

# Étude de l'écoulement de la couche limite atmosphérique pour la modification du couvert forestier au voisinage d'une éolienne

par

Emma FAURIE

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE  
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES RENOUVELABLES  
ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 18 AOÛT 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Emma Faurie, 2021



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

## **PRÉSENTATION DU JURY**

**CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE**

**PAR UN JURY COMPOSÉ DE:**

Feu M. Christian Masson, directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, directeur substitut  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jonathon Sumner, co-directeur  
Département de physique au Collège Dawson

M. Simon Joncas, président du jury  
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Rousse, membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

**LE 16 AOÛT 2021**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement le professeur Jonathon Sumner pour ses encouragements, sa patience et son expertise. Son soutien sans faille et ses conseils m'ont permis d'aller au bout de ce projet de recherche.

Je remercie également le professeur Christian Masson pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet et m'avoir accompagné aussi longtemps que possible. Je remercie vivement le professeur Souheil-Antoine Tahan de m'avoir accompagnée et aidée à mener à terme ce projet.

Cette étude a été conduite au sein du Laboratoire de recherche sur l'aérodynamique des éoliennes en milieu nordique sous forme de fond de recherche de l'École de Technologie Supérieure. Je remercie notre partenaire Power Factors d'avoir proposé le projet, particulièrement intéressant et concret.

Un grand merci aux amis que j'ai rencontré depuis mon arrivé, sans qui l'expérience Montréalaise et Québécoise n'aurait, sans aucun doute, pas été aussi formidable. Un merci tout particulier à la colocation des Pins, et spécialement à Thomas, Margaux, Alice, Allan, Sacha, Nicolas et Lupin, pour leur amitié, leur soutien, leur bonne humeur et leur folie. Merci pour toutes ces superbes aventures et ces magnifiques souvenirs ensemble.

Je remercie également ma famille, restée en France, qui m'a soutenu malgré la distance. Je sais que l'éloignement a parfois été difficile, sachez que vous me manquez et que je ne vous oublie pas.

Enfin et surtout, je remercie Liam, pour sa confiance en moi, sa patience, et son incroyable soutien. Thank you for being there, for your affection, and for your amazing enthusiasm !



# Étude de l'écoulement de la couche limite atmosphérique pour la modification du couvert forestier au voisinage d'une éolienne

Emma FAURIE

## RÉSUMÉ

Afin de mieux comprendre l'effet de la taille des déboisements et des caractéristiques de la forêt sur l'écoulement du vent, des simulations numériques 2D ont été réalisées à l'aide d'une approche RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes). Un modèle  $k - \varepsilon$  modifié permettant de prendre en compte la traînée due à la végétation a été utilisé après avoir été validé par les expériences réalisées en soufflerie de deux auteurs. Une couche limite de surface horizontalement homogène (CLSHH) et neutre a été modélisée en entraînant l'écoulement à la fois par un gradient de pression et une contrainte de cisaillement et en utilisant des conditions aux limites originales en haut du domaine pour les quantités turbulentes. Le modèle a été validé à l'aide de mesures expérimentales de terrain. L'écoulement a été simulé au-dessus d'une forêt de référence reproduisant une forêt boréale typique contenant une zone de coupe d'une longueur variable comprise entre 1h à 100h. Les simulations ont été reproduites dans le cas de trois autres distributions de densité de surface foliaire (Leaf Area Density, LAD) et trois autres indices de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI) compris entre 2.5 à 10. En supposant qu'une éolienne d'environ 3MW était installée dans la zone déboisée, les variations spatiales de l'énergie disponible (E), du cisaillement moyen du vent (Average Wind Shear, AWS) et de l'énergie cinétique turbulente cumulée (cumulative Turbulent Kinetic Energy, cTKE) contenue dans la couche d'air balayée par les pâles ont été estimées à partir des simulations. Particulièrement, la distribution au-dessus du déboisement de leurs changements relatifs par rapport à une zone entièrement boisée a été étudiée. Trois hauteurs de moyeu ont été utilisées pour étudier l'influence de ce paramètre sur la distribution des variables. De manière inattendue, les résultats montrent que le déboisement dans la forêt ne génère pas nécessairement un gain d'énergie ni une réduction de cTKE ou d'AWS par rapport à une zone entièrement boisée, et l'agrandissement du déboisement n'améliore pas nécessairement ces variables. Pour les petites tailles de déboisement, environ 4h ou moins, la coupe n'a presque aucun effet. Les tailles "moyennes" (environ 10h à 40h) sont les moins adaptées, menant aux plus grandes réductions de E, et aux plus grandes augmentations de cTKE et d'AWS. En continuant d'agrandir le déboisement, on peut éventuellement réaugmenter progressivement E mais également l'AWS. L'augmentation de la hauteur du moyeu ne réduit pas les changements relatifs des variables par rapport à leur valeur de référence générés par le déboisement. Pour finir, l'augmentation de la densité de la forêt ainsi que l'augmentation de la répartition des feuilles au sommet des arbres intensifient l'effet du déboisement sur l'écoulement. Cependant les changements ne sont pas significatifs et la distribution des variables reste largement la même.

**Mots-clés:** CFD, Éolienne, Forêt, Déboisement, Modèle de la canopée, Couche limite atmosphérique, Conditions aux limites





# **Study of the atmospheric boundary layer flow for forest clearings around a wind turbine**

Emma FAURIE

## **ABSTRACT**

To better understand the effect of the clearing size and the forest characteristics on the wind flow, two-dimensional numerical simulations have been performed with a Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) approach. A modified  $k - \varepsilon$  model taking into account the forest drag was used after being validated against wind tunnel experiments from two authors. A neutrally stable horizontally homogeneous atmospheric surface layer has been modelled, driven both by a pressure gradient and a shear stress and using original top boundary conditions for the turbulent quantities, and validated against field measurements. Clearing sizes ranging from 1h to 100h were investigated with a reference forest representative of a typical boreal forest as well as with three other Leaf Area Density (LAD) distributions and three other Leaf Area Indexes (LAI) ranging from 2.5 to 10. Assuming that a wind turbine around 3MW was placed in the clearing, spatial variations of available wind Energy (E), Average Wind Shear (AWS) and Cumulative Turbulent Kinetic Energy (cTKE) in layers where the wind flow intersects with the swept area were estimated from the simulations. Three hub heights were used to investigate its influence on the distribution of the variables. Unexpectedly, the results show that the clearing in the forest does not necessarily generates a gain in E or a reduction of cTKE or AWS compared to a completely forested area, and enlarging the gap does not necessarily improve these variables. For small clearing sizes, around 4h or less, the clearing has almost no effect. "Medium" sizes (around 10h to 40h) are the least suitable, providing the greatest reductions in E, and the greatest increases in cTKE and AWS. Continuing to enlarge the clearing can eventually progressively increase E but also AWS. Increasing the hub height does not reduce the relative changes in the flow generated by the clearing. Although increasing forest density, as well as concentrating the LAD more at the top of the trees, does intensify the effect of the clearings, the changes are not significant and the distributions remain largely the same.

**Keywords:** Computational wind engineering, Wind turbine, Forest, Clear-cut, Canopy model, Atmospheric boundary layer, Appropriate boundary conditions



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
0.1 Mise en contexte .....	1
0.2 Objectif de recherche et aperçue de la méthodologie utilisée .....	3
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
1.1 Description de la mécanique et des processus atmosphériques .....	5
1.1.1 Mécanisme en jeu .....	5
1.1.2 Structure verticale de l'atmosphère .....	6
1.1.2.1 Couche limite atmosphérique .....	6
1.1.2.2 Couche limite de surface .....	6
1.1.2.3 La sous-couche rugueuse .....	7
1.1.3 Stratification thermique et stabilité de l'atmosphère .....	7
1.1.4 Les mécanismes de la turbulence .....	8
1.2 Caractéristiques de l'écoulement et faisabilité de l'implantation des éoliennes .....	9
1.2.1 Caractéristiques de l'écoulement au sein d'une zone déboisée .....	9
1.2.1.1 Résultats expérimentaux disponibles dans la littérature .....	10
1.2.1.2 Forme de l'écoulement en blocs de coupe .....	10
1.2.1.3 Influence des caractéristiques de la forêt .....	12
1.2.2 Installation d'éoliennes en zone de coupe .....	12
1.2.2.1 Résultats disponibles dans la littérature .....	13
1.2.2.2 Comportement de l'écoulement au-dessus du déboisement .....	14
1.3 Modélisation numériques de l'écoulement de la CLA avec forêt .....	15
1.3.1 Hypothèses de l'écoulement dans la CLA .....	15
1.3.2 Modèles de turbulence .....	15
1.3.2.1 Méthodes de modélisation .....	15
1.3.2.2 Modèles de fermeture .....	17
1.3.3 Profil d'écoulement pleinement développé sur terrain plat .....	17
1.3.3.1 Profil logarithmique .....	18
1.3.3.2 Turbulences .....	19
1.3.4 Modélisation de la forêt .....	19
1.3.4.1 Hauteur de déplacement .....	20
1.3.4.2 Modèle de la canopée .....	20
1.3.4.3 Formulation des termes source .....	22
1.3.5 Modélisation d'une CLA horizontalement homogène .....	23
1.4 Simulation numérique de l'écoulement .....	24
1.4.1 Méthode de résolution par volumes finis .....	25
1.4.1.1 Discrétisation spatiale et temporelle .....	25
1.4.1.2 Schéma d'interpolation .....	26

1.4.1.3	Couplage vitesse-pression et résolution du système d'équations discrétisées .....	27
1.4.2	OpenFOAM .....	28
CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT .....		
2.1	Démarche de travail .....	29
2.1.1	Objectifs spécifiques .....	29
2.1.2	Approche de recherche .....	30
2.1.3	Limites de la recherche .....	32
2.1.4	Choix des méthodes et des outils .....	33
2.2	Structure du mémoire .....	33
2.2.1	Présentation de l'article .....	33
2.2.2	Présentation des annexes .....	34
CHAPITRE 3 ANALYSIS OF FOREST CLEARING EFFECTS ON WIND ENERGY PRACTICES .....		
3.1	Abstract .....	35
3.2	Introduction .....	36
3.3	Mathematical model .....	38
3.3.1	Governing equations .....	38
3.3.2	Forest canopy model .....	40
3.4	Numerical Method .....	41
3.4.1	Solver .....	41
3.4.2	Development of a Horizontally Homogeneous Surface Layer .....	42
3.4.2.1	Boundary Conditions .....	42
3.4.2.2	CFD domain and mesh configuration .....	45
3.4.3	Simulations of forested terrain with clearings of various lengths .....	46
3.4.3.1	Boundary Conditions .....	46
3.4.3.2	CFD domain, mesh configuration and computational resources .....	46
3.4.4	Numerical set-up .....	46
3.5	Validation .....	48
3.5.1	Validation of fully developed flow simulation .....	48
3.5.2	Validation of clearing-forest flow simulation .....	50
3.5.2.1	Simulation of the Raupach, Bradley & Ghadiri (1987) experiments .....	50
3.5.2.2	Simulation of the Frank & Ruck (2008) experiments .....	52
3.6	Results .....	55
3.6.1	Flow profiles in the middle of the clearings .....	56
3.6.2	Flow profiles throughout the clearings .....	57
3.6.2.1	Boreal forest .....	57
3.6.2.2	Sensitivity to forest morphology .....	57
3.6.3	Distribution of wind-energy-related variables .....	58

3.6.3.1	Boreal forest .....	60
3.6.3.2	Variation with hub height .....	62
3.6.3.3	Sensitivity to the forest morphology .....	64
3.7	Conclusion .....	66
CHAPITRE 4 DISCUSSION DES RÉSULTATS .....		69
4.1	Modélisation d'une CLSHH .....	69
4.1.1	Originalité du travail .....	69
4.1.2	Apport du travail de recherche .....	70
4.2	Comportement de l'écoulement au-dessus des zones de coupe .....	70
4.2.1	Originalité du travail .....	70
4.2.2	Mise en parallèle avec les résultats à proximité du couvert .....	71
4.2.3	Comparaison avec l'état de l'art .....	72
4.2.4	Retour sur les limites de la recherche .....	73
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....		75
5.1	Conclusion .....	75
5.2	Recommandations .....	77
ANNEXE I INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES SUR L'ÉCOULEMENT .....		79
ANNEXE II PROFILS LONGITUDINAUX POUR DIFFÉRENTES MORPHOLOGIES DE FORÊT .....		81
BIBLIOGRAPHIE .....		81



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1      Relative change of wind-energy-related parameters above the clearing with respect to the flow above an undisturbed forest .....	61





## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1	The three LAD distributions tested ..... 47
Figure 3.2	Vertical profiles of normalized streamwise velocity and TKE from the present numerical results (solid line) compared with observed experimental data (symbols) (Arnqvist, Segalini, Dellwik & Bergstrom, 2015) and with the profiles obtained if the shear stress is constant through the domain ( <i>i.e.</i> $\gamma = 1$ ) (dashed) ..... 49
Figure 3.3	Vertical profiles of normalized mean wind speed from the present numerical results (solid line) against observed experimental data (symbols) (Raupach <i>et al.</i> , 1987) at different locations ..... 52
Figure 3.4	Vertical profiles of normalized TKE from the present numerical results (solid line) against observed experimental data (symbols) (Raupach <i>et al.</i> , 1987) at different locations ..... 53
Figure 3.5	Vertical profiles of the stream-wise velocity from the present results (solid line) against experimental data (triangles) and numerical data (dotted) (Frank & Ruck, 2008) at different locations ..... 54
Figure 3.6	Vertical profiles of the TKE from the present results (solid line) against experimental data (triangles) and numerical data (dotted) (Frank & Ruck, 2008) at different locations ..... 55
Figure 3.7	Vertical profiles of mean velocity and TKE in the middle of clearings of different diameters ( $3h \leq D \leq 100h$ ) compared with the profile above undisturbed forest and the profile without any vegetation ..... 56
Figure 3.8	Horizontal profiles of mean velocity above clearings of different sizes compared with the profiles above undisturbed forest ..... 58
Figure 3.9	Horizontal profiles of TKE above clearings of different sizes ( $D/h = 3, 10, 25, 75$ ) compared with the profiles above undisturbed forest ..... 59
Figure 3.10	Longitudinal distribution of the relative change of E above the clearing in the $7h$ thick layer as a function of the clearing size ..... 60
Figure 3.11	Longitudinal distribution of the relative change of cTKE throughout the clearing in the $7h$ thick layer as a function of the clearing size ..... 61

Figure 3.12	Longitudinal distribution of the relative change of the average wind shear throughout the clearing in the $7h$ thick layers as a function of the clearing size .....	62
Figure 3.13	Longitudinal distribution of the cumulative wind-energy-related variables over the clearing in the $7h$ thick layers as a function of the clearing size for three hub height .....	63
Figure 3.14	Longitudinal distribution of the cumulative wind-energy-related variables over the clearing in the $7h$ thick layer as a function of the clearing size for the three LAD .....	64
Figure 3.15	Longitudinal distribution of the cumulative wind-energy-related variables over the clearing in the $7h$ thick layer as a function of the clearing size for the four LAI .....	65

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLS	Couche Limite Surface
CFD	Dynamique des fluides (Computational Fluid Dynamics)
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)
LAD	Densité de surface foliaire (Leaf Area Density)
LES	Simulation des grandes structures de la turbulence (Large Eddy Simulation)
RANS	Méthode de la moyenne de Reynolds (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation)
OpenFOAM	Open Source Field Operation and Manipulation Software
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent
SIMPLER	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised
TKE	Énergie cinétique turbulente (TKE)



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

### Coordonnées

$x, y, z$  Coordonnées cartésiennes

### Symboles Romains majuscules

$C_D$  Coefficient de traînée

$C_{\varepsilon 1}$  Constante du modèle de turbulence k- $\varepsilon$

$C_{\varepsilon 2}$  Constante du modèle de turbulence k- $\varepsilon$

$C_{\varepsilon 4}$  Constante du modèle de turbulence k- $\varepsilon$  modifié

$C_{\varepsilon 5}$  Constante du modèle de turbulence k- $\varepsilon$  modifié

$C_\mu$  Constante du modèle de turbulence k- $\varepsilon$  modifié

$D$  Hauteur de déplacement du profil logarithmique, [m]

$G_k$  Production de l'énergie cinétique turbulente

$S_k$  Terme source de l'équation de transport de k, [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]

$S_\varepsilon$  Terme source de l'équation de transport de  $\varepsilon$

$S_{u,i}$  Terme source de l'équation de quantité de mouvement

$TI$  Intensité turbulente (Turbulence Intensity) (symbole ?)

