 58m
 4 : Tour référence 46m
 5 : Tour météo 40m
 E1 à E3 : Éoliennes 750kW

Figure 6 Topographie du site de Rivière au Renard

2.2 Simulation numérique de l'écoulement du vent

La solution préconisée dans ce mémoire pour remplacer la calibration de site traditionnelle est de réaliser une calibration de site virtuelle. Ceci consiste à simuler l'écoulement du vent à l'aide d'une méthode numérique. Avec une telle approche, une seule tour de mesure est requise, la tour référence, et la simulation numérique effectuée permet d'obtenir la relation des vitesses de vent aux points voulus. Il existe plusieurs modèles qui

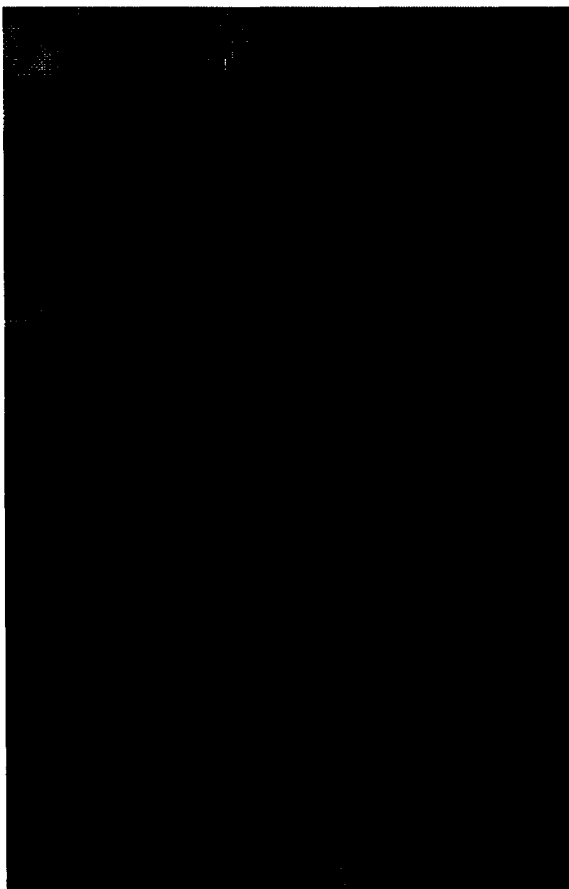


Figure 7 Mâts permanent et temporaire installés à Rivière au Renard

permettent de simuler l'écoulement du vent. L'industrie de l'énergie éolienne utilise généralement le logiciel commercial WAsP. Tel que présenté à la section 2.2.1, ce modèle simplifié donne de bons résultats sur des terrains simples mais son utilisation sur des terrains plus complexes donne des résultats mitigés. Une seconde méthode est la solution des équations de Navier-Stokes, rendue possible par les développements rapides, au cours des dernières années, de la mécanique des fluides assistée par ordinateur (*Computational Fluid Dynamics*, CFD). Cette seconde méthode peut être subdivisée selon la modélisation de la turbulence employée. Deux approches sont présentées ici, soit l'utilisation des équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps par l'approche de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*, RANS) et la technique plus récente nommée simulation des grands tourbillons (*Large Eddy Simulation*, LES).

2.2.1 Modèle WAsP

L'Atlas européen du vent (*European wind atlas*, [5]), publié en 1989, a pour objectif de présenter la distribution générale de la ressource éolienne en Europe. Plus qu'une simple base de données, ce document contient également une description de la technique employée pour obtenir les statistiques de vent. Cette méthode a été intégrée dans un programme informatique appelé WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), lequel est rapidement devenu le modèle référence en terme de modélisation du vent pour l'industrie de l'énergie éolienne. Ce programme, conçu par la filière éolienne du laboratoire Risø (Danemark), a été commercialisé et est encore très utilisé aujourd'hui lors de l'implantation de parcs éoliens.

Le fonctionnement de WAsP est relativement simple. L'idée de base est d'étudier un site en utilisant des données de vent qui proviennent d'une tour de mesure. À partir de ces données, plusieurs sous-modèles sont appliqués pour permettre d'évaluer la ressource éolienne aux alentours de ce mât. À l'aide de données de vent en un seul point de l'espace, il est possible de connaître le vent sur un vaste territoire. Évidemment, plus on s'éloigne de la source de données originale, plus l'incertitude est élevée.

Les sous-modèles utilisés sont au nombre de quatre et touchent aux aspects suivants : stratification thermique de l'atmosphère, variation de la rugosité du terrain, présence d'obstacles et, finalement, orographie du site étudié. Il s'agit de quatre facteurs ayant beaucoup d'influence sur le vent. Sur un terrain plat, l'hypothèse d'homogénéité horizontale implique que le profil vertical du vent se maintient dans l'espace. Le logiciel WAsP utilise cette hypothèse et applique ses sous-modèles pour corriger le vent en différents points de l'espace. Chacun des quatre sous-modèles est présenté sommairement.

– Sous-modèle stratification thermique

La distribution de la température dans la couche limite atmosphérique a un effet sur la turbulence et donc sur la vitesse. Cette notion de stratification thermique sera présentée plus en détail à la section 3.1.2. Un des sous-modèles de WAsP traite de ce facteur important. Cependant, dans le cadre du présent projet de maîtrise, seule la condition de stratification thermique neutre sera étudiée, ce qui signifie que

l'influence de la température sur l'écoulement du vent est nulle. Il n'est donc pas nécessaire de discuter plus en détail ce sous-modèle.

– Sous-modèle variation de la rugosité

L'écoulement du vent dans la couche limite atmosphérique est grandement influencé par les forces de frottement au sol. Cette friction peut être caractérisée par une longueur de rugosité z_0 (voir section 3.1.1 pour plus de détails sur la longueur de rugosité). Or, la rugosité d'un terrain donné est rarement homogène. À l'exception peut-être de la surface de l'océan ou d'un désert, différents éléments transforment la nature du sol : routes, clairières, forêts, champs cultivés, qui affectent la rugosité du sol. Ce sous-modèle permet de prendre en compte les variations de rugosité.

– Sous-modèle obstacle

Les obstacles, tel qu'un arbre ou une maison, peuvent être inclus dans la longueur de rugosité. Cependant, près de ces obstacles, à une distance de l'ordre de la hauteur de l'obstacle, et plus particulièrement en aval, l'écoulement est très perturbé et doit être traité différemment. Cela s'avère nécessaire lorsque la tour de mesure utilisée est située près d'un obstacle majeur : bâtiment de ferme, rangée d'arbres, etc. Dans de tels cas, le sous-modèle obstacle est utilisé : il s'agit simplement d'équations empiriques tirées d'expériences en soufflerie qui permettent de déterminer l'influence de l'obstacle sur l'écoulement du vent.

– Sous-modèle orographie

L'un des facteurs principaux influençant l'écoulement du vent est l'orographie du site étudié. La présence d'une colline, d'une montagne, d'une vallée, etc., aura un impact important sur la couche limite atmosphérique. L'idée du sous-modèle d'orographie est de modéliser un écoulement potentiel. Les équations du mouvement sont simplifiées, ce qui permet d'obtenir un modèle fonctionnel qui requiert peu de temps de calcul. Le développement des équations peut être trouvé dans [6]. L'hypothèse principale avancée est que l'effet d'une variation de la topographie peut être décrit comme une perturbation $\mathbf{u} = (u, v, w)$ affectant l'écoulement moyen horizontal connu, $U_0 = (U_0(z), V_0(z), 0)$, tel que $U = U_0 + u$, $V = V_0 + v$ et $W = w$. L'ensemble des hypothèses utilisées permet d'obtenir une forme linéarisée des équations

du mouvement dans la couche limite atmosphérique :

$$U_0 \frac{\partial u}{\partial x} + V_0 \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + K_m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

$$U_0 \frac{\partial v}{\partial x} + V_0 \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + K_m \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

$$U_0 \frac{\partial w}{\partial x} + V_0 \frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + K_m \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

où K_m est une constante qui dépend de la hauteur z de même que de l'écoulement ($K_m = \mu_t/\rho$). Ces équations permettent d'obtenir, avec un minimum de ressource CPU, de bons résultats pour des terrains peu complexes. Cependant, de nombreux auteurs mentionnent que ce type de modélisation est limitée, particulièrement en regard de la pente maximale du terrain [7, 8, 9, 10].

Le fonctionnement de WAsP, résumé par le schéma de la figure 8, nécessite initialement deux types d'informations : les données de vent, sous forme de série temporelle, généralement moyennées aux 10 minutes, et une description détaillée du site. La série temporelle est alors divisée par direction et présentée sous forme de paramètres de Weibull. À ce stade, les données initiales sont classées, sans plus. Les sous-modèles présentés ci-dessus : obstacle, orographie et variation de la rugosité sont alors employés pour corriger les paramètres de Weibull initiaux. À l'aide des rugosités observées sur le site, une première transformation a lieu, servant à dégager les propriétés du vent géostrophique. Une seconde transformation permet d'obtenir les propriétés du vent pour plusieurs hauteurs et classes de rugosité. À ce stade, les propriétés statistiques régionales sont connues. Suite à cette étape, une extrapolation logarithmique permet de connaître les propriétés du vent pour une hauteur et un lieu géographique donnés, soit généralement la hauteur du moyeu des éoliennes qui seront installées sur le site étudié. Une correction pour la stratification thermique peut alors être appliquée et les résultats finaux sont obtenus. Ceux-ci peuvent être présentés sous différentes formes, selon les besoins du projet.

2.2.1.1 Limitations du modèle WAsP

Initialement, l'atlas européen du vent et sa version informatique WAsP ont été conçus pour donner une idée du potentiel énergétique éolien de l'Europe. Il s'agit d'une application où

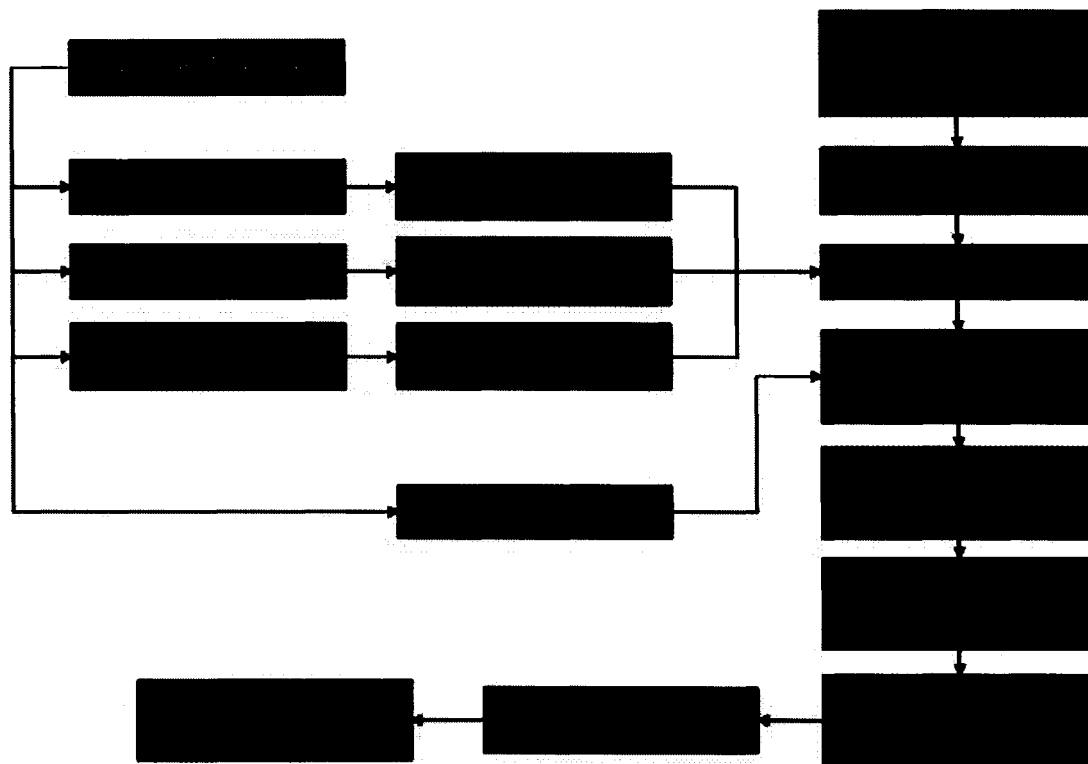


Figure 8 Fonctionnement du modèle WAsP

la précision obtenue n'est pas cruciale puisque l'objectif est simplement d'avoir une idée des sites les plus intéressants pour l'installation d'éoliennes. Par contre, lorsque la précision du résultat importe, comme dans le cas d'une calibration de site virtuelle, un modèle comme WAsP présente de nombreuses lacunes dont les deux principales sont reliées aux sous-modèles de rugosité et d'orographie. Lorsque la rugosité d'un site est élevée, c'est-à-dire lorsque la longueur de rugosité dépasse 40cm, ce qui survient sur un terrain recouvert de forêt, le sous-modèle de variation de la rugosité entraîne des incertitudes de l'ordre de 15% des valeurs de vitesse de vent prédites [5]. De plus, le sous-modèle d'orographie est valable uniquement sur des terrains peu complexes. Dès que les dimensions d'une montagne deviennent importantes, ou dès que les pentes observées sur un terrain dépassent 30%, les résultats obtenus sont alors très peu fiables, particulièrement en aval d'un obstacle où il y a présence de recirculation. D'ailleurs, WAsP n'arrive aucunement à simuler le phénomène de recirculation [6]. Toutes ces limites sont clairement identifiées dans l'Atlas européen du vent [5]. Le logiciel WAsP est encore très utilisé aujourd'hui parce qu'il est

rapide d'utilisation et également parce que les résultats obtenus sont généralement bons sur des terrains simples. Cependant, de nombreux auteurs ont souligné les faiblesses de WAsP sur des terrains complexes [7, 8, 9, 10].

2.2.2 Mécanique des fluides assistée par ordinateur : équations de Navier-Stokes et modélisation de la turbulence (RANS)

L'écoulement du vent, comme celui de n'importe quelle autre fluide, peut être défini à l'aide des équations de Navier-Stokes [11]. L'une des particularités de l'écoulement atmosphérique repose sur son caractère très turbulent. La turbulence peut être définie comme une superposition de fluctuations irrégulières sur l'écoulement moyen [11]. Stull [12] ajoute qu'il est possible de visualiser la turbulence comme un très grand nombre de tourbillons de toutes les grandeurs, superposés les uns aux autres. En fait, il n'existe probablement aucune définition de la turbulence qui arrive à décrire parfaitement ce phénomène complexe. Cependant, une référence en la matière, le livre écrit par Wilcox [13], citant Hinze [14], la décrit ainsi :

Le mouvement d'un fluide turbulent est une condition irrégulière d'un écoulement où différentes quantités présentent des variations aléatoires dans le temps et l'espace, de telle sorte que différentes valeurs moyennes peuvent être établies. (traduction libre)

Cette turbulence affecte l'écoulement moyen, ce qui signifie que, même si l'on ne veut que connaître les valeurs moyennes de la vitesse du vent, il est nécessaire d'avoir des informations relatives à la turbulence. Seuls quelques modèles seront présentés dans ce chapitre. Le lecteur intéressé pourra se référer à l'article de Gosman [15] pour une discussion plus complète des développements récents en CFD appliqués à la simulation du vent, discussion accordant une attention particulière aux différentes méthodes de modélisation de la turbulence utilisées.

L'une des méthodes qui permet de modéliser la turbulence est l'utilisation des équations RANS. L'approche RANS consiste à diviser la vitesse instantanée du vent (u) en deux composantes : une composante moyenne (\bar{u}) et une composante turbulente (u') : $u = \bar{u} + u'$. Cette décomposition de la vitesse est introduite dans les équations de Navier-Stokes et ces dernières sont moyennées pour ainsi obtenir les équations régissant l'écoulement moyen.

L'approche RANS fait apparaître des termes de corrélation des quantités turbulentes dans les équations moyennes de Navier-Stokes, qu'il faut modéliser. Plusieurs modèles existent, les plus utilisés étant principalement le modèle à une équation Spalart-Allmaras et les modèles à deux équations $\kappa - \omega$ et $\kappa - \epsilon$.

Les travaux de la Chaire de recherche du Prof. Masson ont permis de démontrer la validité du modèle $\kappa - \epsilon$ pour reproduire des écoulements atmosphériques. On peut entre autre citer les travaux de Leclerc [16] et de Alinot et Masson [17, 18]. De nombreux auteurs ont également démontré les possibilités de ce modèle pour simuler des écoulements atmosphériques [19, 20]. Enfin, Murakami [21] présente différentes variantes de ce modèle.

Bien que l'approche RANS soit tout à fait appropriée pour de nombreux types d'écoulement atmosphériques, comme le démontre les différents travaux cités ci-dessus, cette approche comporte tout de même certaines lacunes, la plus importante étant les mauvaises prédictions concernant les écoulements avec recirculation. Comme les éoliennes ne sont généralement pas installées dans ces zones, cette lacune n'a que peu de conséquences pour l'application étudiée dans ce mémoire et l'approche RANS semble donc toute désignée à l'atteinte des objectifs de ce travail de maîtrise.

Bien que l'approche RANS soit principalement utilisée pour la recherche, un logiciel commercial de simulation du vent, explicitement conçu pour des applications relatives à l'énergie éolienne, utilise cette méthode. Il s'agit du logiciel WindSim, développé par la firme Vector AS, basée en Norvège. La version commerciale du logiciel a été lancée en 2003. Plus de détails pourront être trouvés au sujet de ce logiciel dans les articles de Albrecht et Klesitz [22] ou Gravdahl et Harstveit [23].

2.2.3 Mécanique des fluides assistée par ordinateur : équations de Navier-Stokes et calcul explicite des grands tourbillons (LES)

Dans le but d'améliorer la précision des simulations numériques d'écoulements turbulents, une nouvelle méthode a été développée au cours des dernières années. Cette méthode, jusqu'à tout récemment difficile à appliquer à des problèmes à géométrie complexe, à cause d'un manque de puissance informatique, consiste à effectuer des moyennes d'ensemble à une échelle de l'ordre de la taille des éléments du maillage utilisé. Les grands tourbillons

sont alors directement solutionnés et seuls les petits tourbillons doivent être modélisés. La modélisation effectuée porte le nom de *Subgrid Scale Model* (SGS) et la méthode dans son ensemble porte le nom de simulation des grands tourbillons (*Large Eddy Simulation*, LES). Il est à noter que de nombreux modèles SGS existent.

Comme les petits tourbillons sont supposés avoir un comportement plus universel, il en résulte de meilleurs résultats. Par contre les calculs supplémentaires rendent les méthodes LES très dispendieuses en terme de temps de calcul. Bien qu'elles soient de plus en plus utilisées, ces méthodes nécessitent des ressources informatiques très importantes et ne sont pas applicables lorsqu'il est souhaitable de réaliser rapidement de nombreuses simulations.

Dans le champ des écoulements atmosphériques, certains auteurs ont tout de même réussi à obtenir des résultats intéressants à l'aide de méthodes LES. Iizuka et Kondo [24] ont étudié les performances de différents modèles SGS pour un écoulement au-dessus d'une colline. De même, Uchida et Ohya [25] ont utilisé un modèle LES pour simuler l'écoulement atmosphérique au-dessus d'une région de $9,5\text{km}$ par 5km et ont démontré qu'une telle technique parvenait à simuler correctement les zones de séparation et de recirculation.

Cette démarche est très intéressante en raison de la précision qu'elle permet d'obtenir. Cependant, comme l'objectif de ce mémoire est de développer une méthode qui pourrait, dans un avenir rapproché, être utilisée par l'industrie de l'énergie éolienne, les méthodes LES ne sont pas encore à un stade suffisamment avancé. Et surtout, elles demeurent beaucoup trop dispendieuses en temps de calcul. Pour ces raisons, les méthodes LES n'ont pas été retenues dans le cadre de ce travail.

2.3 Synthèse sur les simulations en terrains non plats déjà réalisées

Il est bon de revoir différentes simulations disponibles dans la littérature. Sans faire une étude exhaustive de toutes les topographies analysées jusqu'à maintenant, les deux sous-sections qui suivent présentent quelques-uns des cas déjà étudiés. Le lecteur intéressé pourra se référer à l'article de Bitsuamlak et al. [26] pour une revue de la littérature plus détaillée. De nombreux résultats y sont résumés. Les simulations qui y sont discutées diffèrent par le type de modèle de turbulence utilisé, les conditions frontières appliquées, les maillages employés, de même que par les différentes topographies étudiées.

2.3.1 Terrains complexes idéalisés : collines et escarpements

L'analyse d'un terrain réel est un cas très complexe et les premières simulations numériques d'écoulements atmosphériques ont donc porté sur des cas beaucoup plus simples. L'un des cas fréquemment cité dans la littérature est l'étude de l'écoulement bidimensionnel sur une colline idéalisée. Une paramétrisation mathématique permet de définir une colline parfaitement symétrique. Il est alors possible de procéder à l'étude numérique de l'écoulement sur cette colline, mais également à une étude expérimentale en soufflerie.

Ferreira et al. [27] ont procédé à ce genre de travail. L'équation 2.4 présente la paramétrisation qu'ils ont utilisée pour déterminer la forme de la colline.

$$z = \frac{H}{2} \left[1 + \sin \left(\pi \frac{x - L}{2L} \right) \right] \quad (2.4)$$

La figure 9 présente les quatre collines qu'ils ont étudiées. Leur approche compare les résultats numériques obtenus à l'aide d'un modèle RANS $\kappa - \epsilon$ à des données expérimentales recueillies en soufflerie. Ils utilisent également une méthode de maillage qui concentre les noeuds près des frontières. Les résultats présentés incluent des comparaisons de la pression statique observée à la paroi et du ratio de vitesse observé au sommet de la colline de même qu'une observation générale de l'écoulement et de la zone de recirculation, que l'on peut voir à la figure 10. Leurs résultats permettent de conclure à une corrélation relativement satisfaisante entre l'approche expérimentale et le modèle RANS $\kappa - \epsilon$.

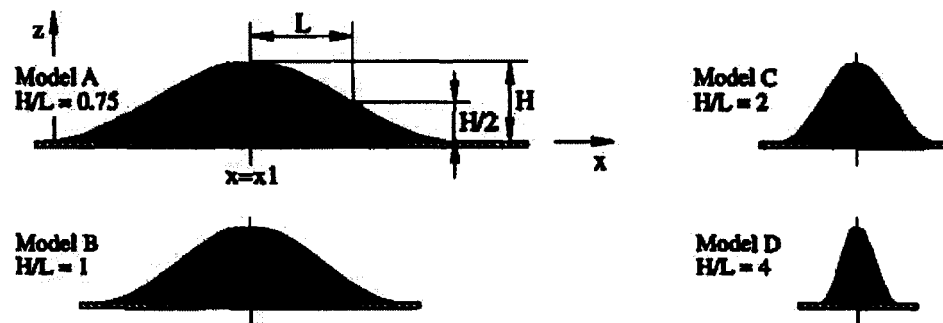


Figure 9 Différentes collines étudiées par Ferreira et al. [27]

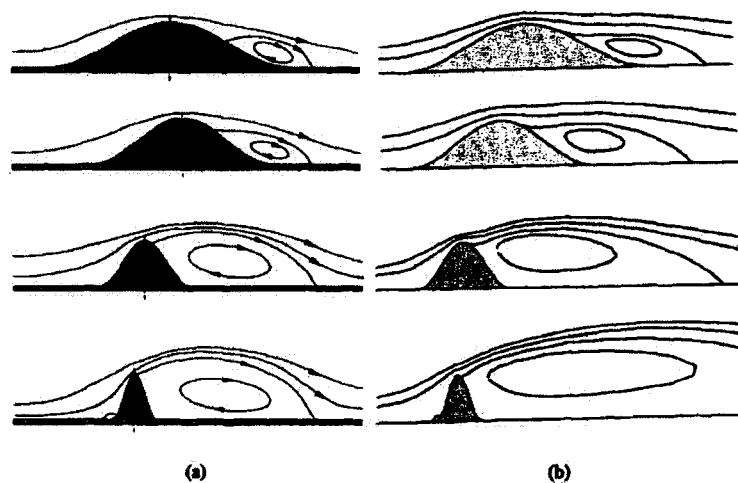


Figure 10 Zones de recirculation obtenues par Ferreira et al. [27] pour différentes collines : (a) Données expérimentales et (b) Résultats numériques

Les travaux de Lun et al. [20] sont similaires. Deux éléments topographiques sont étudiés : une colline et un escarpement. La figure 11 présente ces deux cas. La particularité de leur recherche est cependant de simuler l'écoulement atmosphérique sur ces deux éléments à l'aide de trois modèles de turbulence différents : le modèle $\kappa - \epsilon$ standard ainsi que les modèles $\kappa - \epsilon$ modifiés de Durbin [28] et de Shih [29].

Les simulations numériques effectuées, comparées à des données expérimentales, leur permettent de conclure que le modèle $\kappa - \epsilon$ standard surestime l'énergie cinétique turbulente près du coin supérieur amont de l'escarpement, ce qui résulte en une légère erreur au niveau des profils de vitesse près de ce point. De même, dans le cas de la colline, les modèles modifiés semblent mieux performer que le modèle standard, mais la différence principale ne s'observe que sur les profils d'énergie cinétique ; les profils de vitesse obtenus à l'aide des trois modèles donnent des résultats à toute fin pratique identiques, sauf peut-être en ce qui concerne la position exacte des points de séparation et de réattachement. Dans ce cas, le modèle de Shih donne de très bons résultats, suivi de près par le modèle standard, alors que le modèle de Durbin est relativement loin des données expérimentales. Enfin, les auteurs soulignent également que la rugosité de la surface a une très grande influence sur la position des points de séparation et de réattachement de l'écoulement. La séparation

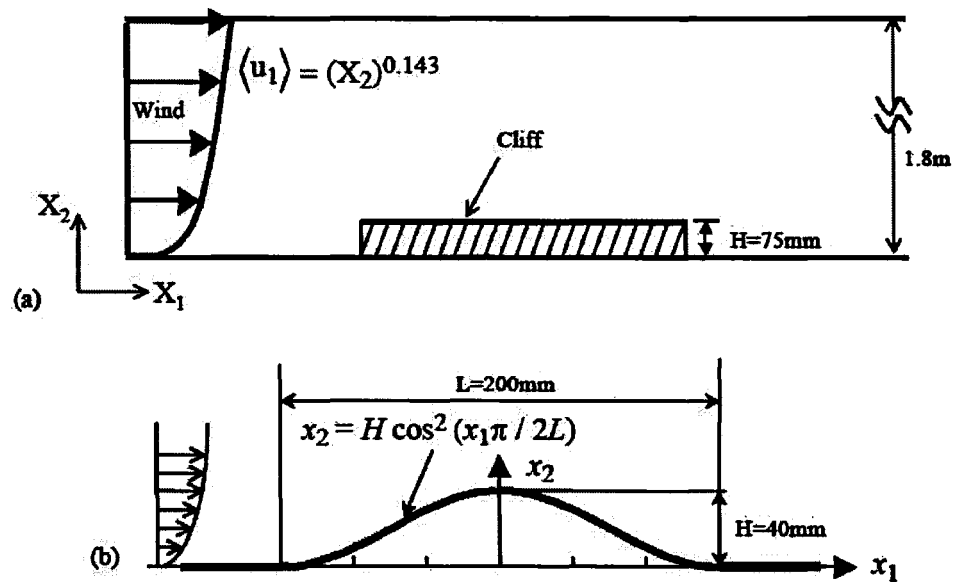


Figure 11 Colline et escarpement étudiés par Lun et al. [20]

début plus rapidement lorsque la rugosité est élevée, ce qui crée une zone de recirculation plus grande.

Plusieurs autres auteurs se sont attaqués à des problèmes similaires. Notons par exemple les travaux de Kim et al. [30, 31]. Enfin, la littérature présente de nombreux écrits portant sur la simulation d'écoulements atmosphériques sur et autour de bâtiments. Bien que le type d'application relié à ce genre de simulation soit différent, les méthodes employées sont très similaires. Par exemple, l'article de Bitsuamlak et al. [32] présente une étude numérique de l'effet de la topographie sur l'écoulement du vent. Les équations RANS, complétées par le modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ standard, sont utilisées. L'objectif de ce travail était de déterminer des paramètres relatifs aux écoulements étudiés qui permettront d'estimer les charges aérodynamiques sur les bâtiments construits près de ou sur des terrains complexes. Les résultats d'intérêt sont les mêmes que ceux des travaux relatifs à l'énergie éolienne : les facteurs d'accélération créés par différentes géométries, incluant des escarpements, des collines isolées ou multiples et des vallées sont présentés. De plus, les effets de la rugosité du sol y sont évalués. La conclusion des auteurs est que la CFD permet de bien reproduire les facteurs d'accélération observés expérimentalement.

Il est également intéressant de mentionner les travaux de Lakehal [33], Lien et al. [34] et Wright et al. [35, 36, 37]. Tous trois utilisent des modèles $\kappa - \epsilon$ standards et/ou modifiés et arrivent à la conclusion que ce genre de modèle est généralement apte à reproduire l'écoulement atmosphérique autour de bâtiments, malgré certaines lacunes quant à la prédiction des profils de turbulence.

Le principal problème du modèle $\kappa - \epsilon$ standard est qu'il suppose que la turbulence est isotropique alors que, dans la réalité, elle ne l'est pas, principalement près de coins pointus d'un bâtiment, d'un escarpement ou d'un changement de pente brusque, ce qui fait dire à certains auteurs que ce modèle n'est pas adapté à l'étude d'un écoulement atmosphérique en terrain complexe. Cependant, malgré cette lacune, il a été démontré (voir [38]) que ce type de modèle pouvait permettre de prédire des caractéristiques importantes d'un écoulement turbulent tels que la séparation, le point de réattachement ou même certains phénomènes instationnaires.

2.3.2 Terrains réels

Avant de procéder au choix final du modèle de turbulence à utiliser dans le cadre de cette maîtrise, il est intéressant de savoir que certains auteurs se sont déjà attaqués à la simulation d'écoulement atmosphérique sur terrains réels. En 2004, Villuaneva et al. [8] ont étudié l'écoulement du vent sur un terrain très complexe. Ils ont utilisé l'approche RANS et le modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$, mais en modifiant les constantes originales du modèle, pour simuler le vent au-dessus d'un terrain situé près de Pamplona, dans la région de Navarre, en Espagne. La taille du terrain étudié était de $14km$ par $14km$ et ils ont comparé les résultats numériques obtenus à une campagne de prise de mesures effectuée sur site à l'aide de quatre mâts météorologiques. Leur conclusion est qu'un tel modèle permet de décrire correctement l'écoulement du vent sur un terrain complexe.

De manière similaire, Eidsvik [39] a simulé l'écoulement du vent au-dessus de la colline de Askervein à l'aide de la méthode RANS $\kappa - \epsilon$. Cette colline est probablement l'une des plus célèbres en ce qui concerne les écoulements atmosphériques puisque des études expérimentales très détaillées y ont été effectuées à la fin des années 1990. Une carte topographique de cette colline est présentée à la figure 12.

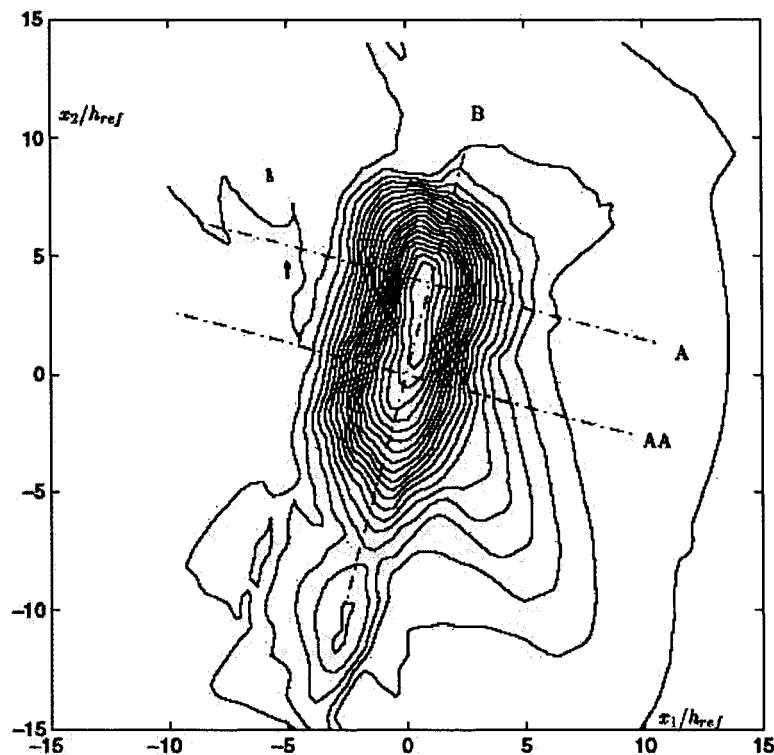


Figure 12 Colline Askervein, $h_{ref} = 121m$, courbes de niveau chaque $6m$ (Tirée de [39])

Les résultats obtenus par Eidsvik sont concluants : on peut voir sur la figure 13 les profils de vitesse déterminés à une hauteur de $10m$, le long de la ligne de coupe AA (voir figure 12). De manière générale, Eidsvik conclue que la méthode numérique proposée permet d'effectuer des prédictions qui se situent à l'intérieur de l'incertitude expérimentale.

2.4 Choix du modèle

Comme cela a été présenté, trois techniques principales existent pour simuler l'écoulement du vent : l'utilisation d'un modèle linéarisé de type WAsP, l'approche RANS complétée par un modèle de turbulence et enfin l'approche par simulation directe des grands tourbillons. Les modèles linéarisés sont présentement très utilisés par l'industrie éolienne, ce qui leur confère un grand avantage. L'un des objectifs de ce mémoire est de développer une méthode qui pourra rapidement être employée par l'industrie ; choisir un outil déjà connu serait donc avantageux. Par contre, il a été démontré par plusieurs auteurs que ce

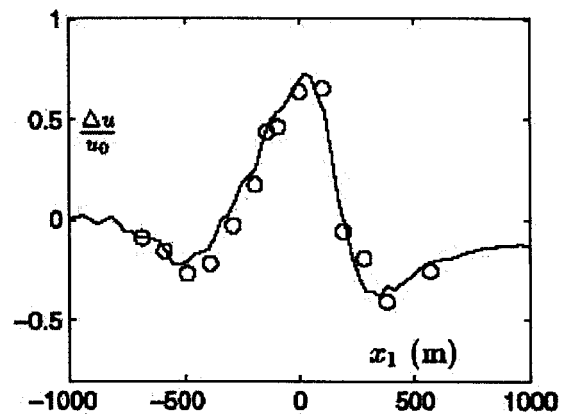


Figure 13 Profils de vitesse numériques et expérimentaux obtenus par Eidsvik [39], colline Askervein

type de méthode linéarisée n'est valable que pour des sites simples. L'utilisation d'une méthode plus complexe doit donc être envisagée. Cabezón et al. [9] soulignent que, malgré les ressources informatiques plus grandes que nécessite une approche RANS, ce type de modèle non-linéaire est un outil prometteur en ce qui concerne la modélisation du vent en terrain complexe.

Si le seul objectif était d'obtenir la solution la plus exacte possible, l'utilisation d'une méthode LES serait la plus appropriée, puisqu'il semble entendu que cette approche est la plus précise. Cependant, la méthode LES nécessite des ressources informatiques trop importantes et il est utopique de croire que l'industrie éolienne pourra se permettre d'utiliser ce type d'approche sous peu. Parce qu'il a été démontré que la méthode RANS pouvait être valide pour simuler un écoulement atmosphérique, en particulier certains phénomènes complexes (voir [38, 39]), et aussi parce que cette méthode a déjà été utilisée par nombre d'auteurs [18, 20, 27, 39], le présent travail utilisera les équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps par l'approche de Reynolds, complétées par un modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ modifié.

CHAPITRE 3

CONCEPTS PHYSIQUES

Dans le cadre de ce travail dont l'objectif est de réaliser la calibration virtuelle d'un site éolien, deux concepts physiques très importants doivent être maîtrisés. Le présent chapitre présentera donc de manière détaillée des notions relatives à l'écoulement en couche limite atmosphérique, ainsi que les différentes possibilités d'une modélisation de la surface d'un terrain complexe.

3.1 Écoulement en couche limite atmosphérique

Pour mettre en contexte la présente recherche, qui vise à modéliser la couche limite atmosphérique, il convient de d'abord présenter l'atmosphère dans sa totalité. Celle-ci consiste en l'ensemble de la masse d'air qui recouvre la Terre. L'atmosphère est composée de quatre couches [40].