$U$  Champs de vitesse moyen, [m/s]

$U_{\text{ref}}$  Vitesse moyenne du vent à la hauteur de référence, [m/s]

### Lettres Romains minuscules

$f$  Paramètre de Coriolis, [m]

$g$  Accélération de la pesanteur, [m]

$h$  Hauteur de la forêt, [m]

$k$  Énergie cinétique turbulente, [J/m<sup>3</sup>]

$u_*$  Vitesse de friction, [m/s]

$u_{\text{ref}}$	Vitesse de référence, [m/s]
$u_{\text{top}}$	Vitesse au sommet du domaine, [m/s]
$p$	Pression, [Pa]

### Symboles Grecs

$\alpha$	Densité de surface foliaire, [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\beta_d$	Constante du modèle de turbulence $k - \varepsilon$ modifié
$\beta_p$	Constante du modèle de turbulence $k - \varepsilon$ modifié
$\Gamma$	Coefficient de diffusion de l'équation générale de transport
$\Delta_x$	Grandeur de maille dans la direction $x$ , [m]
$\Delta_z$	Grandeur de maille dans la direction $z$ , [m]
$\kappa$	Constante de von Karman
$\varepsilon$	Taux de dissipation de la turbulence, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosité dynamique, [kg/(m · s)]
$\mu_T$	Viscosité turbulente / tourbillonnaire, [kg/(m · s)]
$\nu$	Viscosité cinématique, [m <sup>2</sup> /s]
$\nu_T$	Viscosité cinématique turbulente, [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Masse volumique de l'air, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_\varepsilon$	Coefficient du modèle de turbulence $k - \varepsilon$
$\sigma_k$	Coefficient du modèle de turbulence $k - \varepsilon$
$\tau$	Contrainte de cisaillement [Pa]
$\tau_{ij}$	Contrainte de Reynolds [Pa]
$\tau'$	Contrainte cinématique de cisaillement [m/s <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Scalaire général d'intérêt

## INTRODUCTION

### 0.1 Mise en contexte

Devant la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer la dépendance aux énergies fossiles, le développement de la filière éolienne apparaît comme une réponse pertinente. Propre et renouvelable, elle représente également une option abordable, avec aujourd'hui le coût le plus faible parmi les nouvelles sources de production d'électricité au Canada (CanWEA, 2019a). Elle est l'une des filières de production d'électricité qui connaît actuellement la plus forte croissance au monde et le Canada n'échappe pas à ce phénomène, où elle a été la source de production d'électricité la plus mise en service au cours de ces cinq dernières années. Au Québec, où l'immensité du territoire fournit un potentiel éolien considérable, la ressource éolienne tient une place de plus en plus importante suite aux politiques énergétiques (2006-2015) et (2016-2030) du gouvernement. La province québécoise accueille 30% de la puissance installée au Canada et représente le deuxième marché de l'industrie éolienne du pays. Elle disposait en décembre 2019 de 1990 éoliennes en activité, réparties en 47 parcs éoliens actifs, permettant d'atteindre une puissance installée de 3882MW et de couvrir environ 5% de la demande en électricité du territoire (CanWEA, 2019b).

Le domaine étant en pleine expansion, les sites idéaux pour l'installation de parcs éoliens se raréfient, ce qui amène les communautés industrielles et scientifiques à se tourner vers des terrains plus contraignants. L'exploitation éolienne en milieu forestier connaît ainsi une attention grandissante depuis plusieurs années, notamment au Québec, où les forêts sont présentes sur une large partie du territoire. Cependant, la présence de végétation perturbe l'écoulement du vent et intensifie les turbulences, ce qui peut nuire aux performances des turbines tout comme à leur durée de vie (Enevoldsen, 2017). Face à ce problème, ainsi que pour en faciliter l'installation et la maintenance, les installateurs de sites éoliens sont tentés de déboiser des étendues plus ou moins vastes autour de leurs turbines, ou de s'installer dans des zones déboisées pré-existantes.

Pourtant, l'écoulement du vent est perturbé par l'hétérogénéité créée dans le couvert forestier. Les conditions de l'écoulement ne correspondent alors ni à celles au-dessus d'un terrain vierge, ni à celles au-dessus d'un terrain complètement recouvert par la forêt, et il n'est pas certain qu'elles soient davantage favorables à l'installation de turbines éoliennes qu'en absence de déboisement. Outre le fait qu'il est essentiel de connaître les caractéristiques du vent pour le bon développement d'un projet éolien, ce manque de connaissance peut également pousser à déboiser inutilement de trop grandes étendues, les installateurs de sites éoliens pouvant être instinctivement tentés de déboiser la plus grande étendue possible pour diminuer les effets négatifs de la végétation sur le vent et ainsi retrouver un écoulement plus rapide et moins turbulent. Pourtant, il n'est pas certain que les conditions s'améliorent en augmentant la taille de la coupe.

Le comportement du vent au-dessus des zones de coupe à hauteur d'opération des éoliennes est encore mal connu. Tout particulièrement, l'influence des dimensions du déboisement et de la morphologie de la forêt sur la ressource éolienne et la turbulence n'a été que très sporadiquement étudiée. Pourtant, les études disponibles sur les écoulements autour des zones déboisées tendent à montrer que ces paramètres peuvent avoir une influence importante sur la vitesse moyenne de l'écoulement et sur son niveau de turbulence.

Les études d'écoulement du vent en terrains réels s'avèrent fastidieuses, longues et coûteuses dans la zone d'intérêt de l'éolien (soit environ 100m à 200m au-dessus du sol). Il est donc intéressant, voir nécessaire, de réaliser des études numériques. L'écoulement atmosphérique est décrit par des équations aux dérivées partielles qui, mis à part dans certains cas particuliers, ne peuvent pas être résolues analytiquement. De tels écoulements peuvent être étudiés grâce aux approches proposées par la mécanique des fluides numériques (ou computational fluid dynamics, CFD), largement répandues dans le domaine de l'ingénierie (Ferziger, Perić & Street, 2002). En discrétisant les équations aux dérivées partielles pour les résoudre algébriquement,



la CFD permet la résolution numérique des équations de conservation et l'obtention d'une approximation de la solution.

## **0.2 Objectif de recherche et aperçue de la méthodologie utilisée**

A la lumière de précédentes observations, ce travail de recherche a pour objectif d'étudier l'écoulement au-dessus des zones forestières déboisées à l'aide d'une étude numérique utilisant les méthodes de CFD afin de proposer des règles simples pour l'installation d'éoliennes dans ces zones. Cette étude explore l'effet de la taille du déboisement et de la position de l'éolienne, tout en prenant en compte l'effet de la morphologie de la forêt et de la hauteur du moyeu de l'éolienne. Il aspire à proposer un compromis acceptable entre la taille de la surface déboisée, l'énergie disponible et l'endommagement potentiel des turbines.

Pour répondre à cet objectif de recherche, l'écoulement du vent au-dessus des coupes forestières est étudié numériquement à l'aide d'une approche RANS couplée avec un modèle de fermeture  $k - \varepsilon$  modifié permettant de prendre en compte l'effet du couvert forestier. Les équations sont résolues en deux dimensions à travers un modèle CFD implémentés dans le logiciel libre OpenFOAM "Opensource Field Operation And Manipulation". L'écoulement atmosphérique du vent dans la couche limite de surface (CLS) supposée horizontalement homogène et neutre est modélisé en prenant soin de respecter les processus physiques dominants de la basse atmosphère à l'échelle microscopique et en suivant les recommandations actuelles sur les conditions aux limites. Les modèles numériques utilisés sont validés à l'aide de données expérimentales en soufflerie et sur le terrain disponibles dans la littérature. L'écoulement est simulé au-dessus d'une forêt contenant une zone déboisée de taille variable en utilisant différentes morphologies de forêt. En supposant qu'une éolienne est installée dans la zone déboisée, les changements relatifs des variables d'intérêt pour l'éolien sont évaluées dans la couche d'air qui rencontre les pâles pour des hauteurs de mats différentes.

Dans une première partie, une revue de littérature sur les processus physiques dominants dans la basse atmosphère et les principales caractéristiques de l'écoulement ainsi que sur les méthodes de modélisation et de simulation de l'écoulement atmosphérique est proposée. Ensuite, la démarche de travail est exposée. Pour continuer, le travail de recherche réalisé est présenté à travers l'article qui a été écrit dans le cadre de ce mémoire. Enfin, une discussion plus approfondie des résultats est formulée.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LITTÉRATURE**

Ce travail étudie l'écoulement du vent dans la couche limite atmosphérique (CLA) avec et sans couverts forestiers. Une revue de littérature a été réalisée sur les approches qui permettent de modéliser et simuler l'écoulement atmosphérique turbulent et les effets de la forêt en s'appuyant sur les processus physiques dominants dans la basse atmosphère.

Pour commencer, les principaux processus et mécanismes physiques en jeu dans la basse atmosphère sont décrits ainsi que les conditions du vent dans les coupes forestières et leurs répercussions sur l'implantation des éoliennes. Ensuite, les méthodes de modélisation numérique de l'écoulement atmosphérique turbulent avec couvert forestier et les techniques de simulation numériques sont présentées.

#### **1.1 Description de la mécanique et des processus atmosphériques**

##### **1.1.1 Mécanisme en jeu**

Les vents sont dirigés par quatre forces qui agissent sur l'air : la force de pression, la force de Coriolis, la force de gravitation de la terre, et la force des frottements. La première est générée par le gradient de pression produit par les différences de températures de l'air, qui peuvent être verticales (différence d'altitude) et horizontales (différence de latitude), ou par la topographie, comme dans le cas des vents de couloir. Elle est dirigée des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. La force de Coriolis est une force inertielle due à l'accélération du repère terrestre par rapport à un repère galiléen et elle s'exerce perpendiculairement au mouvement de l'air. La force de gravitation, dirigée vers le centre de la Terre, est la force d'attraction de la terre sur les parcelles d'air. La force de frottement, qui s'oppose au mouvement de l'air, est générée par les frottements moléculaires entre les molécules d'air en mouvement et le sol.

### **1.1.2 Structure verticale de l'atmosphère**

L'atmosphère peut être séparée en plusieurs couches et sous-couches en fonction des phénomènes dominants qui influencent l'écoulement. En contact direct avec la surface terrestre, la troposphère s'étend sur une altitude de 8km à 15km et contient près de 85% de la masse totale de l'atmosphère (Seinfeld, 2015). Elle se divise en deux couches : l'atmosphère libre et la CLA, en contact avec le sol. La zone d'intérêt pour les études éoliennes se situe dans les premières centaines de mètres d'altitude, compris dans la CLA.

#### **1.1.2.1 Couche limite atmosphérique**

La CLA est définie comme étant la zone de la troposphère où l'écoulement de l'air est directement influencé par la surface terrestre avec un temps de réponse court (de l'ordre de l'heure) (Stull, 1988). Les irrégularités du sol, la rugosité, le relief et le couvert végétal, tout comme l'évaporation ou les transferts de chaleur, impactent l'écoulement du vent de façon importante. L'écoulement y est très variant et majoritairement turbulent, et la traînée à la surface de la terre est importante. Cette couche comprend la couche d'Ekman, la CLS, et la sous-couche rugueuse.

La hauteur de la CLA est très variable et dépend de la surface terrestre, de la période de la journée et de la situation atmosphérique. Au-dessus des terres, elle suit majoritairement des cycles diurnes. Elle s'y étend sur 2 à 3 km en journée, où la convection est prépondérante, et seulement 100 m à 200 m durant la nuit (Kaimal & Finnigan, 1994; Stull, 1988).

#### **1.1.2.2 Couche limite de surface**

L'énergie récupérée par les turbines éoliennes est extraite des vents de la CLS, ce qui fait d'elle une zone d'intérêt majeure pour les études éoliennes. Aussi appelée couche limite de Prandtl, elle est définie comme étant les premiers 10% de la CLA. Généralement, les flux de quantité de mouvement et de chaleur y sont supposés conservatifs et égaux à ceux à la surface (Stull, 1988). Sa hauteur étant proportionnelle à celle de la CLA, elle est très variable : de l'ordre de 200 m à 300 m en pleine journée à seulement 20 m la nuit.

La plus grande partie de la turbulence de la CLA se trouve dans cette couche. Dans cette zone, la force de Coriolis est négligeable devant les forces de frottement dues au sol et la viscosité est majoritairement turbulente. La distribution du vent est principalement dirigée par la nature du sol et les conditions de stabilité thermique. Sous certaines hypothèses, le profil du vent moyen est proche d'une loi logarithmique.

### **1.1.2.3 La sous-couche rugueuse**

À la base de la CLS peut se distinguer la sous-couche rugueuse, qui est la zone où se mélangent les sillages créés par les obstacles du sol. Elle se caractérise par une forte turbulence et une dominance des forces de frottement. Sa taille et les caractéristiques du vent (notamment le cisaillement du vent) dépendent fortement de la nature du sol (herbes, roches, terre nue, etc.) et des obstacles présents (végétation, constructions, etc.). Sa hauteur est de quelques millimètres au niveau des océans et peut s'étendre jusqu'à plusieurs décimètres ou plusieurs mètres sur certaines natures de sol, notamment en zone urbaine. Cette couche est caractérisée par la hauteur de rugosité  $z_0$ , qui est proportionnelle à la rugosité de la surface. Théoriquement, elle correspond à la hauteur à laquelle la vitesse du vent devrait être nulle.

### **1.1.3 Stratification thermique et stabilité de l'atmosphère**

L'atmosphère peut être dans trois conditions de stabilité : neutre, stable, ou instable. Dans ce mémoire, les effets thermiques ne sont pas pris en compte et l'étude de l'écoulement est réalisée en supposant l'atmosphère neutre. Cependant, devant l'importance des effets thermiques sur l'écoulement atmosphérique et afin de contextualiser le choix d'une atmosphère neutre, les notions de stabilité thermique et de stratification thermique sont présentées.

La stabilité thermique de l'atmosphère permet de caractériser l'influence des gradients thermiques et des variations de température sur la distribution du vent et sur la turbulence. Au cours d'une journée, les rayons du soleil chauffent le sol, qui à son tour chauffe les parcelles d'air à sa proximité. Lors de l'échauffement d'une parcelle, sa densité diminue et la parcelle va alors

s'élever : c'est l'effet de flottabilité (Lange & Focken, 2006). La stabilité thermique permet de qualifier l'influence de l'atmosphère environnante sur le mouvement ascendant de la parcelle. Si le mouvement est amorti par l'atmosphère et que la parcelle est ramenée à sa position d'équilibre, l'atmosphère est considérée comme stable (Lange & Focken, 2006). Si au contraire le mouvement est renforcé et que la parcelle continue de s'élever, l'atmosphère est instable (Lange & Focken, 2006). Une atmosphère stable contribue à atténuer les perturbations qui se produisent, tandis qu'une atmosphère instable va les accentuer. Si l'on considère que l'atmosphère n'a pas d'influence sur le mouvement de la parcelle, elle sera alors considérée comme neutre.