- La troposphère est la couche la plus près de la surface terrestre. Son épaisseur, variable selon les saisons et la position sur le globe, est d'environ 11km . Il s'agit de la zone où se déroule l'ensemble des phénomènes météorologiques [17]. La présente étude se concentrera sur cette couche.
- La stratosphère, couche juste au-dessus de la troposphère qui, entre autres choses, contient la couche d'ozone, est une condition préalable à la présence de la vie sur Terre puisqu'elle bloque les rayons UV extrêmement nocifs pour tous les êtres vivants. La stratosphère s'étend du sommet de la troposphère jusqu'à une altitude d'environ 50km .
- La mésosphère s'étend sur environ 35km au-dessus de la stratosphère. C'est la zone où les poussières et particules qui arrivent de l'espace s'enflamment, dû à la friction de l'air.
- Enfin, la thermosphère s'étend à des centaines de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. C'est une zone qui ne contient qu'une infime partie de tout l'air composant l'atmosphère. La pression y est presque nulle. La thermosphère

contient, dans sa partie basse, la ionosphère, qui réfléchit les ondes courtes et permet ainsi la communication par ondes radio.

La figure 14 présente les différentes couches énumérées ci-dessus.

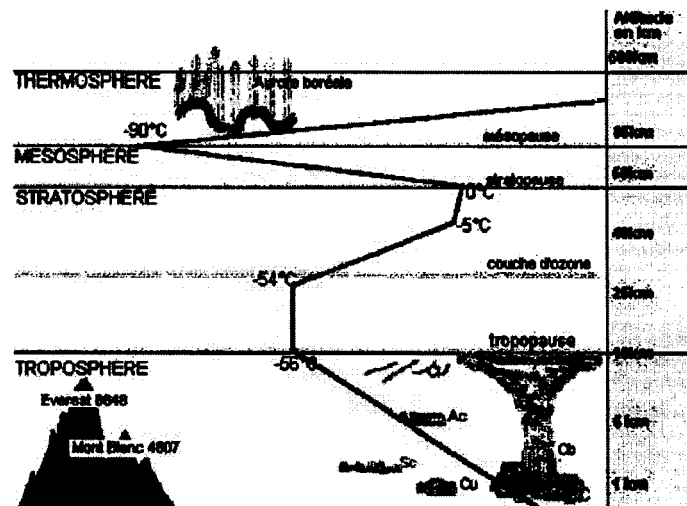


Figure 14 Structure de l'atmosphère (Tirée de [40])

3.1.1 Description de la troposphère

C'est dans la troposphère que les mouvements de l'air sont les plus importants ; l'humain en subit les conséquences tous les jours. C'est également la zone de l'atmosphère qui contient la plus grande quantité d'air, soit près de 85% de sa masse totale, ainsi que près de 100% de sa quantité d'eau. La troposphère se divise en deux parties distinctes, soit la couche limite et l'atmosphère libre. Cette dernière, située au-dessus de la couche limite et faisant la jonction avec la stratosphère, est caractérisée par des forces de frottement négligeables. La couche limite s'étend de la surface terrestre jusqu'à une altitude d'environ un kilomètre, bien que cette mesure soit très variable dans le temps et l'espace. Elle est définie par la présence de forces visqueuses importantes. On y mesure des changements verticaux rapides de la vitesse, de la température et de constituants divers (par exemple l'humidité, des polluants, etc.). Cette couche est directement influencée par le rayonnement solaire, la végétation et la topographie du sol, ce qui explique qu'elle puisse varier, à l'intérieur d'une seule journée, de quelques centaines de mètres à un peu plus d'un kilomètre. Il s'agit

d'une couche où l'écoulement est toujours turbulent, ce qui oblige à modéliser la turbulence pour arriver à bien représenter le mouvement moyen de l'air. La figure 15 présente les deux couches de la troposphère.

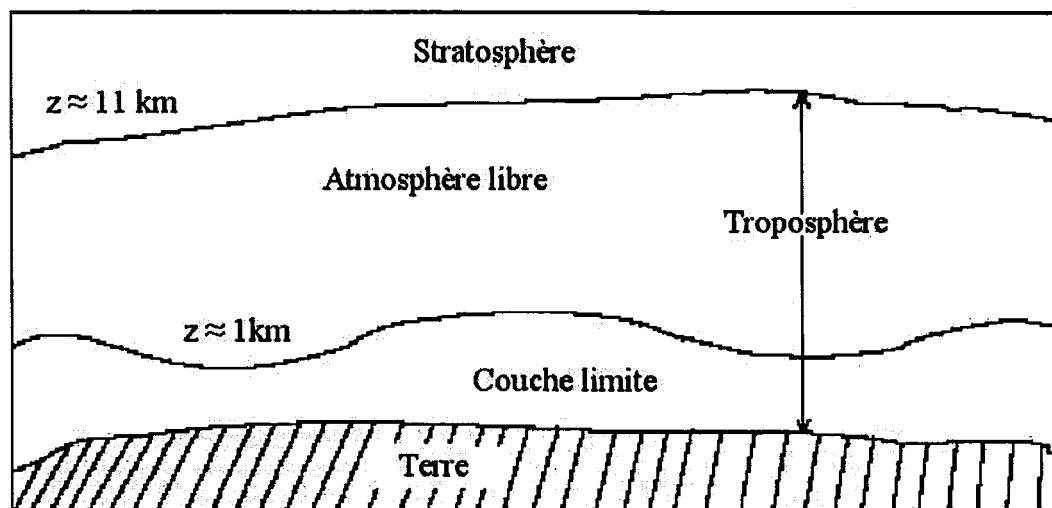


Figure 15 Composition de la troposphère

La couche limite se divise elle-même en trois parties distinctes :

- La sous-couche rugueuse, qui est la partie de la couche limite entrant en contact direct avec la surface terrestre. L'existence de cette couche vient de l'impossibilité de définir avec précision la surface réelle de la Terre, en raison d'un trop grand nombre d'irrégularités. La sous-couche rugueuse contient la végétation, les roches et les bâtiments. Cette zone est d'une importance capitale puisqu'elle détermine les paramètres de cisaillement du vent. Le profil du vent dans toute la couche limite ne sera pas le même si le terrain étudié est celui d'un aéroport, s'il est composé uniquement de plantes basses ou s'il est composé d'une dense forêt. Deux paramètres servent à définir cette sous-couche, soit la longueur de rugosité z_0 et la hauteur de déplacement d . Cette dernière est non-nulle uniquement lorsque l'air se déplace au-dessus d'une zone boisée. La hauteur de déplacement tient compte de la présence d'une forêt : la surface est alors "déplacée". On ne peut a priori connaître la valeur

de d , qui varie selon le type d'arbres ainsi que l'espacement entre chacun. Cependant, en règle générale, la hauteur de déplacement est d'environ $\frac{3}{4}h_c$, où h_c est la hauteur moyenne des arbres d'une forêt. Entre les limites de la hauteur d , l'écoulement n'est généralement pas résolu puisqu'il n'est pas nécessaire à la solution de la couche limite. Plus de détails seront donnés sur la hauteur de déplacement à la section 3.1.3.2.

La longueur de rugosité consiste en la hauteur au-dessus du sol ou au-dessus de la hauteur de déplacement d , selon le cas, à laquelle la vitesse du vent est nulle. Le paramètre z_0 est très variable et dépend du type de terrain ; le tableau I présente la valeur de z_0 pour différents terrains¹. Bien qu'il existe des valeurs tabulées pour la longueur de rugosité, il est généralement nécessaire de déterminer expérimentalement la valeur de z_0 pour un site donné.

Même si la vitesse du vent est en moyenne nulle à la hauteur $d + z_0$, un écoulement existe à l'intérieur de cette couche. Il s'agit d'un écoulement tridimensionnel non-homogène, turbulent et instationnaire. Cette partie de l'écoulement étant très difficilement modélisable, l'utilisation des notions de longueur de rugosité et de hauteur de déplacement est très utile.

Tableau I

Longueur de rugosité pour différentes surfaces

Description du terrain	z_0 [mm]	Classe de rugosité
Glace très régulière	0.01	0.0
Mer calme	0.20	0.5
Surface de neige	3.00	0.5
Herbes courtes	8.00	0.5
Champ de blé	50.00	1.5
Arbres dispersés	100.00	3.0
Centre-ville	3000.00	4.0

- La couche limite de surface est la région où la force de Coriolis est négligeable par rapport aux forces visqueuses. La distribution du vent y est très dépendante de

¹Valeurs tirées de [1], classes de rugosité tirées de [5]

la distribution de la température. La couche limite de surface représente environ 10% de l'ensemble de la couche limite et s'étend donc du sol jusqu'à une hauteur d'environ 100m.

- La couche d'Ekman correspond à la transition entre la couche limite de surface et l'atmosphère libre. Dans cette zone, les forces visqueuses, la force de Coriolis et les forces de flottaison dues à la stratification thermique sont toutes du même ordre. À la hauteur où la couche d'Ekman rejoint l'atmosphère libre apparaît le vent géostrophique, un vent qui résulte de l'équilibre de la force due au gradient horizontal de pression et de la force de Coriolis. Il s'agit d'un vent purement horizontal et, pour une position donnée sur la Terre et un instant donné, ce vent peut être considéré constant.

3.1.2 Notion de stratification thermique

La stratification thermique de la couche limite n'a pas été abordée pour le moment. Or, les forces de flottaison agissant dans cette couche, dues au profil vertical de température et à la force de gravité, sont des forces importantes dans les mouvements verticaux de l'air. Toute particule dans l'espace est soumise à deux forces verticales : la force de gravité, qui dépend du poids de la particule, et la poussée d'Archimède, dont l'intensité est égale au poids de l'air ambiant déplacé, poids qui dépend de la température². Trois cas peuvent survenir :

- Si la température d'une particule amenée de manière adiabatique de sa position d'origine à une hauteur supérieure est plus froide que la température ambiante à la hauteur donnée, la poussée d'Archimède est alors plus faible que la force de gravité et la particule aura tendance à revenir à sa position initiale. On dit alors que la stratification thermique de l'atmosphère est stable. Cette situation survient par exemple lorsqu'une masse d'air chaud s'installe au-dessus d'une masse d'air froid.
- Si, au contraire, la température d'une particule amenée de manière adiabatique de sa position d'origine à une hauteur supérieure est plus chaude que la température

²Dans les paragraphes qui suivent, le terme température est employé au sens de température potentielle virtuelle, ce qui permet de tenir compte, lors d'un déplacement vertical d'une particule, d'un changement d'humidité relative de même que d'un changement de pression. Plus de détails sur la température potentielle virtuelle peuvent être trouvés dans Stull [12].

ambiante, alors la poussée d'Archimède est plus grande que la force de gravité et la particule aura tendance à poursuivre son ascension. On dit alors que la stratification de l'atmosphère est instable. La stratification thermique a donc tendance, dans cette situation, à augmenter les mouvements verticaux de l'air. Cette situation survient très fréquemment, par exemple lorsque le soleil se lève et chauffe la surface de la Terre. L'air près du sol se réchauffe plus rapidement et a tendance à monter.

- Enfin, lorsque la température est identique à travers toute une couche d'air, on dit alors que cette couche est neutre.

La figure 16 présente deux cas de stratification thermique. Ce graphique permet de bien identifier l'état d'une couche d'air. À gauche, le profil est stable : une particule, prise à n'importe quelle position et ramenée adiabatiquement à une position plus basse, aura une température plus chaude que l'air environnant. La particule va donc revenir à sa position d'origine. Si la même particule est déplacée vers une altitude plus élevée, sa température sera plus froide que la température environnante et elle aura à nouveau tendance à revenir à sa position d'origine. Le cas instable est présenté à droite : les conclusions précédentes sont alors inversées. Enfin, une couche d'air peut être définie localement et globalement de manière différente. Sur la figure, les zones A et B sont neutres (localement), ce qui n'empêche pas l'ensemble de la couche limite d'être stable ou instable.

Ces explications démontrent bien que le profil de température influence le mouvement des particules. Pour représenter au mieux la couche limite atmosphérique, il faudrait donc introduire l'équation d'énergie dans les calculs et ainsi obtenir une distribution verticale de la température. Cependant, l'introduction de cette équation dépasse le cadre de ce mémoire. Il sera donc supposé que la stratification thermique de l'air est neutre.

3.1.3 Théorie de Monin-Obukhov

Comme le but de ce mémoire est de représenter l'écoulement du vent sur un terrain complexe, il devient très difficile de déterminer les conditions d'entrée sur le domaine, aussi bien en ce qui concerne les composantes de la vitesse que la turbulence. Pour minimiser ce problème, une méthode d'enchâssement de domaines (*nesting method*) sera utilisée (voir section 5.1.2.1). Malgré cela, il sera toujours nécessaire, à un point ou un autre du travail, de définir une condition d'entrée.

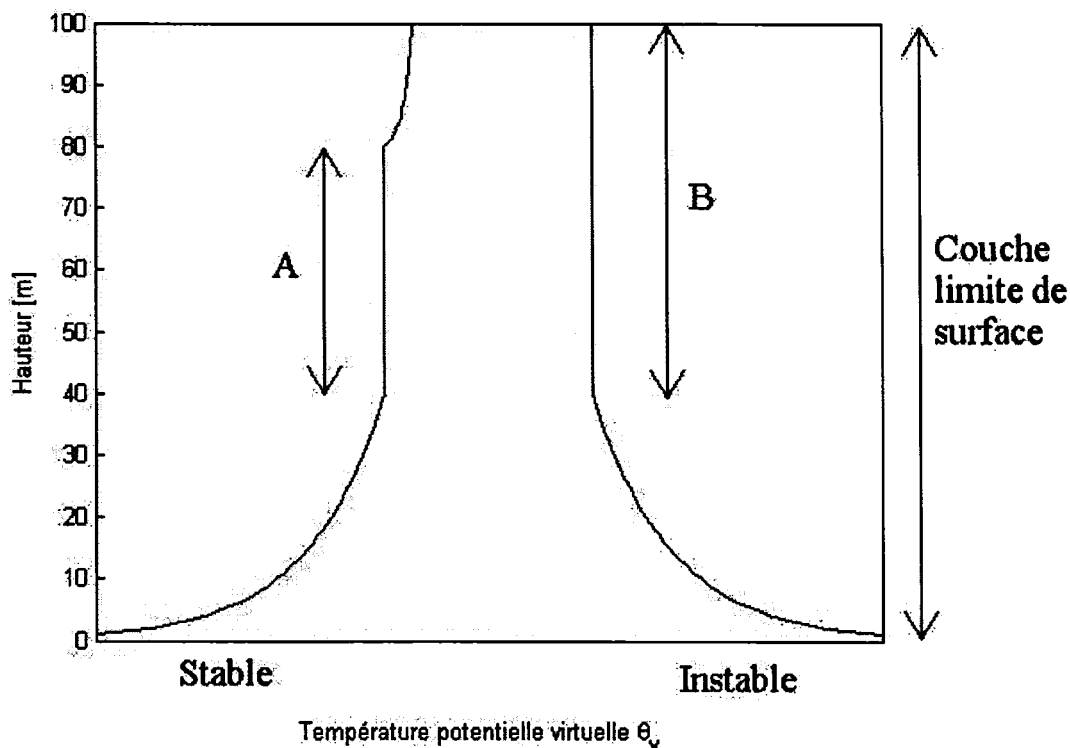


Figure 16 Profils de température potentielle virtuelle pour différents cas de stratification thermique

L'écoulement observé dans les premières centaines de mètres de la couche limite atmosphérique au-dessus d'un terrain plat et pour toutes conditions de stratification thermique est bien connu depuis le développement de cette théorie par Monin et Obukhov en 1954 [41]. Cette théorie est si répandue que très peu de gens citent maintenant l'article original des deux auteurs. Depuis la confirmation par l'expérimentation, notamment des expériences qui ont eu lieu aux États-Unis (Nebraska, Kansas et Minnesota), en Australie (Kerang et Hay) et en URSS (Tsimliansk) [42], cette méthode a fait ses preuves. De même, l'expérimentation réalisée à Silsoe, en Angleterre, et détaillée dans l'article de Richards et Hoxey [19] a démontré la validité des profils de Monin-Obukhov présentés ci-dessous.

La justesse de cette approche n'est plus à démontrer. Mais comme celle-ci n'est valable que pour la couche limite de surface, soit jusqu'à une hauteur d'environ 100m, et uni-

quement pour un terrain plat, cette théorie servira de référence et permettra de comparer l'approche particulière qui sera proposée pour la condition d'entrée.

3.1.3.1 Représentation du champ de vitesse

Pour obtenir les relations développées par Monin et Obukhov, il faut d'abord faire l'hypothèse d'un écoulement horizontalement homogène et stationnaire. Bien que cette hypothèse ne soit pas absolument vraie dans un cas réel, on peut faire cette approximation pour une couche limite de surface sur terrain plat sans trop faire d'erreurs. L'hypothèse d'homogénéité horizontale implique qu'aucune anisotropie n'est présente dans l'écoulement. Pour simplifier le développement des relations, il est supposé que l'écoulement est aligné selon l'axe x et donc que la vitesse transversale (selon l'axe y) est nulle.

Plusieurs méthodes permettent d'obtenir le profil de vitesse présenté en 1954 par Monin et Obukhov. Stull [12] utilise la théorie de similitude, par l'entremise du théorème de Pi-Buckingham. La méthode de Kaimal et Finnigan [42] est présentée ci-dessous.

À partir des équations du mouvement (équations 4.8 et 4.9) et des simplifications qui s'appliquent à un écoulement en couche limite atmosphérique en terrain plat : $\frac{\partial}{\partial x} = 0$, $v = w = 0$, $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ et $\mu_t \gg \mu$, alors :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.1)$$

ce qui permet de définir le flux de quantité de mouvement en terme de gradient vertical :

$$\tau = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (3.2)$$

où μ_t est la viscosité turbulente et \bar{u} la vitesse moyenne selon la direction principale du vent.

L'hypothèse que le vent est aligné sur la direction x ayant déjà été émise, il est alors possible d'écrire $\tau_x = \tau_0$ et $\tau_y = 0$. De plus, les variations de τ_0 dans la couche limite de surface sont minimales et peuvent être négligées. En définissant une vitesse de référence u_* , appelée vitesse de frottement (*friction velocity*), pour représenter les effets des contraintes

τ_0 au sol, on peut écrire :

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (3.3)$$

La vitesse de frottement, qui varie selon la nature de la surface et l'intensité du vent, est reconnue comme un paramètre d'échelle très important pour l'étude de la couche limite de surface. L'introduction de u_* permet de représenter la viscosité turbulente μ_t comme une fonction de deux paramètres d'échelles de la couche limite de surface, soit la hauteur z et la vitesse de friction u_* , plus une fonction universelle $\phi\left(\frac{z}{L}\right)$ qui permet de tenir compte de la stratification thermique de l'atmosphère :

$$\mu_t = \frac{\rho K u_* z}{\phi\left(\frac{z}{L}\right)} \quad (3.4)$$

où K est une constante de proportionnalité et L la longueur de Monin-Obukhov. En remplaçant τ_0 et μ_t dans l'équation 3.2 et en supposant que la stratification thermique de l'atmosphère est neutre, ce qui implique que $\phi\left(\frac{z}{L}\right) = 1$, on obtient :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{Kz} \quad (3.5)$$

L'intégration de l'équation 3.5 permet d'obtenir le profil logarithmique classique, qui n'est autre chose que le cas particulier, pour une stratification thermique neutre, de la théorie de Monin-Obukhov :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.6)$$

où z_0 est la longueur de rugosité définie plus haut. La constante K est connue sous le nom de constante de Von Karman ; sa valeur se situe entre 0.35 et 0.43 selon les auteurs. Les dernières expériences tendent cependant à démontrer qu'elle se trouve dans l'intervalle 0.39 - 0.42. La valeur de 0.42 sera utilisée dans ce travail. À partir de ce profil de vitesse, il suffit de définir une vitesse U pour une hauteur donnée et, si le paramètre z_0 est connu, l'équation 3.6 permet de fixer la valeur de u_* et ensuite connaître avec précision la vitesse en fonction de la hauteur.

3.1.3.2 Influence de la végétation sur la couche limite atmosphérique

Comme le site étudié est composé majoritairement de forêts, une attention particulière doit être portée à la modélisation de la végétation. Lorsque le terrain est recouvert d'une

végétation très dense, le sommet des arbres devient en quelque sorte une surface au-dessus de la vraie surface. L'écoulement peut alors être divisé en deux : un écoulement dans la zone comprise entre le sol et la canopée et un second au-dessus de la cime des arbres. Dans un tel cas, une hauteur de déplacement pourrait être définie et l'équation 3.6 deviendrait :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{K} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \quad (3.7)$$

laquelle s'applique uniquement pour une condition de stratification thermique neutre. La vitesse $u = 0$ est alors définie à la hauteur $z = d + z_0$. De manière générale, la hauteur de déplacement d vaut environ $0.75h_c$ où h_c est la hauteur de la canopée. Lorsque le terrain observé est recouvert d'un nombre important d'arbres, mais que ceux-ci ont des tailles fort différentes et/ou que ces arbres sont positionnés de façon clairsemée, il devient difficile, voire impossible, de déterminer la hauteur de déplacement d . Dans un tel cas, chacun des éléments de rugosité affecte l'écoulement du vent en produisant une trainée maximale, ce qui n'est pas le cas lorsque les arbres sont regroupés, puisqu'alors l'écoulement est déplacé au-dessus des arbres.

Ainsi, lorsqu'un site est recouvert d'arbres, le profil vertical du vent peut être de deux natures très différentes : si les arbres sont suffisamment groupés pour former une nouvelle surface à leurs cimes, la hauteur de déplacement ne sera pas nulle et la valeur de longueur de rugosité z_0 sera relativement faible. À l'opposé, lorsque les arbres sont nombreux mais suffisamment espacés, la hauteur de déplacement sera nulle et la longueur de rugosité z_0 sera relativement grande, représentant bien l'effet de trainée important créé par la végétation. La figure 17 présente les deux profils verticaux du vent pour le cas d'un site où la hauteur des arbres est de $10m$, avec une même vitesse de vent de $12m/s$ observée à $60m$.

Cette figure révèle une grande différence entre le profil vertical de vitesse observé avec la hauteur de déplacement d et celui qui assume que ce paramètre est nul. La même vitesse de vent est observée à $60m$ mais une légère différence est observée sous cette hauteur, alors qu'une différence de plus en plus marquée est observée lorsque le point d'observation se déplace au-dessus de cette hauteur référence. Il sera donc important de prendre le paramètre de hauteur de déplacement d en considération et de bien vérifier s'il faut lui attribuer une valeur non-nulle.

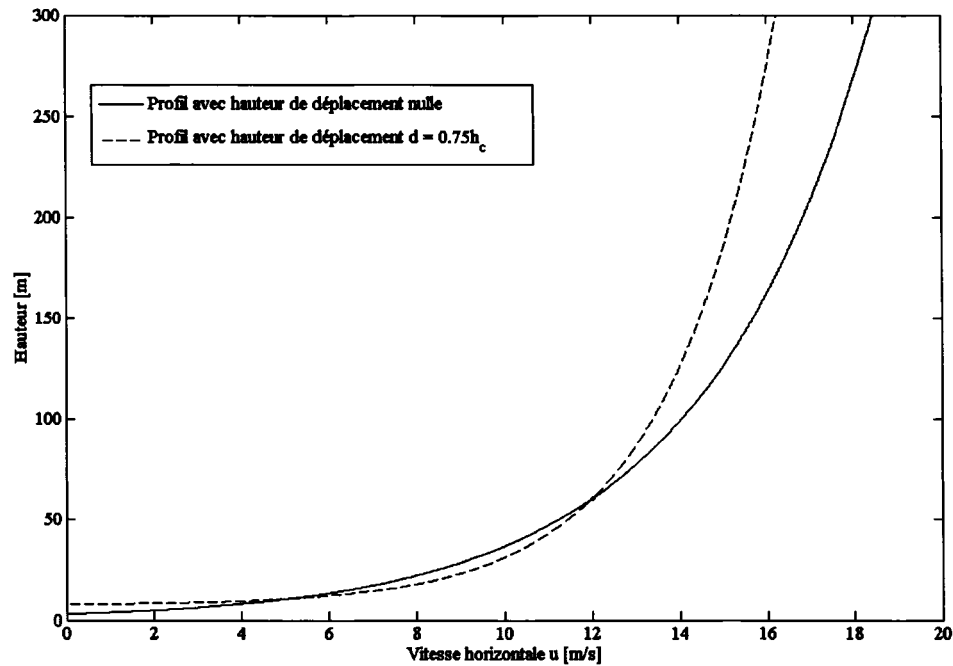


Figure 17 Influence du paramètre d sur le profil vertical de vitesse du vent

Si l'on connaît la vitesse du vent à trois hauteurs différentes et que la hauteur de rugosité a été déterminé comme non-nulle, l'équation suivante peut alors être utilisée pour déterminer d :

$$\frac{(u_2 - u_1)}{(u_3 - u_1)} \cdot \ln \left(\frac{z_3 - d}{z_1 - d} \right) = \ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right) \quad (3.8)$$

Cette approche n'est valable que pour un terrain plat et lorsque la condition de stratification thermique est neutre. Comme cela sera présenté à la section 6.3.2, ces conditions ne sont pas respectées pour le terrain de Rivière au Renard. De plus, la forêt recouvrant ce site est relativement clairsemée. Il ne sera donc pas pertinent d'utiliser le paramètre d dans le cadre du présent travail et sa valeur sera fixée à $d = 0$.

3.2 Modélisation du sol

L'une des bases de ce mémoire est d'arriver à représenter fidèlement la surface du site montagneux qu'est Rivière au Renard. Comme cela sera présenté à la section 5.2, à partir d'informations géographiques, une grille de points planimétriques régulièrement espacés

est créée et l'altitude de chacun des points doit être connue. Chaque carré ou rectangle de la grille est appelé pixel. Une telle grille se nomme modèle numérique d'altitude (MNA ou, en anglais, *digital elevation model*, DEM).

Pour obtenir les informations géographiques de base, plusieurs approches sont possibles, chacune possédant des avantages et des inconvénients. Sans prétendre faire une liste exhaustive, les principales sources de données qui ont été envisagées dans le cadre de ce mémoire sont présentées.

3.2.1 Données provenant de Géobase

Un outil très pratique en imagerie et télédétection au Canada est le site Géobase [43], parrainé par le Conseil canadien de la géomatique. Sur ce site, il est possible de télécharger des données numériques d'élévation de l'ensemble du territoire canadien. Cependant, la résolution offerte par les MNA de Géobase n'est pas adéquate pour l'application envisagée dans ce travail. Des pixels de 30 mètres sont employés, ce qui est nettement insuffisant, compte tenu que l'écoulement à modéliser avec précision se déplace sur une distance de moins de 300 mètres.

3.2.2 Carte topographique numérique

Pour la province du Québec, la Photocartotheque québécoise a le mandat de diffuser de l'information géographique de référence. Cet organisme public, faisant parti du Ministère des ressources naturelles, de la faunes et des parcs du Québec, gère la base de données topographiques du Québec, qui couvre, à l'échelle 1/20000, l'ensemble de la province au sud du 52^e parallèle. Le site de Rivière au Renard se trouve dans cette base de données. Il est donc possible d'obtenir, par l'entremise de la Photocartotheque, la cartographie numérique à l'échelle 1/20000 de la région de Rivière au Renard. Les données associées à cette cartographie sont de type vectoriel et contiennent énormément d'informations sur le territoire : hydrographie, voies de communication et infrastructures routières, bâtiments, végétation et hypsométrie. Les sources des données sont des photographies aériennes à l'échelle 1/40000, prises en 1992. La carte de base est obtenue par procédé photogramétrique. La figure 6 présente l'hypsométrie du site de Rivière au Renard.

L'hypsométrie est composée de points cotés dont la précision verticale est de $\pm 2m$ et de courbes de niveau à équidistance de $10m$ dont la précision verticale absolue est de $\pm 5m$. En planimétrie, la précision obtenue est de l'ordre de $\pm 4m$. Le découpage est fait selon le système québécois de référence cartographique, aussi connu sous le nom de système de coordonnées planes du Québec. Le territoire de Rivière au Renard se trouve dans le fuseau 5.

L'avantage principal de cette source d'informations est qu'elle est facilement accessible pour une grande partie du Québec. Dans l'optique que la méthode développée dans ce mémoire soit facilement adaptable à d'autres sites, cet avantage permet de s'assurer qu'il sera toujours simple de se procurer les données de base concernant le terrain à analyser. Enfin, les données sont de grande portée : des informations sur la végétation et les cours d'eau sont incluses, ce qui sera probablement utile ultérieurement. Ces différents avantages ont mené à choisir, au départ, cette source de données.

Cependant, bien que celle-ci ait permis de faire avancer le travail, elle demeure tout de même limitée. Le problème principal est la grande imprécision des données : l'incertitude de $\pm 5m$ sur les courbes de niveau est énorme, quant on sait que la distance entre les deux tours météorologiques que l'on veut simuler n'est que de $200m$. De plus, la technique employée pour construire le maillage, et qui sera présentée dans une section ultérieure, nécessite d'interpoler entre les courbes de niveau, augmentant plus encore l'incertitude. Finalement, le fait que les données proviennent de photographies aériennes datant de 1992 ne permet pas de saisir l'information réelle concernant la végétation du site. Pour l'installation des trois éoliennes actuellement en fonction à Rivière au Renard, pour l'érection de multiples mâts de mesure et pour la construction des chemins d'accès, de grandes parcelles de forêt ont été rasées. L'influence de ces nouvelles clairières ne peut donc pas être prise en compte. L'utilisation d'autres sources de données a donc été envisagée.

3.2.3 Télédétection

La télédétection est la science, la technologie et l'art d'acquérir de l'information sur des objets ou des phénomènes sans entrer directement en contact avec eux. De manière plus concrète, il s'agit d'un terme qui englobe la photographie aérienne, l'imagerie satellite et

les autres techniques d'acquisition de données relatives à l'environnement de la Terre. Les techniques d'imagerie satellite et de photographie aérienne sont particulièrement intéressantes dans l'optique de ce mémoire. La figure 18 présente une image satellite du site de Rivière au Renard. Il s'agit d'une image basse résolution offerte gratuitement, à titre de prévisionnement, sur le site de DigitalGlobe [44]. La photo originale, prise avec le satellite Quickbird, est à très haute résolution (pixel de 60cm), mais celle-ci n'est pas disponible gratuitement.



Figure 18 Image satellite basse résolution du site de Rivière au Renard (Origine : DigitalGlobe [44])

Deux photographies satellites du même site, prises dans un délai très court, permettent de définir un couple stéréoscopique. Comme une grande partie des deux photos se recourent, mais que celles-ci n'ont pas été prises exactement à partir de la même position, il est possible, en connaissant la position du satellite au moment de la prise des photos, de déterminer l'altitude de chacun des pixels des photos.

L'imagerie satellite est maintenant tellement puissante qu'il est possible d'obtenir, à partir de satellites commerciaux, des modèles numériques d'altitude dont le côté de chaque pixel est de 40cm et dont la précision, aussi bien planimétrique qu'altimétrique, est de moins de 20cm. De plus, les images permettent d'identifier la végétation. Enfin, il est possible de commander des images précises via les compagnies qui gèrent les satellites. Il serait donc facile d'obtenir des informations récentes sur le site de Rivière au Renard, ce qui permettrait une représentation fidèle de la forêt. Cependant, les images prises par les satellites sont très dispendieuses et le traitement nécessaire pour obtenir un MNA à partir d'un couple stéréoscopique doit être réalisé par une firme spécialisée. Quoique très intéressante, cette solution n'a donc pu être retenue.

La photographie aérienne ressemble à l'imagerie satellite, à la différence près que c'est un avion et non un satellite en orbite autour de la Terre qui prend les photos. La précision obtenue par cette méthode n'est pas aussi bonne que celle obtenue en imagerie satellite, mais elle demeure très intéressante. En ce qui concerne le Québec, de nombreuses régions sont fréquemment photographiées par l'industrie forestière. Comme il est possible que des images de Rivière au Renard aient été prises au cours des dernières années, cette source de données a été envisagée. De nombreuses firmes du Québec peuvent construire un MNA à partir de photos aériennes, contrairement aux images satellites que peu de gens utilisent au Québec. Malheureusement, il n'a pas été possible d'obtenir des photos récentes.

3.2.4 Construction d'un MNA à partir de photographies aériennes

Finalement, la solution retenue a été de faire construire un MNA avec une plus grande précision, travail réalisé par la compagnie Géomat inc.³. Pour réaliser ce travail, ils ont

³<http://www.groupealta.com/en/cie.asp?cie=geomat>

d'abord utilisé trois photographies aériennes, à l'échelle 1/40000, achetées à la Photocarto-
thèque québécoise. Ces trois photographies sont présentées sur la figure 19.



Figure 19 Photographies aériennes du site de Rivière au Renard (Origine : Photocarto-
thèque québécoise, présent en 1992)

À partir de ces photos, une technique de stéréoscopie a été utilisée pour retrouver l'altitude de chacun des pixels. Le résultat est un modèle numérique d'altitude avec une taille de pixel de un mètre. Ce MNA est enregistré sous format .tif et est présenté à la figure 20. L'altitude est présentée comme des tons de gris, le blanc représentant les altitudes les plus élevées et le noir les plus basses. Ce MNA est la base qui servira à construire le maillage du domaine.

La précision obtenue par le traitement réalisé par Géomat est supérieure à celle de la carte initiale de la Photocarto-
thèque ; il est cependant difficile de quantifier cette précision car la majorité du site est recouvert de forêt, ce qui complique la tâche de connaître avec certitude l'altitude du sol. Mais un intérêt certain de ce MNA est d'avoir des pixels de un mètre, permettant de ne perdre aucun détail de la surface, contrairement à la carte originale de la Photocarto-
thèque où les courbes de niveau étaient très espacées.



Figure 20 Modèle numérique d'altitude du site de Rivière au Renard

CHAPITRE 4

MODÈLE MATHÉMATIQUE

Le modèle mathématique proposé pour représenter l'écoulement du vent en terrain complexe est détaillé dans ce chapitre. Les équations de transport décrivant le mouvement de l'air sont présentées. Puis, la méthode de Reynolds est appliquée pour obtenir les équations de Navier-Stokes moyennées (*Reynolds' Averaged Navier-Stokes equations*, RANS), lesquelles décrivent le mouvement d'un fluide en écoulement turbulent. Enfin, le modèle de turbulence $k - \epsilon$, qui permet de fermer les RANS, est présenté.

4.1 Équations du mouvement

L'écoulement du vent en terrain complexe est tridimensionnel et turbulent. La turbulence provient principalement de la condition de non-glissement entre le sol et le fluide, mais est également influencée par les forces de flottaison qui peuvent augmenter ou diminuer la turbulence atmosphérique. De plus, un écoulement réel est instationnaire. Cependant, dans la présente étude, l'intérêt majeur est de pouvoir déterminer la vitesse du vent en un point de l'espace par rapport à un autre point et ce, en un instant donné. L'écoulement étudié sera donc considéré comme étant stationnaire. Enfin, puisque la vitesse des écoulements étudiés est de beaucoup inférieure à la vitesse du son dans l'air [17], l'écoulement peut être considéré comme étant incompressible.

Pour arriver à résoudre les équations de Navier-Stokes en tenant compte de la turbulence, une méthode généralement employée est de décomposer chacune des variables instantanées φ en une composante moyenne $\bar{\varphi}$ et une composante turbulente φ' [12] et à moyenner dans le temps les équations ainsi décomposées. Cette technique, connue sous le nom de décomposition de Reynolds, introduit de nouveaux termes dans les équations de Navier-Stokes, ce qui crée un problème de fermeture des équations. Un modèle de turbulence est alors employé pour arriver à fermer le système d'équations.