La stabilité de l'atmosphère dépend de sa stratification thermique, qui correspond à la distribution verticale de la température au sein de l'atmosphère provoquée par les cycles du rayonnement solaire (Lange & Focken, 2006). La stratification dépend directement de la force de l'ensoleillement, donc du moment de la journée et des conditions météorologiques, ainsi que de la capacité thermique de la surface. Un jour ensoleillé aura tendance à créer une atmosphère instable, et le refroidissement du sol la nuit à créer une atmosphère stable. Au-dessus du sol terrestre (par opposition à l'océan), qui a une faible capacité thermique, les variations de stratification thermique sont rapides et responsables de variations rapides dans la stabilité de l'atmosphère et le profil de vitesse moyenne au cours de la journée.

#### **1.1.4 Les mécanismes de la turbulence**

La turbulence se traduit par une variation chaotique et aléatoire de la vitesse et des autres propriétés de l'écoulement dans l'espace et le temps (Versteeg & Malalasekera, 2007). Le mouvement du fluide est instationnaire même si les conditions aux limites restent constantes (Versteeg & Malalasekera, 2007). Dans le cas de l'écoulement atmosphérique, la turbulence peut être visualisée comme étant les rafales qui s'additionnent au vent moyen (Stull, 1988). Elle est composée de la superposition de nombreux mouvements irréguliers, les tourbillons, qui ont des tailles, périodes et forces différentes. Leurs tailles caractéristiques s'étalent de quelques millimètres pour les plus petits, jusqu'à la profondeur totale de la couche limite pour les plus

grands (de 100 m à 3000 m), et leur période de formation et dissipation de quelques secondes à plusieurs heures (Stull, 1988).

Deux mécanismes sont à l'origine de la turbulence atmosphérique, majoritairement due à l'effet du sol. La turbulence mécanique est due au cisaillement du vent créé par la traînée de la surface du sol sur l'air et dépend des caractéristiques de la surface (rugosité du sol, couvert, relief, etc.). Le vent devient turbulent, et les obstacles au sol (roches, végétations, constructions) génèrent des sillages turbulents et des zones de séparations. La turbulence thermique est due à la stratification thermique de l'air et à l'effet de flottabilité. Le réchauffement du sol par le soleil et de l'air l'avoisinant provoque la montée de courant d'air chaud, créant des tourbillons de grandes tailles. La stabilité thermique joue un rôle important en complément des phénomènes sources de turbulence, en atténuant ou amplifiant les turbulences en fonction des conditions de stabilité.

## **1.2 Caractéristiques de l'écoulement et faisabilité de l'implantation des éoliennes**

De nombreuses études s'intéressent au comportement de l'écoulement dans les blocs de coupe ainsi qu'à l'influence de la morphologie de la forêt. Cependant, la plupart d'entre elles ne s'intéresse pas au comportement de l'écoulement aux hauteurs d'opération des éoliennes mais à proximité du couvert végétal, notamment car elles étudient majoritairement les dommages potentiellement causés aux arbres.

A travers l'analyse des résultats disponibles dans la littérature, cette section présente d'abord les caractéristiques de l'écoulement du vent au sein et au-dessus des zones de coupe à proximité du couvert puis l'état de l'art sur l'étude de l'écoulement de la basse atmosphère pour l'installation d'éoliennes dans les zones de coupe.

### **1.2.1 Caractéristiques de l'écoulement au sein d'une zone déboisée**

Des revues bibliographiques sur les écoulements atmosphériques avec différents types de couverts forestiers ont été proposées par Raupach & Thom (1981), Finnigan (2000) et Patton & Finnigan

(2012). Cette section se concentre sur l'écoulement dans le cas d'un couvert forestier comprenant un ou plusieurs blocs de coupe.

### **1.2.1.1 Résultats expérimentaux disponibles dans la littérature**

Plusieurs études se sont appuyées sur des mesures en soufflerie pour étudier le comportement de l'écoulement dans les zones de coupe. Raupach *et al.* (1987) ont étudié l'écoulement en forêt avec une zone de coupe dans les cas de trois longueurs de déboisement différentes ( $4.3h$ ,  $12.8h$  et  $21.3h$ , où  $h$  est la hauteur moyenne des arbres). Leur travail a permis de valider les modèles numériques dans plusieurs études, dont celles de Flesch & Wilson (1999), Sogachev & Panferov (2006) et Dupont & Brunet (2008b). Chen, Black, Novak & Adams (1995) ont étudié les vents dans les grandes régions déboisées afin d'évaluer l'effet de la taille des coupes sur les dommages pouvant être causés aux arbres. Flesch & Wilson (1999), se penchant également sur les dommages causés aux arbres, ont étudié le comportement du vent dans une série de coupes dans le cas de deux coupes de longueurs différentes ( $1.7h$  et  $6.1h$ ). Plus récemment, Poëtte, Gardiner, Dupont, Harman, Böhm, Finnigan, Hughes & Brunet (2017) ont étudié l'écoulement dans un enchaînement de coupes et de bandes de forêts dans le cas de cinq longueurs de déboisement différentes ( $5h$ ,  $10h$ ,  $15h$ ,  $20h$ ,  $30h$ ) entre deux blocs de forêt de  $8.7h$  afin d'étudier l'impact du schéma de fragmentation du couvert forestier sur l'écoulement du vent.

### **1.2.1.2 Forme de l'écoulement en blocs de coupe**

Ces études ont permis de mettre en évidence des comportements caractéristiques de l'écoulement qui se mettent en place à basse altitude dans une zone déboisée au milieu d'une forêt. Pour commencer, la présence d'une zone déboisée n'a que peu d'effet sur le vent en amont de celle-ci (Raupach *et al.*, 1987; Frank & Ruck, 2008) et le profil du vent établi au-dessus et à l'intérieur de la forêt conserve la même forme jusqu'à la lisière (Hajer, 2016). Si la forêt amont est suffisamment longue, ce profil correspond à celui d'un écoulement pleinement développé en forêt. Au sein de la coupe, une zone calme où la vitesse du vent est faible se forme (Raupach *et al.*, 1987; Gash, 1986; Liu, Chen, Black & Novak, 1996; Chen *et al.*, 1995) immédiatement



après le passage forêt/clairière. Un espace de recirculation de l'air, qui peut être permanent ou intermittent avec un écoulement traversant la forêt (Raupach *et al.*, 1987; Bergen, 1975), peut alors se former. La formation d'une région de reflux est d'autant plus probable que la clairière est petite, le vent est fort, ou la densité de la forêt est élevée (Lee, 2000). Ces zones ont été observées par beaucoup d'auteurs, dont entre autres Bergen (1975), Raupach *et al.* (1987), Miller, Lin & Lu (1991a), Miller, Lin & Lu (1991b), Stacey, Belcher, Wood & Gardiner (1994), Sanz Rodrigo, van Beeck & Dezsö-Weidinger (2007) et Frank & Ruck (2008). En aval de cette zone calme, une zone de sillage apparaît, qui correspond à une région de turbulences élevées dans laquelle les rafales sont beaucoup plus fortes que dans une forêt sans déboisement (Gash, 1986; Raupach *et al.*, 1987; Chen *et al.*, 1995; Liu *et al.*, 1996). Entre les deux, une zone de transition est observée (Chen *et al.*, 1995). Dans le cas où les vents sont orientés perpendiculairement aux bandes de coupe ce même motif "zone calme/zone de sillage" se reproduit dans les séries de plusieurs blocs de coupes pour des dimensions, caractéristiques et architectures de blocs variées (Flesch & Wilson, 1999) .

### **Influence de la taille du déboisement**

Au sein de la coupe, la vitesse moyenne du vent augmente proportionnellement à la longueur de celle-ci (Frank & Ruck, 2008) et l'intensité des rafales augmente quand la clairière est plus grande (Raupach *et al.*, 1987). Raupach *et al.* (1987) montrent que si la clairière est assez grande pour permettre le recollement de l'écoulement, les configurations des différentes zones et des rafales restent inchangées pour les différentes longueurs de coupe. Dans le cas d'un enchaînement de découpes, Poëtte *et al.* (2017) ont montré qu'aucune structure particulière des blocs n'a généré une hausse globale de la turbulence plus importante que les autres. Si la zone déboisée est assez longue, un profil de vent classique peut se rétablir (Flesch & Wilson, 1999). La distance nécessaire pour retrouver ce profil diminue quand la rugosité de la surface de la clairière augmente (Hajer, 2016) et peut varier grandement d'un cas à un autre. Par exemple, Chen *et al.* (1995) ont observé qu'un éloignement de  $22h$  était nécessaire pour retrouver un profil logarithmique, tandis que Raynor (1971) ont observé un éloignement de seulement  $5h$ . Il est intéressant de noter que même dans le cas d'une clairière longue de plusieurs dizaines

de fois  $h$ , la vitesse moyenne du vent n'atteint jamais la vitesse qui aurait été obtenue s'il n'y avait eu aucun couvert végétal (Chen *et al.*, 1995; Sogachev, Mann, Dellwik, Bingöl, Rathmann, Jørgensen & Panferov, 2009).

### **1.2.1.3 Influence des caractéristiques de la forêt**

Les caractéristiques des arbres ont une influence significative sur l'écoulement au sein de la cavité (Dupont & Brunet, 2008a; Amiro, 1990a). Quand la densité de la végétation augmente, le vent s'équilibre plus rapidement et la turbulence générée est plus intense (Dupont & Brunet, 2008b). Quand elle diminue, la vitesse globale de l'écoulement s'accroît dans et après la clairière, en particulier à la lisière clairière/forêt (Miller *et al.*, 1991b). Dans le cas où la forêt est très peu concentrée (composée de troncs clairsemés) ou constituée d'une couronne végétale haute et compacte avec peu de sous-bois, le vent est emporté sous la canopée, ce qui crée un grand jet sous le couvert forestier et augmente considérablement la taille de la zone d'ajustement au sein de la clairière (Miller *et al.*, 1991b; Dupont & Brunet, 2008b).

### **1.2.2 Installation d'éoliennes en zone de coupe**

Enevoldsen (2017) explore les risques associés à l'énergie éolienne terrestre dans les zones forestières d'Europe du Nord, qui sont également composées de forêts boréales. Il présente un état de l'art sur l'énergie éolienne terrestre et les risques associés à son développement dans ces zones. Il indique notamment que les éoliennes placées dans les zones forestières subissent une augmentation drastique des charges de fatigue, ce qui augmente leurs coûts de maintenance et les rend moins rentables. La section ci-dessous s'intéresse plus spécifiquement à l'installation d'éolienne dans les zones de coupe.

### 1.2.2.1 Résultats disponibles dans la littérature

A notre connaissance, seulement deux études portent sur les conditions du vent dans les coupes forestières pour une application à l'éolien : celle de Sanz Rodrigo *et al.* (2007) et celle de Sogachev *et al.* (2009).

Sanz Rodrigo *et al.* (2007) ont étudié en soufflerie l'écoulement dans un bloc de coupe d'une dimension fixe de  $5h$ . En supposant qu'une éolienne de 2MW avec une hauteur de moyeu de 70m ( $3.5h$ ) et un diamètre de rotor de 40m ( $2h$ ) y était installée et en s'appuyant sur la norme IEC61400-1 (Int, 1999), ils ont estimé la faisabilité technique de l'implantation d'éoliennes dans des zones déboisées en forêt. Afin d'éviter la couche de cisaillement qui se forme dans la clairière, ils ont estimé que la distance entre le rotor et le sol doit être d'au moins deux fois la hauteur de la forêt.

A l'aide du modèle SCADIS (scalar distribution) (Sogachev, Menzhulin, Heimann & Lloyd, 2002), Sogachev *et al.* (2009) ont étudié les effets de la taille d'un déboisement circulaire d'un diamètre de  $3h$  à  $75h$  ( $h$  étant la taille moyenne des arbres de la forêt) sur la disponibilité de l'énergie éolienne, l'énergie turbulente cinétique cumulée et le cisaillement moyen dans une couche d'air comprise entre  $2h$  et  $5h$  au-dessus de la zone de coupe. Ils montrent qu'il y a une grande variabilité spatiales des caractéristiques considérées dans la coupe et qu'en fonction à la fois des propriétés de l'éolienne et de son emplacement dans la coupe, on peut obtenir une augmentation ou une diminution de l'énergie récupérée par la turbine.

Il y a également dans la littérature des études sur des problématiques proches. Zendehbad, Chokani & Abhari (2016) ont étudié l'impact de la forêt sur le rendement énergétique et la maintenance des éoliennes. Ils ont mesuré sur le terrain la vitesse et la direction du vent, l'intensité des turbulences, ainsi que les déflexions aéroélastiques de la tête de la tour dans le cas d'une éolienne précédée ou non d'un couvert forêt. Récemment, Adedipe, Chaudhari & Kauranne (2020) ont étudié à l'aide de simulations numériques RANS l'influence de la densité de couvert sur l'écoulement de la CLA et sur le sillage des éoliennes au-dessus de forêts homogènes et infinies.

### 1.2.2.2 Comportement de l'écoulement au-dessus du déboisement

A hauteur d'éolienne, l'écoulement de la CLS est encore grandement influencé par la végétation, et l'effet induit dépend de la structure du couvert végétal et de ses caractéristiques, comme la taille des arbres, leur coefficient de traînée, ou la distribution verticale de densité de feuillage (Adedipe *et al.*, 2020; Dalpé & Masson, 2009).

Lors du passage dans un bloc de coupe, la vitesse moyenne du vent et ses propriétés turbulentes sont très différentes de celles qui se seraient établies au sein d'une forêt continue ou en absence de couvert végétal, et ce même bien au-delà de la forêt (Sogachev *et al.*, 2009). Ces modifications ont un impact sur les performances et la durabilité des turbines éoliennes (Sogachev *et al.*, 2009; Enevoldsen, 2017), grandement impactées par les turbulences et le cisaillement au sein de l'écoulement. Pourtant, au sein de la cavité, la vitesse globale du vent, et donc son énergie disponible, est généralement inférieure à celle sur terrain vierge. Sanz Rodrigo *et al.* (2007) a observé qu'au centre de la zone de coupe et à la hauteur d'opération des éoliennes, les vitesses extrêmes et l'intensité des turbulences augmentent respectivement de 15 à 30 % et de 4 à 9 % tandis que l'énergie éolienne est réduite de 5 à 20 %. Sogachev *et al.* (2009) concluent que même dans des clairières d'un diamètre de 75h, la vitesse du vent n'est toujours pas restaurée.

A notre connaissance, il n'existe pas d'études sur l'influence de la morphologie de la forêt sur l'écoulement à hauteur d'éolienne au-dessus d'un bloc de coupe dans une forêt supposée infinie. Dans le cas où le déboisement suit une bande de forêt, Sanz Rodrigo *et al.* (2007) ont montré que la densité du couvert a un impact plus faible dans les cas où la forêt amont est plus longue, car moins d'air traverse la forêt. Ils ont également montré que la vitesse moyenne, l'énergie disponible et le cisaillement de l'écoulement était indépendant de la densité de la forêt, tandis que l'intensité turbulente et les rafales augmentaient avec la densité. Adedipe *et al.* (2020) ont observé que l'effet d'une augmentation de la densité de feuille sur l'écoulement varie en fonction de l'altitude et ils ont montré qu'à hauteur des éoliennes actuelles (110m de haut), la vitesse moyenne augmentait avec l'augmentation de la densité de la forêt, tandis que l'énergie cinétique turbulente ne variait pas de façon monotone.