Le principe de conservation de la masse s'applique à un tel écoulement. L'équation de continuité qui décrit ce principe est :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4.1)$$

où U_j représente les trois composantes de la vitesse et x_j les trois directions¹. Cette équation peut se réécrire

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial(U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4.2)$$

si l'on emploie la définition de la dérivée totale. Comme un écoulement stationnaire est considéré, le terme d'instationarité de l'équation 4.2 peut être éliminé et l'équation de conservation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial(U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4.3)$$

Il s'agit de l'approximation d'incompressibilité. Le deuxième grand principe qui s'applique à un écoulement atmosphérique est la conservation de la quantité de mouvement, qui peut être représentée par :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g - 2\varepsilon_{ijk}\Omega_j U_k - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.4)$$

I
II
III
IV
V
VI

Terme I	terme instationnaire
Terme II	décrit l'advection
Terme III	gravité (agit uniquement verticalement)
Terme IV	force de Coriolis due à la rotation de la Terre
Terme V	forces de pression
Terme VI	forces visqueuses

Dans l'équation 4.4, le terme I est nul puisque l'écoulement considéré est stationnaire. Également, le terme IV est très petit par rapport aux autres termes, pour un écoulement

¹La sommation d'Einstein est utilisée.

près de la surface, et est donc négligé². Enfin, les forces visqueuses (terme VI) sont définies par :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] \quad (4.5)$$

Dans cette dernière équation, il est possible de considérer que μ est une propriété isotrope. De plus, en utilisant l'équation de continuité, $\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0$, il est possible de réécrire le terme VI :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (4.6)$$

Avec ces différentes simplifications, l'équation de conservation de la quantité de mouvement qui sera appliquée pour la simulation dans le cadre du présent mémoire est finalement :

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.7)$$

Les équations 4.3 et 4.7 représentent donc le mouvement d'un fluide en couche limite atmosphérique. L'application de la décomposition de Reynolds ajoute un terme à l'équation 4.7, qui sera appelé le tenseur de Reynolds :

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (4.8)$$

Il est important de noter que, dans l'équation 4.8, les variables de vitesse U_i représentent maintenant des valeurs moyennes. L'apparition de la contrainte de Reynolds dans l'équation du mouvement montre également que la turbulence intervient dans l'étude de l'écoulement malgré le fait que l'on ne s'intéresse qu'au mouvement moyen. En effet, l'équation 4.8 démontre clairement que la turbulence, qui n'est par définition qu'une fluctuation autour de la valeur moyenne, agit sur l'écoulement moyen.

²Lorsque les simulations effectuées portent sur des hauteurs de plus de 100m, la force de Coriolis devient non-négligeable (tout en demeurant cependant très faible), donc une légère erreur peut être induite. Idéalement, l'effet de la force de Coriolis devrait donc être pris en compte, mais par souci d'utiliser un modèle simple, la force de Coriolis sera toujours négligée dans le présent travail.

4.2 Modélisation de la turbulence

Une étude détaillée des équations définies à la section 4.1 met en évidence l'une des principales difficultés de la modélisation des écoulements turbulents : le problème de fermeture [12]. En effet, les termes de Reynolds qui s'ajoutent aux équations de Navier-Stokes permettent de modéliser correctement la turbulence mais introduisent de nouveaux inconnus dans le système d'équations, soit les contraintes de Reynolds $(\overline{u'_i u'_j})$. Le nombre d'inconnus devient alors plus grand que le nombre d'équations. Pour résoudre ce problème, il faut soit déterminer de nouvelles équations pour ces inconnus, ce qui n'est pas concluant³, soit trouver une façon de paramétriser ces corrélations doubles. L'une des façons de faire est d'utiliser un modèle de turbulence. Suite à la revue de la littérature présentée au chapitre 2, le modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ a été retenu.

4.2.1 Modèle $\kappa - \epsilon$ standard avec modifications aux constantes

Comme cela a été présenté précédemment, de nombreux modèles de turbulence existent. L'un des modèles les plus utilisés est le modèle $\kappa - \epsilon$. Il s'agit d'un modèle à deux équations, qui permet de déterminer la vitesse turbulente et l'échelle de grandeur (*length scales*) de l'écoulement indépendamment. Ce modèle, en plus d'être très répandu, parvient à bien modéliser la turbulence atmosphérique ; entre autres, les distributions verticales des propriétés turbulentes κ et ϵ sont disponibles dans la littérature, ce qui valide le modèle proposé. Enfin, l'utilisation de ce modèle par Alinot et Masson [45] ou Villanueva et al. [8] a démontré sa validité pour des applications en énergie éolienne.

Une méthode couramment employée pour modéliser les contraintes de Reynolds est d'utiliser l'hypothèse de Boussinesq [46] :

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (4.9)$$

Le modèle $k - \epsilon$ utilise cette hypothèse, à laquelle s'ajoutent deux équations de transport, soit une pour l'énergie cinétique turbulente κ , et une seconde pour la dissipation de

³Il a été démontré [12] que l'ajout de nouvelles équations ne fait qu'augmenter encore plus le nombre d'inconnus.

l'énergie cinétique turbulente ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_B - \rho \epsilon \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_B) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.11)$$

où G_k représente la génération d'énergie cinétique turbulente due au cisaillement et G_B représente la génération d'énergie cinétique turbulente provoquée par les forces de flottaison (G_B est nul en stratification thermique neutre). Par définition, G_k est :

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.12)$$

et sera évalué, lors des calculs, suivant la proposition de Launder et Spalding [47] :

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.13)$$

De même, G_B est

$$G_B = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.14)$$

où β correspond au coefficient d'expansion thermique et Pr_t est le nombre de Prandtl turbulent, $Pr_t = 0.85$.

Dans ce modèle, la viscosité turbulente est calculée à partir de l'énergie cinétique turbulente, κ , et de son taux de dissipation ϵ , de la façon suivante :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.15)$$

Enfin, les constantes originales du modèle, tel que développé par Launder et Spalding [47] sont :

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (4.16)$$

Cependant, comme l'ont démontré Alinot et Masson [45], ces constantes n'arrivent pas à reproduire l'écoulement d'une couche limite atmosphérique tel que prédit par la théorie de similitude de Monin-Obukhov. Ils ont donc proposé un nouveau groupe de constantes qui sera utilisé dans ce mémoire :

Tableau II

Constantes du modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ utilisées
dans le cadre de ce mémoire (Tirées de [45])

$C_{1\epsilon}$	=	1.176
$C_{2\epsilon}$	=	1.92
C_μ	=	0.0333
σ_k	=	1.0
σ_ϵ	=	1.3

4.3 Conditions aux frontières

Comme cela a été présenté au chapitre 3, le mouvement de l'air étudié dans ce travail est un écoulement en couche limite atmosphérique sur un terrain complexe. Les expressions décrivant ce type d'écoulement sont basées sur la théorie de Monin-Obukhov. Cependant, cette théorie s'applique à des écoulements complètement développés sur un terrain plat, ce qui n'est pas le cas sur un terrain complexe. La théorie de Monin-Obukhov ne peut donc être utilisée directement et servira plutôt de référence. Le profil vertical de vitesse pour une condition de stratification thermique neutre a déjà été présenté (équation 3.6). Il est maintenant important de connaître également les profils verticaux de la turbulence.

4.3.1 Distribution de la turbulence atmosphérique

La vitesse de frottement est définie en fonction de la contrainte de Reynolds :

$$u_* = \left[- \overline{u'w'} \right]^{1/2} \quad (4.17)$$

où $\overline{u'w'}$ est la contrainte de Reynolds présentée à la section 4.2. Cette section a également servi à démontrer que deux paramètres sont nécessaires pour décrire complètement la turbulence. Une expression du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, ϵ , est obtenue en se basant sur la mesure des différents termes dans l'équation de transport de κ (équation 4.10) à l'intérieur de la couche limite atmosphérique sur terrain plat [48] :

$$\epsilon(z) = \frac{u_*^3}{Kz} \quad (4.18)$$

La distribution de κ , soit le profil vertical de l'énergie cinétique turbulente, peut être déduit à partir de l'équation définissant la viscosité turbulente μ_t , équation 4.15, qu'il est possible de réécrire :

$$\kappa^2 = \frac{\mu_t \epsilon}{\rho C_\mu} \quad (4.19)$$

Dans cette équation, il est possible de remplacer ϵ par l'équation 4.18 : $\epsilon = \frac{u_*^3}{Kz}$. De plus, Panofsky et Dutton [48] ont démontré que la viscosité turbulente μ_t peut être définie suivant $\mu_t = \rho K u_* z$. En remplaçant ϵ et μ_t dans l'équation 4.19, on obtient :

$$\kappa = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (4.20)$$

où C_μ est une constante du modèle de turbulence.

L'une des tâches délicates pour la simulation de l'écoulement du vent en terrain complexe est d'arriver à prescrire les conditions frontières. Au départ, seul le sol est une frontière connue du domaine de calcul. La position de cinq frontières doit être déterminée : l'entrée du domaine, deux plans latéraux, la sortie du domaine et le plan supérieur. Certains critères dictent le choix de la position de ces frontières : (i) les valeurs imposées ne doivent pas influencer la solution obtenue ; (ii) aucun élément topographique important situé dans les alentours de la zone d'intérêt ne doit être négligé ; (iii) il faut éviter de positionner ces frontières à de très grandes distances, ce qui engendrerait un domaine de calcul énorme et nécessiterait beaucoup trop de ressources informatiques.

La solution choisie dans le cadre de ce mémoire repose sur deux techniques : la première technique est l'utilisation d'un enchâssement de domaine, ce qui consiste à définir

deux domaines de calcul. Un premier, relativement grand et dont le maillage est grossier, permet de s'assurer que des éléments topographiques influençant la solution ne sont pas négligés. Un second domaine est ensuite créé, beaucoup plus petit et concentré dans la zone d'intérêt, avec un maillage fin qui permet d'obtenir une solution précise. Les conditions frontières appliquées sur le petit domaine proviennent de la solution obtenue sur le grand domaine. Le détail de cette méthode est présenté à la section 5.2.

Une deuxième technique a été élaborée pour arriver à imposer, sur le grand domaine, des conditions frontières qui sont appropriées aux terrains complexes. À l'aide de certaines approximations, un écoulement bidimensionnel, complètement développé et à une composante de vitesse est solutionné pour le plan d'entrée, puis un écoulement bidimensionnel à deux composantes de vitesses est résolu pour les plans latéraux. Les détails de cette approche sont présentés à la section 5.2.

4.3.2 Loi de la paroi

Tout écoulement turbulent est grandement affecté par la présence d'une paroi. Comme les vitesses normales et tangentielles deviennent nulles au sol, la turbulence doit également disparaître dans la zone très près de la paroi. À cet endroit, la viscosité turbulente décroît énormément et la viscosité de l'air devient prédominante. De plus, comme l'un des facteurs affectant énormément la turbulence dans la couche limite atmosphérique est la condition de cisaillement au sol, il est très important de prendre en compte cet aspect lors du développement d'un modèle de simulation.

Pour ce faire, deux approches existent. La première nécessite l'utilisation d'une loi de la paroi, qui permet de faire le lien entre le mur et la partie turbulente de l'écoulement. La seconde approche consiste à modifier le modèle de turbulence utilisé près de la paroi tout en solutionnant jusqu'au mur, à l'aide d'un maillage très fin. Dans le cadre de ce travail, la première approche a été retenue.

Une loi de la paroi, suivant les recommandations de Richards et Hoxey [19], sera appliquée au niveau du sol. Il s'agit de déterminer une vitesse U à une hauteur z près de la paroi, et

d'utiliser la théorie de Monin-Obukhov pour déterminer une vitesse de frottement local :

$$u_{*l} = \frac{KU}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4.21)$$

Une fois u_{*l} déterminé, il suffit alors d'appliquer les équations 3.6, 4.20 et 4.18, mais en remplaçant u_* par u_{*l} , ce qui donne :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_{*l}}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.22)$$

$$\kappa = \frac{u_{*l}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (4.23)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u_{*l}^3}{Kz} \quad (4.24)$$

Cette approche permet de définir les paramètres de vitesse et turbulence à appliquer au sol tout en laissant ceux-ci s'adapter à l'écoulement et à la topographie du terrain. Des explications plus détaillées sont présentées à la section 5.2.

CHAPITRE 5

MÉTHODE NUMÉRIQUE

Le modèle mathématique présenté au chapitre 4 est complexe et une méthode numérique a été choisie pour le résoudre. Un écoulement atmosphérique, en terrain complexe de surcroît, est particulier et exige la modélisation de nombreux détails. Cependant, dans son ensemble, il peut ressembler à de nombreux autres types d'écoulements. En ce sens, un logiciel de mécanique des fluides largement reconnu et offrant également une grande flexibilité dans son utilisation a été retenu. Le logiciel Fluent, développé par la compagnie Fluent Incorporated, offre les différents aspects recherchés :

- Grande variété de choix pour la modélisation de la turbulence, dont le modèle $k - \epsilon$.
- Possibilité d'utiliser des fonctions définies par l'utilisateur, sous-programmes compilables écrits en langage C, qui permettent de modifier les équations de transport ou les conditions frontières appliquées sur le domaine de calcul.
- Logiciel permettant de résoudre des écoulements à l'intérieur de géométries complexes, par l'entremise de maillages structurés ou non.

Enfin, l'utilisation par d'autres chercheurs du logiciel Fluent (Alinot et Masson [45], Villanueva et al. [8]) et les résultats qu'ils ont obtenus pointaient naturellement vers l'utilisation de ce logiciel.

5.1 Description de la méthode employée

Le modèle mathématique présenté au chapitre 4, composé de l'équation de continuité, des trois équations du mouvement (composantes x , y et z) et des équations de transport de la turbulence k et ϵ , est donc résolu à l'aide du logiciel Fluent. Basé sur une méthode de calcul aux volumes finis, trois étapes distinctes sont nécessaires à l'obtention d'une solution :

1. Discrétisation du domaine de calcul en volumes de contrôle.
2. Intégration et linéarisation des équations de transport sur chacun des volumes de contrôle.
3. Résolution du système d'équations linéaires résultant.

5.1.1 Discrétisation du domaine de calcul

La discrétisation du domaine de calcul joue un rôle crucial dans la précision des résultats obtenus de même que dans le temps de calcul nécessaire à l'obtention d'une solution convergée. Il faut d'abord déterminer la taille du domaine à modéliser. Seulement la localisation du sol est prescrite par la description du site d'intérêt. Or, la modélisation en trois dimensions nécessite cinq frontières supplémentaires. Le positionnement de ces cinq faces revêt une grande importance : pour les côtés et la partie supérieure, il est difficile de déterminer des conditions frontières appropriées pour un écoulement en terrain complexe. Il faut donc placer ces frontières à une distance suffisamment grande de la région d'intérêt pour ne pas qu'elles influent sur la solution obtenue. D'autre part, il faut éviter d'avoir un domaine immense, ce qui résulterait en des temps de calcul prohibitifs. Cette problématique sera traitée à la section 5.2.

Lorsque les dimensions du domaine sont fixées, la problématique proprement dite de la discrétisation du domaine apparaît. Pour solutionner ce problème, un maillage structuré a été choisi, permettant d'utiliser des volumes de contrôle de forme hexaédrique. Les hexaèdres permettent une forme aplatie qui épouse les lignes de courant, ce qui permet d'utiliser un grand nombre de volumes de contrôle dans le sens des grands gradients de vitesse. Réaliser un maillage similaire, mais à l'aide de tétraèdres, nécessiterait beaucoup plus de volumes de contrôle.

5.1.2 Construction du maillage

Le maillage du sol est d'abord réalisé. Un maillage différent est construit pour chacune des directions de vent étudiées. Pour ce faire, un rectangle représentant le domaine est d'abord défini. Celui-ci est subdivisé, ce qui permet d'obtenir une grille régulière de points. Les coordonnées (x, y) de ces points étant connues, un MNA du site permet d'interpoler la hauteur (z) exacte des points. Le logiciel Matlab a servi à réaliser cette étape. Comme le MNA original est constitué de pixels de $1m$ de côté, l'interpolation ne peut induire qu'une très faible erreur dans la représentation de la surface. Ce quadrillage du sol sert de base à la construction du maillage. La figure 21 présente les différentes étapes de l'élaboration du maillage du sol.

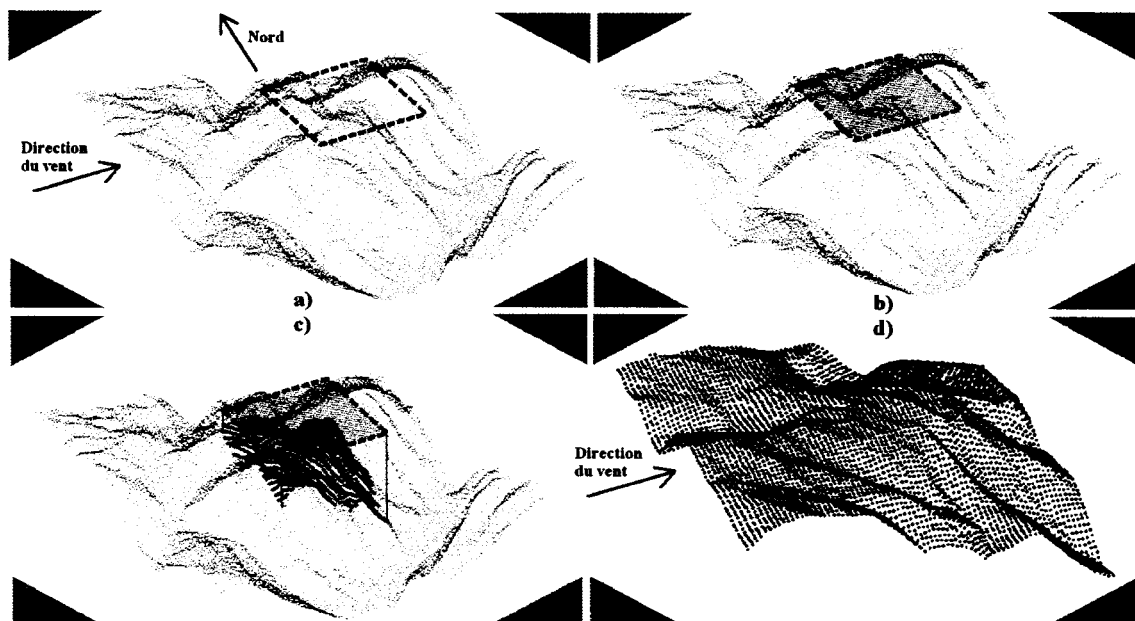


Figure 21 Étapes pour construire le maillage de la surface a) Point de départ : le MNA (résolution de $1m$) du site, où est défini le domaine d'intérêt b) Définition d'une grille régulière de points c) Interpolation des valeurs de hauteur d) Obtention du maillage de la surface, orienté dans la direction souhaitée face au vent.

Dans un deuxième temps, la hauteur maximale du domaine est fixée. Le nombre de volumes de contrôle souhaités dans la direction verticale est déterminé et les points entre le sol et la paroi supérieure sont distribués à l'aide d'une expansion géométrique. Ceci permet d'augmenter la concentration des volumes de contrôle près du sol, là où les gradients verticaux sont les plus importants. La figure 22 présente un exemple de maillage réalisé.

5.1.2.1 Méthode d'enchâssement de domaines

La démarche la plus simple pour obtenir une solution précise consiste à utiliser un très grand domaine autour de la zone d'intérêt et de le subdiviser à l'aide de très petits volumes de contrôle. Le grand domaine assure qu'aucun élément topographique majeur situé dans les environs de la zone d'intérêt n'est négligé alors que l'utilisation de très petits volumes de contrôle assure d'avoir une modélisation détaillée, donc une simulation précise. Ce-

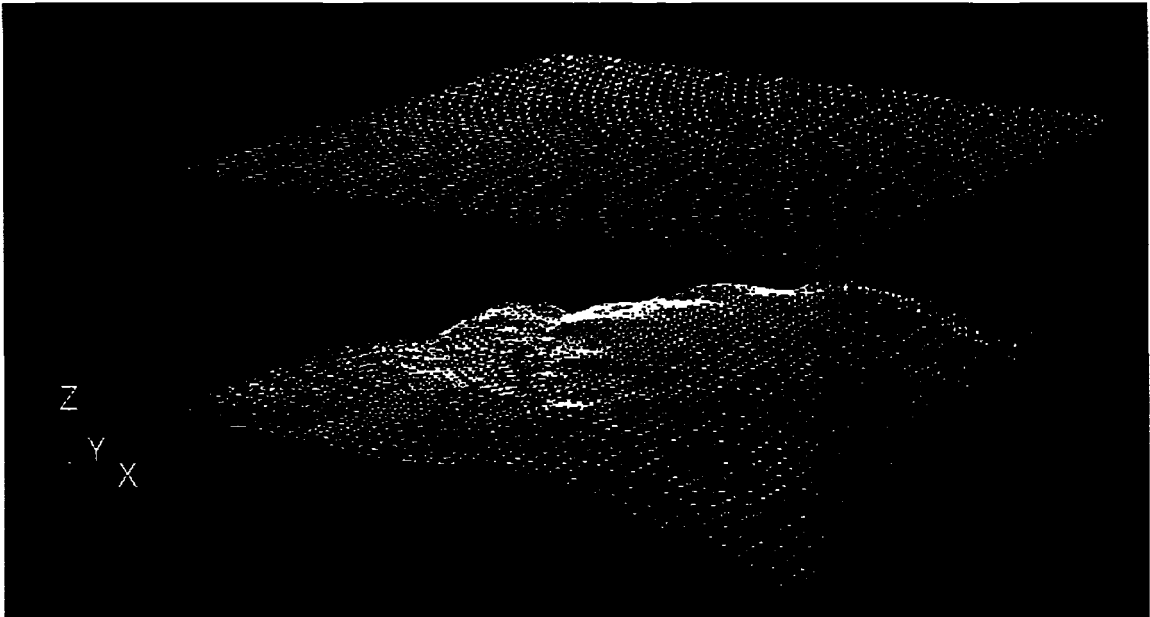


Figure 22 Exemple de maillage du domaine

pendant, ces deux avantages ne viennent pas sans l'inconvénient d'avoir une méthode qui requiert énormément de ressources informatiques.

Pour réduire la quantité de ressources informatiques nécessaires, une méthode d'enchâssement de domaine a été développée. Il s'agit de créer un premier domaine de dimensions relativement grandes par rapport à l'espace χ que l'on veut réellement simuler. Cet espace χ est la distance entre les deux tours météorologiques et est de l'ordre de $200m$. Un premier domaine de $1.6km$ par $1.6km$ a été construit. Dans ce domaine, des volumes de contrôle très grands sont utilisés ($20m$ de côté dans les directions x et y). Pour le second domaine, de dimensions beaucoup plus petites (environ $600m$ par $600m$), créé à l'intérieur du premier, les conditions frontières sont définies à partir de la solution sur le grand domaine. La figure 23 présente l'enchâssement de ces deux domaines. La boîte de couleur cyan, au centre, représente le petit domaine de calcul. Celui-ci est composé de volumes de contrôle ayant cinq mètres de côté, ce qui devrait permettre d'obtenir une solution plus précise.



Figure 23 Enchâssement des deux domaines de calculs

5.1.3 Discrétisation des équations de transport

Une fois terminée la division du domaine en volumes de contrôle, on peut procéder à la discrétisation des équations définies à la section 4. Les équations de conservation sont résolues pour chacun des volumes de contrôle et les différentes variables (vitesse, pression, etc.) sont enregistrées au centroïde des volumes de contrôle.

Toutes les équations de transport décrites précédemment peuvent être réécrites sous la forme générale [49] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (5.1)$$

où ϕ peut être n'importe quelle des variables suivantes : u , v , w , κ ou ϵ . Dans cette équation, le premier terme du membre de gauche est nul puisque l'écoulement considéré est stationnaire. À noter également, le terme source S peut être subdivisé en deux parties distinctes, soit $S = S_C + S_P \phi_P$, montrant clairement que le terme source peut être dépendant de la variable ϕ . La subdivision du terme source S est importante lors de la discrétisation des équations. Le tableau III présente le détail de chacune des équations de transport par rapport à la forme générale (équation 5.1).

Tableau III

Signification de ϕ , Γ et S pour chacune des équations

	ϕ	Γ	$S = S_C + S_P \phi_P$
Équation de continuité	1	0	0
Équation de quantité de mouvement	u_i	$\mu + \mu_t$	$-\rho g \delta_{i3} - \frac{\partial p}{\partial x_i}$
Équation de k	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + G_B - \rho \epsilon$
Équation de ϵ	ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_B) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$

La discrétisation de l'équation 5.1 permet d'obtenir une équation de la forme :

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5.2)$$

où les variables ϕ_x représentent les différentes variables ϕ du tableau III au centroïde du volume de contrôle (point P) ainsi qu'aux centroïdes adjacents (en anglais *nb*, *neighbors*). Les coefficients a_{nb} dépendent des dimensions du volume de contrôle en question ainsi que des coefficients Γ et des variables u_i . Le coefficient a_P dépend des coefficients a_{nb} ainsi que de S_P . Enfin, le terme b dépend du terme source S_C . Sans entrer dans le détail du développement (voir [46] ou [49]), Fluent propose de nombreuses méthodes pour déterminer la valeur de la variable ϕ à l'interface de deux cellules. En effet, dans l'équation 5.2, la valeur de ϕ doit être connue à l'interface. Le schéma *upwind* de premier ordre a été retenu dans ce travail pour ses excellentes propriétés de convergence.

Cette opération permet d'obtenir des équations algébriques (équation 5.2) pour les variables dépendantes telles que les trois composantes de la vitesse, la pression ainsi que la turbulence (κ et ϵ). Fluent utilise une linéarisation implicite des équations, celles-ci doivent donc être résolues simultanément pour l'ensemble du domaine. Une méthode de résolution linéaire de Gauss-Seidel est utilisée pour solutionner le système d'équations résultant.

5.1.4 Résolution du système d'équations linéaires résultant

Le logiciel Fluent propose deux approches pour résoudre le système d'équations linéaires (équation 5.2), soit une approche séquentielle (*segregated solver*) et une approche couplée (*coupled solver*). Dans le présent travail, le choix s'est porté sur l'approche séquentielle

qui implique que les équations sont résolues séparément, l'une après l'autre [46]. La résolution se fait en cinq étapes :

1. Mise à jour des valeurs des variables, selon la solution de l'itération précédente (l'initialisation est utilisée lors de la première itération).
2. Les équations pour les trois composantes de la vitesse, u , v et w , sont résolues l'une après l'autre à partir des valeurs de l'étape 1.
3. L'équation de continuité est vérifiée localement et une équation de correction de pression est utilisée pour s'assurer que la condition de continuité est satisfaite pour chacun des volumes de contrôle. Cette démarche fait partie de l'approche SIMPLE¹.
4. Les équations pour tous les autres scalaires, par exemple pour la turbulence, sont résolues.
5. La convergence est vérifiée.

Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. Il est à noter qu'en raison de la non-linéarité et du niveau de couplage élevé des équations de transport, de nombreuses itérations sont nécessaires pour obtenir une solution convergée.

5.1.5 Vérification de la convergence

La convergence est vérifiée après chacune des itérations et ce, pour toutes les variables ϕ . Un ordinateur dont la précision serait infinie permettrait de réécrire l'équation 5.2 de la façon suivante, lorsque la convergence serait atteinte :

$$\sum a_{nb}\phi_{nb} + b - a_P\phi_P = 0 \quad (5.3)$$

Comme la précision d'un ordinateur n'est pas infinie, le membre de droite de l'équation ci-dessus ne sera jamais nul. Le résidu, pour un volume de contrôle donné, correspond à la valeur du membre de droite de l'équation 5.3. À la fin de chaque itération, la somme des résidus de tous les volumes de contrôle est comptabilisée par Fluent puis normalisée

¹*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*

par rapport à une valeur propre à l'écoulement, à l'aide de l'équation suivante :

$$R^\phi = \frac{\sum_{cellsP} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P \right|}{\sum_{cellsP} |a_P \phi_P|} \quad (5.4)$$

C'est le résidu global R^ϕ que l'on tente de minimiser. À noter que la double précision est utilisée pour les calculs.

5.1.6 Schéma d'interpolation de la pression

L'algorithme non-séquentiel choisi présente un problème : sous la forme détaillée au chapitre 4, la pression apparaît comme terme source dans les équations du mouvement. Or, le champ de pression est, au départ, inconnu. Pour contourner ce problème, l'équation de continuité est utilisée comme une équation de pression. Cependant, dans cette équation, la pression n'apparaît pas explicitement et une approche particulière doit donc être envisagée pour coupler la pression à l'équation de continuité. Les algorithmes de la famille SIMPLE permettent ce traitement. Fluent propose quelques algorithmes de cette famille ; l'algorithme SIMPLER (SIMPLE - *Consistent*) a été choisi dans le cadre de ce mémoire. Les détails d'un tel algorithme sont explicités dans Patankar [49].

5.2 Conditions aux frontières sur le grand domaine

La méthode présentée ci-dessus permet de représenter l'écoulement tridimensionnel du vent sur un terrain complexe. Cependant, cela ne peut se faire sans conditions aux frontières. Il faut donc définir un total de six conditions frontières : l'entrée du domaine, la sortie, les deux côtés, le sol et la partie supérieure. La difficulté principale lors de la prescription des conditions aux frontières est liée à la complexité du terrain. Les profils de vitesse et de turbulence d'un écoulement en couche limite atmosphérique sont relativement bien connus en terrain plat, comme cela a été présenté à la section 3.1.3. Cependant, ce n'est pas ce type de terrain qui est analysé dans ce mémoire. Une approche adaptée aux terrains complexes a donc été développée pour déterminer les conditions frontières à l'entrée et sur les côtés du domaine. La seconde difficulté rencontrée est la très grande rugosité

obtenue expérimentalement sur le site de Rivière au Renard. Le modèle doit donc pouvoir tenir compte de celle-ci. Le détail des conditions frontières développées est présenté dans les sections suivantes.

5.2.1 Sol

La condition frontière appliquée au niveau du sol est très importante car le cisaillement causé par cette paroi joue un grand rôle dans l'évolution de la couche limite atmosphérique. C'est près du sol que les gradients verticaux de vitesse sont les plus grands et c'est également près du sol que la dissipation de l'énergie cinétique turbulente est la plus importante. De plus, la présence d'une forêt sur le site implique que la rugosité observée est très élevée. La section 6.3.2 présente les détails de l'approche utilisée pour arriver à déterminer la rugosité du site. Cette même section traite également du fait que seule la longueur de rugosité z_0 est utilisée pour prendre en compte l'effet de la végétation ; la valeur 0 sera toujours assignée à la hauteur de déplacement d .

Dans un premier temps, l'utilisation de la loi de paroi modifiée pour prendre en compte la rugosité, implantée dans Fluent, a été envisagée. Celle-ci prend la forme suivante (tirée de [46]) :

$$\frac{u_p u_*}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{E \rho u_* y_p}{\mu} \right) - \Delta B \quad (5.5)$$

avec

$$\Delta B = \frac{1}{K} \ln (1 + C_s K_s^+) \quad (5.6)$$

lorsque le régime est complètement turbulent. Or, celui-ci est considéré comme tel lorsque $K_s^+ > 90$, constante qui se calcule à l'aide de :

$$K_s^+ = \frac{\rho K_s u_*}{\mu}$$

Pour l'écoulement du vent dans la couche limite atmosphérique, $\rho \cong 1.225 \text{ kg/m}^3$, dépendamment des conditions atmosphériques, K_s représente la longueur de rugosité réelle du terrain et peut donc être assimilée à z_0 , laquelle prend des valeurs entre 0.1 m et 4.5 m pour le terrain de Rivière au Renard, u_* est de l'ordre de 0.3 à 2.0 et la viscosité de l'air est de $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Donc $K_s^+ \geq 200$ et on peut en conclure que le régime est

complètement turbulent. Dans l'équation 5.5, E est une constante qui vaut 9.81 et dans l'équation 5.6, C_s est une constante de rugosité variable, mais limitée par Fluent à des valeurs se situant entre 0 et 1.

Si l'on utilise l'équation du profil de vent de Monin-Obukhov (équation 3.6), où l'on impose que u_p est la vitesse à la hauteur y_p , on obtient alors :

$$u_* = \frac{K u_p}{\ln(y_p/z_0)}$$

En utilisant cette forme pour remplacer u_* dans l'équation 5.5 et également $\tau_w = \tau_0 = \rho u_*^2$ (équation 3.3) et qu'on procède aux simplifications nécessaires, on obtient alors :

$$\ln \frac{y_p}{z_0} = \ln \frac{E \rho u_* y_p}{\mu} - \ln \left(1 + \frac{C_s K_s \rho u_*}{\mu} \right) \quad (5.7)$$

On peut simplifier cette dernière équation et obtenir :

$$\ln \frac{y_p}{z_0} = \ln \left[\frac{y_p}{\frac{\mu}{E \rho u_*} + \frac{C_s K_s}{E}} \right] \quad (5.8)$$

ce qui permet d'exprimer la longueur de rugosité de la surface par l'expression suivante :

$$z_0 = \frac{\mu}{E \rho u_*} + \frac{C_s K_s}{E} \quad (5.9)$$

et, inversement, décrire les paramètres de rugosité de la loi de paroi modifiée pour la rugosité en fonction de z_0 :

$$C_s K_s = z_0 E - \frac{\mu}{\rho u_*} \quad (5.10)$$

Pour arriver à déterminer les valeurs requises pour C_s et K_s , il faut évaluer l'ordre de grandeur des différentes constantes de l'équation 5.10. La viscosité μ est de l'ordre de $O(10^{-5})$, la densité ρ est de l'ordre de $O(10^0)$ et u_* est de l'ordre de $O(10^0)$, donc le deuxième terme du membre de droite correspond à $O(10^{-5})$. La constante E valant 9.81 et z_0 étant de l'ordre de $O(10^0)$ pour les cas étudiés, le premier terme du membre de droite

de l'équation 5.10 est donc de l'ordre de $O(10^1)$. Le produit $C_s \times K_s$ devient donc :

$$C_s K_s = O(10^1) \quad (5.11)$$

Or, avec le logiciel Fluent, cette condition est impossible à imposer puisque la constante K_s , qui doit représenter la rugosité réelle de la surface, peut ici être assimilée à z_0 , et la constante C_s doit être inférieure ou égale à 1.

Il apparaît donc clairement que cette loi de paroi modifiée pour prendre en compte la rugosité n'est pas applicable dans les cas étudiés. Cette loi de paroi a été élaborée pour des écoulements en conduites ; la rugosité considérée est alors relative au fini de surface des dites conduites. Il s'agit d'une forme de rugosité différente de la rugosité associée à la couche limite atmosphérique : il semble que les ordres de grandeur diffèrent. Alinot et Masson [45] sont parvenus à utiliser cette loi de paroi pour modéliser la couche limite atmosphérique, mais seulement pour des valeurs de z_0 très faibles ($z_0 < 0.002m$). L'équation 5.10 permet de trouver que $C_s K_s$ est alors de l'ordre de $O(10^{-1})$ et Fluent peut traiter ce cas. En raison des limites de Fluent, il n'a pas été possible d'employer cette loi de paroi pour le site de Rivière au Renard.

L'utilisation de l'approche proposée par Richards et Hoxey [19], telle que décrite à la section 4.3.2, a donc été envisagée. La hauteur allant du sol réel jusqu'à z_0 n'est pas modélisée. La frontière inférieure du domaine débute à une hauteur $z_g = z_0 + \Delta z$ au-dessus du sol. La figure 24 présente la configuration du maillage près du sol. Pour arriver

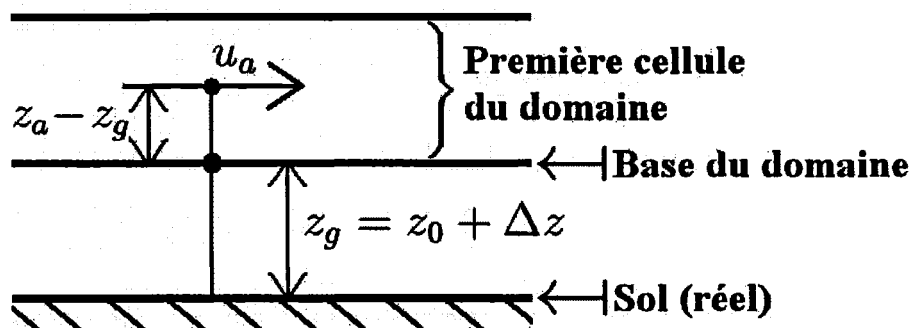


Figure 24 Configuration du maillage près du sol

à définir les paramètres de vitesse et turbulence au sol et pour permettre simultanément à ces paramètres de s'adapter au relief du terrain, une vitesse de frottement locale est calculée pour chacune des cellules à l'aide de l'équation 4.21, qu'il est possible de réécrire, connaissant les dimensions du maillage présenté à la figure 24 :

$$u_{*l} = \frac{K u_a}{\ln \left(\frac{z_a - z_g + z_0 + \Delta z}{z_0} \right)}$$

Une fois la grandeur u_{*l} connue, les équations 4.22, 4.23 et 4.24 sont utilisées pour obtenir la valeur des différents paramètres à imposer au sol. Ces valeurs pourront changer à chaque itération et pourront être différentes pour des cellules voisines. Cette approche a été implantée dans Fluent par l'entremise de fonctions définies par l'utilisateur. Un facteur de relaxation a dû être employé. Enfin, un traitement particulier a été appliqué pour s'assurer que l'écoulement au sol est toujours parallèle à la surface, ce qui implique nécessairement la présence d'une composante verticale de la vitesse sur un terrain complexe.

La frontière inférieure du domaine a été positionnée à une hauteur Δz légèrement supérieure à z_0 car la valeur de ϵ devient de plus en plus grande lorsque z tend vers z_0 , ce qui crée un problème de convergence dans Fluent.

5.2.2 Entrée du domaine

La frontière d'entrée est un plan $y - z$ en amont du domaine. S'il s'agissait d'un terrain plat, il suffirait d'utiliser la théorie de Monin-Obukhov et d'imposer le profil logarithmique de la vitesse sur ce plan. Cependant, le terrain analysé dans ce mémoire est complexe et aucune forme analytique de la distribution de la vitesse et des caractéristiques de la turbulence n'est disponible pour ce genre de situation. La condition frontière appliquée à l'entrée correspond à l'écoulement complètement développé qui serait observé si la forme du sol sur le plan d'entrée se prolongeait indéfiniment vers l'aval. Pour ce faire, il est nécessaire de résoudre les équations pour un écoulement bidimensionnel à une composante de vitesse.

Le plan d'entrée, composé d'une arête de forme complexe - le sol - et de trois droites (deux côtés et la partie supérieure) est ainsi isolé du reste du domaine. Les équations de transport

de la vitesse et de la turbulence présentées précédemment (équations 4.3, 4.8, 4.10 et 4.11) s'appliquent, avec les hypothèses que l'écoulement ne varie pas dans la direction du vent, c'est-à-dire que $\frac{\partial}{\partial x} = 0$, et que les composantes de la vitesse parallèles au plan sont 0, donc $v = w = 0$. La figure 25 présente un exemple de distribution de vitesse obtenue.

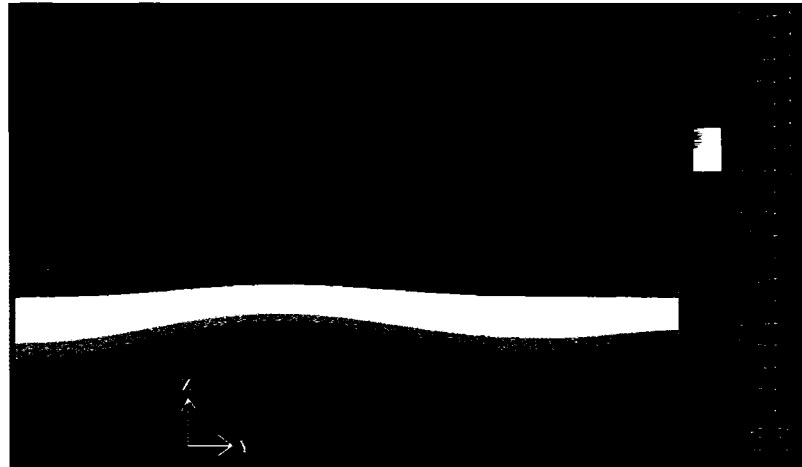


Figure 25 Solution obtenue pour un écoulement complètement développé en entrée, profil de vitesse u (le vent sort de la page)

Ce problème bidimensionnel est d'abord solutionné et les profils obtenus pour u , κ et ϵ sont ensuite imposés comme conditions frontières sur le domaine tridimensionnel. Lorsque cette approche est utilisée sur un terrain plat, les profils prédits par la théorie de Monin-Obukhov sont obtenus, ce qui vient confirmer la validité d'une telle approche (voir section 7.1.1).

Pour résoudre ce problème bidimensionnel, il est nécessaire d'imposer des conditions frontières, qui sont au nombre de quatre : le sol, les deux arêtes de côté et l'arête supérieure. L'approche présentée à la section 5.2.1 a été utilisée au niveau du sol. Les côtés sont traités comme des symétries ($\frac{\partial}{\partial y} = 0$ pour toutes les variables). L'arête supérieure est traitée comme si l'ensemble de l'écoulement dans la couche limite atmosphérique (donc dans le domaine modélisé) était alimenté par un vent géostrophique constant. Une vitesse fixe est imposée à l'arête supérieure. À l'aide de cette vitesse et de la hauteur moyenne à l'entrée du domaine, il est possible de définir une vitesse de friction au sommet u_{*s} à l'aide

de la théorie de Monin-Obukhov. Ce u_{*s} est le paramètre définissant l'écoulement étudié. Les paramètres de turbulence κ et ϵ sont alors imposés à l'aide de ce u_{*s} et de la hauteur moyenne de l'entrée. Ces conditions ont été implantées dans Fluent à l'aide de fonctions définies par l'utilisateur.

5.2.2.1 Termes sources à introduire dans les équations de transport de la turbulence

Dans le logiciel Fluent, lorsqu'une simulation bidimensionnelle est réalisée, l'écoulement doit être parallèle au domaine de calcul. Or, le calcul de l'écoulement bidimensionnel à l'entrée exige de réaliser une simulation où l'écoulement est nul dans le plan, mais non-nul perpendiculairement à ce plan. Pour arriver à simuler cet écoulement dans Fluent, il est nécessaire de modéliser la composante de la vitesse perpendiculaire au plan, u , à l'aide d'un scalaire défini par l'utilisateur (*User-Defined Scalar*, UDS). L'équation résolue par Fluent pour n'importe quel UDS ϕ est de la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi \quad (5.12)$$

où Γ et S_ϕ doivent être fournis par l'utilisateur. Pour un écoulement bidimensionnel dont les coordonnées sont orientées selon les axes de la figure 25, l'équation 5.12 devient :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S_\phi \quad (5.13)$$

Pour le cas étudié, $\phi = u$, $\Gamma = \mu + \mu_t$ et $S_\phi = 0$ car $v = w = 0$ et toutes les dérivés par rapport à x sont nulles, $\frac{\partial}{\partial x} = 0$. L'équation pour la vitesse u se résume donc, pour le plan d'entrée, à :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial z} \right] = 0 \quad (5.14)$$

En plus de devoir simuler cet écoulement en utilisant un UDS pour la vitesse u , il est nécessaire d'introduire des termes sources dans les équations de transport de la turbulence. Le cisaillement dans la couche limite atmosphérique crée de la turbulence, que l'on modélise à l'aide de l'expression de G_k (équation 4.13), terme qui dépend des gradients de vitesse. Dans le cas présent, il est nécessaire d'ajouter les termes associés aux gradients

de la vitesse u , les termes relatifs aux gradients de v et w étant nuls. Les termes à ajouter se résument à :

$$S_\kappa = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

et

$$S_\epsilon = \mu_t C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

L'environnement UDF de Fluent permet d'aller chercher, en cours de calcul, des paramètres tels que $\frac{\partial u}{\partial y}$, μ_t , κ ou ϵ , donnant la possibilité d'introduire les termes ci-dessus dans les équations de transport de la turbulence via une UDF.

Comme la viscosité turbulente est incluse dans les termes sources S_κ et S_ϵ , et que cette viscosité turbulente est elle-même dépendante de κ et de ϵ , il est nécessaire de procéder à la linéarisation de ces termes sources, pour accélérer la convergence. L'expression de S_κ peut se réécrire :

$$S_\kappa = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

La formulation recommandée par Patankar [49] est utilisée, c'est-à-dire que le terme source est linéarisé de la façon suivante :

$$S_\kappa = S_c + S_p \kappa \tag{5.15}$$

où

$$S_c = S_\kappa^* - \left(\frac{\partial S_\kappa}{\partial \kappa} \right)^* \kappa^*$$

$$S_p = \left(\frac{\partial S_\kappa}{\partial \kappa} \right)^*$$

L'étoile * indique la valeur provenant de l'itération précédente. En posant

$$g_k = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

on obtient alors :

$$S_{\kappa} = -\rho C_{\mu} \frac{\kappa^{*2}}{\epsilon^*} g_k + 2\rho C_{\mu} \frac{\kappa^*}{\epsilon^*} g_k \cdot \kappa \quad (5.16)$$

Dans Fluent, il suffit de donner à la fonction la dérivé du terme source $\frac{\partial S_{\kappa}}{\partial \kappa} = 2\rho C_{\mu} \frac{\kappa}{\epsilon} g_k$ et Fluent se charge d'appliquer l'équation 5.16.

Pour le terme source S_{ϵ} , on a :

$$S_{\epsilon} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} \rho C_{\mu} \frac{\kappa^2}{\epsilon} g_k = C_{1\epsilon} \rho C_{\mu} \kappa g_k \quad (5.17)$$

Comme S_{ϵ} ne dépend pas de ϵ , ce terme source n'a pas à être linéarisé.

5.2.3 Sortie du domaine

La sortie du domaine est le plan $y - z$ en aval de l'écoulement. Une technique de lissage est utilisée pour aplanir la sortie du domaine, de telle sorte que l'arête inférieure du plan de sortie devienne une droite. Cette approche est employée pour s'assurer qu'aucune recirculation n'est présente à la sortie, ce qui permet d'utiliser le traitement de sortie de Patankar [49].

5.2.4 Frontières latérales

Les frontières latérales sont des plans $x - z$. Tout comme pour l'entrée du domaine, aucune information n'est connue a priori sur les caractéristiques de la vitesse et de la turbulence sur ces plans. Une approche similaire à celle présentée à la section 5.2.2 est donc utilisée.

Chacun des deux plans latéraux est pris à part et un écoulement bidimensionnel à deux composantes de vitesse y est résolu. À nouveau, les équations de transport (équations 4.3, 4.8, 4.10 et 4.11) s'appliquent, avec l'hypothèse qu'il n'y a aucune variation perpendiculairement au plan, c'est-à-dire que $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ et que la composante transversale de la vitesse est nulle, $v = 0$. Cela revient à considérer que le plan $x - z$ s'étend à l'infini dans la direction perpendiculaire à l'écoulement. La figure 26 présente un exemple de champ de vitesse obtenu. Cette figure démontre également que la méthode proposée arrive à modéli-

ser le phénomène de recirculation, ce qu'une méthode comme WAsP ne peut absolument pas faire.

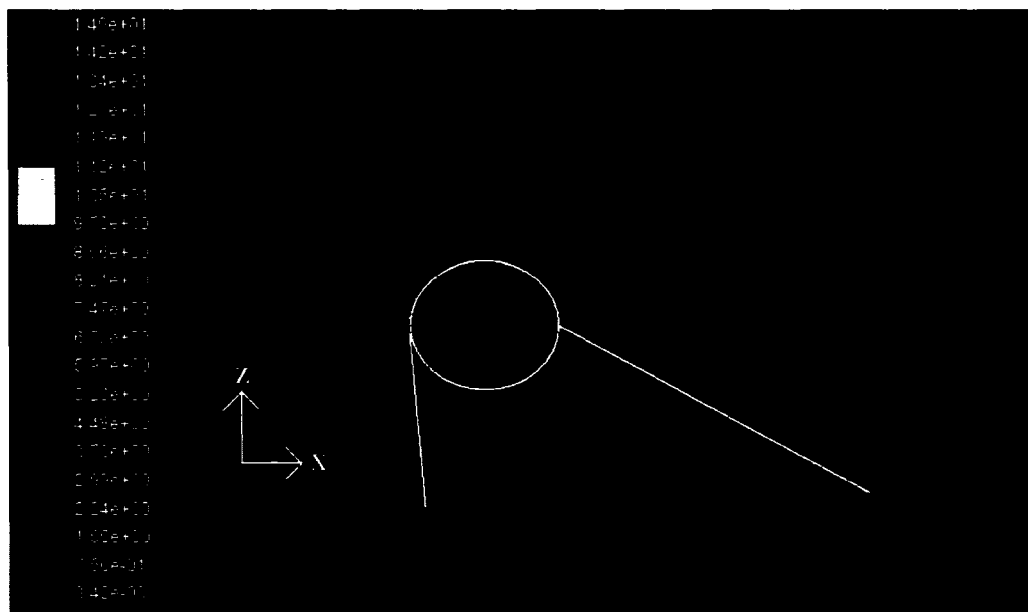


Figure 26 Vecteurs de vitesse du vent pour un écoulement 2D sur une frontière latérale

Quatre conditions frontières doivent être imposées à ce problème bidimensionnel : l'entrée, la sortie, le sol et la partie supérieure. Le sol est traité comme cela a été présenté à la section 5.2.1. Le profil d'entrée est tiré directement de la solution du problème bidimensionnel d'entrée. La frontière supérieure et la sortie sont traitées exactement comme le problème tridimensionnel. Une fois solutionnés, les profils pour u , w , κ et ϵ sont imposés sur les frontières latérales du domaine tridimensionnel.

L'hypothèse que la vitesse transversale sur ces plans est nulle peut s'avérer fautive, par exemple si une montagne se trouve tout juste à l'extérieur du domaine défini. Le positionnement des frontières latérales du domaine est donc effectué avec soin pour s'assurer qu'il est raisonnable d'utiliser cette hypothèse.

5.2.5 Partie supérieure du domaine

Comme cela a été mentionné précédemment, l'écoulement dans la couche limite atmosphérique est maintenu grâce à l'action du vent géostrophique. En suivant la recommandation de Richards et Hoxey [19], un cisaillement constant $\tau = \rho u_{*s}^2$ est appliqué au sommet du domaine pour représenter l'effet du vent géostrophique, ce qui permet de définir une vitesse de friction constante au sommet. La vitesse de friction au sommet u_{*s} définie pour l'entrée du domaine est utilisée. Les composantes de vitesse et de turbulence peuvent alors être définies à l'aide des équations 3.6, 4.20 et 4.18, en remplaçant u_* par u_{*s} . La composante verticale de la vitesse, w , est fixée à 0.

5.3 Conditions frontières sur le petit domaine

Les conditions frontières sont relativement simples à imposer sur le petit domaine de calcul. D'abord, deux parois sont traitées de manière identique à ce qui a été fait pour le grand domaine : le sol et la sortie. Pour les quatre autres frontières, soit l'entrée, la partie supérieure et les deux faces latérales, il suffit de connaître leur position exacte et de lire les valeurs trouvées par la solution sur le grand domaine. Toutefois, un traitement particulier doit être apporté à ces valeurs avant d'imposer celles-ci sur le petit domaine.

En effet, les valeurs provenant de la simulation sur le grand domaine sont des valeurs discrètes qui ne sont disponibles qu'aux centroïdes des volumes de contrôle du grand domaine. Or le petit domaine a des volumes de contrôle dont les dimensions sont beaucoup plus petites. Pour ce type d'application, le fonctionnement de Fluent est fort simple : dans un premier temps, le profil obtenu par solution du grand domaine est exporté de Fluent dans un fichier profil qui est ensuite importé sur le petit maillage. Fluent compare les coordonnées x , y et z des centroïdes du grand domaine aux coordonnées x , y et z des centroïdes des faces du petit domaine, et attribue à chacune de ces faces des valeurs pour la vitesse et la turbulence correspondant simplement aux valeurs des centroïdes les plus proches. La figure 27 présente ce procédé. Sur cette figure, les 16 faces du petit domaine se sont toutes faites imposer les mêmes valeurs de vitesse et turbulence, puisque la valeur enregistrée la plus près de toutes celles-ci est la même.

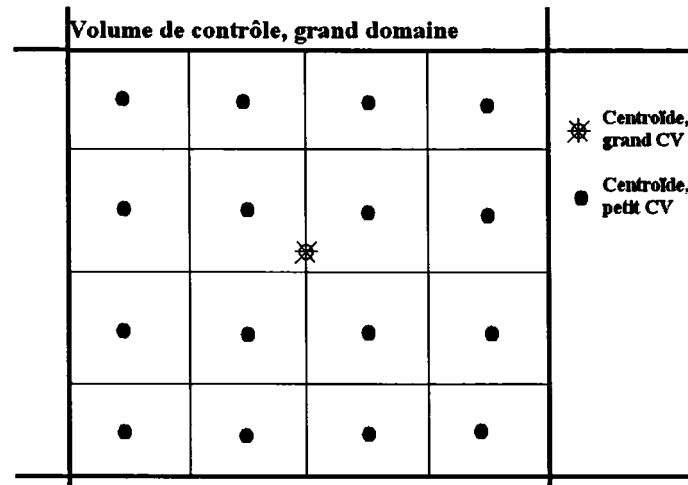


Figure 27 Valeurs de vitesse et turbulence provenant du grand domaine imposées sur le petit domaine

Il est évident que cette approche peut mener à des imprécisions de taille et pour contourner ce problème, une interpolation bilinéaire a été utilisée. Le fichier profil exporté de Fluent est traité à l'aide du logiciel Matlab et un grand nombre de points sont ajoutés, pour créer un nouveau fichier profil. À chacun des nouveaux points sont associées des valeurs de vitesse et turbulence qui sont interpolées à partir des points originaux. Ce nouveau fichier profil est alors importé sur le petit maillage. Le fonctionnement de Fluent demeure le même, c'est-à-dire que les valeurs imposées sont simplement déterminées en fonction du point le plus proche, mais comme un nombre suffisant de points a été ajouté, ce point le plus proche est réellement près et la valeur assignée provient de l'interpolation bilinéaire.

5.4 Initialisation de la solution

Avant de débiter le processus itératif, des valeurs doivent être imposées dans chacun des volumes de contrôle pour cinq paramètres : les trois composantes de la vitesse u , v et w , l'énergie cinétique turbulente κ et la dissipation d'énergie cinétique turbulente ϵ . L'initialisation de la solution est une étape importante puisque des valeurs initiales imposées intelligemment peuvent permettre de converger et d'obtenir une solution beaucoup plus rapidement, alors que des valeurs initiales mal choisies pourraient faire diverger l'approche itérative.

Dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, la solution initiale correspond aux profils de Monin-Obukhov obtenus avec la vitesse de friction u_{*s} de l'entrée. Pour ce faire, il suffit, pour chacun des volumes de contrôle, de connaître la hauteur de son centroïde par rapport au sol, et ainsi utiliser les équations 3.6, 4.18 et 4.20, en imposant $u_* = u_{*s}$.

En terrain plat, comme la théorie de Monin-Obukhov suppose que l'écoulement se maintient dans l'espace, l'initialisation effectuée revient à imposer la solution exacte sur l'ensemble du domaine dès le départ.

Lorsque le terrain est accidenté, l'hypothèse que la vitesse de friction de l'entrée sera identique partout n'est pas valable. Cependant, on peut supposer que la valeur réelle sera dans les environs de ce u_{*s} . Initialiser la solution de cette façon permet d'avoir des valeurs de départ qui sont près de la réalité. Il est à noter que les composantes transversale et verticale de la vitesse sont initialisées à zéro. La figure 28 présente un exemple d'initialisation effectuée sur un terrain complexe.

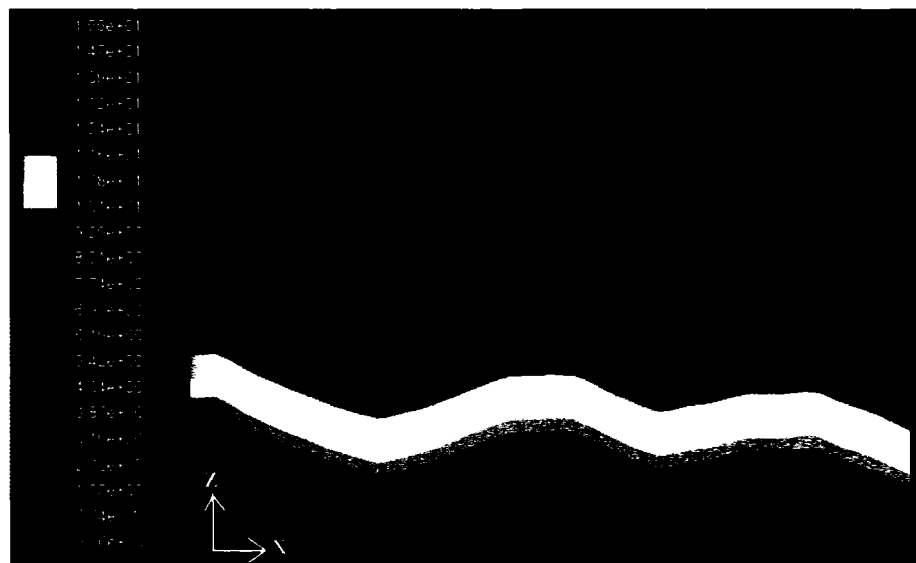


Figure 28 Exemple d'initialisation de la solution : profil de vitesse u

5.5 Résumé des paramètres employés dans FLUENT

Cette section présente de manière succincte les paramètres employés dans Fluent pour parvenir à obtenir les résultats présentés dans le cadre de ce mémoire. Une liste détaillée de ces paramètres est également présentée à l'annexe A.

Paramètres généraux communs à toutes les formulations

Quatre formulations distinctes sont utilisées dans le cadre de ce travail de maîtrise : écoulement bidimensionnel sur la face d'entrée, écoulement bidimensionnel sur les faces latérales, écoulement tridimensionnel sur le grand domaine de calcul et écoulement tridimensionnel sur le petit domaine de calcul. Plusieurs paramètres sont communs à toutes ces simulations et sont présentés ci-dessous.

- Modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$ avec constantes modifiées, telles que présentées au tableau II.
- Utilisation d'une discrétisation de premier ordre amont (*first order upwind*) pour résoudre les équations de conservation de quantité de mouvement et de turbulence.
- Utilisation d'une forme de loi de paroi nécessitant le calcul d'une vitesse de friction locale u_{*i} pour représenter l'effet de la rugosité au sol, telle que proposée initialement par Richards et Hoxey [19].
- Vitesse et turbulence à la paroi supérieure du domaine imposées à partir d'une vitesse de friction u_{*s} représentative de l'interaction entre l'écoulement dans la couche limite atmosphérique et les vents géostrophiques qui maintiennent l'écoulement.

Paramètres pour écoulement bidimensionnel de l'entrée

Cet écoulement est perpendiculaire au plan du maillage.

- Les équations de transport pour les composantes de la vitesse dans le plan, v et w ne sont pas résolues ; $v = w = 0$.
- Utilisation d'un scalaire-utilisateur pour modéliser la composante u de la vitesse, qui est perpendiculaire au plan.

- Introduction de termes sources dans les équations de transport de la turbulence, pour prendre en compte la distribution de u .
- Condition de symétrie pour les arêtes latérales du domaine.

Paramètres pour écoulement bidimensionnel des parois latérales

Cet écoulement est dans le plan du maillage.

- Condition frontière sur l'arête d'entrée du domaine provenant directement de la solution obtenue pour l'écoulement bidimensionnel d'entrée.

Paramètres pour écoulement tridimensionnel du grand domaine

- Condition frontière sur le plan d'entrée du domaine provenant directement de la solution obtenue pour l'écoulement bidimensionnel d'entrée.
- Condition frontière sur les parois latérales du domaine provenant directement de la solution obtenue pour l'écoulement bidimensionnel des parois.

Paramètres pour écoulement tridimensionnel du petit domaine

- Condition frontière sur le plan d'entrée, sur les plans latéraux et sur le plan supérieur du domaine provenant de la solution obtenue pour l'écoulement tridimensionnel du grand domaine. Comme les valeurs obtenues sur le grand domaine ne sont disponibles qu'au centroïde des volumes de contrôle, une technique d'interpolation bilinéaire est employée pour obtenir des valeurs plus précises qui seront imposées à chacun des centroïdes des faces du petit domaine.

CHAPITRE 6

ÉTUDE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

L'objectif de ce mémoire est de développer une méthode numérique qui permettra de simuler l'écoulement du vent sur un terrain complexe en vue de réaliser la calibration virtuelle d'un site éolien. Pour vérifier si la méthode numérique développée est valable, il est nécessaire de comparer les résultats obtenus à des données expérimentales. Le présent chapitre s'attarde à présenter le site choisi de même que les données expérimentales recueillies. Une analyse d'incertitude détaillée a également été réalisée.

6.1 Présentation détaillée du site de Rivière au Renard

Le site retenu est situé près du village de Rivière au Renard, en Gaspésie. La figure 29, tirée de [50] présente la localisation de ce village dans la province du Québec. Comme le but est de simuler l'écoulement du vent sur de courtes distances, le terrain étudié est une parcelle de 5km par 5km . Il s'agit d'un site très complexe car il est en grande partie recouvert de forêt, en plus d'être très montagneux, tel qu'illustré à la figure 30. Dans un rayon de moins de 1km centré sur le site, une différence d'altitude de plus de 300m est observée.

6.2 Installations sur le site

Initialement, le site de Rivière au Renard a accueilli un petit projet éolien réalisé par le Groupement Éolien Québécois¹ : trois éoliennes ont été installées sur le site en 2003 dans le but d'en faire une vitrine technologique. Il s'agit d'éoliennes de 750kW dont la hauteur du moyeu est de 46m et dont le rotor a un diamètre de 48m .

Pour arriver à déterminer les performances des éoliennes, une tour de mesure temporaire et une tour de mesure de référence ont été installées sur le site en octobre 2002. La tour

¹Le Groupement Éolien Québécois est composé de quatre compagnies : Groupe Ohméga Inc., Fabrication Delta, Hélimax Énergie Inc. et Lefebvre et Frères.



Figure 29 Localisation de Rivière au Renard dans la province de Québec (Tirée de [50])

temporaire a été enlevée dans les premiers mois de 2003 pour permettre l'installation de l'éolienne.

La Chaire de recherche du Professeur Masson a installé sur ce site complexe trois tours de mesure supplémentaires, dans le but de procéder à différentes analyses du vent [51]. Les données provenant de ces trois tours, de même que celles provenant des tours référence et temporaire, seront utilisées dans le cadre du présent projet de maîtrise.

Avant de procéder à l'étude détaillée des données expérimentales recueillies, il est intéressant de quantifier la ressource éolienne sur ce site. La rose des vents présentée à la figure

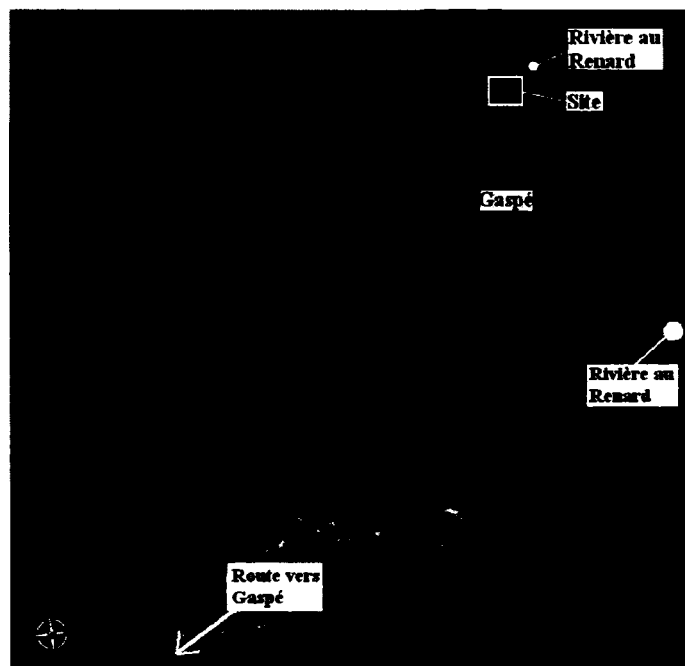


Figure 30 Parcelle de terrain à l'étude : 5km par 5km (Tirée de GoogleEarth)

31 permet de voir que deux directions de vent sont dominantes, soit Nord-Nord-Ouest et Sud-Ouest. Cette rose des vents a été élaborée par Christophe Sibuet-Watters, de HéliMAX Énergie, à partir de données de vent enregistrées à une tour de 40m appartenant à Environnement Canada et située à 1km du site (voir la figure 6 pour la position exacte de cette tour).

6.2.1 Positionnement des différents équipements

En plus des trois éoliennes, quatre mâts météorologiques ont donc été installés sur le site de Rivière au Renard. La figure 32 présente la position de chacune de ces tours par rapport à la position des éoliennes. De même, le tableau IV présente les coordonnées des éoliennes et des mâts de mesure, dans le système de coordonnées planes du Québec, fuseau 5 (projection MTM, système de référence géodésique NAD83).

La tour référence, installée en 2002, a une hauteur de 46m . Un anémomètre de marque NRG et une girouette ont été installés à son sommet sur un bras en U. La hauteur des cou-

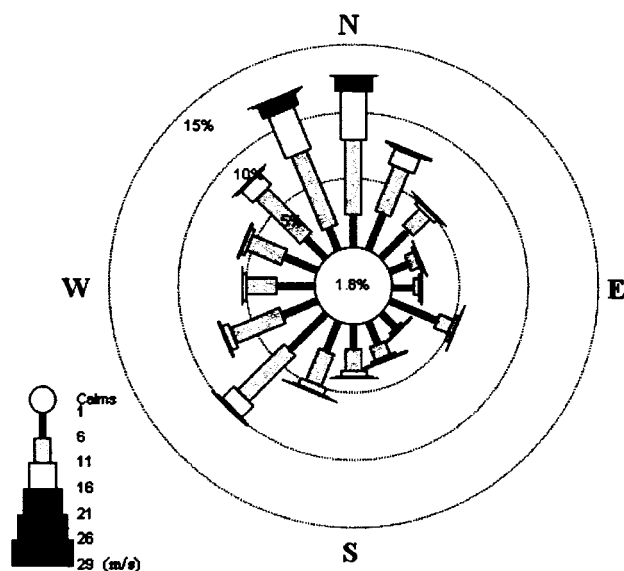


Figure 31 Rose des vents du site de Rivière au Renard

poles de l'anémomètre est de 46, 5m au dessus du sol. Une deuxième série d'instruments a été installé à 20m du sol. La tour temporaire installée à la position exacte de l'éolienne 1, était identique à la tour référence.

Tableau IV

Positions des installations sur le site

	Coordonnées Est	Coordonnées Nord	Altitude
Éolienne 1	308260	5427597	330
Éolienne 2	308500	5427700	351
Éolienne 3	308800	5428025	328
Tour ref	308164	5427597	330
Tour 1	308330.8	5427526.5	330
Tour 2	308361.9	5427699.1	339
Tour 3	308158.3	5427699.1	327

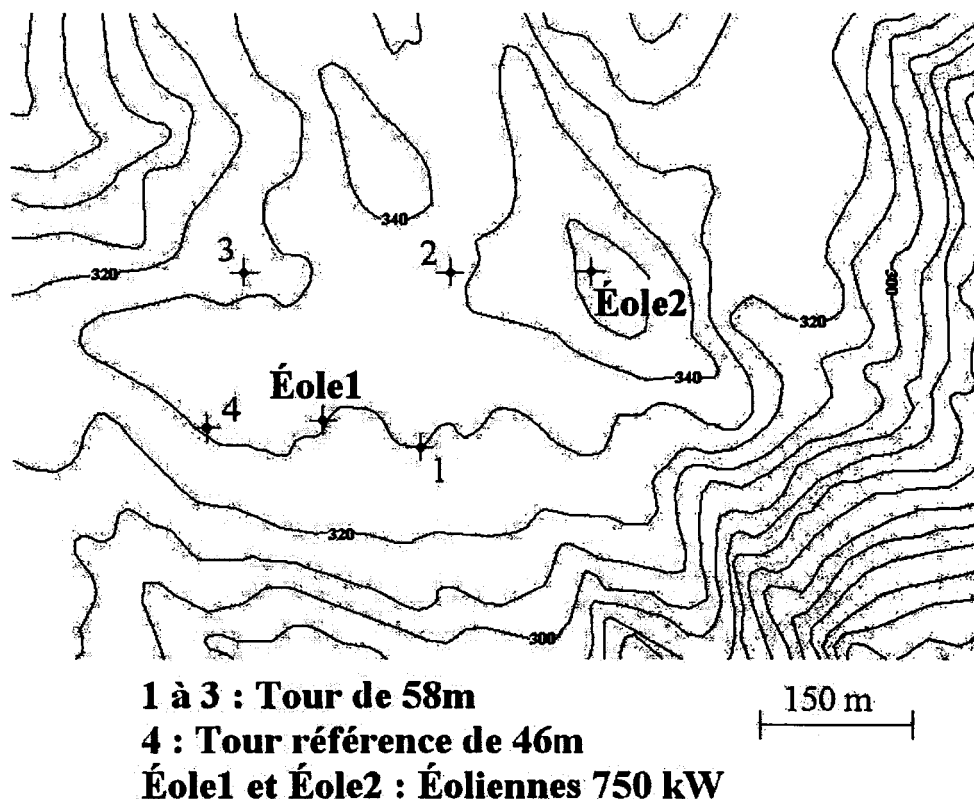


Figure 32 Position des différents équipements sur le site

Les trois autres mâts météorologiques du site ont été installés principalement dans le but d'étudier certaines caractéristiques du vent sur ce site complexe. Les détails de ces installations peuvent être trouvés dans la référence [51]. Dans le présent mémoire, seul un résumé des principales caractéristiques des mâts sera présenté à la section 6.2.2. La figure 33 permet de voir l'une des éoliennes installées sur le site de même que la tour référence (à gauche) et deux des trois tours de 58m.

Un fait important à retenir par rapport à la position des mâts de mesure installés sur le site est que ceux-ci sont tous relativement près des éoliennes 1 et 2. En effet, les tours 2 et 3 sont à environ 200m de l'éolienne 1, alors que la tour 3 est encore plus près, sans compter que l'éolienne 2 n'est pas très loin à l'Est. Or, la présence des éoliennes crée un sillage important qui influence énormément le vent. Afin de développer une méthode de simulation du vent qui n'inclut pas la présence des éoliennes, il est important que les données expérimentales utilisées ne soient pas influencées par celles-ci. Pour s'en assurer,

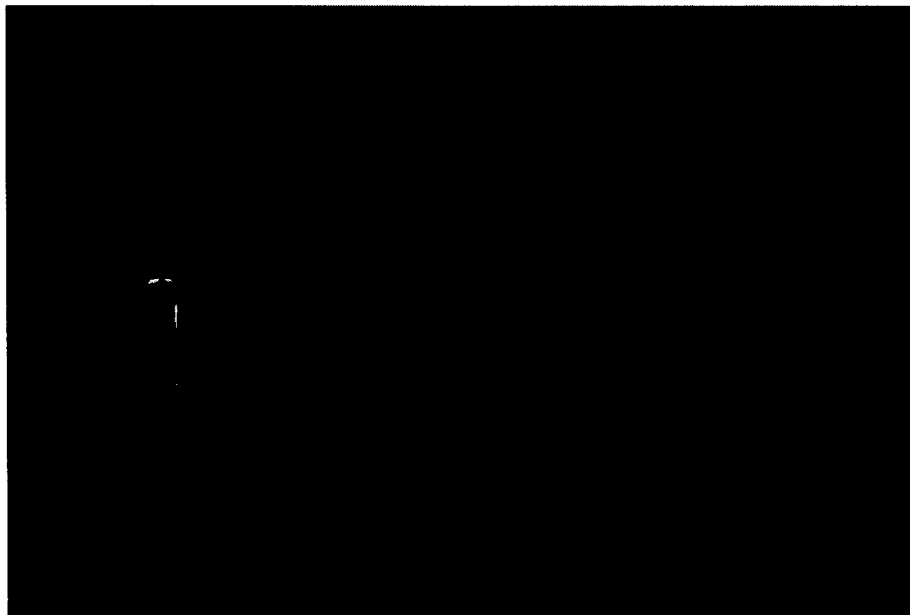


Figure 33 Photographie des tours de mesure sur le site de Rivière au Renard

la règle relative à la présence d'obstacles de la norme IEC61400-121 [4] a été suivie. Cela implique de déterminer la distance L_e entre le mât de mesure concerné et l'obstacle (ici une éolienne) tout en déterminant le diamètre du rotor de l'éolienne D_e . À partir de ces deux mesures, le graphe présenté à la figure 34 est utilisé pour déterminer le secteur à exclure en raison de la présence de l'obstacle. Ce secteur doit être centré sur la ligne reliant l'obstacle au mât de mesure. Enfin, il faut répéter cette opération pour chacun des obstacles.

Pour chacun des mâts de mesure, cette démarche a été suivie, ce qui permet de connaître les secteurs de vent qui ne sont pas perturbés par la présence des éoliennes. Le tableau V les présente. Il est important de ne considérer que les secteurs à l'intérieur de ces plages de direction de vent lors de l'analyse des résultats.