### **1.3 Modélisation numériques de l'écoulement de la CLA avec forêt**

La résolution des équations de la turbulence demeure aujourd'hui un problème complexe. En effet, les valeurs de champs des écoulements turbulents varient de façon brusque, importante, et irrégulière. Les nombreuses fluctuations de courtes périodes compliquent la résolution de l'écoulement et rendent la simulation numérique directe (ou Direct Numerical Simulation, DNS) impossible dans la plupart des cas réels, le coût de calcul étant trop important (Lange & Focken, 2006). Afin de traiter les écoulements fluides turbulents, différents modèles mathématiques ont été développés (Versteeg & Malalasekera, 2007). Ils se regroupent principalement en deux types de méthodes : les modèles de simulations de grandes échelles (ou Large Eddy Simulation, LES), basés sur des équations filtrées dans l'espace, et les modèles de moyenne de Reynolds (ou Reynolds Average Navier-Stokes, RANS).

#### **1.3.1 Hypothèses de l'écoulement dans la CLA**

Lors de l'étude de l'écoulement dans la CLA, l'air de l'atmosphère est considéré comme un fluide newtonien dont le mouvement est décrit par les équations de Navier-Stokes. L'écoulement se fait généralement à nombre de Reynolds élevé. Le fluide est généralement considéré comme incompressible, une hypothèse qui se vérifie bien pour les applications de micro-météorologie (Arya, 2001). L'écoulement y est turbulent et ses caractéristiques dépendent du type de surface, du relief, et des conditions de stabilité.

#### **1.3.2 Modèles de turbulence**

##### **1.3.2.1 Méthodes de modélisation**

Les écoulements atmosphériques étant majoritairement turbulents, l'emploi d'un modèle de turbulence est généralement nécessaire en CFD. Les deux approches les plus utilisées pour traiter la turbulence dans la CLA sont celles citées précédemment : l'approche RANS et LES.

(Sumner, Watters & Masson, 2010; Sanz Rodrigo, Chávez Arroyo, Moriarty, Churchfield, Kosović, Réthoré, Hansen, Hahmann, Mirocha & Rife, 2017).

L'état de l'art de l'étude numérique des écoulements atmosphériques par CFD pour l'éolien a été réalisé par Sumner *et al.* (2010) et plus récemment par Sanz Rodrigo *et al.* (2017). À la lumière des avancées dans le domaine, ils revoient la position de la revue antérieure de Finnigan (2000) sur l'étude des écoulements avec couvert forestier, selon laquelle de tels écoulements ne pouvaient être modélisés que par des méthodes LES à cause de leur nature fortement tourbillonnaire et instationnaire. En effet, l'évaluation des vents pour l'éolien repose maintenant souvent sur les modèles RANS (Sanz Rodrigo *et al.*, 2017), plus simples d'utilisation et plus économes en ressources, bien que l'utilisation des modèles LES tend à se répandre ces dernières années avec l'augmentation des capacités de calculs des ordinateurs.

Au sein des études disponibles dans la littérature, des problématiques connexes à celle de ce mémoire sont traitées à la fois par approches LES ou RANS. Des études numériques des variations du comportement du vent en fonction des caractéristiques du couvert forestier ont été réalisées à l'aide d'approches LES, comme l'influence de la densité du couvert et de la distribution verticale du feuillage (Dupont & Brunet, 2008a,b) ou l'influence de la taille de la coupe (Panferov & Sogachev, 2008). De nombreuses études d'écoulement avec couvert forestier pour une application à l'énergie éolienne emploient la méthode RANS, comme Dalpe *et al.* qui ont utilisé un modèle RANS pour étudier numériquement un écoulement pleinement développé dans et autour d'une forêt continue (Dalpé & Masson, 2008) et à proximité d'une lisière (Dalpé & Masson, 2009) ou Morales *et al.* (2019a; 2019b) ont évalué la précision de cette approche pour la modélisation d'écoulement au-dessus d'un terrain forestier pour l'évaluation de la ressource éolienne. Utilisant également une approche RANS, Frank & Ruck (2008) ont étudié numériquement l'écoulement au-dessus de zones de coupes afin de mieux comprendre le comportement de l'écoulement turbulent autour des forêts comprenant des déboisements. Lopes da Costa (2008) a réalisé des simulations numériques d'écoulement atmosphérique au-dessus de terrains complexes avec ou sans forêt pour l'évaluation de la ressource éolienne. Il

a montré que des modèles RANS adaptés pour la prise en compte des effets du couvert forestier pouvaient présenter des résultats comparables à ceux obtenus avec des modèles LES.

### **1.3.2.2 Modèles de fermeture**

L'utilisation d'un modèle de turbulence permet de fermer le système d'équations moyennées en exprimant de façon suffisamment précise et générale les contraintes de Reynolds et les termes de transport de scalaires inconnus dans les équations. Pour être convenable, un modèle de turbulence doit être précis, simple, et peu coûteux (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Plusieurs approches de fermeture turbulente, avec différentes hypothèses et degrés de complexité, sont utilisées pour modéliser l'écoulement atmosphérique turbulent avec couvert forestier. Les modèles d'ordre un et d'ordre un et demi sont les plus simples et les moins coûteux à mettre en œuvre. Cependant, ils reposent sur l'hypothèse de Boussinesq, qui suppose que la turbulence est isotrope, ce qui ne se vérifie pas au sein de la CLA. Les modèles d'ordres supérieurs et les modèles LES permettent de prendre en compte l'anisotropie de la turbulence atmosphérique mais sont plus complexes et plus coûteux.

Le modèle  $k - \varepsilon$  est un modèle d'ordre un et demi à deux équations qui fournit un compromis intéressant entre complexité et précision. Ils sont très populaires dans le domaine de l'énergie éolienne et sont devenus une référence pour l'étude de la météorologie de la CLA (Sogachev, Kelly & Leclerc, 2012b; Morales, 2017). Le modèle standard  $k - \varepsilon$  peut être adapté pour traiter la présence de zones forestières (voir section 1.3.4.2).

### **1.3.3 Profil d'écoulement pleinement développé sur terrain plat**

Pour modéliser le profil de vitesse moyenne du vent dans la partie basse de la CLA, il existe dans la littérature trois méthodes classiques : la loi du 1/7 ième, le profil logarithmique et le profil log-linéaire (Sumner & Masson, 2012). La première correspond à une régression entre des mesures, elle est très simple à utiliser, mais ne s'appuie sur aucune loi ou théorie physique et ne peut pas fournir un niveau élevé de précision. La deuxième présente l'avantage d'être

basée sur des lois physiques et d'être très facile à appliquer. Cependant elle n'est applicable que pour des conditions de stabilité atmosphérique neutres, ce qui est rarement établi dans les cas réels. La dernière, aussi appelée loi adiabatique, est une adaptation du profil logarithmique qui prend en compte les effets de la stratification thermique et permet d'étendre la loi logarithmique à toutes les conditions de stabilité. S'appuyant à la fois sur des lois physiques et des mesures empiriques, elle est la plus complète. Elle est néanmoins la plus complexe, notamment en raison de la difficulté à déterminer les paramètres nécessaires à son application (Sumner & Masson, 2012).

### 1.3.3.1 Profil logarithmique

De nombreuses études des performances éoliennes supposent que la CLS est neutre et que l'écoulement est pleinement développé (Sumner *et al.*, 2010). Cette démarche permet de conserver l'effet de cisaillement du vent sur le rotor de l'éolienne tout en simplifiant considérablement la complexité de la CLA. Ces hypothèses s'adaptent bien aux terrains plats.

Sous ces conditions, le profil logarithmique est généralement utilisé pour modéliser l'écoulement atmosphérique de la partie basse de la CLA. Il est notamment utilisé par Dalpé & Masson (2009), Morales *et al.* (2019a; 2019b), et Adedipe *et al.* (2020) dans le cas d'étude numérique de l'écoulement avec couvert forestier pour l'éolien.

Plusieurs hypothèses supplémentaires doivent être posées pour l'établir. L'atmosphère est supposé homogène horizontalement et l'écoulement incompressible et stationnaire. Il est également nécessaire de supposer que la variation de pression locale est négligeable et que les contraintes turbulentes sont largement supérieures aux contraintes visqueuses. Sous ces conditions, les équations de Navier-Stokes permettent d'obtenir le profil logarithmique de vitesse moyenne d'écoulement du vent. Pour plus de détail concernant l'intégration de ce profil, le lecteur est invité à se référer à (Sumner, 2006). Pour tout  $z > z_0$  et en absence de couvert végétal, la vitesse moyenne du vent dans la CLA suit alors :



$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (1.1)$$

Ce profil est simple à appliquer, car ils ne nécessitent que deux mesures de vitesse pour être généré.

### 1.3.3.2 Turbulences

Lors de l'utilisation d'un modèle de turbulence  $k - \varepsilon$ , l'hypothèse d'une atmosphère neutre dans la CLA permet de formuler également des expressions analytiques pour la distribution de l'énergie cinétique turbulente et de son taux de dissipation. Pour une couche limite neutre avec une rugosité du sol faible, Panofsky & Dutton (1984)) et Richards & Hoxey (1993) proposent comme expression des profils de  $k$  et  $\varepsilon$  :

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{K(z + z_0)} \quad (1.3)$$

avec  $C_\mu$  est une constante de fermeture du modèle.

Ces expressions ont été utilisées dans le cas d'étude numérique d'écoulement de la CLA avec couvert forestier pour l'éolien, notamment par Dalpé & Masson (2009), Morales *et al.* (2019a,b)), et Adedipe *et al.* (2020).

### 1.3.4 Modélisation de la forêt

Il existe dans la littérature deux approches classiques pour modéliser l'effet du couvert forestier sur l'écoulement du vent. La première, dit méthode de la hauteur de déplacement, repose sur la modification du profil logarithmique du vent, tandis que la seconde, dit modèle de la canopée, repose sur l'ajout de termes supplémentaires aux équations. Ces deux modèles ont été comparés

par Morales *et al.* (2019b) lors de l'étude de l'écoulement au-dessus d'un terrain forestier et le modèle de la canopée a montré de meilleurs résultats avec les résultats statistiques moyens.

#### 1.3.4.1 Hauteur de déplacement

La méthode la plus simple consiste à déplacer verticalement le profil logarithmique usuel du vent en introduisant une hauteur de déplacement qui dépend de la hauteur moyenne et de la densité de la forêt (Kaimal & Finnigan, 1994; Garratt, 1992; Pinard, 2000). Cette approche est facile à appliquer et demande peu de ressources. Elle permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans des cas simples et a été utilisée dans plusieurs travaux, notamment dans ceux de Raupach (1994) et Verhoef *et al.* (1997). Elle montre cependant des faiblesses dans des cas plus complexes et n'est pas performante pour les écoulements en bordure ou à l'intérieur des forêts. Elle n'est donc pas adaptée aux forêts non homogènes (Morales, 2017), les variations verticales de densité de feuillage ne peuvent pas être prises en compte et la différence de traînée aérodynamique liée à la particularité du feuillage est ignorée, ce qui peut avoir un impact important sur les prévisions de la vitesse du vent, notamment lors des changements de saison (Morales *et al.*, 2019a).

#### 1.3.4.2 Modèle de la canopée

Un modèle plus complexe a été proposé par Svensson & Häggkvist (1990). La forêt y est considérée comme un milieu poreux qui génère une perte de pression au sein de l'écoulement. Cette perte de pression relative, décrite par la loi de Darcy-Forchheimer (Ward, 1964) comprend un terme de friction visqueuse et un terme de résistance inertielle. Dans le cas des écoulements atmosphériques, qui s'effectuent à haut nombre de Reynolds, les pertes visqueuses deviennent négligeables par rapport aux pertes inertielles et la perte de charge s'exprime alors :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\beta \rho u_i |\mathbf{u}| \quad (1.4)$$

avec  $\beta$  la passabilité ou coefficient inertiel.

Pour les forêts, le coefficient inertiel correspond au produit du coefficient de traînée  $C_D$  et de la densité de surface foliaire de la forêt  $\alpha$  (Leaf Area Density, LAD) (Amiro, 1990a; Katul, Mahrt, Poggi & Sanz, 2004; Katul & Chang, 1999). La distribution de la densité de feuillage dépend de la hauteur  $z$ , et son intégration sur la hauteur de l'arbre correspond à son indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI).

Cette perte de charge est ajoutée dans les équations du mouvement à travers un terme source comme une force de traînée qui reproduit la dissipation de mouvement créé par les arbres :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -C_D \alpha \rho u_i |\mathbf{u}| \quad (1.5)$$

La difficulté de ce modèle réside dans la détermination des coefficients  $C_D$  et  $\alpha$ , qui dépendent directement de la forêt et de l'espèce des arbres la constituant. Dans la littérature, des valeurs sont proposées pour les types d'arbre classiques. Le coefficient  $C_D$  est souvent considéré constant et sa valeur varie généralement de 0.1 à 0.3. Pinard & Wilson (2001) a comparé le choix d'un coefficient de traînée qui varie verticalement à celui d'un coefficient constant pour une forêt de Pins de 14m de haut et a conseillé l'utilisation d'un  $C_D$  constant. Amiro (1990a) présente des valeurs de  $C_D$  et  $\alpha$  pour des forêts d'épinettes noires, de pins gris et de peuplier faux-tremble et Endalew, Hertog, Gebrehiwot, Baelmans, Ramon, Nicolaï & Verboven (2009) ont proposé trois ensembles de valeurs standards qui prennent en compte la variation de feuillage des arbres avec les saisons. Il a été montré que le coefficient  $C_D$  dépend également de la vitesse de l'écoulement entrant dans la forêt Mayhead (1973). Pour l'étude numérique de l'impact de la densité de la forêt sur l'écoulement, Adedipe *et al.* (2020) ont fait le choix d'utiliser un coefficient  $C_D$  qui varie avec la vitesse du vent, tandis que Sogachev *et al.* (2009) ont fait consciemment le choix d'un coefficient  $C_D$  constant, estimant que les résultats ne seraient pas notablement impactés.

Pour prendre en compte la turbulence générée par la forêt, les équations de transport de  $k$  et  $\varepsilon$  sont également modifiées avec les termes source, dont la forme originale est (Svensson & Häggkvist,

1990) :

$$S_k = -C_D \alpha (\beta_p U^3 - \beta_d k U) \quad (1.6)$$

$$S_\varepsilon = -C_D \alpha \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 4} \beta_p U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d k U) \quad (1.7)$$

#### 1.3.4.3 Formulation des termes source

La formulation des termes source et les valeurs des coefficients du modèle ont été largement discutées dans la littérature et il n'existe toujours pas de consensus. La forme usuelle des termes a été proposée par Liu *et al.* (1996). L'une des premières méthodes de calcul des coefficients dans le cas d'un écoulement prenant place dans la CLA ainsi que l'une des plus populaires pour cet usage est celle proposée par Katul *et al.* (2004), elle-même basée sur le travail de Sanz (2003). Cette méthode a été utilisée et validée dans de nombreux travaux qui étudiaient l'écoulement turbulent avec une forêt, comme entre autres, ceux de Desmond, Watson, Aubrun, Ávila, Hancock & Sayer (2014), Lopes da Costa, Castro, Palma & Stuart (2006), Dalpé & Masson (2009) et Morales *et al.* (2019b). Les résultats de plusieurs formes de modèles  $k - \varepsilon$  modifiés disponibles dans la littérature (Svensson & Häggkvist, 1990; Liu *et al.*, 1996; Sanz, 2003; Green, 1992; Katul *et al.*, 2004) ont été comparés à ceux obtenus à l'aide de modèles LES par Lopes da Costa (2008). Il a conclu que le plus performant était celui de Sanz (2003) et Katul *et al.* (2004), qui propose des performances comparables à celles des LES. L'auteur a également proposé un processus de calcul amélioré aboutissant à un nouvel ensemble de coefficients qui offrent des résultats plus proches des simulations LES prises pour référence et des résultats expérimentaux que les coefficients proposés précédemment. Ces coefficients ont été utilisés avec succès par Desmond *et al.* (2014), Desmond, Watson & Hancock (2017), et Adedipe *et al.* (2020). Sogachev & Panferov (2006) ont proposé une modification de la forme des termes source afin de mieux reconstruire le rapport entre les taux de production et de dissipation de l'énergie cinétique turbulente dans le couvert végétal et de réduire la sensibilité du modèle à la constante  $C_\mu$ . Pour une description détaillée du processus de calcul, le lecteur est invité à se référer à Sogachev & Panferov (2006) et Sogachev (2009). Leur modèle a été largement testé dans leurs

propres études, et a également été utilisé avec succès par Arroyo, Rodrigo & Gankarski (2014) et Boudreault, Bechmann, Tarvainen, Klemetsson, Shendryk & Dellwik (2015). Plus récemment, Lopes, Laginha Palma & Lopes (2013) ont également proposé une révision des constantes.

### 1.3.5 Modélisation d'une CLA horizontalement homogène

Lors de la simulation d'écoulement atmosphériques prenant place dans la CLA, il est important de créer une couche limite horizontalement homogène (Richards & Hoxey, 1993; Blocken, Stathopoulos & Carmeliet, 2007; Franke & Baklanov, 2007; Hargreaves & Wright, 2007), ce qui reste encore aujourd'hui un défi (Richards & Norris, 2019). En l'absence de perturbation, le modèle doit être capable de produire un écoulement horizontalement homogène à travers tout le domaine et il peut alors être particulièrement difficile de maintenir les caractéristiques de la turbulence. Pour y parvenir, il est important que toutes les équations de conservation soient en équilibre et les conditions aux limites jouent alors un rôle déterminant. Cette section présente les conditions à respecter disponibles dans la littérature pour créer une CLA horizontalement homogène sur un terrain plat et rugueux avec un modèle de fermeture  $k - \varepsilon$ .

Un grand nombre d'auteurs s'appuie sur l'approche originellement proposée par Richards & Hoxey (1993), largement répandues dans le domaine (comme en témoigne, entre autres, le grand nombre de travaux où l'article a été cité), qui correspond à un ensemble de conditions aux limites associés au modèle  $k - \varepsilon$  qui créent des conditions homogènes en se basant sur le profil logarithmique du vent (Richards & Hoxey, 1993; Richards & Norris, 2011). L'écoulement est alors entraîné par une contrainte de cisaillement supposée constante à travers le domaine (Richards & Hoxey, 1993; O'Sullivan, Archer & Flay, 2011; Richards & Norris, 2011). Il est alors important de ne pas négliger l'application de ce cisaillement à la limite supérieure du domaine pour maintenir l'écoulement et compenser la présence d'un effet de cisaillement au sol (Hargreaves & Wright, 2007; Richards & Norris, 2011). Au sol, cette approche est basée sur la loi des parois, qui a depuis été adaptée par Hargreaves & Wright (2007) afin de pallier à la surestimation de l'énergie cinétique turbulente au sol ainsi que par Parente, Gorlé, Beeck & Benocci (2011). Pour respecter les conditions d'équilibre, il est préconiser d'imposer en haut du domaine un gradient nul pour

l'énergie cinétique turbulente et une condition de Neumann (non nulle) adéquate pour son taux de dissipation  $\varepsilon$  (O'Sullivan *et al.*, 2011; Richards & Norris, 2011). Il est important d'utiliser la condition de Neumann adéquate pour  $\varepsilon$  plutôt qu'une valeur de gradient nulle (même si cette valeur est petite), car l'utilisation d'un gradient nulle mène à une erreur systématique à travers tout le domaine (O'Sullivan *et al.*, 2011).

Plus récemment, Richards & Norris (2015) ont montré qu'une couche limite entraînée par la pression était un modèle satisfaisant pour la moitié basse de la CLA où la contrainte de cisaillement diminue de façon approximativement linéaire avec l'altitude. Ils proposent alors des profils de vitesse et de propriétés de turbulence pour un écoulement entraîné par la pression avec une contrainte de cisaillement nulle imposée à la limite haute du domaine.

Finalement, Richards & Norris (2019) ont montré que la partie basse de la CLA peut être modélisée comme un écoulement partiellement entraîné par un gradient de pression et partiellement par une contrainte de cisaillement (qui diminue linéairement avec l'altitude). De plus, ils remarquent que dans cette zone atmosphérique, le profil de l'énergie cinétique turbulente (dont la diffusion est relativement faible) est fortement lié au profil de la contrainte de cisaillement. En suivant ces observations, ils proposent alors une marche à suivre complète pour créer une CLA horizontalement homogène en utilisant un modèle 1D. Quelque soit la méthode choisie, il est important d'être cohérent entre les profils d'entrée, les conditions en haut du domaine, et les conditions qui entraînent l'écoulement (Richards & Norris, 2015).

## 1.4 Simulation numérique de l'écoulement

L'écoulement atmosphérique est décrit par des équations aux dérivées partielles qui, mis à part dans certains cas particuliers, ne peuvent pas être résolues analytiquement. De tels écoulements peuvent être étudiés grâce aux approches proposées par la mécanique des fluides numériques, largement répandues dans le domaine de l'ingénierie (Ferziger *et al.*, 2002). La CFD permet la résolution numérique des équations de conservation et l'obtention d'une approximation de la solution. Elle repose sur l'utilisation d'une méthode de discrétisation qui

transforme les équations différentielles en un système d'équations algébriques qui peut être résolu numériquement (Ferziger *et al.*, 2002). Il existe différentes méthodes de discrétisation, les plus communément utilisées étant : les éléments finis, les volumes finis, et les différences finies. Ce mémoire s'attarde plus particulièrement sur la méthode des volumes finis.

Les notions présentées reposent en grande partie sur les ouvrages de Patankar (1980), Ferziger *et al.* (2002), et Moukalled, Mangani & Darwish (2016) et le lecteur est invité à s'y référer pour davantage de détails.

### **1.4.1 Méthode de résolution par volumes finis**

La méthode des volumes finis s'est largement répandue pour l'étude des performances des turbines éoliennes au sein de leur environnement (Sumner *et al.*, 2010). Cette approche repose sur le calcul de bilan local dans des volumes de contrôle de dimension finie. Plus générale que la méthode des différences finies, elle ne nécessite pas de maillage structuré et permet de résoudre des problèmes d'ingénierie particulièrement complexes.

#### **1.4.1.1 Discrétisation spatiale et temporelle**

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de volumes contingents, appelés volumes de contrôle (ou Control Volume, CV), mailles, ou cellules. Leur taille est un critère important qui affecte directement le temps de calcul et la précision des résultats. Plus le maillage est fin, plus les résultats sont précis, mais plus le temps de calcul est long. Un maillage adéquat dépend du problème considéré, pour lequel il faut réaliser un compromis entre précision et ressources nécessaires.

Les équations de transports sont résolues pour chaque CV. Pour y parvenir, elles sont discrétisées. L'hypothèse centrale de la discrétisation est que les équations différentielles qui régissent l'écoulement ont toutes la même structure. Elles s'écrivent alors sous la forme générale d'une équation de convection et de diffusion, dont l'expression instationnaire pour une variable d'intérêt  $\phi$  est (Patanekar, 1980) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla(\phi)) + S_\phi \quad (1.8)$$

Où  $\Gamma_\phi$  et  $S_\phi$  sont respectivement le coefficient de diffusion et le terme source spécifiques à la variable  $\phi$ .

Cette équation générale peut être discrétisée à l'aide d'une série de Taylor (Patankar, 1980). Ainsi linéarisée, elles sont résolues de manière itérative au centre de chaque CV pour y calculer les variables d'intérêt.

#### 1.4.1.2 Schéma d'interpolation

Afin que les variables d'intérêt soient calculées aux centres des cellules, leurs valeurs doivent également être connues à chacune des faces. Pour les différents termes de l'équation, leur évaluation se fait grâce à des schémas d'interpolation, qui proposent différents ordres de discrétisation. La précision du résultat augmente avec l'ordre de troncature des dérivés de la série de Taylor, mais un ordre trop haut peut provoquer des oscillations lors de la convergence (Ferziger *et al.*, 2002). Les ordres de discrétisation élevés sont nécessaires pour les géométries complexes, tandis que les schémas de premier ordre sont généralement suffisant quand l'écoulement est aligné avec le maillage (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Dans les plus couramment utilisés pour la simulation des écoulements dans la CLA avec couvert forestier modélisés par RANS, on retrouve les schémas d'interpolation linéaire, upwind (de premier et second ordre), QUICK (Quadratic Upwind Interpolation), et Gauss linéaire corrigé. Le schéma upwind présente l'avantage de prendre en compte la direction de l'écoulement du vent et d'être très stable. Cependant, il n'est pas adapté quand l'écoulement et le maillage ne sont pas alignés, car il perd en précision et peut générer de la diffusion numérique (Jasak, 1996). Lors de l'étude d'écoulement atmosphérique avec couvert forestier, il est par exemple utilisé au premier ordre pour les termes convectifs par Hajer (2016) et Frank & Ruck (2008) et au second ordre par Sumner & Masson (2012) ainsi que par Morales *et al.* 2019a; 2019b). Pour les termes de



diffusion le schéma différences finies centrées est précis et stable, et il un des schémas de second ordre les plus communs et les plus faciles à appliquer. Il est notamment utilisé par Frank & Ruck (2008), Sumner & Masson (2012) ainsi Morales *et al.* (2019a,b). Dans son mémoire, Dalpé (2007) a comparé les résultats des calculs effectués avec différents schémas d'interpolation dans le cas de modélisation RANS de l'écoulement atmosphérique sur terrain plat avec couvert forestier et a montré que les résultats ne présentaient pas de différences significatives.

#### **1.4.1.3 Couplage vitesse-pression et résolution du système d'équations discrétisées**

Dans le cas où l'équation générale 1.8 est appliquée à la quantité de mouvement, le gradient de pression (moteur de l'écoulement) est introduit sous forme d'un terme source. Il y a alors un couplage entre la pression et la vitesse, qui apparaissent tous les deux dans les équations de conservation du mouvement. Cependant, le gradient de pression est inconnu et aucune équation ne permet de le calculer explicitement à partir de la vitesse. Pour les écoulements compressibles, l'équation de continuité peut alors servir d'équations de transport pour calculer la pression indirectement. Dans le cas d'un fluide incompressible, une difficulté supplémentaire apparaît, car l'équation de continuité devient complètement découplée des équations de la quantité de mouvement, et il n'y a donc aucune équation de transport pour déterminer la pression. Un champ de vitesse peut alors satisfaire l'équation de continuité alors qu'il ne vérifie pas les équations du mouvement.

Afin de pallier à ce problème, l'utilisation d'un algorithme de couplage pression-vitesse est nécessaire. La résolution du système d'équations discrétisées se fait alors de manière itérative et la non-linéarité des équations est traitées en même temps que le couplage vitesse-pression. Les familles d'algorithmes les plus communément utilisées pour traiter les équations de Navier-Stokes couplées en pression et en vitesse sont les méthodes SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), proposées par Patankar (1980), et les méthodes PISO, proposées par Issa (1986). Initialement, elles s'appliquaient respectivement aux écoulements stationnaires et instationnaires. La famille d'algorithme SIMPLE propose plusieurs versions, dont l'algorithme

SIMPLE et ses versions modifiées SIMPLEC et SIMPLER. Ils sont décrits dans l'ouvrage de Patankar (1980) et le lecteur est invité à s'y référer pour davantage de détails.

### 1.4.2 OpenFOAM

Les simulations CFD ont été réalisées sur le logiciel libre OpenFOAM (Opensource Field Operation And Manipulation) qui permet de résoudre les équations de mécanique des fluides à l'aide de la méthode des volumes finis. Essentiellement constitué d'une bibliothèque logicielle en langage C++, il est facile d'accès et populaire dans le domaine de l'éolien. Construit selon la méthode de la programmation orientée objet, il propose sous forme de librairie et d'applications plusieurs modèles mathématiques d'écoulements fluides, plusieurs modèles de turbulence, les conditions aux limites standards, divers solveurs et plusieurs schémas de discrétisation. Dans la littérature, sa capacité à simuler correctement la CLA a déjà été démontrée (Sumner & Masson, 2012), y compris pour les terrains avec forêts (Morales *et al.*, 2019a; Adedipe *et al.*, 2020). Il propose également différentes librairies pour prendre en compte le couvert forestier suivant les méthodes proposées par Katul *et al.* (2004) ou par Sogachev & Panferov (2006).

## **CHAPITRE 2**

### **DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT**

Ce chapitre présente la démarche de travail adoptée pour répondre à la problématique. Les objectifs spécifiques, l'approche de recherche, ses limites ainsi que le choix des méthodes et des outils sont présentés. Le travail réalisé a conduit à la rédaction d'un article de journal.

#### **2.1 Démarche de travail**

##### **2.1.1 Objectifs spécifiques**

Ce travail souhaite élaborer des règles simples pour l'installation d'éoliennes dans les zones de coupe à l'aide de simulation numérique CFD. Pour y arriver, les objectifs spécifiques suivant sont fixés :

- Développer un modèle CFD unidimensionnel pour simuler correctement l'écoulement dans la CLS supposée horizontalement homogène et neutre et le valider à l'aide de mesures expérimentales disponibles dans la littérature.
- Utiliser ce modèle CFD unidimensionnel pour obtenir une solution de l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur des différentes forêts, afin d'utiliser les résultats comme conditions limites d'entrée pour les simulations de l'écoulement dans le cas où il y a un déboisement dans le couvert forestier.
- Développer et valider un modèle CFD bidimensionnel permettant de simuler l'écoulement dans le cas où il y a une zone déboisée dans une forêt à l'aide de mesures expérimentales obtenues disponibles dans la littérature.
- Évaluer l'influence de la taille du déboisement et de la morphologie de la forêt sur le comportement du vent et sur la distribution spatiale des variables d'intérêt pour l'éolien au-dessus de la zone de coupe à différentes hauteurs de mats.

### 2.1.2 Approche de recherche

Ce travail suit une approche en quatre étapes, qui correspondent aux quatre objectifs spécifiques.

#### **Modéliser une couche limite de surface horizontalement homogène au-dessus d'une forêt**

Pour simuler correctement l'écoulement du vent, il est nécessaire de modéliser de façon appropriée une couche limite de surface horizontalement homogène (CLSHH). Une pratique courante est de considérer la contrainte de cisaillement constante à travers le domaine (Richards & Hoxey, 1993; Richards & Norris, 2011). Cependant, pour des hauteurs supérieures à environ 1.5h, cette approche génère des profils d'énergie cinétique turbulente qui ne correspondent à la forme des profils expérimentaux comme ceux proposés par Sanz Rodrigo *et al.* (2007) ou Arnqvist *et al.* (2015). Une autre méthode est alors de modéliser la CLS comme un écoulement partiellement entraîné par le gradient de pression et partiellement par la contrainte de cisaillement, dont le profil décroît avec l'altitude au lieu d'être supposé constant (Richards & Norris, 2019). Un modèle de CLSHH est construit à partir de cette recommandation, d'une condition au limite originale pour les quantités turbulentes, et de conditions d'entrée et de sortie cycliques. Il est validé avec les mesures expérimentales obtenues en forêt fournies par Arnqvist *et al.* (2015). Les profils de vitesse et d'énergie cinétique turbulente sont comparés avec les mesures expérimentales ainsi qu'avec les profils obtenus quand la contrainte de cisaillement est supposée constante.