6.2.2 Détails concernant les instruments utilisés

Les instruments ont été installés sur les tours de mesure en respect de la norme IEC61400-121. Sur chacune des tours de 58m, quatre niveaux d'instruments ont été installés. La

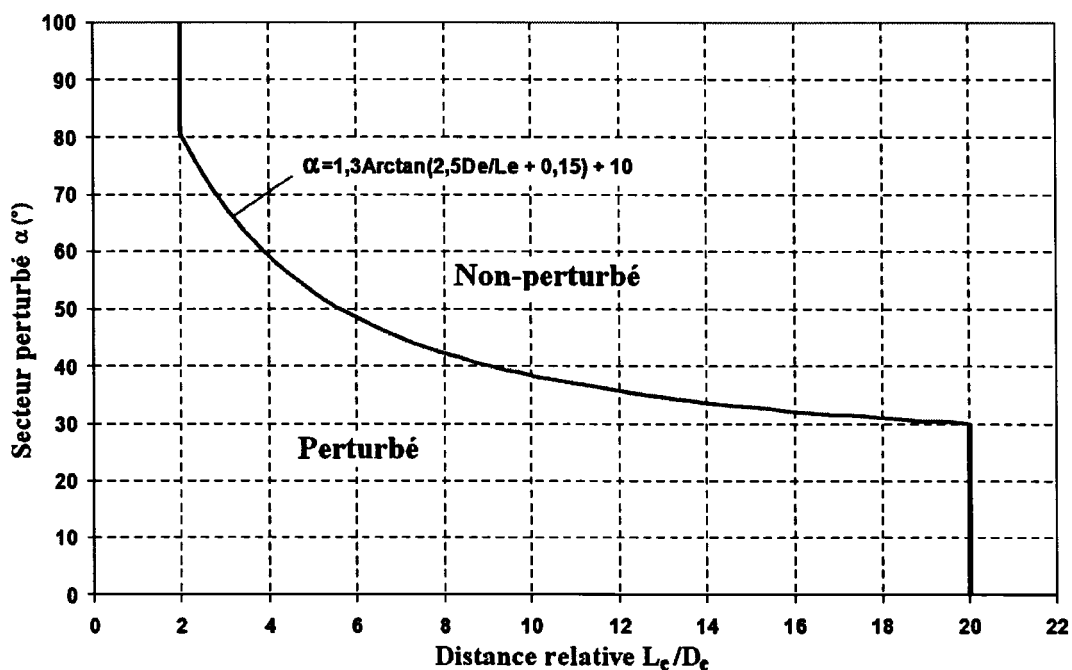


Figure 34 Secteurs à exclure selon la norme IEC61400-121 [4]

figure 35 présente la photo de l'une des tours de 58m et explique comment les instruments ont été installés sur celles-ci. Plus de détails pourront être obtenus à ce sujet en consultant la référence [51].

Les orientations choisies pour les systèmes de fixation assurent que l'influence du sillage de la tour est minimisé dans les directions principales du vent. Les anémomètres NRG utilisés sont calibrés et leur taux d'échantillonnage est de $0,5Hz$. L'anémomètre au sommet est un anémomètre redondant qui permet de vérifier la lecture faites à 58m. Un thermomètre a été installé à la base de chaque tour. Ces données sont enregistrées dans le système d'acquisition de données (SAD) installé à la base de chaque tour et transmise quotidiennement, par cellulaire, à la compagnie Ohméga, qui se chargeait de recueillir ces données et de les transmettre à la Chaire de recherche de M. Masson. Le SAD procède au moyennage des données. Les valeurs transmises sont donc des moyennes de 10 minutes, incluant l'écart-type sur ces valeurs.

Tableau V

Perturbations dues au sillage des éoliennes à proximité

Tour1					
	Distance (m)	Rapport L_e/D_e	Direction mât - Obstacle (°)	Secteurs à exclure (°)	SECTEURS VALIDES (°)
Éolienne 1	109.5	2.28	296	258 à 334	79 à 258 et 334 à 26
Éolienne 2	242.4	5.05	52	25 à 79	
Éolienne 3	682.4	14.22	43	26 à 60	
Tour2					
	Distance (m)	Rapport L_e/D_e	Direction mât - Obstacle (°)	Secteurs à exclure (°)	SECTEURS VALIDES (°)
Éolienne 1	203.1	4.23	212	184 à 240	125 à 184 et 240 à 35
Éolienne 2	138.4	2.88	90	55 à 125	
Éolienne 3	543.9	11.33	53	35 à 71	
Tour3					
	Distance (m)	Rapport L_e/D_e	Direction mât - Obstacle (°)	Secteurs à exclure (°)	SECTEURS VALIDES (°)
Éolienne 1	164.6	3.43	152	121 à 183	112 à 121 et 183 à 46
Éolienne 2	337.4	7.03	90	68 à 112	
Éolienne 3	717.7	14.95	63	46 à 80	

6.3 Traitement statistique des données

Il est important de noter que les anémomètres chauffés installés à la hauteur de 40m présentent clairement des phénomènes de survitesse par rapport aux autres instruments. Les anémomètres chauffés ne seront donc pas utilisés pour la comparaison des résultats numériques et expérimentaux. Par contre, ces anémomètres chauffés ont été utilisés pour identifier des problèmes de givre sur les autres instruments.

De même, les anémomètres soniques présentent des caractéristiques très différentes des autres instruments et ceux-ci ne seront donc pas utilisés lors de l'analyse des résultats.

6.3.1 Méthodologie employée

Deux séries de résultats sont présentés au chapitre 7 : la comparaison entre calibration traditionnelle et virtuelle est réalisée à partir des données expérimentales provenant des

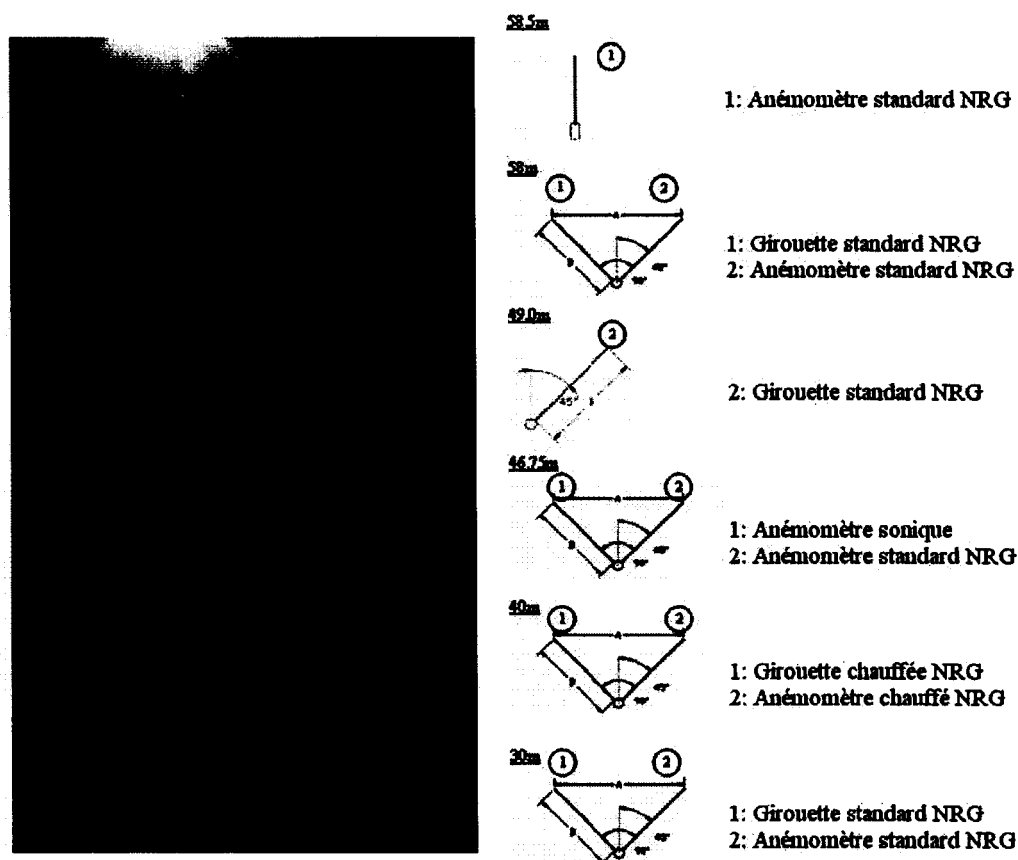


Figure 35 Détails des instruments installés sur les tours de 58m

tours de 46m alors que le reste des comparaisons provient de l'utilisation des données des tours de 58m. L'analyse de données présentée ci-dessous traitera principalement des données provenant des tours de 58m. Une approche identique a été utilisée pour l'analyse des données des tours de 46m.

Les données provenant des tours de 58m ont été recueillies du 1^{er} septembre 2004 à la fin juin 2005, ce qui donne un total de 10 mois de données ou, de manière brute, près de 44 000 échantillons de 10 minutes. Dans un premier temps, ces données ont été filtrées à l'aide des critères suivants :

- Comme il s'agit d'un site nordique, les températures hivernales sont très basses et il est possible que les anémomètres et girouettes aient gelé. Les instruments chauffés

ont donc été utilisés pour vérifier ce genre de problème et les données erronées ont été éliminées.

- La cohérence des données entre elles a également été vérifiée. Par exemple, les anémomètres installés au sommet étaient dédoublés : si plusieurs lectures consécutives présentaient des différences trop significatives ($> 2m/s$), ces données étaient alors éliminées. De même, le profil général observé à une tour pour un échantillon donné devait ressembler au profil logarithmique, c'est-à-dire que la vitesse du vent devait être de plus en plus grande lorsque l'altitude augmentait. Si ce n'était pas le cas, cet échantillon était éliminé.
- Enfin, en respect de la nouvelle norme IEC61400-121 [4], seules les données de vent situées entre 4 et 16 m/s , à la hauteur du moyeu de l'éolienne, soit 46m, ont été retenues.

Lorsqu'un échantillon était éliminé pour une tour, il l'était pour toutes les tours à cet instant précis. Une fois le travail de filtrage réalisé, les données étaient classées par secteur de 10° , chacun des secteurs étant analysé séparément.

6.3.2 Analyse des données

L'objectif de l'analyse de données est d'obtenir des valeurs moyennes représentatives de l'écoulement sur le site de Rivière au Renard et qui permettent de relier la vitesse du vent entre différents anémomètres. Pour réaliser une calibration de site, seules deux anémomètres doivent être corrélés entre eux : celui à la tour référence et celui à la tour temporaire, tous deux à la hauteur du moyeu de l'éolienne. Dans le cadre de ce travail de maîtrise, il a été décidé d'aller plus loin et de corrélérer tous les anémomètres de toutes les tours entre eux. La méthode présentée ci-dessous est appliquée pour chacun des secteurs étudiés.

Dans un premier temps, un anémomètre référence a été choisi. Généralement, l'anémomètre de la tour 2, à une hauteur de 47m, a été retenu. Puis, une régression linéaire² est

²L'utilisation d'une régression linéaire pour corrélérer la vitesse de vent entre deux anémomètres est explicitement suggérée par la norme IEC61400-12 [52]. Par contre, la nouvelle norme IEC61400-121 [4], en vigueur depuis décembre 2005, parle d'un facteur de correction de l'écoulement α , ce qui peut être interprété comme une régression linéaire passant par l'origine. Comme une grande partie du travail de ce mémoire a été réalisée avant décembre 2005, l'approche de la norme IEC61400-12 a été utilisée.

établie entre les vitesses de vent à cet anémomètre et celles à un second anémomètre de la même tour. Pour ce faire, la méthodologie proposée par Press et al. [53] ou Bevington [54] est utilisée. Cette méthode a la particularité de prendre en compte l'erreur aussi bien sur les valeurs x que sur les valeurs y . La norme IEC61400-121 [4] indique que le traitement statistique des données doit suivre les recommandations faites par le *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [55]. Or, ce dernier recommande la méthode de Press et al..

On souhaite obtenir une relation de la forme :

$$V_{pos} = f(V_{ref}) = A + B \cdot V_{ref} \quad (6.1)$$

où V_{ref} est la vitesse à l'anémomètre référence et V_{pos} est la vitesse prévue à une autre position. Pour arriver à déterminer la valeur des paramètres A et B , il faut minimiser la relation du chi-carré suivante (tirée de [53]) :

$$\chi^2(A, B) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{pos,i} - A - B \cdot V_{ref,i}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (6.2)$$

où n correspond au nombre d'échantillons pour le secteur considéré. De plus, il est important de se rappeler que les valeurs expérimentales utilisées pour arriver à développer la régression linéaire exprimée par l'équation 6.1 sont des données de vent moyennées sur 10 minutes. Chaque donnée est donc une distribution statistique comportant une moyenne et un écart-type. Cet écart-type, exprimant une incertitude sur les valeurs, influence les paramètres de la régression linéaire recherchée.

Dans ce cas-ci, l'incertitude associée aux données est présente aussi bien pour les valeurs V_{ref} que pour les valeurs V_{pos} , et la valeur de l'écart-type σ_i que l'on retrouve au dénominateur de l'équation 6.2 sera donnée par $\sigma_i^2 = \sigma_{ref,i}^2 + \sigma_{pos,i}^2$. Cela revient à considérer que la valeur de la variable indépendante V_{ref} est connue avec une très grande précision et que l'ensemble de l'incertitude est portée par la variable dépendante V_{pos} . Il s'agit là d'une approximation qui permet de simplifier le traitement de l'incertitude, ce qui est recommandé par la référence [54].

Pour arriver à calculer les paramètres A et B , il faut d'abord déterminer les sommes suivantes :

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (6.3)$$

$$S_x = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ref,i}}{\sigma_i^2} \quad (6.4)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n \frac{V_{pos,i}}{\sigma_i^2} \quad (6.5)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ref,i}^2}{\sigma_i^2} \quad (6.6)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ref,i} V_{pos,i}}{\sigma_i^2} \quad (6.7)$$

Il est alors possible d'obtenir la valeur de A et B :

$$\Delta = S \cdot S_{xx} - (S_x)^2 \quad (6.8)$$

$$A = \frac{S_{xx} \cdot S_y - S_x \cdot S_{xy}}{\Delta} \quad (6.9)$$

$$B = \frac{S \cdot S_{xy} - S_x \cdot S_y}{\Delta} \quad (6.10)$$

La figure 36 présente un exemple de corrélation obtenue. La façon de calculer l'intervalle d'incertitude de type A sera expliquée en détail à la section 6.4.1. Les données sont filtrées pour ne conserver que des valeurs de vitesses de vent entre 4 et 16m/s à l'anémomètre référence, mais ce filtrage n'est pas fait pour l'anémomètre secondaire puisque cela induirait un biais dans la régression. Cependant, lorsque la vitesse du vent à l'anémomètre secondaire est trop faible ($< 1m/s$), l'échantillon est rejeté.

Une fois la première corrélation obtenue, l'opération est répétée pour chacun des autres anémomètres de la même tour. Puis, toujours en gardant le même anémomètre référence, les vitesses de vent aux anémomètres des autres tours sont corrélées. La figure 37 présente schématiquement cette méthode (pour seulement deux des trois tours). Cette méthode permet ensuite de n'avoir à fixer qu'une seule valeur de vitesse de vent, la valeur à l'anémomètre référence, permettant de connaître la vitesse du vent à toutes les autres positions. Il

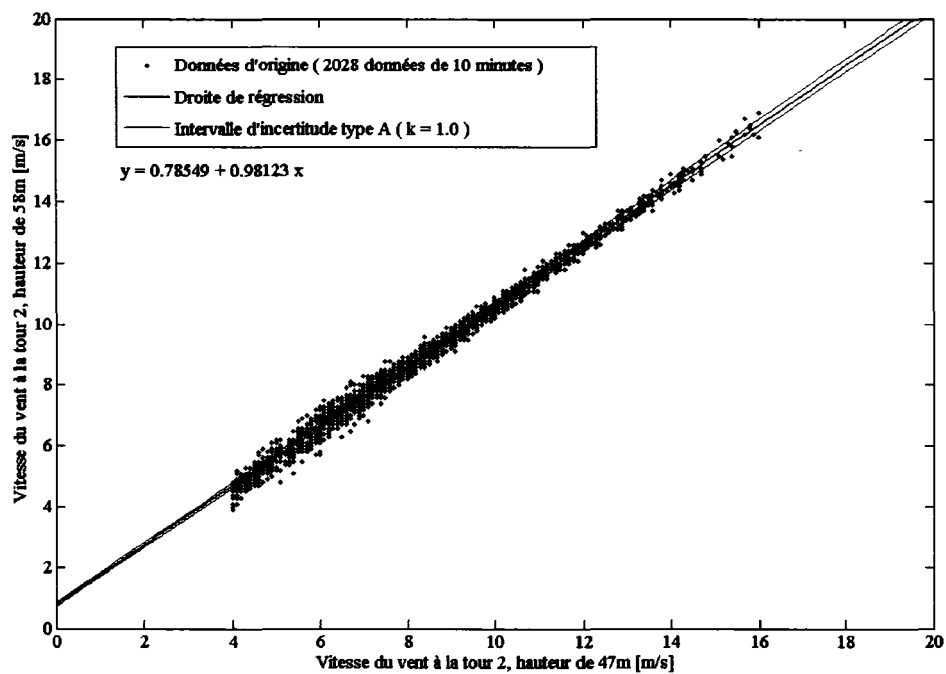


Figure 36 Exemple de corrélation entre deux anémomètres d'une même tour (secteur 305°)

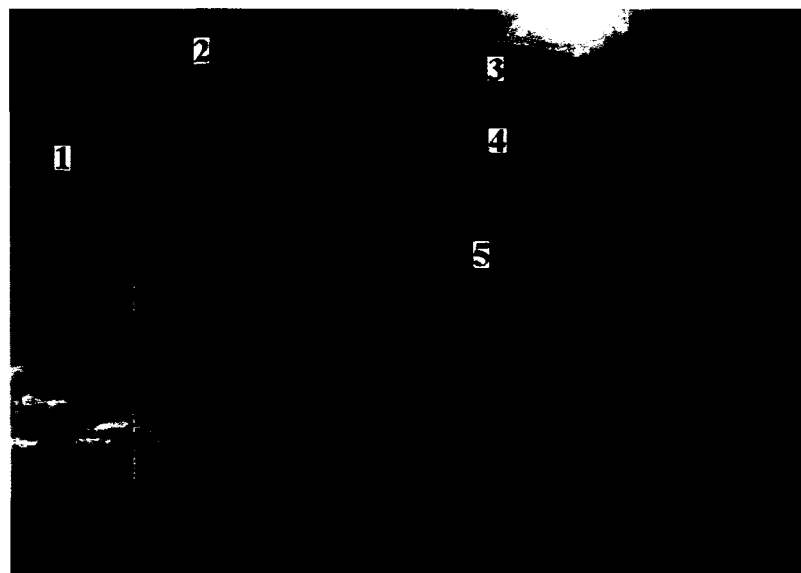


Figure 37 Procédure pour établir la relation de vitesse entre les différents anémomètres

est alors possible d'établir le profil de vitesse à chacune des tours et de comparer ces profils aux valeurs numériques obtenues par simulation. L'avantage de cette méthode est qu'un seul échantillon de 10 minutes peut être largement influencé par la stabilité thermique de la couche limite atmosphérique. La moyenne obtenue représente donc mieux une condition de stabilité thermique neutre, ce qui simplifie le modèle numérique à développer.

L'analyse des données expérimentales a permis d'observer que le profil vertical de vitesse à chacune des tours et ce, peu importe la direction, est près de la forme du profil logarithmique prédit par la théorie de la couche limite atmosphérique de Monin-Obukhov pour un écoulement sur terrain plat. Toutefois, la longueur de rugosité observée est très grande. Les z_0 observées sont de l'ordre de $0.2m$ à $4.5m$. Ces valeurs de rugosité sont légèrement supérieures aux valeurs prévues pour ce genre de terrain [42, 56]. De plus, la longueur de rugosité présente une importante dépendance sur l'orientation du vent et peut être très différente pour deux mâts distincts dans la même orientation de vent. Cela est probablement dû à la complexité du terrain étudié.

Il est important d'avoir en tête que ces valeurs de z_0 ont été déterminées expérimentalement et ne doivent pas être considérées comme représentatives uniquement de la rugosité du terrain étudié. Pour déterminer les valeurs de z_0 , la vitesse du vent est obtenue à deux hauteurs pour une même tour. À partir de ces deux vitesses, en utilisant l'équation du profil de vitesse de Monin-Obukhov et en assumant une stratification thermique neutre (équation 3.6), la longueur de rugosité est déterminée. La troisième lecture de vitesse pour cette même tour permet de vérifier si le profil de vitesse du vent réel respecte bien le profil de Monin-Obukhov qui vient d'être déterminé.

De cette manière, la longueur de rugosité z_0 est représentative de la rugosité de la surface mais également de la topographie au-dessus de laquelle le vent a progressé avant d'atteindre la tour, ce qui implique que z_0 peut être différente à un même endroit pour différentes orientations de vent.

Comme le terrain étudié est recouvert de forêt, l'approche présentée à la section 3.1.3.2 a été envisagée, c'est-à-dire caractériser la végétation à l'aide de deux paramètres : la longueur de rugosité z_0 et la hauteur de déplacement d . Comme des mesures sont disponibles à trois hauteurs différentes ($58m$, $47m$ et $30m$), il est possible d'utiliser l'équation 3.8

pour déterminer la hauteur de déplacement. Cependant, il s'est avéré que cette approche était impossible à utiliser ici, pour de nombreuses raisons. Dans un premier temps, à partir de l'observation de la forêt recouvrant le site étudiée, que l'on peut voir sur la figure 38, il est difficile d'assimiler la canopée des arbres à une surface déplacée. En effet, bien que



Figure 38 Forêt observée du haut d'une éolienne à Rivière au Renard

la forêt semble assez dense, la présence de conifères et de feuillus de hauteurs sensiblement différentes rend cette hauteur déplacée très inégale. Cette considération purement physique ne permet donc pas d'affirmer avec certitude qu'une hauteur de déplacement devrait être utilisée pour caractériser cette forêt. Dans un deuxième temps, il faut se rappeler que l'équation 3.8, qui découle directement de l'équation 3.7, n'est théoriquement valable que pour un terrain plat en condition de stabilité thermique neutre. Or, dans le cas présent, le terrain n'est assurément pas plat et, plus important encore, bien qu'il soit supposé que l'approche statistique utilisée permette de tendre vers un profil neutre, cette condition ne peut être garantie. Cette dernière considération fait en sorte que l'équation 3.8 devient inutilisable.

Le cas particulier du vent observé à la tour 1, dans la direction 5° , illustre bien ce problème. Le tableau VI présente les valeurs de vitesse de vent que l'on obtient à chacun des anémomètres de la tour 1 en fixant la vitesse à $47m$ à la tour 2 à $10m/s$, à l'aide de la méthode présentée ci-dessus.

Tableau VI

Vitesses de vent observées à la tour 1, orientation 5°

Hauteur [m]	30	47	58
Vitesse du vent [m/s]	8.4	9.62	10.3

Si l'on tente d'utiliser l'équation 3.8 pour déterminer la hauteur de déplacement d , une valeur de $d \cong -50m$ est alors trouvée, ce qui bien sûr est impossible. La hauteur de déplacement est donc fixée à zéro et seul le paramètre z_0 sera utilisé pour représenter l'effet de la végétation sur l'écoulement.

6.4 Analyse d'incertitude

L'analyse d'incertitude présentée dans cette section est basée sur la méthode proposée par le "*Guide to the expression of uncertainty in measurement*" [55], qui est elle-même recommandée par la norme IEC61400-121 [4]. Deux types d'incertitudes doivent être analysées : les incertitudes de type A proviennent de considérations statistiques dérivées des régressions linéaires ; les incertitudes de type B ne peuvent être déterminées par les données elles-mêmes et proviennent plutôt d'incertitudes reliées aux équipements et installations utilisés. L'objectif est d'arriver à quantifier l'incertitude standard associée à chacun des paramètres. L'incertitude standard est définie comme étant l'incertitude exprimée sous la forme d'un écart-type.

6.4.1 Incertitudes de type A

Les incertitudes de type A représentent la qualité de la droite de régression à exprimer le lien entre les valeurs de vitesse de vent observées à l'un des anémomètres par rapport à

l'anémomètre référence choisi. Toujours en se basant sur la méthode proposée par Press et al. [53], la théorie de propagation des erreurs démontre que la variance σ_f^2 de n'importe quelle fonction $y = f(x)$ est donnée par :

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{x,i}^2 \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)^2 \quad (6.11)$$

Pour la régression linéaire présentée à l'équation 6.1, on a que :

$$\begin{aligned} V_{pos,i} &= f(x) \\ &= f(V_{ref,i}) \\ &= A + B \cdot V_{ref,i} \end{aligned} \quad (6.12)$$

et les dérivées de A et B donnent :

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial V_{pos,i}} &= \frac{S_{xx} - S_x \cdot V_{ref,i}}{\sigma_i^2 \cdot \Delta} \\ \frac{\partial B}{\partial V_{pos,i}} &= \frac{S \cdot V_{ref,i} - S_x}{\sigma_i^2 \cdot \Delta} \end{aligned} \quad (6.13)$$

En utilisant la sommation de l'équation 6.11, le résultat est alors :

$$\begin{aligned} \sigma_A^2 &= \frac{S_{xx}}{\Delta} \\ \sigma_B^2 &= \frac{S}{\Delta} \end{aligned} \quad (6.14)$$

où S_{xx} et S sont calculées avec les équations 6.6 et 6.3. À partir de la variance sur les paramètres A et B de la régression linéaire, il est possible de déterminer l'incertitude associée à toutes valeurs comprises dans l'intervalle initial utilisé (ici 4 à 16m/s). L'incertitude de

type A associée à la régression linéaire est donnée par³ :

$$u(V_{pos,i}) = \sqrt{\sigma_A^2 + V_{ref,i}^2 \cdot \sigma_B^2} \quad (6.15)$$

6.4.1.1 Incertitude standard combinée de type A

Pour obtenir l'incertitude combinée de type A, il faut multiplier la valeur d'incertitude standard trouvée, $u(V_{pos,i})$ par un facteur de sensibilité c . Sachant que la valeur de vitesse recherchée peut se résumer à la fonction $V_{pos} = f(V_{ref}) = A + B \cdot V_{ref}$, alors le facteur de sensibilité c se calcule :

$$c = \frac{\partial f(V_{ref})}{\partial V_{ref}} = B \quad (6.16)$$

L'incertitude combinée de type A est donc donnée par $u_A(V_{pos,i}) = B \cdot u(V_{pos,i})$. Lorsque l'on détermine la relation entre des vitesses à des hauteurs similaires, la constante B est toujours près de 1. Cependant, lorsque l'on corrèle deux vitesses se trouvant à des hauteurs différentes, la constante B peut être significativement différente de 1 et celle-ci prend donc son importance dans l'équation 6.16.

6.4.2 Incertitudes de type B

Les instruments, leurs limites, le montage des instruments sur les tours et la turbulence dans les écoulements introduisent des incertitudes de type B. Chacun de ces éléments est décrit ci-dessous.

– Calibration des anémomètres

Les anémomètres utilisés ont tous été calibrés. La figure 39 présente un exemple de calibration.

Ces rapports de calibration définissent de manière précise les paramètres β_0 et β_1 de la droite de régression linéaire $V = \beta_0 + \beta_1 N_I$ qui permettent de relier le nombre d'impulsions N_I produit par l'anémomètre à la vitesse de vent observée. Il permet également de définir l'incertitude standard associée à la lecture de vitesse d'un

³Le symbole u (*uncertainty*) est utilisé pour représenter l'incertitude suivant la nomenclature employée par [55].

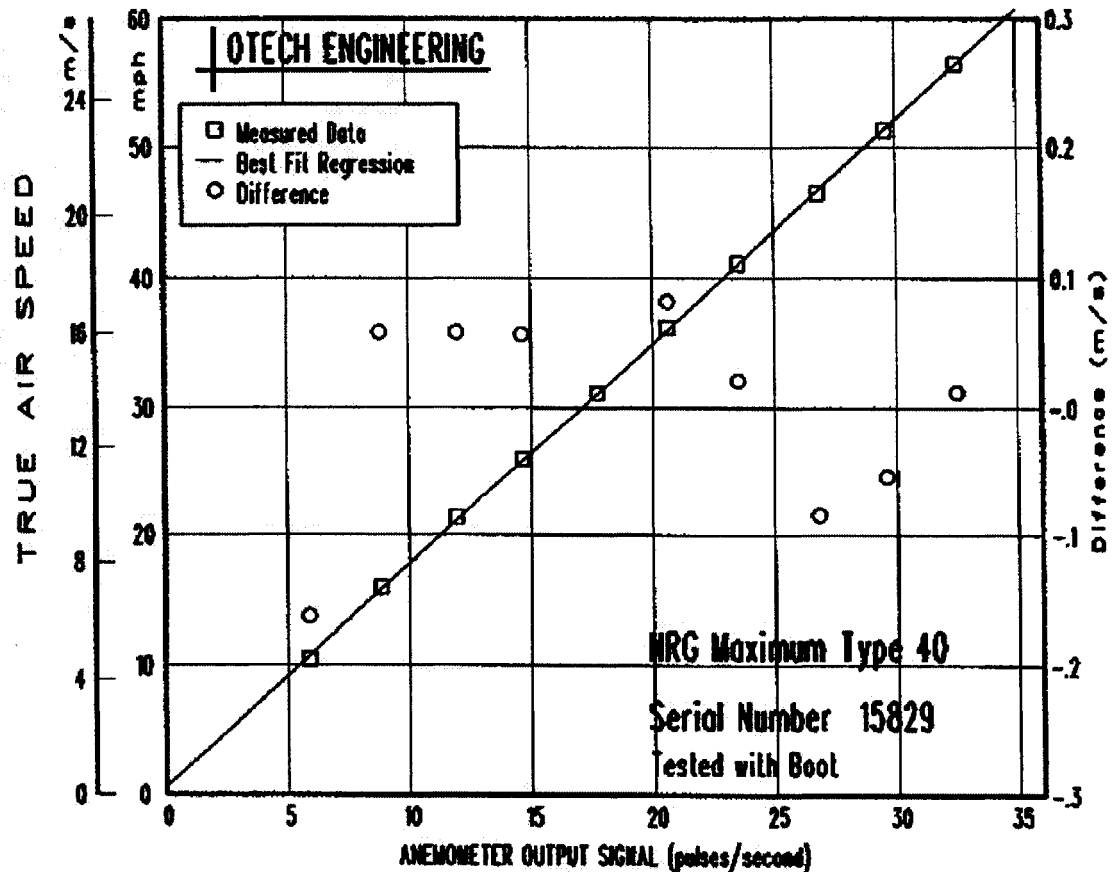


Figure 39 Graphique de calibration d'un anémomètre (Origine : rapport de calibration de l'anémomètre)

anémomètre. Les rapports de calibration donnent une valeur pour cette incertitude, mais dans le but d'en vérifier l'exactitude, une analyse plus détaillée des rapports de calibration est présentée ci-dessous.

Pour déterminer l'incertitude standard associée à la lecture de vitesse d'un anémomètre, la méthodologie présentée à la section 6.4.1 ne peut être appliquée car il s'agissait là d'une forme de régression qui prenait en compte l'incertitude sur la variable dépendante. Or, lors de la calibration des anémomètres, il est supposé que l'incertitude sur la vitesse du vent est nulle et ce type de régression ne s'applique pas. L'approche proposée par Montgomery [57] est plutôt utilisée.

L'idée de départ est d'obtenir une relation de la forme :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad (6.17)$$

Il s'agit d'un modèle de régression d'échantillonnage, écrit en fonction des n paires de données reliant le nombre d'impulsions $N_{I,i}$ aux vitesses V_i . Le critère des moindres carrés est alors :

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (6.18)$$

Les évaluations par moindres carrés (*least-squares estimators*) de β_0 et β_1 , que l'on notera $\hat{\beta}_0$ et $\hat{\beta}_1$, doivent alors satisfaire :

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_0} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) = 0 \quad (6.19)$$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_1} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) x_i = 0 \quad (6.20)$$

Dans le cas présent, $x_i = N_{I,i}$, soit le nombre d'impulsions enregistrées par l'anémomètre, et $y_i = V_i$, soit la vitesse du vent associée. Pour arriver à déterminer les paramètres $\hat{\beta}_0$ et $\hat{\beta}_1$, il faut d'abord calculer les sommes suivantes :

$$S_{II} = \sum_{i=1}^n (N_{I,i} - \overline{N_I})^2 \quad (6.21)$$

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^n V_i (N_{I,i} - \overline{N_I})$$

Le paramètre $\hat{\beta}_1$ est alors donné par

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{IV}}{S_{II}} \quad (6.22)$$

ce qui permet de calculer :

$$\hat{\beta}_0 = \overline{V} - \hat{\beta}_1 \cdot \overline{N_I} \quad (6.23)$$

où \overline{V} est la moyenne des vitesses testées lors de la calibration. Une fois ce travail effectué, on obtient la relation souhaitée : $V = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 N_I$ et les paramètres $\hat{\beta}_0$ et $\hat{\beta}_1$ trouvés sont identiques à ceux données sur le rapport de calibration. Il est donc clair que cette méthode, ou une méthode équivalente, a été utilisée pour réaliser les calibrations. Cependant, en ce qui concerne l'incertitude standard associée, une divergence apparaît.

Pour une régression linéaire à deux paramètres, Montgomery [57] indique que l'incertitude standard associée à une valeur prédite V_i est définie comme suit⁴ :

$$u_a(V_i) = \sqrt{MS_{res} \left(\frac{1}{n} + \frac{(N_{I,i} - \bar{N}_I)^2}{S_{II}} \right)} \quad (6.24)$$

où $u_a(V_i)$ est l'incertitude standard due à la calibration de l'anémomètre associée à la vitesse V_i ,

$$MS_{res} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-2} \quad (6.25)$$

avec n le nombre d'échantillons de mesure utilisés pour réaliser la régression linéaire et e_i le résidu associé à chaque point utilisé pour la régression, $e_i = V_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot N_{I,i})$. Il est à noter que l'incertitude $u_a(V_i)$ dépend de la vitesse. Plus la valeur considérée s'approche de \bar{V} , plus l'incertitude est faible. Dans le cas particulier du graphe présenté à la figure 39, les incertitudes standards obtenues sont présentées au tableau VII.

Tableau VII

Exemple d'incertitude standard associée à la lecture de l'anémomètre

Vitesse du vent [m/s]	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
Incertainitude standard associée $u_a(V)$ [m/s]	0.057	0.049	0.043	0.042	0.046

Dans le cas de l'anémomètre 15829 dont le graphe est présenté à la figure 39, l'incertitude standard proposée dans le rapport de calibration est de $0.083m/s$. On remarque immédiatement que cette valeur est supérieure aux valeurs indiquées dans le tableau VII. Cela est dû au fait que l'incertitude standard proposée est probablement une moyenne faite sur l'ensemble de la plage de vitesse de l'anémomètre. Ainsi, si l'on utilise la méthode expliquée ci-dessus pour trouver l'incertitude standard associée à 30 impulsions par seconde (soit une vitesse de vent de $23.3m/s$), on obtient une incertitude standard de $0.11m/s$.

⁴Il est important de mentionner que cette valeur V_i doit se situer dans l'intervalle des valeurs utilisées pour réaliser la régression.

Comme la figure 39 est représentative des autres rapports de calibration et comme les lectures faites par les anémomètres dans le cadre de ce travail portent sur une plage variant de 4 à 16m/s seulement, une valeur fixe de 0.05m/s sera employée pour quantifier l'incertitude standard associée à la lecture de l'anémomètre, $u_a(V)$.

– Système d'acquisition de données (SAD)

Le SAD utilisé est un Go-Logger, développé par la compagnie québécoise Ohméga. L'anémomètre transmet au Go-logger un signal de fréquence variable, proportionnelle à la vitesse du vent. La période d'échantillonnage du SAD est de deux secondes : il compte les impulsions à une fréquence de 0.5Hz. Par exemple, un signal de 21.4Hz représentera un total de 42.8 impulsions pour le SAD (en deux secondes). Le Go-Logger lit des cycles complets, donc 42.8Hz deviendra 43 cycles (42.4 sera arrondi à 42), ce qui ramène le résultat à $43/2 = 21.5Hz$. L'erreur maximale est donc de $\pm 0,25Hz$ pour une résolution de $0.5Hz$ ⁵. La période d'échantillonnage fixe la fréquence de Nyquist. Dans ce cas-ci, cette fréquence est de 0.5Hz et représente la plus petite variation détectable. Il serait possible d'augmenter la période à 4 secondes ou 10 secondes, donnant respectivement 0.25Hz et 0.1Hz de résolution, mais avec un nombre d'échantillons réduit par tranche de sauvegarde. Il ne s'agit pas d'une erreur induite mais bien d'une précision de mesure qui résulte d'un compromis entre la résolution, la précision, la capacité de détection de phénomènes rapides (bourrasques) et la taille de l'échantillon statistique. L'erreur maximale de lecture est de 0.25Hz et l'incertitude maximale associée est alors de 0.19m/s (les anémomètres utilisés ont un facteur de conversion de 0.765m/s/Hz).

Pour arriver à déterminer l'incertitude standard associée à ce type d'erreur, il est nécessaire d'avoir une idée de la distribution de la variable concernée, soit ici le nombre d'impulsions N lut pas le SAD, que l'on peut immédiatement transformer en vitesse du vent V . Or, à priori, la distribution la plus probable est que N soit décrite par une distribution rectangulaire uniforme, de borne inférieure $a_- = -0.5Hz$ et de borne supérieure $a_+ = +0.5Hz$. Le meilleur estimée de N est alors la valeur enregistrée μ_N et l'incertitude standard associée est $u(\mu_N) = a/\sqrt{3} = (0.5/\sqrt{3}) = 0.2887$, que l'on peut convertir en incertitude standard due au logger : $u_l(V) =$

⁵Le logger est bien plus précis que le décompte du nombre d'impulsions, l'erreur provient donc uniquement du fait qu'un nombre fini d'impulsions est comptabilisé.

$1/2 \cdot u(\mu_N) \cdot 0.765m/s/Hz = 0.11m/s$. Le facteur $1/2$ dans la dernière équation vient du fait que le SAD a une fréquence d'échantillonnage de $0.5Hz$.

La figure 40 présente une lecture par le SAD de 43 impulsions dans un délai de deux secondes.

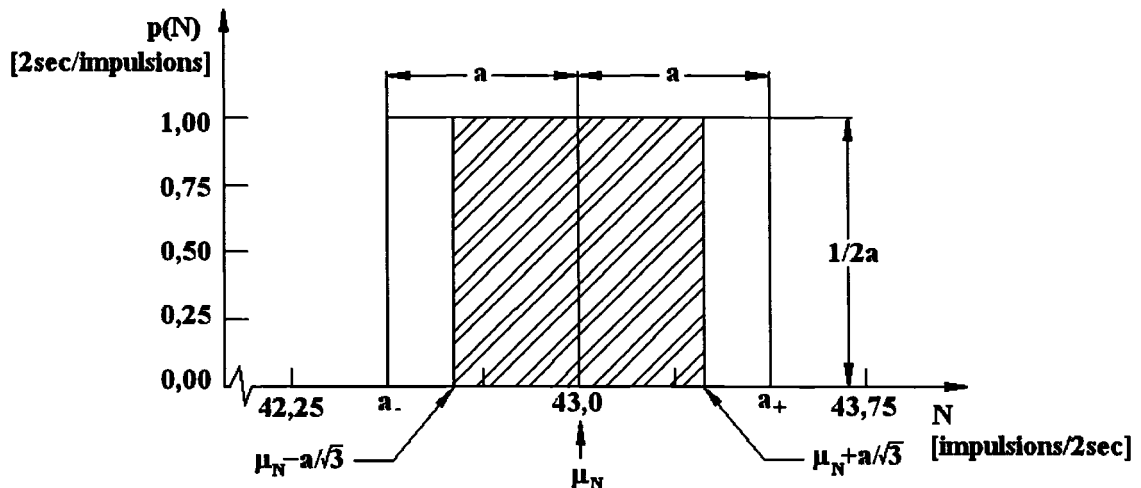


Figure 40 Distribution uniforme du nombre d'impulsions lues par le SAD

– Interférences dues au montage des anémomètres

Comme les anémomètres sont installés sur des bras à une distance supérieure de 7 diamètres de la tour et à une hauteur supérieure de 15 diamètres du bras de montage, la norme IEC61400-121 [4] est respectée. De plus, les instruments sont installés à des distances suffisamment grandes les uns des autres, ce qui assure qu'ils n'interfèrent pas entre eux. Dans de telles conditions, la norme IEC61400-121 indique que l'incertitude observée est inférieure à 0.5% de la vitesse. On supposera donc que l'incertitude standard due au montage des instruments est $u_m(V) = 0.4\% \cdot V$.

– Caractéristiques opérationnelles de l'anémomètre

Les anémomètres ont tendance à mesurer des vitesses de vent trop élevées, selon le niveau d'intensité de turbulence (Hunter [58]). Une loi semi-empirique a été développée pour déterminer cette erreur :

$$u_I(V) = V \cdot E = V \cdot I^2 \cdot (1.8d - 1.4)$$

où $u_I(V)$ représente l'incertitude sur la vitesse V associée à un niveau d'intensité de turbulence I , E représente le pourcentage d'erreur associé à la survitesse et d représente la constante de distance⁶ de l'anémomètre. Dans le cas présent, le niveau de turbulence est évalué par l'écart-type associé aux moyennes de vent réalisées sur 10 minutes : $I = \frac{\sigma_V}{V}$. La constante de distance des anémomètres utilisés est de $3m$. L'intensité de turbulence moyenne observée sur le site de Rivière au Renard est de l'ordre de 15%. Aussi, plus de 85% des valeurs de vent mesurées présentent une intensité de turbulence inférieure à 20% et cette borne sera donc utilisée pour quantifier l'erreur qui sera attribuée aux caractéristiques opérationnelles de l'anémomètre. L'erreur associée à la survitesse est donc de $E = 0.16$. Cela représente une erreur de $u_I(V) = 0.016m/s$ pour une vitesse de vent de $10m/s$.

- Enfin, la température peut également influencer la lecture d'un anémomètre. Cependant, il est évident que les deux anémomètres utilisés pour établir la régression linéaire sont à la même température à un instant donné et donc l'erreur associée à la température est entièrement corrélée et sera négligée, $u_t(V) = 0$.

6.4.2.1 Incertitude standard combinée de type B

Lors du calcul de l'incertitude standard combinée de type B, $u_B(V_i)$, il faut considérer aussi bien les incertitudes à la tour référence que celles à la tour secondaire. On peut combiner les incertitudes standards de type B en utilisant l'équation proposée par la norme IEC61400-121 [4] :

$$u_B^2(V_i) = u_a^2(V_{ref,i}) + u_a^2(V_{pos,i}) + u_t^2(V_{ref,i}) + u_t^2(V_{pos,i}) + u_m^2(V_{ref,i}) + u_m^2(V_{pos,i}) + u_I^2(V_{ref,i}) + u_I^2(V_{pos,i}) + u_t^2(V_{ref,i}) + u_t^2(V_{pos,i}) \quad (6.26)$$

où $u_B(V_i)$ est l'incertitude standard combinée de type B pour la vitesse i .

⁶La constante de distance d'un anémomètre est la longueur de vent qui doit traverser l'anémomètre pour que celui-ci indique 63% de la valeur finale de la vitesse du vent.

6.4.3 Incertitude standard combinée

L'incertitude standard combinée est tout simplement donnée par :

$$u_c(V_i) = \sqrt{u_A^2(V_i) + u_B^2(V_i)} \quad (6.27)$$

Enfin, l'incertitude étendue $U_c(V_i)$ est l'incertitude standard combinée multipliée par un facteur de couverture k . Ce facteur permet de quantifier le niveau de confiance que la valeur de vitesse réelle se retrouve dans l'intervalle défini. Le tableau VIII présente ces niveaux de confiance.

Tableau VIII

Incertitudes étendues (Valeurs tirées de [55])

Niveau de confiance %	Facteur de couverture k
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576

Suivant la recommandation de Kessel [59], un facteur de couverture permettant d'avoir un niveau de confiance de 95% sera utilisé.

6.5 Exemple de calcul : le cas de l'orientation du vent 295°

Pour ce cas particulier, la figure 41 présente les données expérimentales recueillies ainsi que la régression linéaire établie, qui permet de définir la relation entre la vitesse du vent à l'anémomètre référence, soit l'anémomètre situé à une hauteur de 46m sur la tour 2, et l'anémomètre situé à 46m sur la tour 3.

Pour arriver à bien visualiser l'incertitude associée à la prédiction de la mesure du vent à la tour secondaire (ici la tour 3), le tableau IX présente toutes les valeurs d'incertitudes

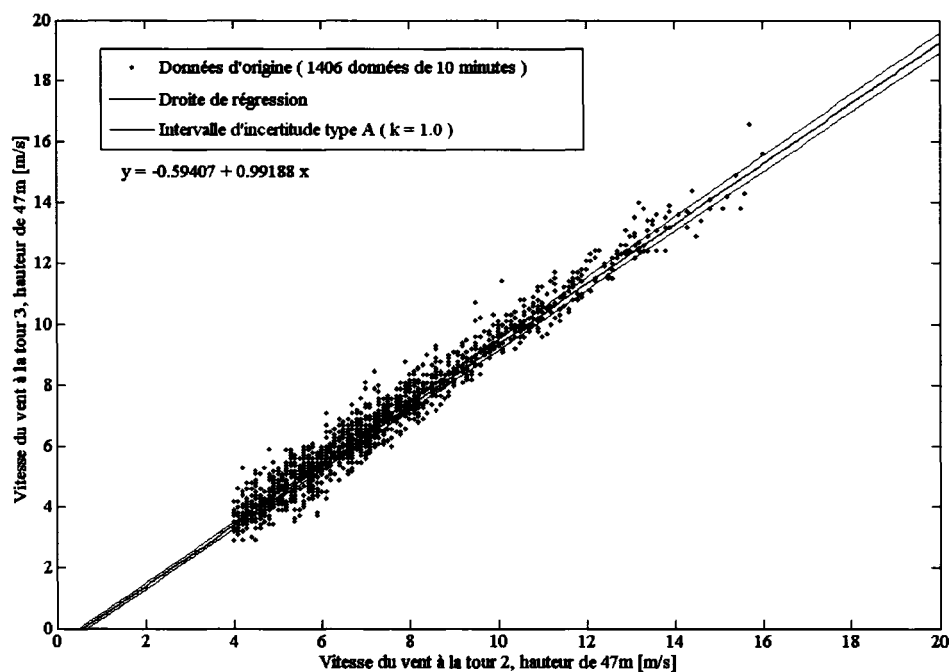


Figure 41 Régression linéaire reliant la vitesse de deux anémomètres

de type A et de type B et ce pour cinq vitesses de vent différentes⁷. Comme on peut le voir sur le graphe de la figure 41, il s'agit d'un secteur où un grand nombre de données sont disponibles : 1406 échantillons de vent de 10 minutes représentent tout de même plus de 230 heures de données, ce qui se compare avantageusement au minimum de 24 heures recommandé par la norme IEC61400-121 [4] pour une calibration de site. Malgré le grand nombre de données disponibles, le tableau IX montre clairement que les incertitudes sont loin d'être négligeables. Il est également intéressant de remarquer que les incertitudes de type A et de type B sont de même ordre. Pour arriver à diminuer réellement l'incertitude combinée, il serait donc nécessaire de s'attaquer aux deux types d'incertitude.

⁷L'incertitude combinée de type B provient des incertitudes aux deux tours de mesure. Comme celles-ci sont identiques à chaque tour, le tableau IX ne présente les valeurs qu'une fois.

Tableau IX
Incertitudes pour chacun des paramètres

Vitesse du vent [m/s]	Incertitude Type A $u_A(V_i)$	Incertitudes Type B					Incertitudes étendues	
		Calibration	SAD	Montage	Turbulence	Combinées	$U_c(V_i)$	
		$u_a(V_i)$	$u_l(V_i)$	$u_m(V_i)$	$u_l(V_i)$	$u_B(V_i)$	[m/s]	% de la vitesse
5.0	0.123	0.05	0.11	0.02	0.008	0.174	0.418	8.36
7.5	0.151	0.05	0.11	0.03	0.012	0.177	0.456	6.08
10.0	0.182	0.05	0.11	0.04	0.016	0.181	0.503	5.03
12.5	0.216	0.05	0.11	0.05	0.020	0.187	0.560	4.48
15.0	0.251	0.05	0.11	0.06	0.024	0.194	0.622	4.15

CHAPITRE 7

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La méthode développée et présentée dans les chapitres précédents a permis d'effectuer plusieurs simulations de vent sur le site de Rivière au Renard. Le présent chapitre s'attarde à discuter les résultats obtenus. Dans un premier temps, la validation du modèle proposé est présentée. La méthodologie développée a été utilisée pour réaliser la simulation d'un écoulement sur terrain plat avec rugosité élevée. Les résultats obtenus sont validés en comparaison avec la théorie de Monin-Obukhov. Dans un deuxième temps, trois directions de vent ont été étudiées en détail sur le site de Rivière au Renard. Ces simulations sont présentées à la section 7.2. Une comparaison de la méthode développée et du logiciel commercial WASP a également été effectuée et est discutée à la section 7.3. Enfin, une calibration virtuelle du site de Rivière au Renard, pour deux directions de vent, est présentée à la section 7.4.

7.1 Validation du modèle proposé sur terrain plat

Avant de s'attaquer à une simulation en terrain complexe, une simulation en terrain plat a été effectuée pour s'assurer que la méthode développée parvienne à prendre en compte une rugosité élevée. Pour ce faire, un domaine rectangulaire de $2000m$ de long, $200m$ de large et $800m$ de haut a été défini, avec une longueur de rugosité $z_0 = 2.5m$. Une vitesse de $15m/s$ au sommet du domaine a été définie, ce qui donne $u_{*s} = 1.092m/s$ et donc une vitesse de $7.8m/s$ à une hauteur de $50m$. Ceci est représentatif des vents observés à Rivière au Renard.

Des volumes de contrôle de $20m$ par $20m$ ont été utilisés, avec un total de 77 volumes de contrôle établis en hauteur, répartis à l'aide d'un facteur d'expansion géométrique, ce qui résulte en un premier volume de contrôle de $0.55m$ de haut près du sol et de près de $50m$ au sommet. Dans un premier temps, l'écoulement sur l'entrée du domaine a été simulé en suivant la méthode présentée à la section 5.2.2. Puis l'écoulement sur l'un des deux côtés a également été simulé. Il n'est pas nécessaire de présenter ici les résultats pour la simulation tridimensionnelle de cet écoulement puisque la composante transversale

de la vitesse demeure toujours nulle pour un écoulement en terrain plat. La simulation bidimensionnelle du côté est donc suffisante pour cette validation.

7.1.1 Écoulement perpendiculaire au plan : entrée du domaine

La figure 42 présente le maillage utilisé pour résoudre l'écoulement sur l'entrée du domaine. On peut voir qu'un très grand nombre de volumes de contrôle se concentrent près du sol. Pour la solution de l'écoulement sur le plan d'entrée, la distribution verticale des volumes de contrôle a été raffinée pour que chacun d'eux soit plus mince. Ainsi, plutôt que d'avoir 77 volumes de contrôle distribués verticalement, le maillage élaboré en contient 217. Beaucoup plus dense verticalement, ce maillage a été utilisé car la méthode pour solutionner l'écoulement perpendiculaire au plan nécessite l'ajout de termes sources dans les équations de transport de κ et de ϵ (voir section 5.2.2.1). Or, ceux-ci dépendent des gradients verticaux de vitesse $\frac{\partial u}{\partial z}$ et la solution obtenue est plus précise lorsque plus de volumes de contrôle sont déployés verticalement.

Autre fait important à remarquer sur la figure 42, la largeur du domaine modélisée est très faible. Comme le sol est plat, l'écoulement est purement unidimensionnel à une composante de vitesse, les composantes transversales et verticales de la vitesse étant nulles.

L'écoulement sur ce domaine rectangulaire a été simulé à l'aide des paramètres présentés ci-dessus et la solution obtenue est présentée sur la figure 43. Pour solutionner cet écoulement, la seule condition imposée est la vitesse référence de $15m/s$ au sommet. Or, il apparaît clairement que la méthode proposée permet de retrouver les profils théoriques de Monin-Obukhov. Une légère erreur est perceptible au niveau de la distribution verticale de l'énergie cinétique turbulente : une valeur constante devrait être obtenue sur l'ensemble du domaine. Toutefois, une valeur inférieure est prédite au sol par la méthode de simulation. Une erreur maximale de 7,6% est observée en ce qui concerne κ . De plus, pour la dissipation d'énergie cinétique turbulente, la valeur dans la première cellule près du sol devrait être légèrement supérieure à la valeur trouvée (erreur de 8.5%, qui devient quasi-nulle à plus de un mètre au-dessus de z_0). Ces différences sont mineures car elles affectent très peu le champ de vitesse. Ces écarts sont dus à l'incapacité du modèle à obtenir exactement la bonne valeur de vitesse dans la première cellule au-dessus du sol. Comme cette valeur,

légèrement trop faible, est ensuite utilisée pour déterminer u_{*l} à l'aide de l'équation 5.2.1, une valeur trop faible est également obtenue pour u_{*l} . Cette erreur se répercute fortement sur la distribution de κ et ϵ près du sol car ceux-ci dépendent de u_{*l}^2 et u_{*l}^3 respectivement.

Malgré une légère lacune au niveau des profils de turbulence, la figure 43 démontre bien la capacité de la méthode à simuler l'écoulement du vent sur l'entrée du domaine.

7.1.2 Écoulement dans le plan : frontière latérale du domaine

Pour bien démontrer la validité de l'ensemble de la méthode, l'écoulement a également été simulé sur l'une des frontières latérales du domaine. Dans un premier temps, cette simulation a été réalisée en imposant sur l'arête d'entrée les profils provenant directement

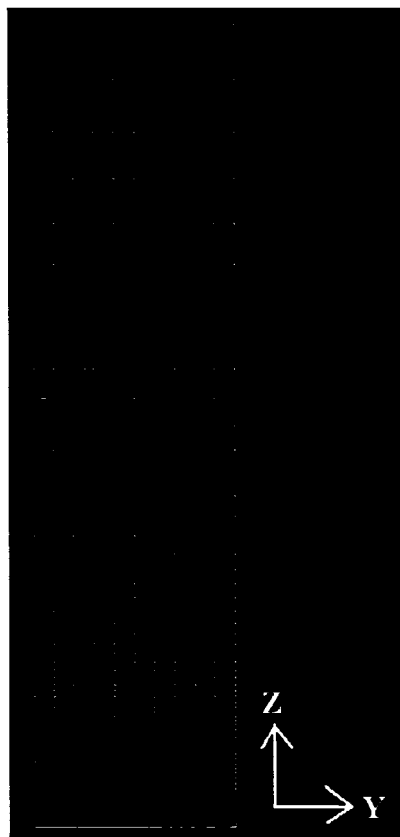


Figure 42 Maillage bidimensionnel employé pour solutionner l'écoulement sur l'entrée du domaine (200m de largeur et 800m de hauteur)

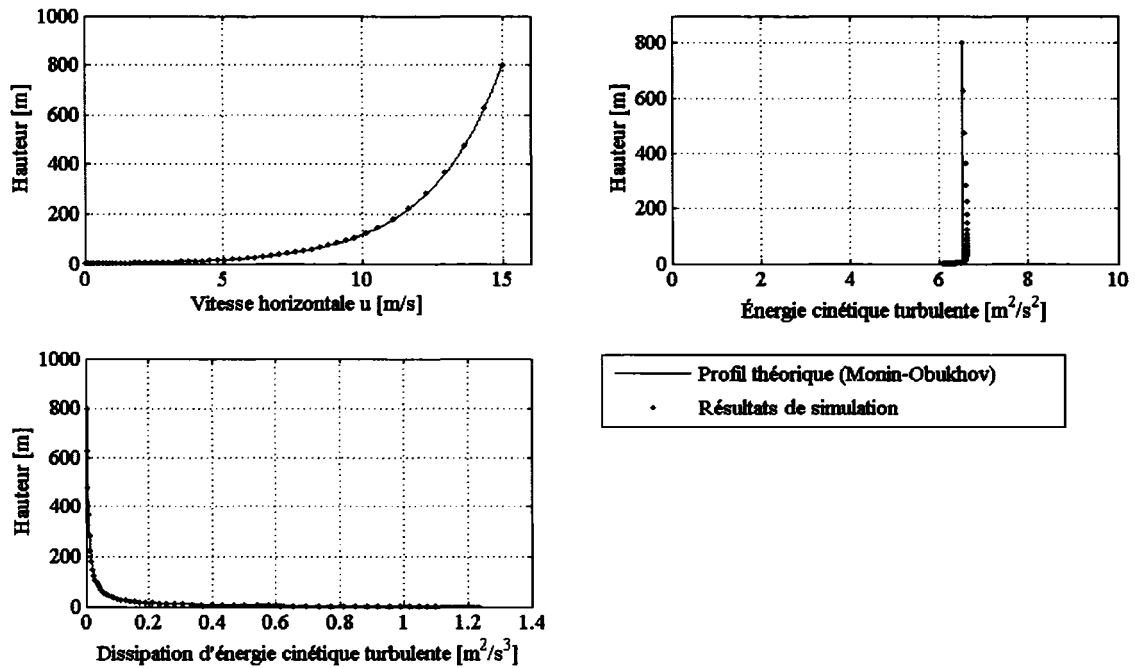


Figure 43 Comparaison : profils théoriques et de simulation pour l'écoulement à l'entrée du domaine

de la simulation de l'entrée, présentée à la section 7.1.1. Ces profils contenaient de légères erreurs au niveau des distributions de κ et ϵ et il est donc possible que celles-ci se répercutent sur la simulation. La figure 44 présente les résultats obtenus pour cette simulation. Le maillage employé était long de $2000m$ et haut de $800m$. Sur toutes les figures présentées ci-après, le vent va toujours de gauche à droite.

Sur cette figure, cinq profils sont présentés : le profil théorique de Monin-Obukhov et quatre profils tirés de la simulation, soit les profils observés à différentes distances de l'entrée. Malgré le profil imparfait imposé comme condition d'entrée, la méthode parvient très bien à maintenir le profil de Monin-Obukhov sur tout le domaine. Sur le plan de la distribution de la vitesse horizontale, le profil théorique est très bien reproduit par la simulation. Une légère vitesse verticale est observée, mais il s'agit d'une très faible erreur ; en adimensionalisant celle-ci par rapport à la vitesse totale, l'erreur maximale est de moins de 0.2%. En ce qui concerne l'énergie cinétique turbulente, cette simulation donne un résultat encore meilleur qu'à l'entrée : une erreur maximale de 2.2% est observée, ce qui est très raisonnable. Enfin, du côté de la dissipation d'énergie cinétique turbulente, le

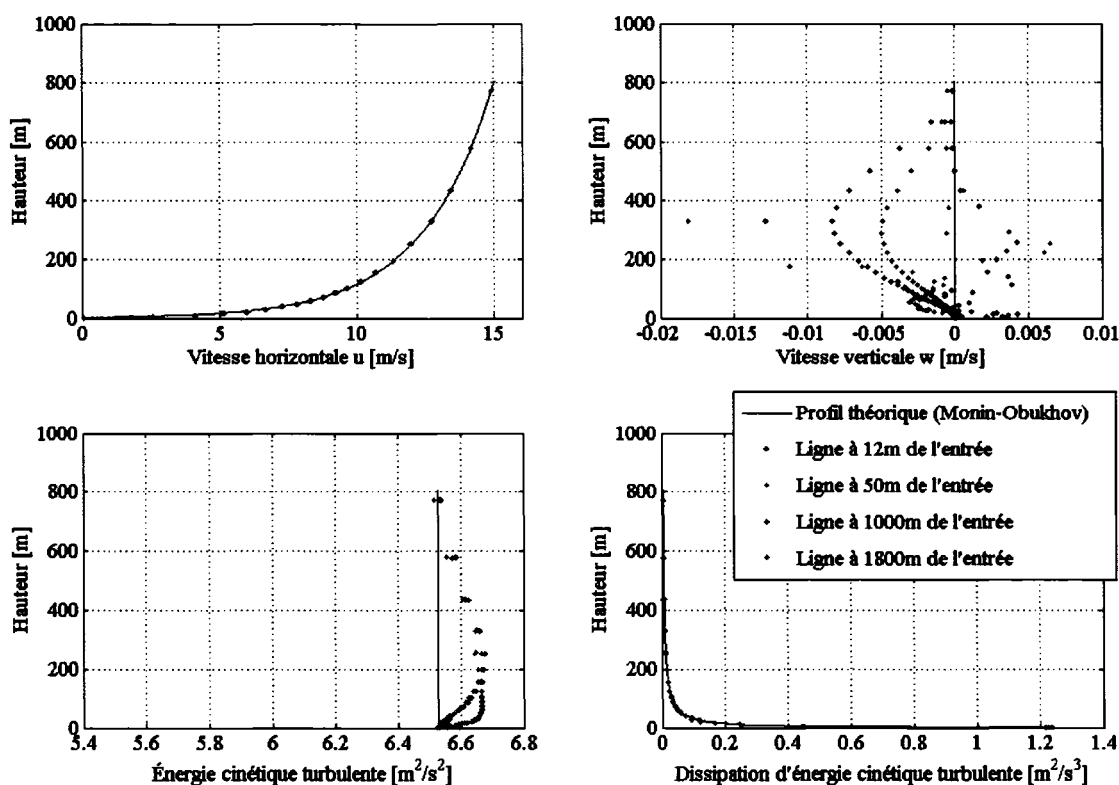


Figure 44 Comparaison : profils théoriques et de simulation pour l'écoulement de l'un des côtés du domaine

profil théorique semble parfaitement bien reproduit, particulièrement au niveau du sol où la valeur théorique attendue est obtenue sur l'ensemble du domaine.

Bien que les erreurs observées soient tout à fait acceptables, il est tentant d'essayer de les minimiser, dans l'espoir d'obtenir une méthode qui soit la plus précise possible. Pour avoir une meilleure idée de l'écoulement, la figure 45 présente les contours de vitesse verticale et ceux de l'énergie cinétique turbulente obtenue¹. Il est possible d'observer deux éléments importants sur cette figure. D'abord, on remarque immédiatement les régions de vitesse verticale créées près de l'entrée du domaine, lesquelles sont ensuite dissipées. Comme ces régions sont très près de l'entrée, il est fort probable que la condition frontière imposée soit en partie à l'origine de ce phénomène.

¹Les contours présentés sont obtenus à partir de valeurs interpolées, ce qui implique qu'il est possible d'obtenir des valeurs extrêmes aux parois. Ce fait explique que les valeurs extrêmes sur ces figures sont différentes des données mentionnées dans le texte



Figure 45 Contours obtenus pour la simulation d'un côté du domaine, terrain plat avec entrée provenant de simulation a) Composante verticale de la vitesse v b) Énergie cinétique turbulente κ

Le deuxième élément d'importance est la présence d'une faible valeur de turbulence au coin inférieur gauche du domaine. La figure 46 permet de voir celle-ci en gros plan. Présenter les résultats avec des valeurs calculées ou interpolées fait manifestement une différence. Dans un cas comme dans l'autre, toutefois, il est clair qu'un léger problème survient près du coin inférieur de l'entrée, car l'énergie cinétique turbulente connaît une légère chute à cet endroit.

Il est important de relativiser les deux erreurs observées : il ne s'agit, dans chaque cas, que d'un léger pourcentage d'erreur, dans des endroits très localisés. Cependant, les erreurs pourraient être causées par l'imprécision de la condition d'entrée. Pour vérifier ce fait, une simulation a été réalisée en imposant un profil de Monin-Obukhov parfait sur l'arête d'entrée. Une UDF a été élaborée à cette fin. Celle-ci agit sur chacun des segments de l'arête d'entrée, en détermine la hauteur du centroïde et, à partir du paramètre u_{*s} de l'écoulement, définit les paramètres de vitesse et de turbulence à appliquer à l'aide

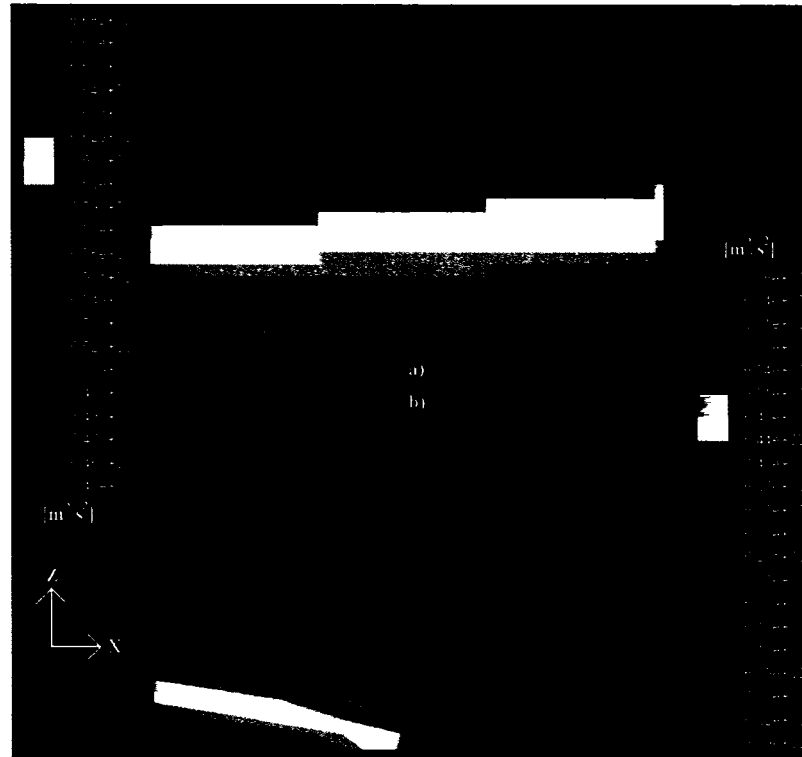


Figure 46 Zoom sur la faible valeur de κ à la base de l'entrée du domaine a) Valeurs calculées (aux centroïdes) b) Valeurs interpolées (aux noeuds)

des équations de Monin-Obukhov. Le profil exact de Monin-Obukhov est alors imposé sur l'arête d'entrée. Les résultats obtenus pour cette simulation sont présentés à la figure 47. Sur cette figure, le profil de vitesse horizontale de Monin-Obukhov est parfaitement reproduit par la méthode numérique. Par contre, le fait d'imposer le profil exact à l'entrée ne semble pas éliminer les lacunes observées dans la solution précédente. L'erreur observée au niveau des profils de vitesse verticale est différente, mais l'erreur maximale est cependant du même ordre que précédemment, soit un peu moins de 0.2%. En ce qui concerne l'énergie cinétique turbulente κ , l'erreur est encore plus grande : près du sol, elle atteint 16.5%. Cette erreur se résorbe rapidement lorsque l'on s'éloigne du sol, et celle-ci ne semble pas affecter l'écoulement moyen. Enfin, en ce qui concerne la dissipation de l'énergie cinétique turbulente, la valeur trouvée au sol pour les positions près de l'entrée est légèrement erronée. Cela s'explique probablement par une très légère erreur au niveau de la vitesse dans la première cellule, ce qui affecte la valeur de u_{*l} et, par conséquent, affecte ϵ .

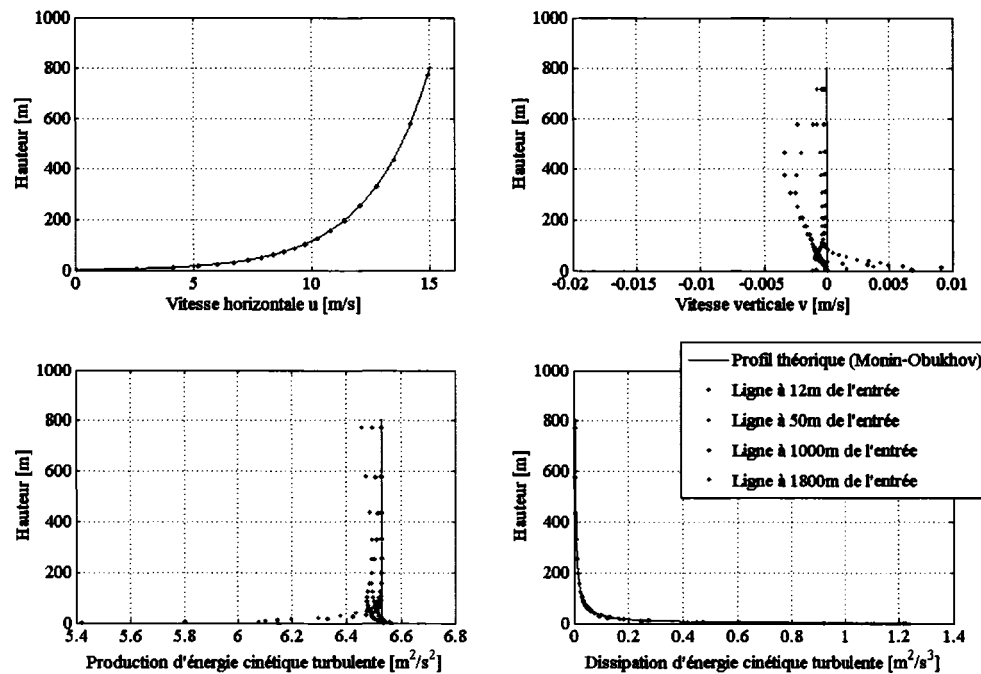


Figure 47 Profils de simulation pour l'écoulement de l'un des côtés du domaine, entrée idéale respectant exactement la théorie de Monin-Obukhov

Pour mieux visualiser la situation, la figure 48 présente pour ce cas précis les contours obtenus pour v et κ . Cette figure montre clairement que le problème vient du coin inférieur à l'entrée. Une région de vitesse verticale positive apparaît à cet endroit, accompagnée d'une bulle d'énergie cinétique turbulente inférieure à la valeur attendue. Il semble que le problème provienne de l'incompatibilité entre la frontière du sol et celle de l'entrée.

Il est important de souligner que la méthode parvient très bien à simuler un écoulement atmosphérique avec de grandes valeurs de z_0 imposées au sol, ce qui était l'un des objectifs à atteindre. Puisque les deux cas de simulation d'une frontière latérale présentés ci-haut donnent des résultats équivalents, où les erreurs observées sont minimales, il a été choisi de retenir la première approche, c'est-à-dire d'utiliser le profil déterminé par la simulation bidimensionnelle de l'entrée comme condition d'entrée sur le domaine latéral.

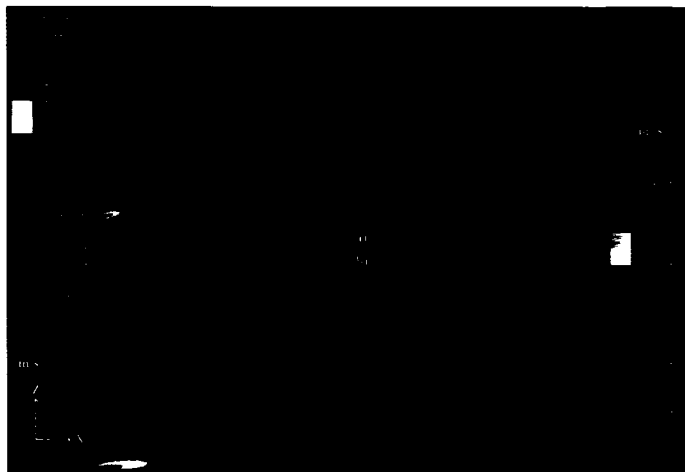


Figure 48 Contours obtenus par simulation d'un côté du domaine, terrain plat avec entrée Monin-Obukhov a) Composante verticale de la vitesse v b) Énergie cinétique turbulente κ

7.2 Comparaison des simulations numériques aux données expérimentales

Cette section présente une validation de la méthode proposée sur un terrain complexe. Cependant, cette vérification est beaucoup plus ardue à réaliser que sur un terrain plat : aucune solution analytique n'existe pour un terrain complexe. La seule manière d'arriver à valider la méthode est de réaliser des comparaisons avec des résultats expérimentaux.

Le terrain de Rivière au Renard a été choisi car il s'agit d'un terrain très complexe, autant par sa topographie montagneuse que par la présence d'un couvert forestier important. Des sources de données fiables sont nécessaires et les trois tours de $58m$ installées sur le site seront utilisées à cette fin, suivant la méthode présentée au chapitre 6. Trois directions de vent ont été étudiées.

Pour ce qui est de la méthode numérique, un grand domaine de $1600 \times 1600m$ a été construit pour chacune des orientations choisies, avec une hauteur de $800m$ au-dessus du plus haut point observé au sol. Les volumes de contrôle employés avaient une taille de $20 \times 20m$ dans le plan horizontal, avec une hauteur variant de un mètre près du sol à près de $50m$ près de la paroi supérieure, ce qui a résulté en un maillage ayant environ 725 000 volumes de contrôle. Pour tester la méthode d'enchâssement de domaine proposée, un petit domaine a également été construit pour chaque orientation. Celui-ci a été établi sur une surface de

500x500m pour une hauteur de 150m au-dessus du sol, avec des volumes de contrôle de 5x5m dans le plan horizontal, variant de 0,4m de hauteur près du sol à environ 10m près de la paroi supérieure. Ce petit domaine comporte au total environ 700 000 volumes de contrôle.

En raison de la présence des éoliennes installées sur le site, une attention particulière a été portée au choix des orientations de vent étudiées pour s'assurer que les mâts de mesure n'étaient pas dans le sillage de l'une des éoliennes. Les trois orientations retenues sont 5°, 15° et 255°. Selon les critères de la norme IEC61400-121 [4], ces trois orientations font en sorte que les tours 2 et 3 ne sont pas dans le sillage des éoliennes installées sur le site. En ce qui concerne la tour 1, celle-ci est à la limite des secteurs perturbés par le sillage des éoliennes pour les orientations 15° et 255°. Malgré ce fait qui pourrait introduire un léger écart, la tour 1 sera tout de même utilisée pour l'analyse des résultats.