#### **Utiliser ce modèle CFD pour obtenir une solution de l'écoulement pleinement développé**

Lors de l'écoulement dans et au-dessus de la configuration forêt-déboisement-forêt, la forêt précédent le déboisement est supposée semi-infinie. Les conditions d'un profil pleinement développé doivent donc être imposées en entrée. Cependant, le profil théorique de l'écoulement dans la forêt est une relation empirique qui ne représente qu'approximativement le profil de vitesse. Afin de prescrire des conditions limites d'entrée appropriées, l'écoulement pleinement développé au-dessus et à l'intérieur des différentes forêts est simulé pour chaque morphologie de forêt étudiée et les résultats sont utilisés comme conditions limites d'entrée pour les simulations de l'écoulement dans et au-dessus de la configuration forêt-déboisement-forêt.

## **Valider le modèle CFD bidimensionnel pour simuler l'écoulement au-dessus d'un déboisement dans une forêt**

Le modèle permettant de prendre en compte le couvert forestier par ajout de termes source proposé par Sogachev & Panferov (2006) a été largement testé et validé dans divers cas de figure à l'aide d'observations issues d'expériences sur le terrain et en soufflerie. Cependant, il a majoritairement été appliquées avec un modèle de fermeture  $k - \omega$ . Tout particulièrement, il a été testé uniquement avec ce modèle de fermeture dans le cas d'un déboisement au sein de la forêt. Parallèlement, l'implantation de ce modèle déjà proposée dans OpenFOAM n'a pas été testée dans la littérature. Pour garantir la validité de la méthode numérique et la fiabilité du solveur CFD d'OpenFOAM, une validation est effectuée à l'aide de mesures en soufflerie disponibles de la littérature. L'écoulement est simulé dans et au-dessus d'un déboisement en reproduisant les conditions de la soufflerie. Les études choisies fournissent des résultats jusqu'à des altitudes éloignées du couvert forestier, afin de correspondre au mieux aux altitudes correspondant à celles où opèrent les éoliennes. L'étude portant sur une large gamme de longueurs de coupe, la validation est réalisée sur deux études expérimentales dont la taille de déboisement est différente d'un ordre de grandeur. Les profils verticaux de vitesse et d'énergie cinétique turbulente sont comparés à différents emplacements dans le domaine.

## **Évaluer l'influence des caractéristiques du déboisement**

Cette dernière étape est celle qui permet de répondre à l'hypothèse principale de ce projet de recherche. Il subsiste un manque de connaissances autour de l'exploitation éolienne dans les zones de coupe, particulièrement concernant l'effet de la taille de déboisement et de la morphologie de la forêt sur l'écoulement. L'influence de la taille du mat de l'éolienne est également mal connue. Pourtant, les études réalisées sur l'écoulement en zones déboisées s'intéressant aux dommages potentiellement causés aux arbres (qui se concentrent sur des altitudes inférieures à celles d'intérêt pour l'opération des éoliennes) montrent qu'à hauteur des arbres, la taille de la coupe et la morphologie de la forêt a une influence importante sur l'écoulement. Il est légitime de supposer qu'il en est de même à plus hautes altitudes, et qu'il est

possible d'établir des règles simples sur la longueur de coupe, en prenant en compte l'effet de la morphologie de la forêt et de la hauteur de l'éolienne.

Le travail mené doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- Augmenter la surface de forêt déboisée améliore-t-il les conditions pour l'exploitation éolienne au-dessus de la zone de coupe ?
- La position de l'éolienne au sein du déboisement a-t-elle une influence ?
- La hauteur du moyeu a-t-il une incidence sur les résultats ? Y a-t-il une hauteur de mat à privilégier lors de l'installation d'une éolienne au-dessus des zones de coupe ?
- Les conclusions dépendent-elles de la morphologie de la forêt ?

Pour répondre à ces questions, l'écoulement est modélisé au-dessus d'une configuration forêt-déboisement-forêt avec une taille de déboisement variable, d'abord en utilisant la morphologie d'une forêt boréale typique. Les paramètres d'intérêt retenus pour l'étude sont la vitesse moyenne de l'écoulement et l'énergie cinétique turbulente, ainsi que l'énergie cinétique turbulente cumulée, le cisaillement moyen du vent, et de l'énergie disponible contenue par la couche d'air rencontrée par les pales d'une potentielle turbine à hauteur de mat variable. Cette même approche est répétée pour plusieurs morphologie de forêt.

### **2.1.3 Limites de la recherche**

Ce travail de recherche se limite à l'étude de terrains plats et de forêts homogènes. Un certain nombre d'hypothèses et de simplifications ont été faites. L'atmosphère est supposée avoir une structure horizontalement homogène, hypothèse largement répandue pour l'étude de l'écoulement dans la couche limite atmosphérique. Comme suggéré dans la littérature (Sogachev *et al.*, 2009), le modèle suppose que la stabilité thermique de l'atmosphère est neutre et il néglige également les effets thermiques générés par la végétation et le déboisement. Pour finir, le coefficient de traînée de la forêt est supposé constant. Le travail ayant pour but d'être utilisé au Québec, les modèles de forêt sont basés sur les caractéristiques des forêts boréales. Les tailles de coupes

couvrent un intervalle allant du déboisement minimum nécessaire à la maintenance des turbines (soit 15m de diamètre) aux clairières d'1.5km.

#### **2.1.4 Choix des méthodes et des outils**

Une approche RANS est choisie. Les modèles RANS ont fait leur preuve dans la modélisation d'écoulement de vent avec forêt pour l'application à l'éolien ainsi que pour la modélisation des écoulement avec forêts et zones de coupe. Cette approche permet d'obtenir des résultats satisfaisant tout en utilisant des ressources de calcul raisonnables pour l'usage de la CFD dans l'industrie du vent. De plus, Lopes da Costa (2008) a montré que les résultats obtenus à l'aide d'un modèle RANS étaient comparables à ceux obtenus à l'aide de modèle LES plus coûteux.

Pour la résolution des équations, le logiciel libre et ouvert OpenFOAM a été choisi. Les options *atmPlantCanopyUSource* et *atmPlantCanopyTurbSource* sont utilisées pour appliquer les termes source du modèle de la canopée sur l'équation du mouvement et sur les équations de transport de la turbulence, respectivement. Le choix d'un logiciel libre permet d'appuyer l'avancée de l'utilisation de tels logiciels dans l'industrie du vent. L'emploi de modèles connus et la démonstration de leur efficacité permet de répandre et donner du crédit à l'utilisation de ce type de logiciel et de motiver le développement de nouveaux programmes ou options à accès libre. Pour finir, le post-traitement a été réalisé à l'aide de Python.

## **2.2 Structure du mémoire**

### **2.2.1 Présentation de l'article**

Le chapitre 3 présente l'article de journal rédigé dans le cadre de ce mémoire et soumis au Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. L'article répond aux différents objectifs spécifiques. Il présente l'intégralité du travail de recherche de ce mémoire, c'est à dire à la fois la modélisation et les simulations d'écoulements horizontalement homogène dans la CLS à

partir d'un nouvel ensemble de conditions aux limites, et également la modélisation et l'étude de l'écoulement au-dessus des coupes de différentes tailles avec différentes morphologies de forêt.

### **2.2.2 Présentation des annexes**

L'annexe propose un tableau qui résume les effets des changements des différents paramètres sur les caractéristiques de l'écoulement simulé. Ces paramètres sont la longueur du déboisement, la position dans le déboisement, la hauteur du rotor de l'éolienne, ainsi que la LAD et la LAI de la forêt.



## CHAPITRE 3

### ANALYSIS OF FOREST CLEARING EFFECTS ON WIND ENERGY PRACTICES

Emma Faurie<sup>1</sup>, Jonathon Sumner<sup>2</sup>, Christian Masson<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

<sup>2</sup> Département de Physique, Collège Dawson,  
3040 Rue Sherbrooke Ouest, Montréal, Québec, Canada H3Z 1A4

Article soumis à la revue « Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics » en juin 2021.

#### 3.1 Abstract

To better understand the effects of clearing size and forest characteristics on wind flow, two-dimensional Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) simulations were performed. A modified  $k - \varepsilon$  model accounting for vegetation drag was used following its validation against wind tunnel experiments.

The neutrally stable stratified Horizontally Homogeneous Atmospheric Surface Layer (HHASL) was driven both by a pressure gradient and a shear stress, which decreased with height, and original top boundary conditions for the turbulent quantities were introduced. Agreement with field measurements was significantly better than when the shear stress was assumed constant across the domain.

Clearing sizes ranging from  $1h$  to  $100h$  were investigated within a boreal forest, and with six other forest morphologies. Assuming that a wind turbine was installed in the clearing, spatial variations of available wind Energy (E), Average Wind Shear (AWS) and cumulative Turbulent Kinetic Energy (cTKE) in layers where the wind flow intersects with the swept area were estimated for three hub heights.

Unexpectedly, the results show that a forest clearing does not generate a gain in E or a significant reduction of cTKE or AWS compared to an undisturbed forested. Enlarging the clearing does

not necessarily improve these variables and, contrary to current practice, it appears optimal to minimize clearings.

### 3.2 Introduction

As the wind energy sector flourishes, suitable and convenient sites for the development of wind farms are becoming scarce. Consequently, there is a growing interest in the scientific and industrial wind energy community in the installation of wind parks in forested areas. Within the forest, wind farm developers take advantage of pre-existing clear-cuts, such as road clearings or firewalls, or create new ones to facilitate wind farm installation, operation, and maintenance and improve the quality of the wind. Clear-cuts appear attractive, however, it is not clear that wind conditions will be improved by cutting trees. The discontinuity in the forest canopy can decrease mean wind speed and increase turbulence, and as a consequence, both the turbine's overall power production and lifespan are reduced.

Despite the need to accurately predict wind characteristics for a reliable assessment of turbine performance and lifespan, there is a lack of both experimental measurements and numerical data on wind flow over forest disturbed by clear-cuts for wind power production. To our knowledge, the studies of Sanz Rodrigo *et al.* (2007) and Sogachev *et al.* (2009) are the only two in the published literature that study wind energy potential inside forest clearings and the technical feasibility of turbine siting in such conditions. Sanz Rodrigo *et al.* (2007) investigated in a wind tunnel the influence of the length of the leading forest and the forest porosity on the flow inside forest clear-cuts. Sogachev *et al.* (2009) investigated the effect of forest clear-cut size (in the range of 3 to 75 tree heights) on wind-energy-related variables, with a unique forest morphology. Most of their observations focus on heights which are much smaller than the operating height of modern wind turbines.

The use of CFD, and more specifically the finite volume method, is now well accepted by the wind energy community to assess wind characteristics and to predict the performance of wind turbines within their environment. In practice, it is predominantly based on the steady-state RANS

equations with turbulence closures assuming a neutral atmosphere and a surface-layer structure (Sumner *et al.*, 2010; Sanz Rodrigo *et al.*, 2017). Since it provides an interesting compromise between complexity and precision, the  $k - \varepsilon$  turbulence model is a very popular choice in the wind energy field (Sogachev *et al.*, 2012b). The usual formulation (Jones & Launder, 1972) has been adapted by several authors (Svensson & Häggkvist, 1990; Kobayashi, Pereira & Siqueira, 1994; Liang, Xiaofeng, Borong & Yingxin, 2006; Sogachev & Panferov, 2006; Sogachev, 2009) to account for canopy effects by considering the forest as a porous medium and adding source terms to the governing equations. This combination of methods has been successfully used in several studies of atmospheric wind flow over forested lands for wind energy applications, such as in Dalpé & Masson (2008, 2009), Morales *et al.* (2019a) and Adedipe *et al.* (2020), among others.

The area of interest for wind energy purpose is within the first few hundred meters and simulations are assumed to take place in the surface boundary layer. It is a common practice to assume that the shear stress is constant through the domain, as proposed by Richards & Hoxey (1993), O'Sullivan *et al.* (2011), and Richards & Norris (2011). Recently, Richards & Norris (2019) demonstrated that the shear stress has to decrease linearly with height for an equilibrium condition to exist, and as the TKE level and the shear stress are strongly linked in the surface layer, it is important to properly model the shear stress to obtain a proper TKE profile. To this end, the authors shows that the flow can be driven by a combination of a pressure gradient and a shear stress.

The main objective of the present study was to investigate the effect of the forest clear-cut size (for different LAD distributions and LAI) on relevant wind-energy-related variables at different hub-heights. This was achieved by implementing a two-dimensional CFD model to simulate wind flow velocity and turbulent quantities within and above forest clearings. The 2D RANS simulations were combined with the modified  $k - \varepsilon$  model proposed by Sogachev & Panferov (2006) and Sogachev (2009). As this is a first step in studying the problem, the computations were conducted on a flat terrain with a horizontally homogeneous forest. A neutral HHASL was created using the guidelines of Richards & Norris (2019) and a new top boundary condition was proposed based on their work and on the work of O'Sullivan *et al.* (2011). The numerical model

was validated using experimental measurements from the works of Arnqvist *et al.* (2015) for fully developed flow and of Frank & Ruck (2007, 2008) and Raupach *et al.* (1987) for wind flow over clear-cuts. The simulations over forest clear-cuts of various sizes were conducted with a reference forest which aimed to reproduce a typical boreal forest (Sogachev *et al.*, 2009; Amiro, 1990b; Sogachev *et al.*, 2002) as well as with three other LAD distributions and three other LAI ranging from 2.5 to 10. The results of this work can be distilled into guidance for the installation of wind turbines in forest clear-cuts regarding the clearance length around the turbine, the location of the turbine in the clearing as a function of the hub height and the forest morphology.

### 3.3 Mathematical model

The mathematical model is based on the RANS equations with the modified  $k - \varepsilon$  model taking into account the forest proposed by Sogachev & Panferov (2006). The equations are based on the assumptions of an incompressible flow and neutral atmosphere where gravity forces are handled implicitly. The Coriolis force is neglected since simulations took place in the atmospheric surface layer. The computations were conducted on a flat terrain and the forest was horizontally homogeneous.

#### 3.3.1 Governing equations

Additional source terms  $S_{U_i}$ ,  $S_\varepsilon$  and  $S_k$  introduced in transport equations allow the model to account for the effect of the canopy. The additional terms were applied only to the cells within the forest (under the average height) and do not appear elsewhere in the domain.

Following the Einstein summation convention and using Reynolds averaging, the continuity equation and the momentum equation may be expressed as follows :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + S_{U_i} \quad (3.2)$$

where  $x_i$  designates the Cartesian directions,  $U_i$  is the average wind velocity in the  $i^{th}$  direction (m/s),  $\rho$  is the air density (kg/m<sup>3</sup>),  $P$  is the pressure (Pa),  $\nu$  the kinematic viscosity (m<sup>2</sup>/s), and  $\overline{u'_i u'_j}$  the products of the fluctuating velocities.

The Reynolds stress tensor is modeled through the idea of a turbulent viscosity  $\mu_T$ , originally proposed by Boussinesq (1877) :

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

Using the Turbulent Kinetic Energy (TKE) ( $k$ ) and its dissipation rate ( $\varepsilon$ ), the turbulent viscosity is defined as :

$$\mu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

where  $C_\mu$  is a closure constant.

The transport equations for  $k$  and  $\varepsilon$  closing the system are respectively :

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = P_k - \varepsilon + S_k \quad (3.5)$$

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + S_\varepsilon \quad (3.6)$$

where  $P_k$  is the rate of shear production of  $k$ ,  $C_{\varepsilon 1}$  and  $C_{\varepsilon 2}$  are closure constants, and  $\sigma_k$  and  $\sigma_\varepsilon$  are the turbulent Schmidt numbers for  $k$  and  $\varepsilon$ , respectively.

Model constants are defined as  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$  and  $\sigma_k = 1.0$ . The standard  $C_\mu$  and  $\sigma_\varepsilon$  are modified to better match atmospheric surface layer conditions (Katul *et al.*, 2004) and were calibrated for each case. The former was determined based on standard deviation of the velocity components through (Katul *et al.*, 2004) :

$$C_\mu = \frac{1}{\left(1/2[(\sigma_u/u_\tau)^2 + (\sigma_v/u_\tau)^2 + (\sigma_w/u_\tau)^2]\right)^2} \quad (3.7)$$

where  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ , and  $\sigma_w$  are the standard deviations of velocity components to friction velocity and  $u_\tau$  is the friction velocity.

Then  $\sigma_\varepsilon$  was calculated via (Richards & Hoxey, 1993) :

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})\sqrt{C_\mu}} \quad (3.8)$$

where  $\kappa$  is the von Karman constant ( $\kappa = 0.41$ ).

### 3.3.2 Forest canopy model

Throughout the canopy model, forest canopies are described by an average forest height  $h$ , a drag coefficient  $C_D$ , and a Leaf Area Density (LAD) profile  $\alpha(z)$  ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ). The integration of the latter over the tree height leads to the LAI, which corresponds to an evaluation of the forest density.

$$LAI = \int_0^h \alpha(z) dz \quad (3.9)$$

In the momentum equation, the effects of the forest were modeled by adding the drag term  $S_{Ui}$  :

$$S_{Ui} = -C_D \alpha(z) |U| U_i \quad (3.10)$$

where  $S_{U_i}$  is the drag force per unit volume and  $|U|$  is the magnitude of the wind velocity.

As extensively discussed by Sogachev & Panferov (2006) and Sogachev (2009), the effects of the forest on turbulence are expressed entirely through a source term added to the dissipation rate equation. As proposed by the authors, only the additional enhanced dissipation term  $S_d$  was added to the equation, leading to :

$$S_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2}) (-S_d) \quad (3.11)$$

$$S_k = 0 \quad (3.12)$$

With the approximation (Sogachev & Panferov, 2006) :

$$S_d = 12C_\mu^{1/2} C_D \alpha(z) |U| k \quad (3.13)$$

### 3.4 Numerical Method

The equations were solved using the finite volume method. To compute two-dimensional flow around and within forest clearings and to impose suitable boundary conditions, it was necessary to first create a horizontally homogeneous atmospheric surface layer including the forests. Simulations of forested terrain with clearings were then carried out, using the fully developed computed profiles as the inlet condition.

#### 3.4.1 Solver

The equations were solved using the free, open-source CFD software OpenFOAM, which offers incompressible solvers and  $k - \varepsilon$  turbulence models with wall-functions. The equations have been discretized employing a second-order linear interpolation discretization scheme for all

diffusion terms, and an upwind scheme for convection terms (first and second order for the TKE and its dissipation rate  $\varepsilon$  and for velocity, respectively). The partial differential governing equations were solved on a structured grid using the finite volume method. With a steady-state formulation, the Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) by Patankar (1980) has been used to handle the pressure–velocity coupling. The solution was considered converged when the absolute tolerance on the normalized residuals is less than  $10^{-6}$  for all variables.

### **3.4.2 Development of a Horizontally Homogeneous Surface Layer**

#### **3.4.2.1 Boundary Conditions**

To set and test the numerical setting applied for the HHABL, a common approach is to use a 500m high, 5000m long domain, as done by Hargreaves & Wright (2007), Richards & Norris (2011) and Richards & Norris (2015), among others. However, the flow profiles may still not be constant even after the 5000m of fetch (Richards & Norris, 2019). Hence, following the guidelines of Richards & Norris (2019) and O’Sullivan *et al.* (2011), a one-dimensional solution was generated using periodic boundary conditions between the inflow and outflow boundaries for all of the variables. The wind flow was not modelled below the surface roughness length  $z_0$ , thus the lower boundary of the computational domain and the origin of the vertical were offset from the ground by  $z_0$ .

The flow was driven by a combination of a pressure gradient and a shear stress. As the TKE level and the shear stress are strongly linked, it is important to take into account that the shear stress decreases with height to obtain a proper TKE profile (Richards & Norris, 2019). In order to properly reduce the shear stress imposed at the top boundary, the ratio of the shear stress at the top of the domain to that at the ground  $\gamma$  was introduced and the theoretical depth of the Atmospheric Boundary Layer (ABL) was calculated. The shear stress decreases linearly with height and follows the equation (Richards & Norris, 2019) :



$$\tau_t = \rho u_\tau^2 \left( 1 + (\gamma - 1) \frac{z}{H_{domain}} \right) \quad (3.14)$$

Where  $\gamma$  is the ratio of shear stresses at the top and bottom of the domain and  $H_{domain}$  is the height of the calculation domain.

Therefore, the driving kinetic shear stress applied at the top of the domain is expressed as :

$$\tau'_t = u_\tau^2 \gamma \quad (3.15)$$

Since the simulations takes place in the lower half of the ABL,  $\gamma$  can be estimated as (Richards & Norris, 2019) :

$$\gamma = 1 - \frac{2H}{H_{ABL}} \quad (3.16)$$

The Coriolis parameter is introduced to determine the depth of the ABL via (Deaves & Harris, 1978) :

$$H_{ABL} = \frac{u_\tau}{6f} \quad (3.17)$$

where  $H_{ABL}$  is the depth of the ABL,  $u_\tau$  is the friction velocity and  $f$  the Coriolis parameter, calculated here for the Gaspé Peninsula.

The pressure gradient partially driving the flow is added through a source terme in the momentum equation (Richards & Norris, 2019) :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_*}{\partial x} = \frac{u_\tau^2}{H_{domain}} (\gamma - 1) \quad (3.18)$$

In the case of no vegetation,  $u_\tau$  is related to the resultant ground shear stress. In this study,  $u_\tau$  was related to the resultant shear stress in the vicinity of the top of the canopy.

In the vicinity of the forest, the wind velocity profile above the forest was assumed to be well approximated by the expression (Kaimal & Finnigan, 1994; Panofsky & Dutton, 1984) :

$$u = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_{0,f} - d}{z_{0,f}} \right) \quad (3.19)$$

where  $d$  is the displacement height of the forest and  $z_{0,f}$  the aerodynamic roughness length.

It is assumed that, at the top of the domain, the wind profile follows a logarithmic profile with a constant local friction velocity  $u_{\tau,t}$ , as considered by Dalpé & Masson (2009) :

$$u_{\tau,t} = \sqrt{\tau'_t} \quad (3.20)$$

Using the above local friction velocity, the top conditions for the TKE and its dissipation rate were based on the expression given by O'Sullivan *et al.* (2011) :

$$k = \frac{u_{\tau,t}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.21)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{-u_{\tau,t}^3}{\kappa(z_t + z_0)^2} \quad (3.22)$$

where  $z_0$  is the aerodynamic roughness length,  $u_{\tau,t}$  is the local friction velocity at the top and  $C_\mu$  is a constant.

At the lower boundary, a no-slip condition is used for the velocity and a log-law wall-function is used for turbulent quantities. Following the approach of Richards & Hoxey (1993), the local friction velocity near the ground is introduced as :

$$u_{\tau,g} = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \quad (3.23)$$

where  $k_p$  is the TKE in the first cell above the lower boundary.

The boundary condition expression of the turbulent dissipation rate at the wall adjacent cell "p" is (Parente *et al.*, 2011; Richards & Hoxey, 1993) :

$$\varepsilon_p = \frac{u_{\tau,g}^3}{\kappa(z_p + z_{0,g})} \quad (3.24)$$

where  $z_{0,g}$  is the surface roughness length.

The boundary condition expression for the turbulent viscosity is (Hargreaves & Wright, 2007; Morales *et al.*, 2019a) :

$$\nu_{t,p} = \nu_p \left( \frac{y + \kappa}{\ln(z_p + z_{0,g})/z_{0,g}} - 1 \right) \quad (3.25)$$

where  $\nu_p$  is the kinematic viscosity of the fluid and  $y+$  is defined as :

$$y+ = \frac{u_{\tau,g} z_p}{\nu_p} \quad (3.26)$$

For the TKE, a zero gradient condition is used at the ground.

### 3.4.2.2 CFD domain and mesh configuration

A grid independence study was conducted to choose the vertical discretization. The calculation domain was a rectangle 200m wide in the streamwise direction and 500m high. It was discretized into a grid of 10 columns and 212 rows and refined near the ground. The minimum distance between grid points was set to  $\Delta z = 0.1\text{m}$  at the ground and expanded up to 11m at the top.

### 3.4.3 Simulations of forested terrain with clearings of various lengths

#### 3.4.3.1 Boundary Conditions

For each case, the generated horizontally homogeneous surface layer profiles with the correct forest type were used as the inlet condition. At the ground and at the top, the same boundary conditions were applied as described above. The outlet conditions were based on those outlined by Patankar (1980), assuming the region near the outflow boundary has a local one-way behaviour. For the velocity, the boundary conditions switched depending on the direction of the flow. A zero gradient condition was applied for the outflow and a velocity fixed of  $U = 0$  m/s was imposed for the reverse flow. For the TKE and  $\varepsilon$ , zero gradient conditions were applied.

#### 3.4.3.2 CFD domain, mesh configuration and computational resources

A grid and domain independence study was first conducted to compute an independent solution. The domain was 500m high discretized into 212 rows. As the clearings varied from  $1h$  to  $100h$ , the domain length depended on the case. In the streamwise direction, there was  $60h$  before the clearing and  $40h$  after. The domain was refined near the edge, in the clear-cut area and near the ground. In the vertical direction, the grid size was set to  $\Delta z = 0.1$ m at the ground and expanded to  $\Delta z = 36$ m at the top. In the horizontal direction, the minimum distance between grid points was at the edges ( $\Delta x = 3$ m) and the maximum was at the inlet ( $\Delta x = 7.5$ m) and at the outlet ( $\Delta x = 15$ m). In the clearing, the distance between grid points was  $\Delta x = 3$ m.

### 3.4.4 Numerical set-up

The neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components given by Garratt (1992) were used to determine the constant  $C_\mu$  and then the Schmidt number for  $\varepsilon$ , leading to  $C_\mu = 0.03$  et  $\sigma_\varepsilon = 2.02$ . The characteristics of the forest were chosen to approximate a typical boreal forest (Sogachev *et al.*, 2009; Amiro, 1990b; Sogachev *et al.*, 2002). The forest has an

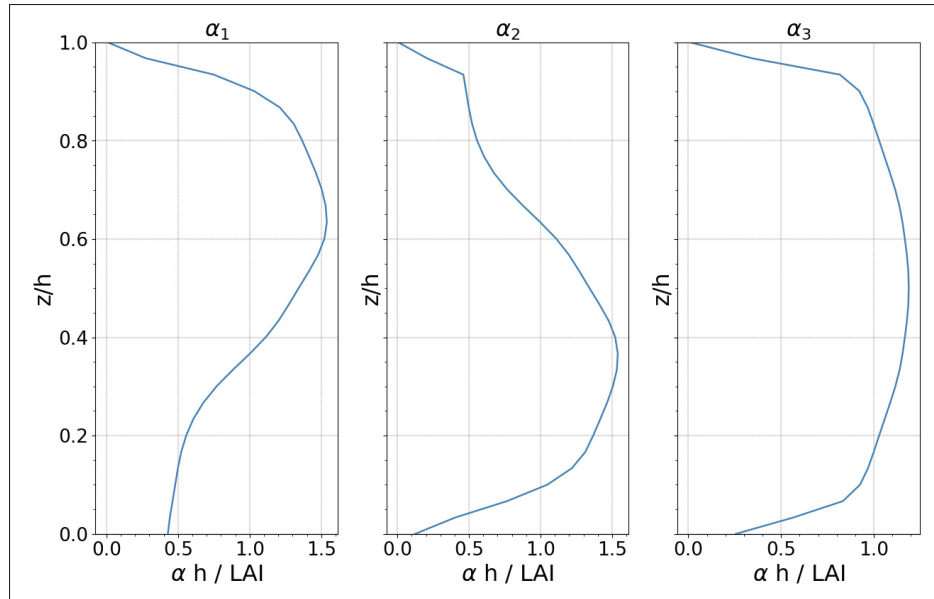


Figure 3.1 The three LAD distributions tested

average tree height of 15m, a total LAI of 5, and its drag coefficient was estimated at 0.2. Its LAD distribution can be found in the paper of Sogachev *et al.* (2009).

To investigate the impacts of the LAD distribution on the flow above the clearing, the three different LAD distributions presented in figure 3.1 were also tested. To investigate the impact of the density of the forest on the flow above the clearing, three other LAI were tested, using the same LAD distribution. In the canopy model, increasing the LAI or the drag coefficient is equivalent and can be seen as increasing the density of the forest. The drag coefficient  $C_D$  was set to 0.2 for all cases and the LAI was chosen as 2.5, 7.5 and 10.

As considered by Sogachev *et al.* (2009), clear-cuts of size  $D$  ranging from  $3h$  to  $75h$  were tested ( $D/h = 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 55$  and  $75$ ), and  $1h$ ,  $2h$  and  $100h$  long clearings were added. The upstream friction velocity was set to  $u_\tau = 1\text{m/s}$ . The surface roughness length of the ground was assumed to be the same at the clearing surface and at the forest floor and was set to  $z_0 = 0.03\text{m}$  (Dalpé & Masson, 2008; Sogachev & Panferov, 2006; Amiro, 1990a).

### 3.5 Validation

As new boundary conditions were applied at the top of the domain and this specific model for the canopy has never been applied with a  $k - \varepsilon$  closure model to a forest clearing, comparisons against experimental measurements were carried out. This was done in two steps : the validation of the computation of a fully developed wind flow over a homogenous and undisturbed forest and the validation of the wind flow over forest clearings.

#### 3.5.1 Validation of fully developed flow simulation

The proposed method for fully developed flow was validated against the experimental measurements on a real forested site located in Sweden, Ryningsnäs, reported by Arnqvist *et al.* (2015) and Bergström, Alfredsson, Arnqvist, Carlén, Dellwik, Fransson, Ganander, Mohr, Segalini & Söderberg (2013), previously used for the validation of numerical models by Nebenführ & Davidson (2015), Nebenführ & Davidson (2017) and Adedipe *et al.* (2020). The measurements are from a 138m tall tower located in the forest, which consisted predominantly of Scots Pine (*Pinus Sylvestris*) trees. This study was chosen because, contrary to most published studies on the subject (which give their results for maximum heights around two or three canopy heights), it presents results between two and seven canopy heights from the ground level, which better corresponds to heights for wind turbine operation.

The forest height was set to  $h = 20\text{m}$ , the drag coefficient to  $C_D = 0.15$ , the LAI to 4.25, and the LAD distribution corresponds to that of a dense pine forest, given and used by Adedipe *et al.* (2020). These same characteristics were used by Nebenführ & Davidson (2015, 2017), who carried out large-eddy simulations (LES) with this tree morphology. The coefficient  $C_\mu$  was calculated using the neutral surface layer ratios of standard deviations of velocity components to friction velocity around the height  $z/h=2$  given by Arnqvist *et al.* (2015), leading to  $C_\mu = 0.075$  and  $\sigma_\varepsilon = 1.278$ .

Arnqvist *et al.* (2015) determined that in neutral conditions, the mean wind velocity at  $z/h \approx 4.9$  is around 8.75m/s, the aerodynamic roughness length  $z_0$  is around 3m and the displacement

height  $d$  is around 13m. As the agreement of the velocity profile with a logarithmic function is satisfactory between  $2 \leq z \leq 5$  (Arnqvist *et al.*, 2015), the friction velocity is determined with the equation 3.19 as  $u_\tau = 1.06$ . This is coherent with the distribution of mean wind speed and near-surface friction velocity given by Bergström *et al.* (2013) which shows  $1 \leq u_\tau \leq 1.15$  for  $u \approx 8.75\text{m/s}$ .

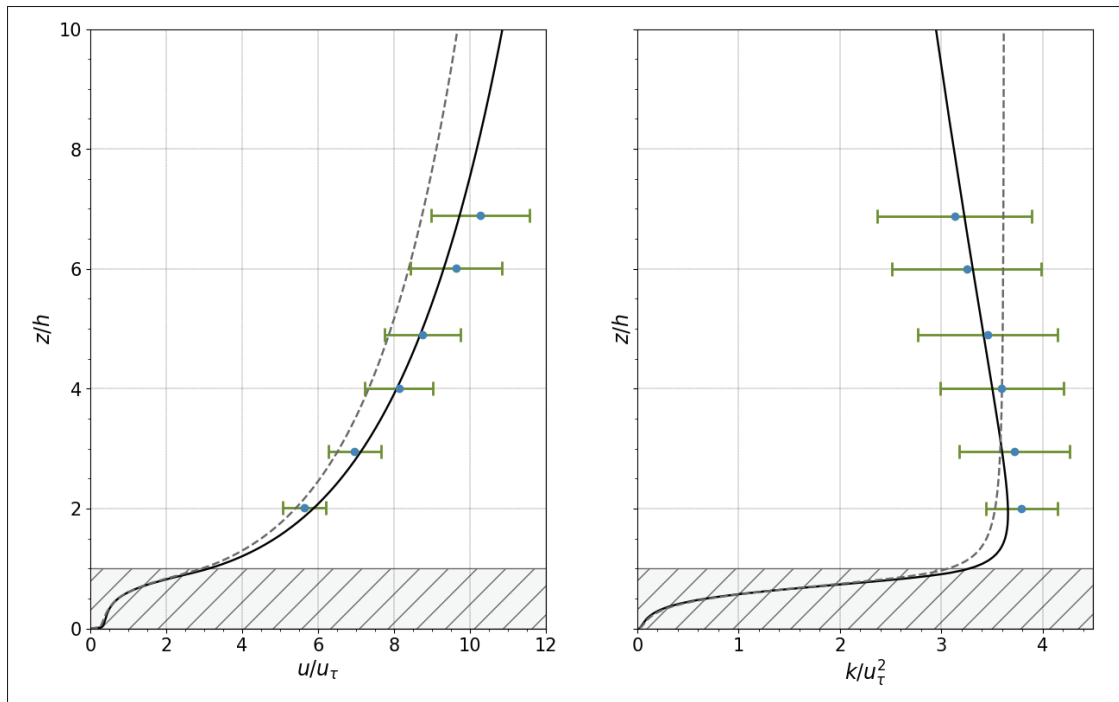


Figure 3.2 Vertical profiles of normalized streamwise velocity and TKE from the present numerical results (solid line) compared with observed experimental data (symbols) (Arnqvist *et al.*, 2015) and with the profiles obtained if the shear stress is constant through the domain (*i.e.*  $\gamma = 1$ ) (dashed)

Figure 3.2 presents the computed profiles of velocity and TKE compared with the experimental measurements of Arnqvist *et al.* (2015). The experimental measurements and the error bars (which show the standard deviation of the measurements) are digitally extracted from their study. The profiles are also compared with the profiles obtained with the boundary conditions developed if the shear stress is assumed to be constant through the domain, which corresponds to  $\gamma = 1$ . The results are normalized by the values at the height  $z = 2h$ .

Above  $z/h = 5$  and increasingly with height, the simulation underestimates the wind speed, with a maximum deviation to the mean value around 5.15%, and slightly overestimates the TKE. It underestimates the TKE under  $z/h = 5$  with a maximum deviation around 3.5%. The agreement with the experimental measurements using the boundary conditions presented in this paper is quite satisfactory and much better than when the shear stress is assumed to be constant through the domain. As expected, the TKE profile is not properly calculated if the fact that the shear stress decreases with height is not taken into account.

### 3.5.2 Validation of clearing-forest flow simulation

Since the study investigated the wind flow above a wide range of clearing lengths, this validation was based on two experimental studies to ensure the flow is properly modelled for both large as well as small cuts. First, the experiments of Raupach *et al.* (1987) were simulated to validate the method for flow above a large clearing ( $L = 21.3h$ ). Second, the experiments of Frank & Ruck (2007) were reproduced to ensure that the model is also appropriate for the case of a small clear-cut ( $L = 1h$ ).

#### 3.5.2.1 Simulation of the Raupach *et al.* (1987) experiments

Using a scale-model canopy within the CSIRO Pye Laboratory wind tunnel (Wooding, 1968), Raupach *et al.* (1987) investigated mean wind speed and turbulence statistics above clearings of width  $4.3h$ ,  $12.8h$  and  $21.3h$ . However only the results for  $21.3h$  were published with complete data with wind velocity measurements given at several distances downwind from the upstream edge of the canopy. Many authors have already used this data to validate numerical models, such as Wilson & Flesch (1999), Foudhil, Brunet & Caltagirone (2005), Sogachev & Panferov (2006) and Dupont & Brunet (2008b) for  $k-l$ ,  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  and LES models, respectively.

The domain, boundary conditions and forest pattern were adapted from section 3.4 to recreate the conditions of the wind tunnel and of the canopy. The main adjustments involved elongating the domain to match the wind tunnel length, lowering the upper boundary to the height of



$13.83h$  and treating it as a wall, and setting the flow at the inlet to the constant  $U = 12.3\text{m/s}$  (Foudhil *et al.*, 2005). The  $21.3h$  width clearing was placed  $53h$  downwind of the start of the canopy. The aerodynamic roughness length of the clearing was set to  $z_0/h = 0.003$ . As outlined by Sogachev & Panferov (2006), the flow is highly sensitive to the roughness of the tunnel ceiling, which was set to  $z_0/h = 0.075$ . Following Sogachev & Panferov (2006), the number of vertical nodes was lowered to 39 and the vertical resolution was set to  $\Delta z/h = 0.10$  within the forest canopy region ( $z/h \leq 1$ ) and gradually stretched above this region with a cell-to-cell expansion ratio of  $\delta = 1.053$ . The horizontal resolution was set to  $\Delta x/h = 2.5$  at the inlet and refined at  $\Delta x/h = 0.5$  uniformly over the area of interest. The resolution was validated by a grid independence study.

Following Foudhil *et al.* (2005), the estimation of  $C_\mu$  was calculated with the observed values  $\sigma_u/u_\tau = 2.11$  and  $\sigma_w/u_\tau = 1.25$  and assuming the equality  $\sigma_v^2 = \sigma_u/\sigma_w$ , leading to  $C_\mu = 0.0534$  and  $\sigma_\varepsilon = 1.515$ . The forest height was chosen to be  $h = 10\text{m}$ , the LAD distribution was vertically constant and the product  $C_D \cdot \text{LAI}$  was set to 0.32 Wilson, Finnigan & Raupach (1998).

The experimental data was extracted from Raupach *et al.* (1987). The vertical profiles of streamwise velocity and TKE for the mean flow are compared at various downstream locations with the present study's results in figures 3.3 and 3.4. For ease of comparison, the results are normalized by the values at  $x/h = -2.1$  and  $z/h = 1$ . The velocity and TKE profiles generally fit the experimental results.

The computed velocity slightly deviates from the experimental data after encountering the second forest edge (from  $x/h = 25.5$ ) above  $z/h = 2$ , with a maximum deviation around 7.6% at  $x/h = 27.7$  and  $z/h = 4.8$ . Inside the clearing, the maximum deviation of the TKE is around 17%. However, in the layer of interest for wind turbine application ( $z/h \geq 2$ ), the maximum deviation in the clearing is limited to 6.3%. Overall, the effect of the forest on the wind flow above the clearing is properly reproduced.

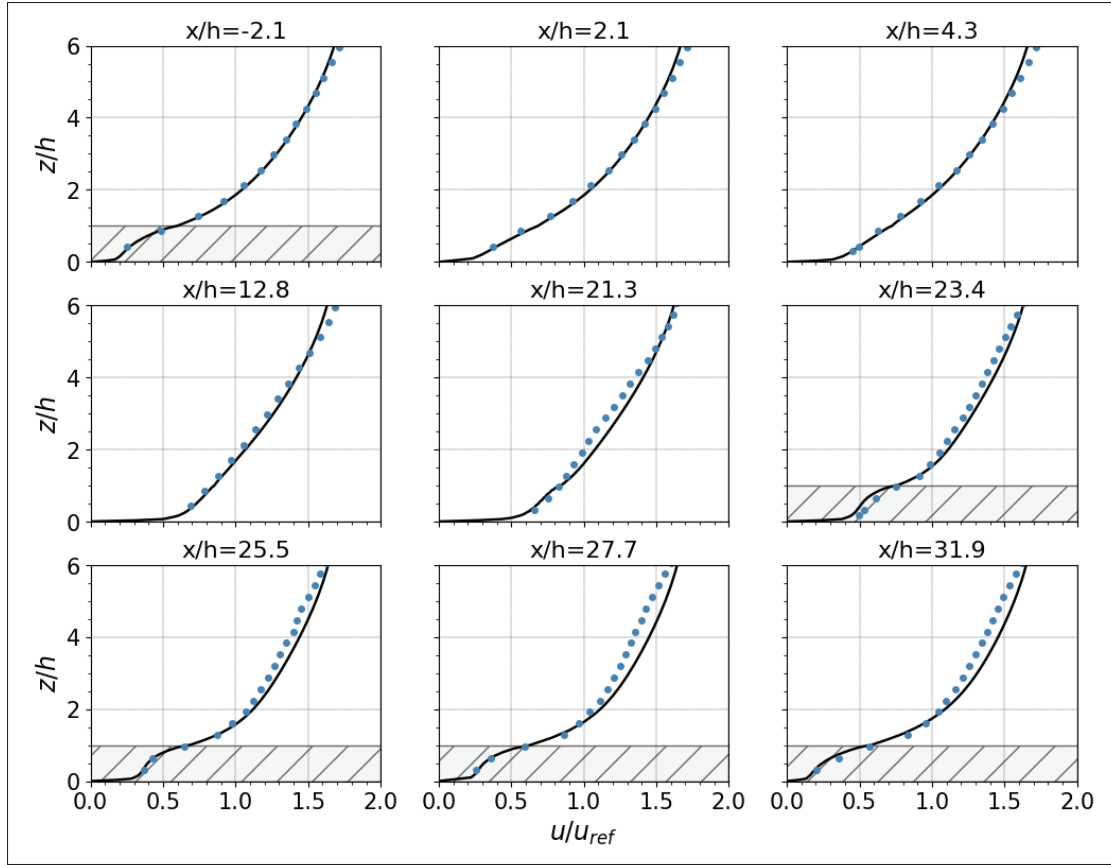


Figure 3.3 Vertical profiles of normalized mean wind speed from the present numerical results (solid line) against observed experimental data (symbols) (Raupach *et al.*, 1987) at different locations

### 3.5.2.2 Simulation of the Frank & Ruck (2008) experiments

Using model trees within an ABL wind tunnel, Frank & Ruck (2007) investigated the flow around a forest with a clearing of width  $D/h = 1$  and another of width  $D/h = 5$ , and measured the mean velocity and the TKE. The validation was conducted with the case of a clear-cut of width  $D = 1h$ . The results are also compared with the numerical study of Frank & Ruck (2008), who validated their numerical model against the wind tunnel measurements.

The domain, the boundary conditions and the forest pattern were adapted to build the numerical wind tunnel of Frank & Ruck (2008), which aimed to reproduce the wind tunnel of Frank & Ruck (2007). The domain size, the forest pattern, the forest morphology, the TKE profile of the

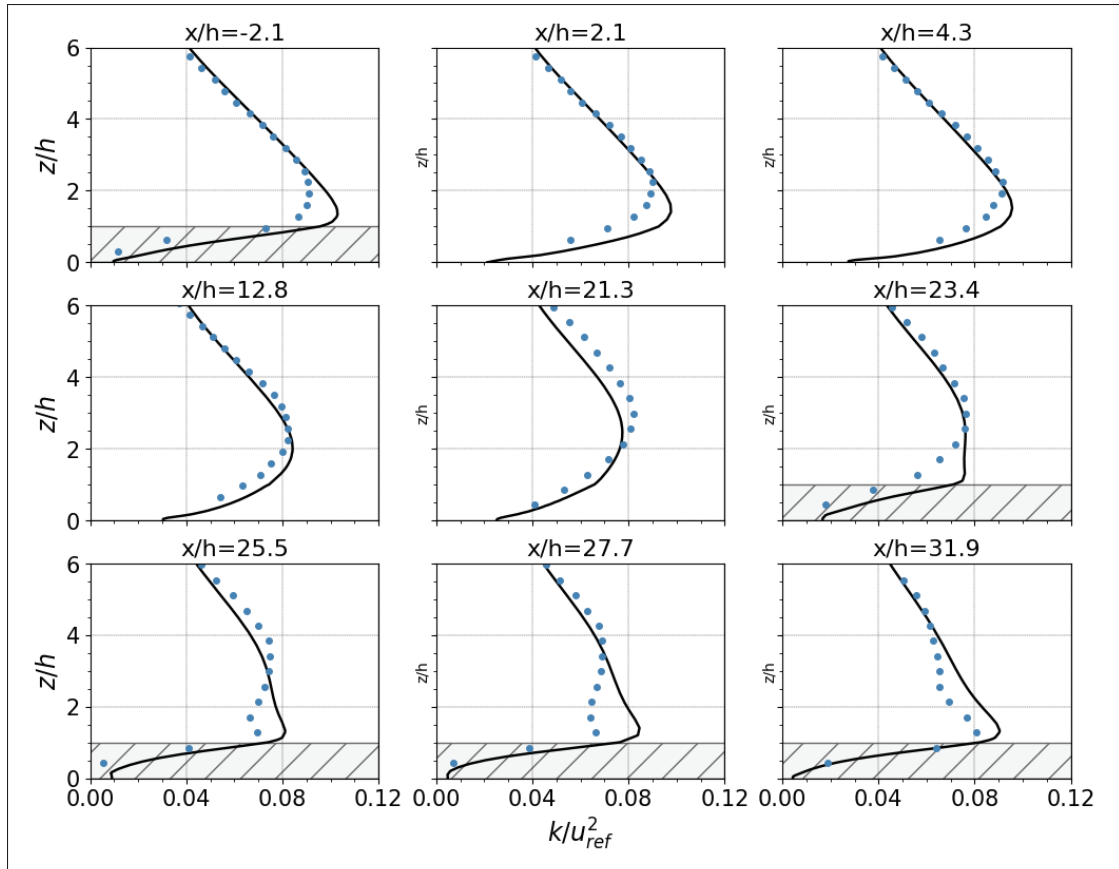


Figure 3.4 Vertical profiles of normalized TKE from the present numerical results (solid line) against observed experimental data (symbols) (Raupach *et al.*, 1987) at different locations

undisturbed flow applied at the inlet, and the top boundary conditions were set replicating the work conducted by Frank & Ruck (2008). At the inlet boundary, the streamwise velocity was set to fit the vertical profiles of the undisturbed flow measured in the tunnel. A log-law profile was used with the roughness length of the ground set to  $z_0 = 1.5\text{m}$  and the friction velocity to  $u_\tau = 0.84\text{m/s}$  in the lower part of the boundary ( $z \leq 6.9h$ ), and a constant value of  $U = 9.5\text{m/s}$  was imposed above.

A grid independence study was conducted to choose a mesh of  $384 \times 200$ , refined in the forest area and near the ground. In the horizontal direction, the minimum distance between grid points was at the edges ( $\Delta x = 3\text{m}$ ) and the maxima were at the inlet ( $\Delta x = 10\text{m}$ ) and at the outlet

( $\Delta x = 15\text{m}$ ). In the vertical direction, the grid size was set at  $\Delta z = 0.05\text{m}$  from the ground to top of the forest canopy and expanded to  $\Delta z = 8\text{m}$  at the top.