Pour chacune des simulations, la vitesse du vent a été alignée sur l'orientation choisie. Au niveau expérimental, les données ont été classées par secteur de 10° centrées sur les directions retenues et toutes les mesures faisant partie de ce secteur ont été utilisées pour définir les valeurs moyennes expérimentales, à l'aide de la méthode décrite à la section 6.3.

Les profils de vent sont présentés sous la forme d'un facteur d'accélération \mathfrak{R} (*speed-up ratios*), lequel est défini de la façon suivante :

$$\mathfrak{R} = \frac{u(x, z) - u(x_{ref}, z_{ref})}{u(x_{ref}, z_{ref})} \quad (7.1)$$

où $u(x, z)$ correspond à la vitesse à une certaine position x à une hauteur z , dépendant d'une vitesse de référence $u(x_{ref}, z_{ref})$. Le choix de la vitesse de référence est arbitraire. Le choix s'est porté naturellement vers la hauteur 46m car il s'agit de la hauteur du moyeu des éoliennes installées sur ce site. Le facteur \mathfrak{R} est employé parce qu'il est très utilisé par l'industrie de l'énergie éolienne, en particulier par le logiciel WAsP.

7.2.1 Cas 1 : orientation du vent 5°

Le premier cas analysé concerne le profil de la vitesse du vent observé à chacune des trois tours de 58m, pour une orientation de vent de 5° (0° étant le nord géographique). Pour cette direction de vent, les données expérimentales permettent d'observer un très grand facteur d'accélération entre les tours 2 et 3. La figure 49 présente les profils numériques et expérimentaux obtenus sans l'aide de la méthode d'enchâssement de domaine, alors que la figure 50 présente ces mêmes profils avec la méthode d'enchâssement de domaine.

Les données expérimentales sont constituées de 820 échantillons de 10 minutes pour cette orientation de vent, ce qui représente près de 140 heures de données. L'anémomètre situé à une hauteur de 46m sur la tour 2 a été choisi comme anémomètre référence. Les autres valeurs expérimentales de vitesse ont été obtenues selon la méthode présentée à la section 6.3.2.

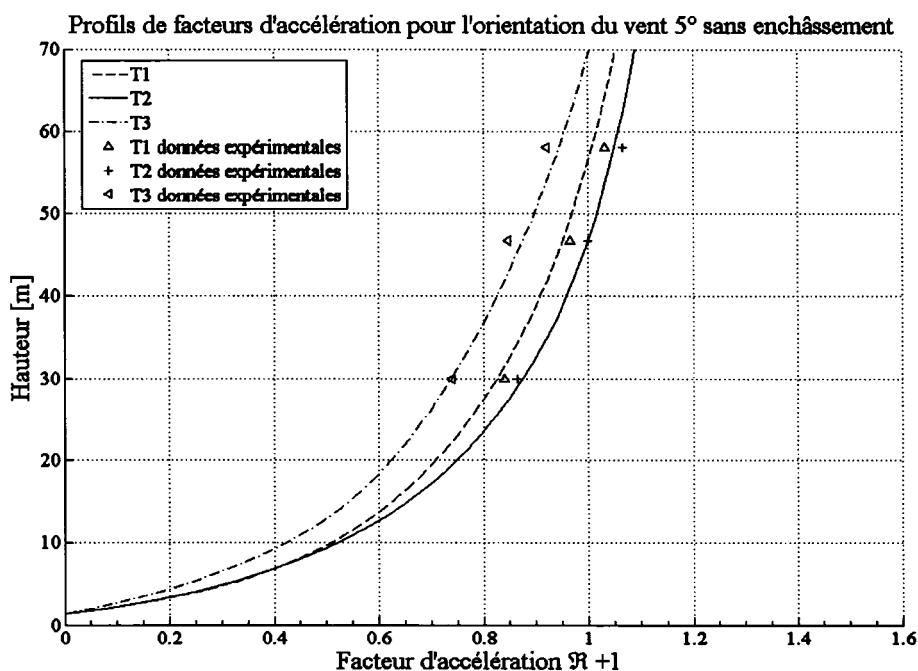


Figure 49 Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 5° sans la méthode d'enchâssement de domaine

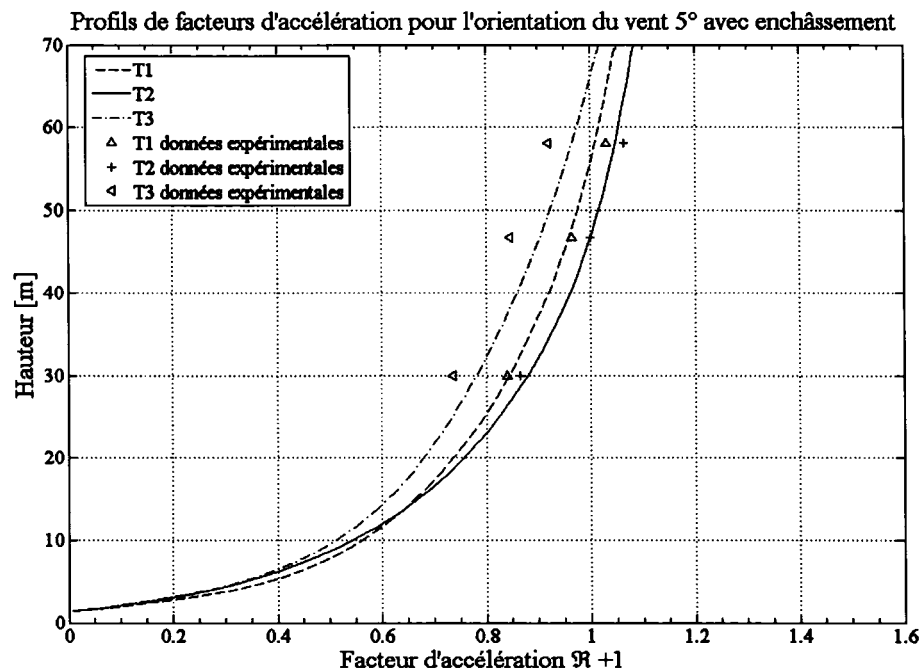


Figure 50 Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 5° avec la méthode d'enchâssement de domaine

Pour cette orientation de vent, les figures 49 et 50 présentent des résultats de simulation particulièrement précis. Les profils numériques de vent pour les tours 1 et 2 reproduisent presque à la perfection les données expérimentales. De plus, la méthode d'enchâssement de domaine semble apporter une légère précision supplémentaire. Par contre, pour la tour 3, les données expérimentales ne sont pas exactement reproduites par le profil numérique, bien que la simulation effectuée parvienne à prédire un ralentissement important du vent à la tour 3 par rapport à la tour 2. Pour la tour 3, la méthode d'enchâssement de domaine ne semble pas améliorer la précision de la simulation numérique. Bien que ces résultats ne soient pas parfaits, la grande similitude observée entre les données numériques et expérimentales prouve que la méthode numérique développée a un grand potentiel.

7.2.2 Cas 2 : orientation du vent 15°

Une étude similaire a été effectuée pour l'orientation de vent 15°, toujours en prenant l'anémomètre situé à 46m sur la tour 2 comme anémomètre référence. Les figures 51 et 52 présentent les résultats obtenus. Les données expérimentales, pour leur part, ont nécessité

un total de 422 échantillons de 10 minutes. Ces figures démontrent que les profils de vitesse prédits par la méthode numérique pour les tours 1 et 2 sont à nouveau très près des données expérimentales. Une légère différence est cependant observée à la tour 1 pour la hauteur de 58m. Par contre, la prédiction de la méthode numérique au niveau du profil de vitesse à la tour 3 n'est pas aussi bonne. En effet, bien que la méthode prédise que la vitesse du vent sera inférieure à la tour 3 par rapport à la tour 2, l'important facteur d'accélération observé expérimentalement entre ces deux tours n'est pas reproduit ; seul un léger ralentissement à la tour 3 est prédit.

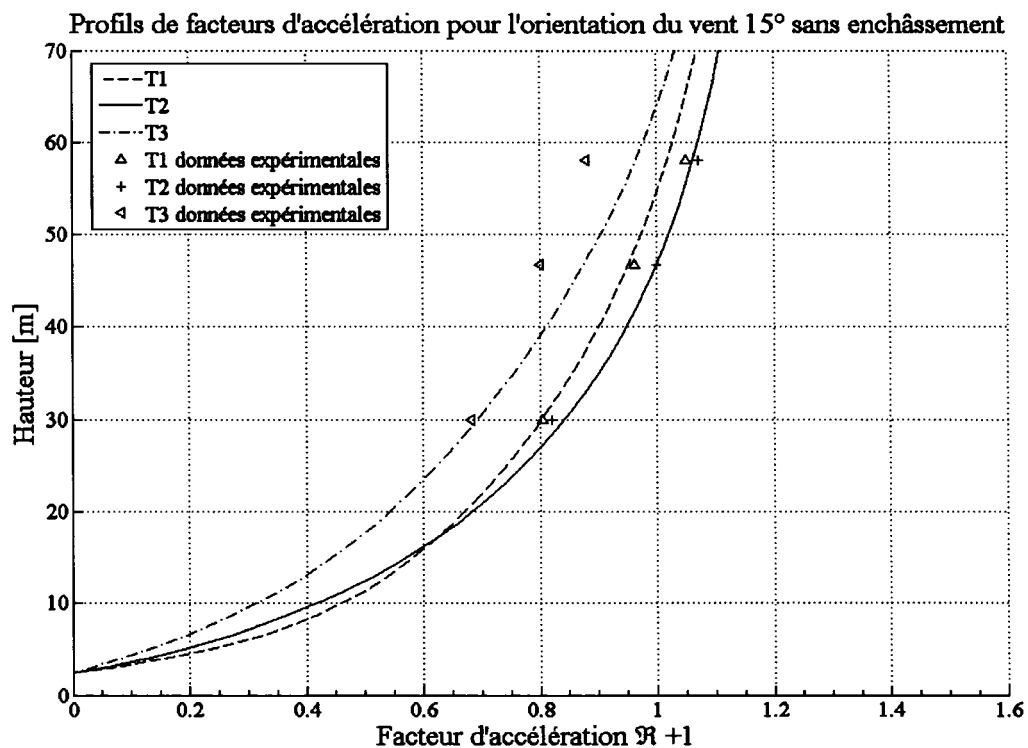


Figure 51 Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 15° sans la méthode d'enchâssement de domaine

L'explication pour cette faible précision des simulations tient au fait que la longueur de rugosité observée expérimentalement sur le site pour cette orientation de vent est très différente entre la tour 2 et la tour 3. Or, la méthode proposée n'utilise qu'une seule valeur pour la rugosité du sol, valeur qui est appliquée à l'ensemble du terrain étudié. Pour cette orientation de vent, si l'on traçait le profil logarithmique de vitesse à chacune des tours

à partir des données expérimentales, on obtiendrait une valeur de z_0 de $2.18m$ à la tour 2, alors qu'une valeur de z_0 de $3.89m$ serait obtenue à la tour 3². Comme la méthode développée applique la même longueur de rugosité sur l'ensemble du terrain, la variabilité de la rugosité n'a pu être bien prise en compte par la méthode.

Toujours pour l'orientation de vent 15° , notons également que l'utilisation de la méthode d'enchâssement de domaine ne semble pas apporter plus de précision aux résultats. En effet, les résultats obtenus avec ou sans la méthode d'enchâssement de domaine sont très similaires.

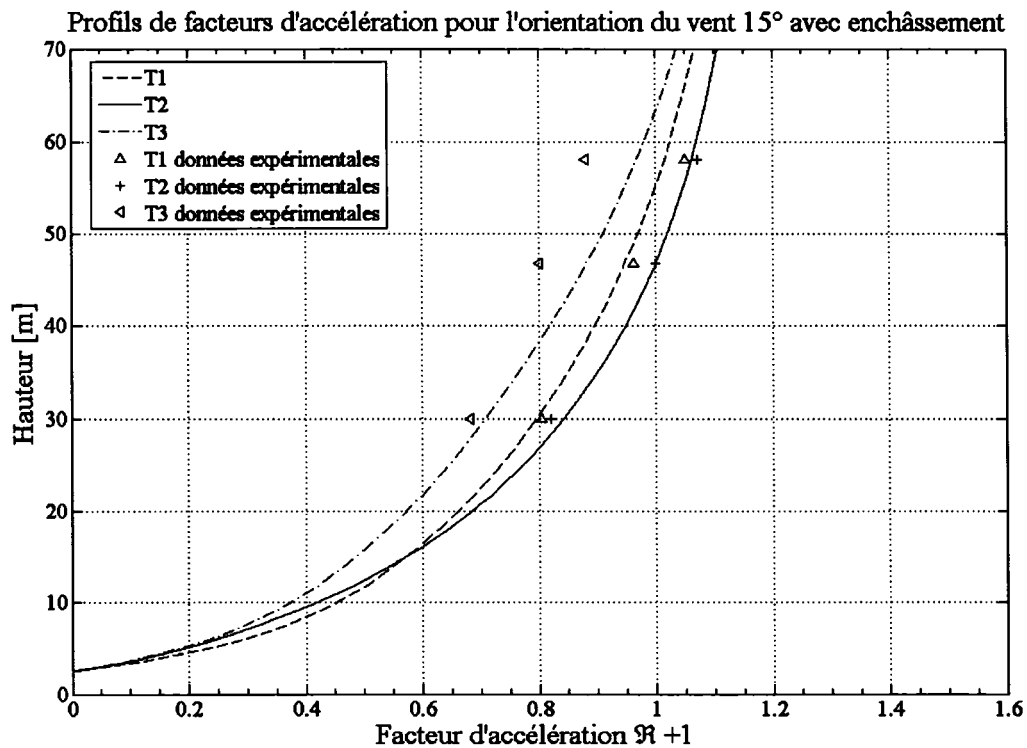


Figure 52 Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 15° avec la méthode d'enchâssement de domaine

²À noter que la valeur de z_0 à la tour 1 est très près de la valeur à la tour 2. De même, pour la direction de vent 5° , la valeur de z_0 observée à chacune des trois tours est très similaire.

7.2.3 Cas 3 : orientation du vent 255°

Une troisième orientation, soit 255°, a été étudiée de manière similaire. Les résultats obtenus sont présentés aux figures 53 et 54. Pour cette orientation de vent, il apparaît que la méthode numérique ne parvient pas à prédire correctement les différents profils de vent obtenus expérimentalement. Le profil expérimental de vent de la tour 2 est bien reproduit par la méthode, c'est-à-dire qu'en fixant la valeur de la vitesse de vent à la hauteur de 46m, on arrive à prédire les valeurs de vitesse de vent à 30m et à 58m pour cette même tour. Par contre, la méthode numérique prédit une accélération du vent à la tour 1 par rapport à la tour 2, alors qu'expérimentalement à peu près aucune différence n'est observée entre les deux profils de vent. De même, de la tour 2 à la tour 3, la simulation numérique prévoit seulement un léger ralentissement de la vitesse du vent alors qu'un ralentissement important est enregistré expérimentalement.

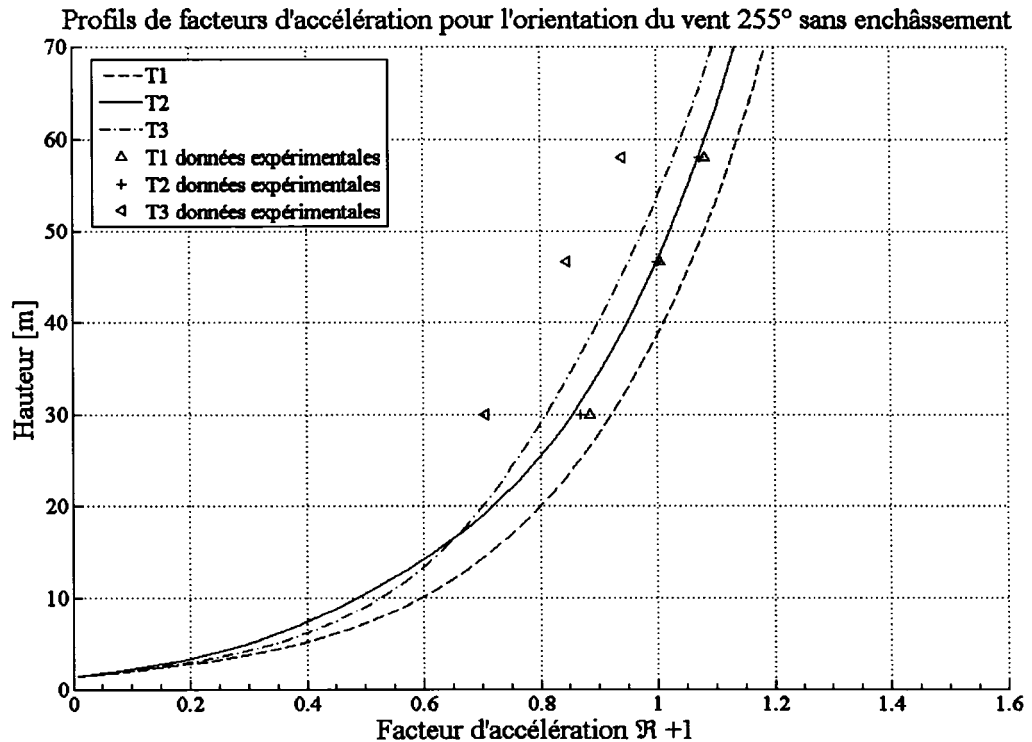


Figure 53 Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 255° sans la méthode d'enchâssement de domaine

Tout comme dans le cas de 15° , la variation de la rugosité observée expérimentalement est probablement la cause principale des disparités observées. En effet, la longueur de rugosité déduite expérimentalement à la tour 2 est de $1.49m$ et cette rugosité a été appliquée sur l'ensemble du terrain virtuel construit pour la simulation numérique. Or, à la tour 1, un z_0 expérimental de $1.14m$ est observé, alors que, pour la tour 3, la longueur de rugosité expérimentale est de $2.94m$. Cette variabilité dans la longueur de rugosité observée expérimentalement explique donc en grande partie l'incapacité du modèle développé à bien reproduire l'écoulement du vent. Bien sûr, l'étude d'autres directions de vent, et éventuellement d'autres sites, permettrait de confirmer cette hypothèse.

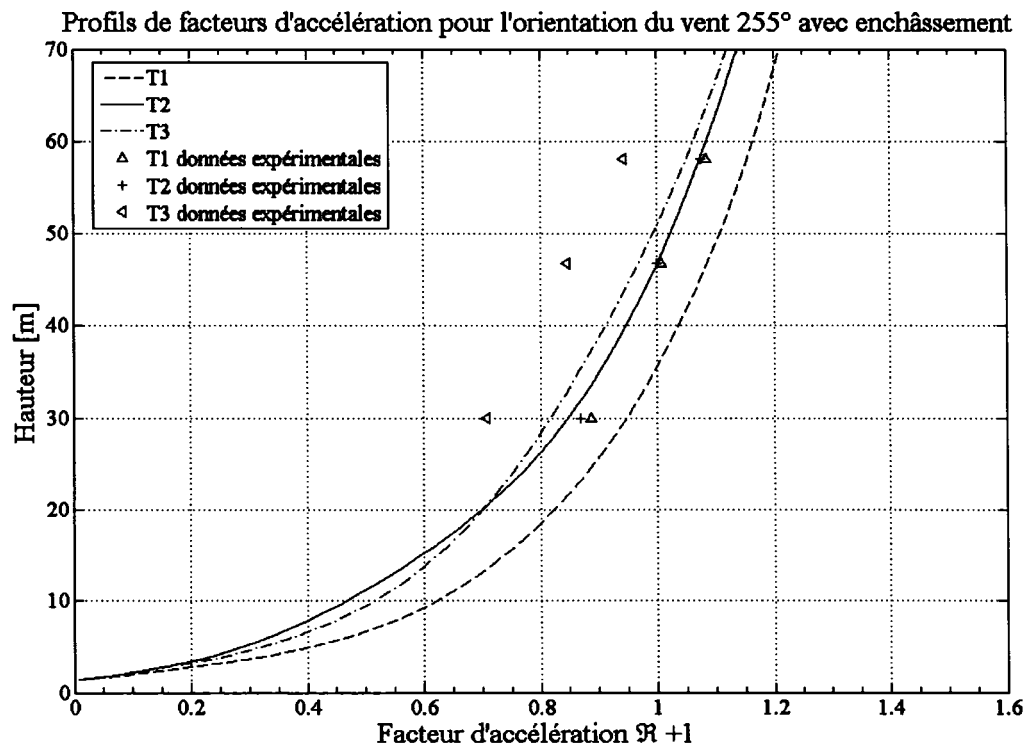


Figure 54 Données expérimentales et profils de vitesse numérique obtenus pour l'orientation 255° avec la méthode d'enchâssement de domaine

Tel qu'observé pour le cas de 15° , la méthode d'enchâssement de domaine ne semble pas améliorer les résultats. Bien que seulement trois directions de vent aient été étudiées, et ce pour un même site, il est probable que la dimension des volumes de contrôle utilisés dans le grand domaine est suffisante pour capter les détails de l'écoulement. Une amélioration

à l'efficacité de la méthode serait donc d'utiliser un maillage plus grossier pour le grand domaine, ce qui permettrait d'accélérer la convergence tout en permettant d'obtenir une solution précise lors de l'enchâssement de domaine.

7.3 Comparaison de la méthode CFD proposée au logiciel WAsP

Le logiciel WAsP a également été utilisé pour obtenir les facteurs d'accélération entre les différentes tours, dans le but de comparer la méthode proposée à ce logiciel grandement utilisé par l'industrie éolienne à travers le monde. Tel que présenté à la section 2.2.1, ce logiciel utilise une approche simplifiée qui permet de déterminer l'influence de la topographie et de la rugosité sur l'écoulement du vent. Le travail relatif au logiciel WAsP a été présenté dans le cadre d'un article de conférence [60]. Les simulations WAsP ont été réalisées en collaboration avec M. Christophe Sibuet-Watters de HéliMAX Énergie.

Pour s'assurer de reproduire l'écoulement du vent avec les mêmes paramètres que ceux utilisés pour la simulation CFD effectuée, un MNA, au format WAsP, a été préparé, avec des courbes de niveau générées tous les cinq mètres, ce qui donne exactement la même représentation de la surface. Tout comme la méthode proposée, WAsP nécessite la spécification d'une longueur de rugosité qui sera appliquée sur l'ensemble du terrain étudié. Cependant, WAsP n'accepte pas de longueur de rugosité de plus de un mètre, ce qui correspond à une rugosité inférieure à celle mesurée expérimentalement. Pour vérifier l'influence de ce paramètre sur les simulations de WAsP, deux valeurs de z_0 ont été utilisées, soient $0.2m$ et $1.0m$.

WAsP nécessite une vitesse référence. Pour vérifier si ce paramètre a une influence sur la solution de WAsP, trois vitesses références ont été imposées tour à tour : $5m/s$, $10m/s$ et $15m/s$. Effectivement, cette vitesse référence influence légèrement la solution, et les valeurs de facteur d'accélération présentées ci-dessous sont donc une moyenne entre les résultats obtenus avec ces trois vitesses références.

Dans le logiciel WAsP, le facteur d'accélération est toujours défini entre deux hauteurs identiques, c'est-à-dire que $z = z_{ref}$ dans l'équation 7.1. Les vitesses références sont prises à la tour 3 et le tableau X présente les résultats obtenus en regard des facteurs

d'accélération trouvés entre la tour 2 et la tour 3. Pour une hauteur donnée, les données expérimentales indiquent que la vitesse à la tour 2 est toujours plus grande qu'à la tour 3. Ce fait est également observable dans les résultats de WAsP, de même que dans ceux obtenus à l'aide de la méthode CFD proposée, qui se retrouvent également dans le tableau X.

Tableau X

Comparaison des facteurs d'accélération prédits par WAsP et par la méthode numérique développée (en pourcentage d'augmentation)

Orientation du vent 5°			
	30m	47m	58m
WAsP $z_0 = 0.2m$	7.97	6.51	5.74
WAsP $z_0 = 1.0m$	11.85	9.27	7.93
Fluent (sans enchâssement, $z_0 = 1.4m$)	18.67	14.00	11.03
Fluent (avec enchâssement, $z_0 = 1.4m$)	17.68	14.16	10.95
Données expérimentales	17.69	18.63	16.05
Orientation du vent 15°			
	30m	47m	58m
WAsP $z_0 = 0.2m$	9.86	7.95	6.94
WAsP $z_0 = 1.0m$	14.10	10.66	8.94
Fluent (sans enchâssement, $z_0 = 2.5m$)	21.56	14.12	10.18
Fluent (avec enchâssement, $z_0 = 2.5m$)	18.55	12.84	9.01
Données expérimentales	20.20	24.90	21.72
Orientation du vent 255°			
	30m	47m	58m
WAsP $z_0 = 0.2m$	7.64	6.47	5.84
WAsP $z_0 = 1.0m$	11.40	8.80	7.46
Fluent (sans enchâssement, $z_0 = 3.5m$)	4.73	6.69	5.96
Fluent (avec enchâssement, $z_0 = 3.5m$)	1.41	4.34	3.80
Données expérimentales	21.70	17.47	13.70

Tout comme le modèle CFD proposé, WAsP arrive à prédire une augmentation de la vitesse à la tour 2 par rapport à la tour 3. Cependant, les facteurs d'accélération déterminés par WAsP sont nettement inférieurs aux valeurs obtenues à l'aide de la méthode CFD de même qu'aux données expérimentales, particulièrement pour les directions de vent 5° et

15°. Bien qu'il était attendu que les résultats de WAsP ne soient pas parfaits, dû aux limitations présentées à la section 2.2.1.1 de même qu'au fait que WAsP ne puisse utiliser une longueur de rugosité supérieure à 1.0m, il est tout de même surprenant de voir que WAsP s'éloigne de la réalité sur de si courtes distances. Il faut se rappeler que la tour 2 et la tour 3 ne sont distantes que de 200m.

D'autres auteurs ont comparé des approches CFD au logiciel WAsP [8, 9]. Pour le moment, aucun accord relatif au meilleur outil disponible quant à la simulation du vent en terrain complexe n'a été atteint. Cependant, il est clair que l'utilisation directe de WAsP, sans correction, est inadéquate pour l'analyse de la couche limite atmosphérique sur un terrain complexe et l'industrie éolienne désirera donc éventuellement se tourner vers un nouvel outil. Par contre, les méthodes CFD nécessitent encore des améliorations avant d'être totalement fiables. C'est le cas pour la méthode CFD proposée, dont la lacune principale semble être reliée à la variation de rugosité au sol.

7.4 Calibration virtuelle du site de Rivière au Renard

Tel que mentionné précédemment, trois éoliennes sont installées sur le site de Rivière au Renard. Celles-ci sont en fonction depuis l'été 2004 et, pour pouvoir procéder au test de performance de ces éoliennes, une tour de mesure temporaire avait été érigée à la position exacte de l'éolienne 1 (voir figure 6). Cette tour temporaire a accumulé des données pendant un peu plus de quatre mois, ce qui, sans être idéal, demeure suffisant pour procéder à une calibration de site.

Pour faire suite aux objectifs énoncés au début de ce mémoire, une calibration virtuelle du site de Rivière au Renard a été réalisée à l'aide de la méthode développée. Les données provenant des deux tours de 46m installées sur le site ont été utilisées pour valider les valeurs numériques obtenues. Malgré les lacunes discutées ci-dessus (voir section 7.2.3), il semble que la méthode parvient relativement bien à prédire les phénomènes observés sur ce site très complexe.

Avant de présenter directement les résultats obtenus, il est important de discuter de la façon de faire une calibration de site. Malgré la présence de normes internationales, certaines controverses demeurent. La calibration de site fait partie de ces problématiques.

Depuis 1998, la norme IEC61400-12 [52] était la référence en matière de calibration de site, bien qu'une seule page de la norme traite de ce sujet. Cette norme indiquait clairement que l'objectif d'une calibration de site est de corrélérer la vitesse du vent à la position exacte de l'éolienne à la vitesse du vent en un second point de mesure et cette relation devait se faire par l'intermédiaire d'une régression linéaire, dont l'ordonnée à l'origine n'était pas nécessairement nulle. De plus, cette régression devait se faire en suivant les recommandations du *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [55]. Enfin, ce dernier mentionne qu'il est nécessaire d'employer une régression linéaire qui considère l'incertitude des données, comme cela est présenté à la section 6.3.2.

Or, cette norme a été discutée et critiquée au cours des dernières années, si bien que la nouvelle norme IEC61400-121 [4] comporte certaines modifications par rapport à la précédente. La principale différence est que la nécessité d'utiliser une régression linéaire n'y est plus mentionnée : on y parle seulement d'un facteur de correction de l'écoulement α . Cela peut être interprété comme une régression linéaire dont l'ordonnée à l'origine doit absolument être nulle, ce qui peut présenter une différence importante par rapport à une régression linéaire dont l'ordonnée à l'origine est non-nulle.

Dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, l'approche proposée par la norme IEC61400-12 [52] a été utilisée car la calibration traditionnelle a été réalisée avant la publication de la nouvelle norme.

Bien que le traitement des données expérimentales provenant des tours de 46m installées sur le site de Rivière au Renard soit très similaire à celui des tours de 58m présenté à la section 6.3.2, quelques informations concernant les deux tours de 46m doivent être ajoutées. Il est important de mentionner que la tour temporaire n'est demeurée sur le site que quatre mois, suite à quoi elle a été démantelée pour faire place à l'une des éoliennes. Or, quatre mois de données représentent un laps de temps relativement court et certainement pas idéal. En même temps, cela illustre bien le fait que les promoteurs de parcs veulent installer leurs éoliennes le plus vite possible et que la calibration traditionnelle de site

est souvent problématique. Rappelons également que les instruments utilisés sur ces deux tours sont identiques à ceux des tours de 58m, donc l'analyse d'incertitude présentée à la section 6.4 demeure valable.

La base de données brutes de ces deux tours est présentée à la figure 55, où l'on peut observer le ratio des vitesses de vent, à une hauteur de 46m, sur les tours référence et temporaire. Une dispersion importante des données est visible et certains secteurs de vent ne contiennent pas suffisamment de données ; ceux-ci ne pourront donc pas être utilisés pour réaliser la calibration de site. Enfin, il faut aussi noter que les données présentées sur cette figure contiennent l'ensemble des données originales enregistrées. Plusieurs filtres ont été appliqués à ces données avant leur utilisation. Par exemple, aux environs de l'orientation de vent 345°, une concentration de données est observée, sûrement due au gel de la girouette. Comme aucun instrument chauffé n'était installé sur ces tours, les données ont été comparées entre elles pour identifier les problèmes potentiels³. Pour illustrer la capacité

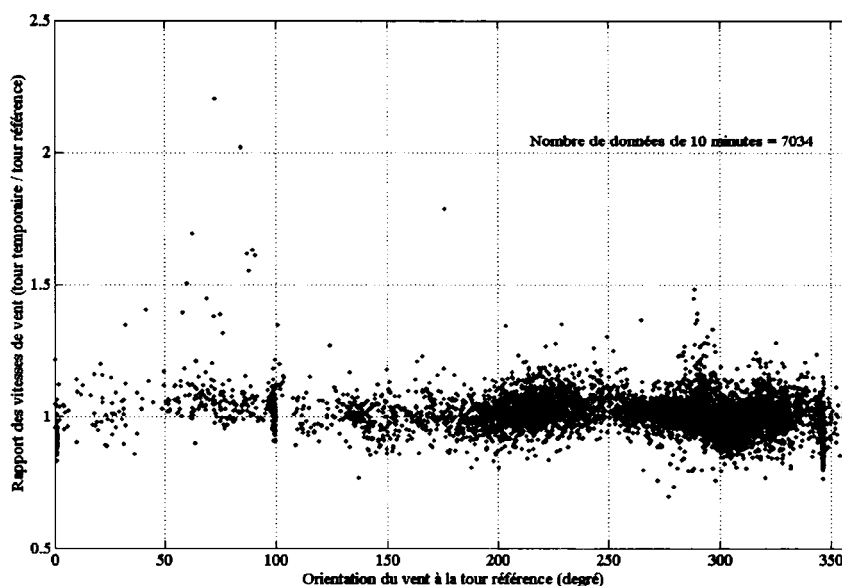


Figure 55 Base de données brutes, tours référence et temporaire

³Chaque tour avait un anémomètre et une girouette au sommet, soit à une hauteur de 46.5m, puis une deuxième série d'instruments était positionné à 20m, ce qui permet de vérifier la cohérence des données.

de la méthode numérique développée, deux secteurs de vent ont été retenus, soit les orientations 305° et 315° . Ces deux secteurs contiennent chacun un grand nombre de données, ce qui devrait permettre de diminuer l'incertitude de type A. Pour chacun de ces secteurs, une calibration de site traditionnelle a été réalisée en suivant les recommandations de la norme IEC61400-12 [52]. Par la suite, la méthode numérique développée au chapitre 5 a été appliquée. La méthodologie employée est très similaire à celle utilisée à la section 7.2 : à partir des données expérimentales, le profil de vitesse est déterminé à la tour référence, ce qui permet de connaître la longueur de rugosité expérimentale à appliquer au modèle numérique. Puis, un terrain virtuel de $1600 \times 1600 \times 800$ mètres est créé et l'écoulement est simulé sur ce domaine, toujours en appliquant les conditions frontières mentionnées à la section 5.2. Comme il a été conclu que la méthode d'enclassement de domaine n'était pas très efficace avec le maillage utilisé sur le grand domaine, celle-ci n'a pas été utilisée ici. Une fois l'écoulement solutionné, il ne reste plus qu'à analyser les vitesses aux points voulus, soit à une hauteur de $46.5m$ à la position exacte des tours référence et temporaire.

Pour chacune des deux directions de vent choisies, plusieurs simulations numériques ont été réalisées, permettant d'obtenir le ratio des vitesses de vent aux deux tours pour différentes vitesses références. La figure 56 présente les résultats obtenus pour l'orientation de vent 305° . Pour cette orientation de vent, 892 échantillons de 10 minutes étaient disponibles (près de 150 heures de données), ce qui est nettement suffisant par rapport au 24 heures recommandées par la norme. La figure 56 présente plusieurs informations. D'abord, les données expérimentales originales présentent une dispersion importante. Ensuite, la droite de régression calculée est accompagnée de deux intervalles d'incertitudes, selon la valeur attribuée au facteur de couverture k . Il est important de souligner que l'incertitude présentée ici n'est que l'incertitude de type A. Cependant, comme celle-ci est dominante dans les deux orientations, ajouter l'incertitude de type B changerait peu les intervalles présentés. Enfin, les données numériques obtenues sont présentées et le résultat est plutôt concluant : pour les trois vitesses de vent inférieures à $12m/s$ à la tour référence, les données numériques sont très près de la droite de régression tirée des données expérimentales. Et en ce qui concerne la vitesse de vent plus élevée, même si les données expérimentales suggèrent une différence de vitesse un peu plus grande que celle prédite numériquement, la bonne tendance est tout de même obtenue à l'aide de la méthode numérique.

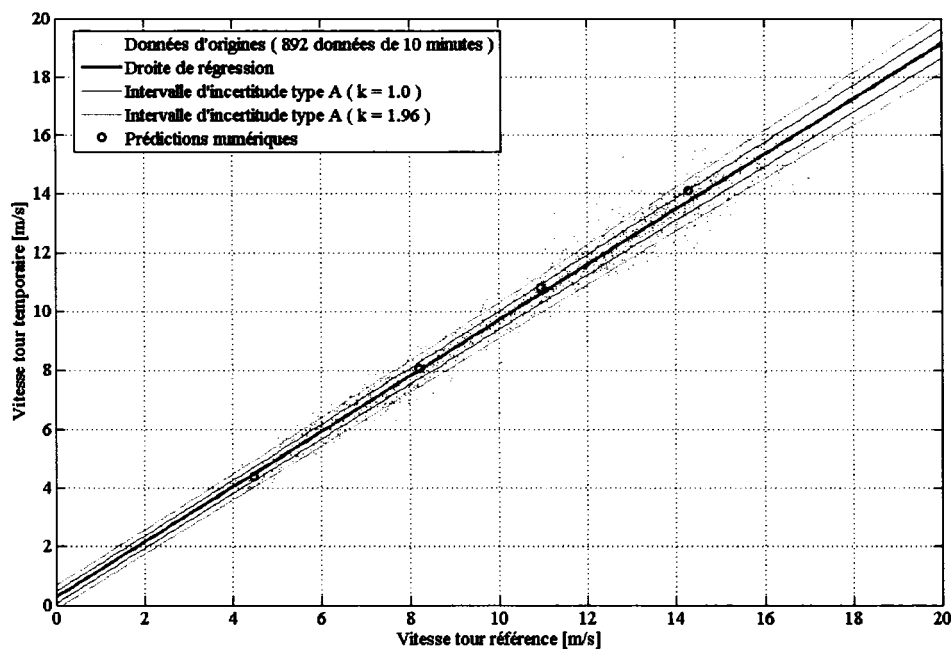


Figure 56 Calibration virtuelle, direction du vent 305°

Les résultats obtenus pour l'orientation de vent 315° sont présentés à la figure 57. Contrairement aux résultats pour l'orientation 305°, ceux-ci sont légèrement moins convaincants. En effet, les valeurs expérimentales indiquent que la vitesse est à toute fin pratique identique à la tour référence et temporaire, alors que la méthode numérique prédit une vitesse légèrement supérieure à la tour référence. Cependant, les données numériques se trouvent à l'intérieur de l'intervalle d'incertitude avec $k = 1$, donc il ne s'agit en rien de résultats qui tendent à démontrer que la méthode n'est pas valable, bien au contraire.

Enfin, le tableau XI présente les résultats obtenus pour la calibration de site pour les deux orientations de vent étudiées, mais de manière chiffrée. L'erreur relative obtenue à l'aide de la méthode numérique, pour chacune des vitesses de vent, est comparée à l'erreur relative liée à l'incertitude des données. L'erreur reliée à la méthode numérique est calculée suivant :

$$E_{num} = 100\% \cdot \frac{|V_{temp,num} - V_{temp,regress}|}{V_{temp,regress}} \quad (7.2)$$

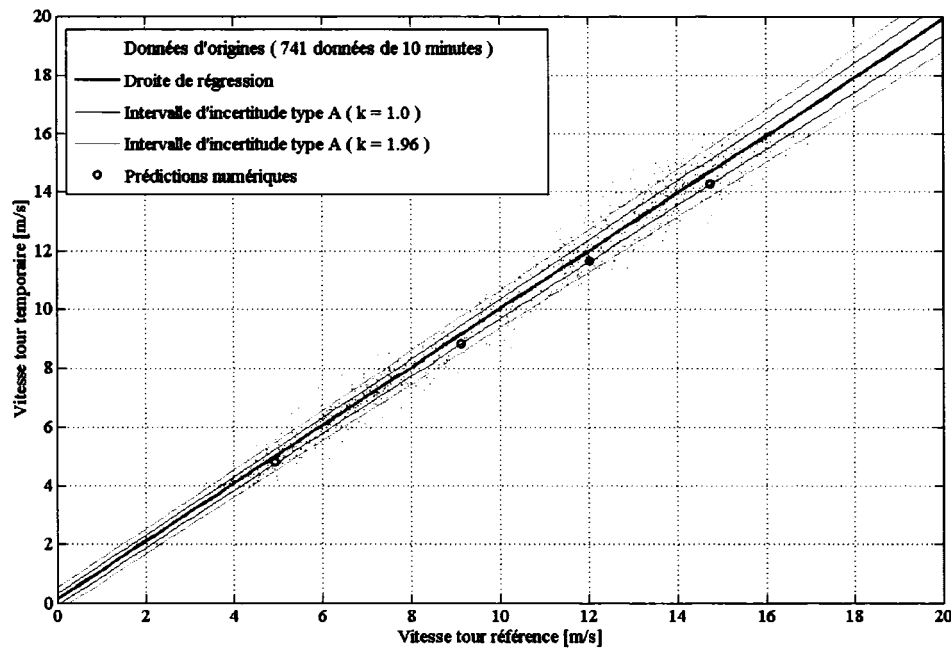


Figure 57 Calibration virtuelle, direction du vent 315°

où $V_{temp,num}$ est la vitesse à la tour temporaire prédite par la méthode numérique et $V_{temp,regress}$ est la vitesse à la tour temporaire calculée à l'aide de la droite de régression. L'erreur provenant des données expérimentales est calculée avec :

$$E_{incert} = 100\% \cdot \frac{U_c(V_i)}{V_{temp,regress}} \quad (7.3)$$

où $U_c(V_i)$ est l'incertitude étendue obtenue avec un facteur de couverture $k = 1.96$.

Ce tableau permet d'apprécier la précision obtenue à l'aide de la méthode développée : les prévisions numériques sont nettement à l'intérieur de l'incertitude associée aux données expérimentales.

Peu de cas ayant été simulés numériquement, il serait abusif de conclure que la méthode développée peut, dès aujourd'hui, remplacer la calibration de site traditionnelle. Il serait très intéressant de répéter le processus effectué ici pour d'autres terrains. Il serait particulièrement souhaitable, quoique peut-être ardu, de trouver des sites où l'incertitude des

Tableau XI

Erreurs relatives observées sur les données

Orientation du vent 305°		
Vitesse référence [m/s]	Erreur méthode numérique [%]	Erreur incertitude expérimentale [%]
4.462	1.34	10.07
8.205	1.06	6.81
10.958	1.98	5.96
14.297	2.62	5.52
Orientation du vent 315°		
Vitesse référence [m/s]	Erreur méthode numérique [%]	Erreur incertitude expérimentale [%]
4.919	3.89	9.63
9.107	3.25	6.74
12.035	3.10	6.09
14.745	2.83	5.77

données expérimentales est réduite au minimum, question de pouvoir réellement valider la méthode numérique.

L'ensemble des résultats de ce mémoire respecte la norme IEC61400-12 [52] au sens où une régression linéaire à deux paramètres est employée. La majeure partie des travaux présentés a été réalisée au moment où cette norme était en vigueur. Bien que la nouvelle norme IEC61400-121 [4] recommande plutôt l'utilisation d'un facteur de correction de l'écoulement α , les paramètres de régression A trouvés sont faibles et les résultats seraient très similaires si la nouvelle norme avait été suivie.

CONCLUSION

Résumé de la problématique

Face aux récents appels d'offres lancés par Hydro-Québec et aux investissements qui se multiplient à travers le monde dans la sphère de l'énergie renouvelable, le moins que l'on puisse dire est que l'énergie éolienne est dans le vent. Mais comme cela a été présenté au début de ce mémoire, cette croissance extrêmement rapide oblige à relever de nouveaux défis ; l'un de ceux-ci étant de trouver de nouveaux sites pour l'implantation d'éoliennes. Pour cette raison, de plus en plus de sites complexes sont sélectionnés. Cependant, l'écoulement du vent sur ces terrains irréguliers est encore peu compris. Or une bonne connaissance du vent est absolument nécessaire pour parvenir à maîtriser la ressource éolienne. L'une des problématiques principales est de savoir si les éoliennes d'un parc sont bien installées. Fonctionnent-elles de manière optimale ? Serait-il possible d'améliorer leurs performances ? Les résultats attendus sont-ils atteints ?

Afin de répondre à ces questions, il est nécessaire de procéder à un test de performance des éoliennes, ce qui, en terrain complexe, implique de réaliser au préalable une calibration de site. Ce concept, expliqué en détail au chapitre 2.1.2, consiste à recueillir et analyser des données de vent. Grandement utilisée aujourd'hui, la calibration de site traditionnelle est cependant longue et coûteuse à effectuer. Ce mémoire visait donc à développer une méthode permettant de remplacer la calibration de site traditionnelle.

Solution proposée

Pour atteindre cet objectif, l'approche préconisée est de simuler numériquement le mouvement du vent dans la couche limite atmosphérique et ce, de manière très précise et sur de courtes distances. Cet écoulement tridimensionnel, incompressible et stationnaire a été représenté par les équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps par l'approche de Reynolds et complétées par le modèle de turbulence $\kappa - \epsilon$, dont les constantes originales ont été modifiées.

Le déplacement de l'air dans la couche limite atmosphérique est un écoulement où la turbulence joue un rôle majeur. Les équations empiriques de Monin-Obukhov ont servi de base théorique à cette étude du vent. De plus, comme l'objectif est de déterminer l'influence de la topographie sur l'écoulement, différentes méthodes de représentation surfacique ont été envisagées pour arriver à bien modéliser numériquement le site étudié. Une approche basée sur la photographie aérienne a finalement été adoptée.

Un site complexe typique a été choisi afin de valider la méthode numérique développée : le site de Rivière au Renard, en Gaspésie, où trois éoliennes $750kW$ sont installées. Il s'agit d'un site très complexe, couvert de forêt à l'exception des chemins déboisés qui ont permis l'érection des différentes installations du site. Ce terrain présente des pentes très importantes (plus de 15°). De plus, cinq tours météorologiques y ont été installées, dont trois tours de $58m$ fortement instrumentées, qui ont fourni les données nécessaires à la validation de la méthode numérique développée.

Principales contributions

L'ensemble des travaux effectués a mené au développement d'une méthode numérique complète et fonctionnelle, implantée dans le logiciel Fluent. Ce logiciel commercial ne possède originalement aucun module éolien. Par contre, il rend possible l'utilisation de fonctions définies par l'utilisateur qui permettent d'adapter le logiciel à l'application souhaitée. Ces fonctions ont été particulièrement utiles pour le développement de conditions frontières originales à implanter au modèle. Ce dernier a été validé sur terrain plat et sur terrain complexe, toujours pour de courtes échelles de distance. La calibration virtuelle du site de Rivière au Renard, pour deux orientations de vent, a également été réalisée.

Développement d'une méthode numérique de simulation du vent

Avant de procéder à l'élaboration d'une méthode de simulation, les besoins ont été ciblés. Il est apparu nécessaire d'utiliser des maillages dont la face d'entrée était toujours orientée perpendiculairement au vent ; une technique de construction du maillage tenant compte de cette contrainte a été élaborée. De plus, l'étude des données expérimentales provenant du site de Rivière au Renard a révélé la présence d'une rugosité de surface très élevée. Il a

donc fallu considérer cette importante contrainte lors du développement de la méthode numérique. Utiliser une loi de paroi rugueuse pour tenir compte de la rugosité s'est avéré impossible. Une approche particulière a donc été élaborée, basée sur les travaux présentés par Richards et Hoxey [19]. Cette approche parvient à déterminer les paramètres de vitesse et turbulence au sol tout en permettant à l'écoulement de s'adapter aux variations de la topographie.

Pour les parois d'entrée et latérales, étudier l'écoulement du vent sur un terrain complexe rend la définition de ces conditions frontières particulièrement ardue. Celles-ci sont traitées individuellement, avant de procéder à la solution sur le domaine tridimensionnel : un écoulement bidimensionnel est résolu sur chacune, à l'aide de certaines hypothèses simplificatrices. Ces solutions bidimensionnelles ont été imposées sur le domaine tridimensionnel. De plus, pour s'assurer que l'ensemble des éléments topographiques importants soit traité, une méthode d'enchâssement de domaine a également été développée. Ce travail a été implanté dans Fluent à l'aide de fonctions définies par l'utilisateur.

Pour valider la méthode et, plus particulièrement, sa capacité à prendre en compte de grandes longueurs de rugosité, une simulation sur terrain plat a été effectuée et les résultats obtenus ont été comparés aux profils empiriques de Monin-Obukhov. La comparaison effectuée a permis de conclure que la méthode développée arrive à reproduire précisément les profils de vitesse et de turbulence prédits par la théorie de Monin-Obukhov.

Validation de la méthode en terrain complexe

Une étude détaillée des données expérimentales provenant de Rivière au Renard a donc été effectuée. Les données de vent, enregistrées à quatre hauteurs différentes sur chacune des trois tours de 58m du site, ont été vérifiées et analysées afin d'obtenir des corrélations de vitesse entre les différents instruments. Par la suite, trois directions de vent ont été étudiées et les résultats des simulations numériques ont été comparés aux données expérimentales.

Les résultats obtenus démontrent clairement la capacité de la méthode développée. Pour le site de Rivière au Renard, des facteurs d'accélération importants sont observés entre les différentes tours météorologiques, bien que celles-ci soient situées à de courtes distances

les unes des autres. Or, la méthode parvient somme toute relativement bien à reproduire ces facteurs d'accélération. Plus particulièrement, pour le cas où le vent provient de la direction 5° , la méthode numérique prédit de manière très précise les valeurs expérimentales obtenues. Une lacune de la méthode a par contre été soulevée par les différentes simulations effectuées, soit son incapacité à prendre en considération des variations de longueur de rugosité. En effet, la méthode numérique applique une longueur de rugosité constante sur l'ensemble du domaine. Cette longueur de rugosité est déterminée à partir du profil de vitesse obtenu à l'une des tours du site. Lorsque la longueur de rugosité expérimentale observée aux autres tours est similaire, ce qui est le cas pour l'orientation de vent 5° , la méthode prédit avec beaucoup de justesse les valeurs de vitesse de vent obtenues expérimentalement. Par contre, des variations de rugosité aux autres tours induisent des erreurs non négligeables. Il est clair que, dans le but d'avoir une méthode qui soit fiable et la plus précise possible, il serait nécessaire qu'elle puisse tenir compte des différentes longueurs de rugosité.

Dans le but de comparer la méthode développée aux règles actuellement établies par l'industrie de l'énergie éolienne, les résultats obtenus à l'aide de la méthode CFD ont également été comparés aux résultats de simulation produits par le logiciel WAsP. Ce logiciel, qui permet d'établir une corrélation numérique entre la vitesse du vent en différents points de l'espace sur un terrain donné, est très utilisé dans l'industrie encore aujourd'hui. Les comparaisons effectuées étant relativement peu nombreuses, il est difficile de conclure avec certitude laquelle des méthodes est la plus précise. Cependant, comme de nombreux auteurs l'ont conclu avant le présent travail, le logiciel WAsP n'est pas formulé pour donner de bons résultats sur des terrains fortement complexes, et les résultats présentés dans ce mémoire tendent à démontrer que la méthode CFD développée pourrait permettre d'obtenir des résultats beaucoup plus fiables que WAsP sur un terrain tel que Rivière au Renard. La réalisation de nombreuses autres simulations, en particulier sur d'autres sites, pourrait permettre de valider cette hypothèse.

Enfin, la calibration virtuelle du site de Rivière au Renard, obtenue à l'aide de la méthode numérique développée, a été comparée à la calibration traditionnelle réalisée à partir des données expérimentales provenant des deux tours de $46m$ installées sur le site. Les résultats obtenus tendent à montrer que l'utilisation de la calibration virtuelle, pour ces deux

cas particuliers, aurait été tout aussi valable que l'utilisation d'une calibration de site traditionnelle, puisque les valeurs numériques obtenues se situent à l'intérieur des intervalles d'incertitude expérimentale. Cependant, comme seulement deux directions de vent ont été étudiées, il serait prématuré de conclure immédiatement à la validité absolue de la méthode proposée.

Développements futurs

Il est clair que l'objectif initial était fort ambitieux : la simulation numérique de l'écoulement du vent dans la couche limite atmosphérique n'est pas simple à réaliser et le site de Rivière au Renard est particulièrement complexe. Malgré cela, une méthode fonctionnelle a été développée et des résultats encourageants ont été obtenus. La prochaine amélioration à apporter à la méthode est certainement de parvenir à prendre en considération les variations de la rugosité observées sur le site. À ce sujet, deux éléments importants doivent être envisagés. D'abord, pour que la méthode numérique tienne compte des variations de la rugosité, cette dernière devrait pouvoir être imposée différemment en chaque point du maillage. Parallèlement à cela, il est nécessaire d'élaborer une méthode qui permettrait de définir la rugosité réelle observée en chaque point du terrain étudié. Cela demanderait de trouver des sources de données fiables permettant de définir la végétation : des images satellites pourraient, par exemple, être utilisées. Il serait alors possible de transformer en longueur de rugosité les observations faites.

Lorsque cette amélioration aura été apportée, de nombreuses simulations permettraient de valider la méthode. Différents ajouts pourraient alors être faits, par exemple introduire les effets de stratification thermique dans les calculs, ajouter le terme de Coriolis dans les équations de transport, intégrer des éoliennes dans les simulations à l'aide du concept du disque actuateur et évaluer différents modèles de turbulence, dont la simulation des grands tourbillons. Enfin, outre la calibration de site, diverses applications pourraient être expérimentées, dont la modélisation de l'écoulement sur l'ensemble d'un parc éolien. Au niveau industriel, les retombées seraient immenses : les cartes des vents obtenues seraient beaucoup plus précises, ce qui occasionnerait une meilleure optimisation des parcs éoliens, donc une plus grande production d'énergie verte au même coût.

ANNEXE 1
PARAMÈTRES FLUENT

Les différentes sections ci-dessous présentent les paramètres Fluent employés pour réaliser les simulations présentées dans ce mémoire. Ces listes ont été obtenues en utilisant la commande Rapport-Résumé (*Report - Summary*) disponible dans Fluent. Ceci devrait permettre à toute personne intéressée d'arriver à reproduire les résultats obtenus.

Paramètres pour écoulement bidimensionnel de l'entrée

FLUENT

Version: 2d, dp, segregated, ske (2d, double precision, segregated, standard k-epsilon)

Release: 6.2.16

Title:

Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
fluide_top	2	fluid
fluide_main	3	fluid
fluide_b	4	fluid
side_db	5	symmetry
interior_bas	6	interior
interior_top	7	interior
side_gt	8	symmetry
side_gm	9	symmetry
side_gb	10	symmetry
side_dt	11	symmetry
side_dm	12	symmetry
top	13	velocity-inlet
sol	14	wall
default-interior	16	interior
default-interior:001	1	interior
default-interior:015	15	interior

Boundary Conditions

fluide_top

Condition	Value

Material Name	air
Fixed Values	
((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(k (profile udf k_top_fluide_2Dinlet) (constant . 0) (inactive . #f))	
(epsilon (profile udf eps_top_fluide_2Dinlet) (constant . 0) (inactive . #f))	
(uds-0 (profile udf Vx_top_fluide_2Dinlet) (constant . 0) (inactive . #f)))	

fluide_main

Condition	Value

Material Name	air
Specify source terms?	yes
Source Terms	
((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(k (profile udf k_source) (constant . 0) (inactive . #f))	
(epsilon (profile udf eps_source) (constant . 0) (inactive . #f))	
(uds-0 (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
Specify fixed values?	no

fluide_b

Condition	Value

Material Name	air
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	yes
Fixed Values	
((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(k (profile udf k_sol) (inactive . #f) (constant . 17.8))	
(epsilon (profile udf eps_sol) (inactive . #f) (constant . 3.25))	
(uds-0 (profile udf vitesse_sol_u) (inactive . #f) (constant . 0.02)))	

top

Condition	Value
-----------	-------

```

-----
Velocity Specification Method      2
Reference Frame                    0
Velocity Magnitude                 0
X-Velocity                         0
Y-Velocity                         0
X-Component of Flow Direction      1
Y-Component of Flow Direction      0
X-Component of Axis Direction      1
Y-Component of Axis Direction      0
Z-Component of Axis Direction      0
X-Coordinate of Axis Origin        0
Y-Coordinate of Axis Origin        0
Z-Coordinate of Axis Origin        0
Angular velocity                   0
Turbulence Specification Method    0
Turb. Kinetic Energy               1
Turb. Dissipation Rate             1
Turbulence Intensity               0.1
Turbulence Length Scale            1
Hydraulic Diameter                 1

```

sol

```

Condition                          Value
-----
Wall Motion                         0
Shear Boundary Condition             0
Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
Apply a rotational velocity to this wall? no
Velocity Magnitude                   0
X-Component of Wall Translation       1
Y-Component of Wall Translation       0
Define wall velocity components?     no
X-Component of Wall Translation       0
Y-Component of Wall Translation       0
Wall Roughness Height                 0
Wall Roughness Constant               0.5

```

Solver Controls

Equations

```

Equation      Solved
-----
Flow          no

```


Turbulence yes
User Scalar 0 yes

Numerics

Numeric	Enabled

Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor

Pressure	0.3000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	1
Turbulence Kinetic Energy	0.95
Turbulence Dissipation Rate	0.95
Turbulent Viscosity	0.94999999
User Scalar 0	0.92

Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance

Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7
User Scalar 0	Flexible	0.1	0.7

Discretization Scheme

Variable	Scheme

Pressure	Second Order
Momentum	First Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	First Order Upwind
User Scalar 0	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit

Minimum Absolute Pressure	1

Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	9.9999998e-15
Minimum Turb. Dissipation Rate	9.9999997e-21
Maximum Turb. Viscosity Ratio	1e+12

Material Properties

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
UDS Diffusivity	kg/m-s	user-defined	(facteur_uds)
Speed of Sound	m/s	none	#f

Paramètres pour écoulement tridimensionnel

FLUENT

Version: 3d, dp, segregated, ske (3d, double precision, segregated, standard k-epsilon)

Release: 6.2.16

Title:

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions

Boundary Conditions

Zones		
name	id	type
fluide_top	2	fluid

fluide_d	3	fluid
fluide_g	4	fluid
fluide_m	5	fluid
fluide_b	6	fluid
sol	27	wall
outlet_b	29	velocity-inlet
side_dfin1	25	wall
top_fin1	21	wall
int10	7	interior
int9	8	interior
int8	9	interior
int7	10	interior
int6	11	interior
int5	12	interior
int4	13	interior
int3	14	interior
int2	15	interior
int1	16	interior
side_gfin	17	symmetry
side_gt	18	wall
side_gm	19	wall
side_gb	20	wall
side_dt	22	wall
side_dm	23	wall
side_db	24	wall
top_m	26	wall
outlet_m	28	outflow
inlet_g	30	velocity-inlet
inlet_d	31	velocity-inlet
inlet_t	32	velocity-inlet
inlet_m	33	velocity-inlet
inlet_b	34	velocity-inlet
default-interior	36	interior
default-interior:001	1	interior
default-interior:035	35	interior
default-interior:037	37	interior
default-interior:038	38	interior
default-interior:039	39	interior

Boundary Conditions

fluide_top	
Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	
((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	

Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	
((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(k (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile)))	
Specify fixed values?	yes
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	
((x-velocity (profile pr_interior_g x-velocity) (constant . 0))	
(y-velocity (constant . 0) (profile))	
(z-velocity (profile pr_interior_g z-velocity) (constant . 0))	
(k (profile pr_interior_g turb-kinetic-energy) (constant . 0))	
(epsilon (profile pr_interior_g turb-diss-rate) (constant . 0)))	
Motion Type	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Porosity	1
fluide_m	
Condition	Value
Material Name	air
Specify source terms?	no
Source Terms	
((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(k (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile)))	
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	
((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(k (inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
(epsilon (inactive . #f) (constant . 0)	
(profile)))	
Motion Type	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Porosity	1

```

fluide_b
  Condition                                     Value
  Material Name                                air
  Specify source terms?                        no
  Source Terms
  ((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile ))
  (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile ))
  (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile ))
  (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile ))
  (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile ))
  (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
  Specify fixed values?                        yes
  Fixed Values
  ((x-velocity (profile udf vitesse_sol_u) (constant . 0))
  (y-velocity (profile udf vitesse_sol_v) (constant . 0))
  (z-velocity (profile udf vitesse_sol_w) (constant . 0))
  (k (profile udf k_sol) (constant . 0))
  (epsilon (profile udf eps_sol) (constant . 0)))
  Motion Type                                  0
  Deactivated Thread                           no
  Laminar zone?                                no
  Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone? no
  Porous zone?                                 no
  Porosity                                     1
sol
  Condition                                     Value
  -----
  Enable shell conduction?                     no
  Wall Motion                                  0
  Shear Boundary Condition                    0
  Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
  Apply a rotational velocity to this wall?    no
  Velocity Magnitude                          0
  X-Component of Wall Translation              1
  Y-Component of Wall Translation              0
  Z-Component of Wall Translation              0
  Define wall velocity components?             no
  X-Component of Wall Translation              0
  Y-Component of Wall Translation              0
  Z-Component of Wall Translation              0
  Wall Roughness Height                       0
  Wall Roughness Constant                     0.5
  Rotation Speed                              0
  X-Position of Rotation-Axis Origin           0
  Y-Position of Rotation-Axis Origin           0
  Z-Position of Rotation-Axis Origin           0
  X-Component of Rotation-Axis Direction       1
  Y-Component of Rotation-Axis Direction       0

```

Z-Component of Rotation-Axis Direction	0
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

outlet_b

Condition	Value

Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0
Coordinate System	0
X-Velocity	0.02
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	0
Turb. Kinetic Energy	7
Turb. Dissipation Rate	0.60000002
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

side_dfin1

Condition	Value

Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0

Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

top_fin1

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

side_gt

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

side_gm

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0

Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

side_gb

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

side_dt

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

side_dm

Condition	Value

Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0

X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

side_db

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

top_m

Condition	Value
-----	-----
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0

X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Wall Roughness Height	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
Specularity Coefficient	0

outlet_m

Condition	Value

Flow rate weighting	1

inlet_g

Condition	Value

Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0
Coordinate System	0
X-Velocity	(profile pr_interior_inlet x-velocity)
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	0

Turb. Kinetic Energy	(profile pr_interior_inlet turb-kinetic-energy)
Turb. Dissipation Rate	(profile pr_interior_inlet turb-diss-rate)
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

inlet_d

Condition	Value
-----	-----
Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0
Coordinate System	0
X-Velocity	(profile pr_interior_inlet x-velocity)
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	0
Turb. Kinetic Energy	(profile pr_interior_inlet turb-kinetic-energy)
Turb. Dissipation Rate	(profile pr_interior_inlet turb-diss-rate)
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

inlet_t

Condition	Value
-----	-----
Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0
Coordinate System	0
X-Velocity	(profile pr_interior_inlet x-velocity)
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0

X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	0
Turb. Kinetic Energy	(profile pr_interior_inlet turb-kinetic-energy)
Turb. Dissipation Rate	(profile pr_interior_inlet turb-diss-rate)
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

inlet_m

Condition	Value

Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0
Coordinate System	0
X-Velocity	(profile pr_interior_inlet x-velocity)
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	0
Turb. Kinetic Energy	(profile pr_interior_inlet turb-kinetic-energy)
Turb. Dissipation Rate	(profile pr_interior_inlet turb-diss-rate)
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

inlet_b

Condition	Value
Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0
Coordinate System	0
X-Velocity	(profile pr_interior_inlet x-velocity)
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	0
Turb. Kinetic Energy	(profile pr_interior_inlet turb-kinetic-energy)
Turb. Dissipation Rate	(profile pr_interior_inlet turb-diss-rate)
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

Solver Controls

Equations

Equation	Solved
Flow	yes
Turbulence	yes

Numerics

Numeric	Enabled
Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.3000001
Density	1
Body Forces	1

Momentum	0.89999998
Turbulence Kinetic Energy	0.85000002
Turbulence Dissipation Rate	0.85000002
Turbulent Viscosity	0.69999999

Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Momentum	First Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	9.9999998e-15
Minimum Turb. Dissipation Rate	9.9999997e-21
Maximum Turb. Viscosity Ratio	1e+14

Material Properties

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2002), *Wind energy explained : theory, design and application*. Chichester ; New York : Wiley.
- [2] Danish wind industry association (2005), [http ://www.windpower.org/](http://www.windpower.org/).
- [3] Hunter, R., Pedersen, T.F., Dunbabin, P., Antoniou, I., Frandsen, S., Klug, H., Albers, A., and Lee, W.K. (2001), *European Wind Turbine Testing Procedure Developments Task 1 : Measurement Method to Verify Wind Turbine Performance Characteristics*. RISO-R-1209(EN), Roskilde, Danemark : Riso National Laboratory.
- [4] (2005), *IEC 61400 Wind turbines - Part 121 : Power performance measurements of grid connected wind turbines*. International Electrotechnical Commission.
- [5] Troen, I. and Lundtang, E. (1989), *European Wind Atlas*. Riso National Laboratory, Danemark.
- [6] Landberg, L. (1994), *Short-term prediction of local wind conditions*. Roskilde, Danemark : Riso National Laboratory.
- [7] Murakami, S., Mochida, A., and Kato, S. (2003), *Development of local area wind prediction system for selecting suitable site for windmill*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, 12-15 :pp. 1759–1776.
- [8] Villanueva, J., Curtet, M., Cabezon, D., Cantero, E., and Marti, I. (2004), *Wind resource assessment in complex terrain using a CFD model*. In *The science of making torque from Wind*, Delft, Pays-Bas, pp. 328–335.
- [9] Cabezon, D., Iniesta, A., Ferrer, E., and Marti, I. (2005), *Comparing linear and non linear wind flow models*. In *Euromech Colloquium 464b on Wind Energy*, Carl von Ossietzky University, Oldenburg, Germany.
- [10] Strack, M. and Riedel, V. (2004), *State of the art in application of flow models for micrositting*. In *GmbH, DEWI German wind energy institute (Ed.), German Wind Energy Conference DEWEK*, Wilhelmshaven, Germany.
- [11] Schlichting, H. (1987), *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill classic textbook reissue series, 7th edn., New York, N.Y., États-Unis : McGraw-Hill.
- [12] Stull, R.B. (1999), *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Atmospheric Sciences Library, Dordrecht, Pays-Bas : Kluwer Academic Publishers.
- [13] Wilcox, D.C. (1993), *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, Californie, États-Unis : DCW Industries.
- [14] Hinze, J. (1975), *Turbulence*. Second edn., New-York, États-Unis : McGraw-Hill.
- [15] Gosman, A.D. (1999), *Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 81, 1-3 :pp. 21–39.

- [16] Leclerc, C. (1998), Simulation numérique de l'écoulement tridimensionnel turbulent dans un parc éolien. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- [17] Alinot, C. (2003), Analyse aérodynamique des parcs éoliens immergés dans une couche limite terrestre ayant différentes conditions de stabilité thermique. Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, Canada.
- [18] Alinot, C. and Masson, C. (2005), $\kappa - \epsilon$ model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications. ASME Journal of Solar Energy Engineering, vol. 127 :pp. 1–6.
- [19] Richards, P. and Hoxey, R. (1993), *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using $\kappa - \epsilon$ turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 46-47 :pp. 145–153.
- [20] Lun, Y.F., Mochida, A., Murakami, S., Yoshino, H., and Shirasawa, T. (2003), *Numerical simulation of flow over topographic features by revised $\kappa - \epsilon$ models*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 91, 1-2 :pp. 231–245.
- [21] Murakami, S. (1997), *Current status and future trends in computational wind engineering*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 67-68 :pp. 3–34.
- [22] Albrecht, C. and Klesitz, M. (2006), *Three-dimensional wind field calculation above orographic complex terrain in southern europe*. In Conférence EWEC, Athens, Grèce.
- [23] Gravdahl, A.R. and Harstveit, K. (2000), *Windsim - flow simulations in complex terrain*. In 5th German Wind Energy Conference, Wilhelmshaven, Allemagne.
- [24] Iizuka, S. and Kondo, H. (2004), *Performance of various sub-grid scale models in large-eddy simulations of turbulent flow over complex terrain*. Atmospheric Environment, vol. 38, 40 :pp. 7083–7091.
- [25] Uchida, T. and Ohya, Y. (2003), *Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 91, 1-2 :pp. 219–229.
- [26] Bitsuamlak, G.T., Stathopoulos, T., and Bedard, C. (2004), *Numerical evaluation of wind flow over complex terrain : Review*. Journal of Aerospace Engineering, vol. 17, 4 :pp. 135–145.
- [27] Ferreira, A.D., Lopes, A.M.G., Viegas, D.X., and Sousa, A.C.M. (1995), *Experimental and numerical simulation of flow around two-dimensional hills*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 54-55 :pp. 173–181.
- [28] Durbin, P. (1996), *On the $\kappa - \epsilon$ stagnation point anomaly*. International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 17, 1 :pp. 89–90.

- [29] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J. (1995), *New $\kappa - \epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows*. Computers and Fluids, vol. 24, 3 :pp. 227–238.
- [30] Kim, H.G., Lee, C.M., Lim, H.C., and Kyong, N.H. (1997), *An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 66, 1 :pp. 17–33.
- [31] Kim, H.G., Patel, V.C., and Lee, C.M. (2000), *Numerical simulation of wind flow over hilly terrain*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 87, 1 :pp. 45–60.
- [32] Bitsuamlak, G., Stathopoulos, T., and Bedard, C. (2004), *Numerical modeling of wind flow over different types of topography*. In Proceedings of the 2004 Structures Congress - Building on the Past : Securing the Future, May 22-26 2004, Nashville, TN, United States : American Society of Civil Engineers, Reston, United States, pp. 1645–1655.
- [33] Lakehal, D. (1998), *Application of the $\kappa - \epsilon$ model to flow over a building placed in different roughness sublayers*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 73, 1 :pp. 59–77.
- [34] Lien, F.S., Yee, E., and Cheng, Y. (2004), *Simulation of mean flow and turbulence over a 2d building array using high-resolution cfd and a distributed drag force approach*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 92, 2 :pp. 117–158.
- [35] Wright, N. and Easom, G. (1999), *Comparison of several computational turbulence models with full-scale measurements of flow around a building*. Wind and Structures, an International Journal, vol. 2 :pp. 305–323.
- [36] Wright, N., Easom, G., and Hoxey, R. (2001), *Development and validation of a non-linear $\kappa - \epsilon$ model for flow over a full-scale building*. Wind and Structures, an International Journal, vol. 4, 3 :pp. 177–196.
- [37] Wright, N.G. and Easom, G.J. (2003), *Non-linear $\kappa - \epsilon$ turbulence model results for flow over a building at full-scale*. Applied Mathematical Modelling, vol. 27, 12 :pp. 1013–1033.
- [38] Eidsvik, K.H. and Utnes, T. (1997), *Flow separation and hydraulic transitions over hills modelled by the reynolds equations*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 67-68 :pp. 403–413.
- [39] Eidsvik, K. (2005), *A system for wind power estimation in mountainous terrain-prediction of askervein hill data*. Wind Energy, vol. 8, 2 :pp. 237–49.
- [40] Fédération française de la montagne et de l'escalade (2000), *Formation, structure et composition de l'atmosphère*, <http://www.ffme.fr/technique/meteorologie/theorie/atmosphere/composition.htm>.

- [41] Monin, A. and Obukhov, A. (1954), *Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground*. Trudy Geofizicheskogo Instituta, Akademiya Nauk, URSS, , 151 :pp. 1963–1987.
- [42] Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J. (1994), *Atmospheric boundary layer flows : their structure and measurement*. New York : Oxford University Press.
- [43] Géobase, Conseil canadien de la géomatique (2006), <http://www.geobase.ca/geobase/fr/index.html>.
- [44] DigitalGlobe (2006), <http://www.digitalglobe.com/>.
- [45] Alinot, C. and Masson, C. (2002), *Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications*. In American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (Ed.), ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, pp. 206–215.
- [46] Fluent (1998), *Fluent 6.0 users's guide*. Lebanon, New Hampshire, États-Unis : Fluent.
- [47] Launder, B. and Spalding, D. (1974), *The numerical computation of turbulent flows*. Computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 3 :pp. 269–289.
- [48] Panofsky, H.A. and Dutton, J.A. (1984), *Atmospheric Turbulence - Models and methods for engineering applications*. A Wiley-Interscience Publication, New York : John Wiley & Sons.
- [49] Patankar, S.V. (1980), *Numerical heat transfer and fluid flow*. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences, New York : Mcgraw-Hill.
- [50] Atlas du Canada (2006), <http://atlas.gc.ca/site/francais/index.html>.
- [51] Bibor, E. (2005), *Validation de la technique d'anémométrie à la nacelle en terrain complexe*. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Canada.
- [52] (1998), *IEC 61400 Wind turbine generator systems - Part 12 : Wind turbine power performance testing*. International Electrotechnical Commission.
- [53] Press, W.H. (2002), *Numerical recipes in C++ : the art of scientific computing*. Rev. 2nd edn., Cambridge : Cambridge University Press.
- [54] Bevington, P.R. and Robinson, D.K. (1992), *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. Second edn., New York, N.Y. : McGraw-Hill.
- [55] ISO (1993), *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. International Organization for Standardization.
- [56] Wiernga, J. (1993), *Representative roughness parameters for homogeneous terrain*. Boundary-Layer Meteorology (Historical Archive), vol. 63, 4 :pp. 323–363.
- [57] Montgomery, D.C., Peck, E.A., and Vining, G.G. (2001), *Introduction to linear regression analysis*. Wiley series in probability and statistics. Texts, references, and pocketbooks section, 3rd edn., New York : Wiley.

- [58] Hunter, R. (1999), *Wind speed measurement and use of cup anemometry*. Rapport technique, International Energy Agency Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine testing and Evaluation.
- [59] Kessel, W. (1998), *Analysis of the measurement uncertainty - basic component of test equipment inspection*. In DGQ & VDI/VDE-GMA expert meeting "Prüfmittelmanagement und Prüfmittelüberwachung", Version anglaise : http://www.metrodata.de/papers/resistor_en.pdf, Düsseldorf, pp. 153–166.
- [60] Brodeur, P., Masson, C., and Sibuet-Watters, C. (2006), *Numerical simulations of wind distributions over very complex terrain*. In American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (Ed.), ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada.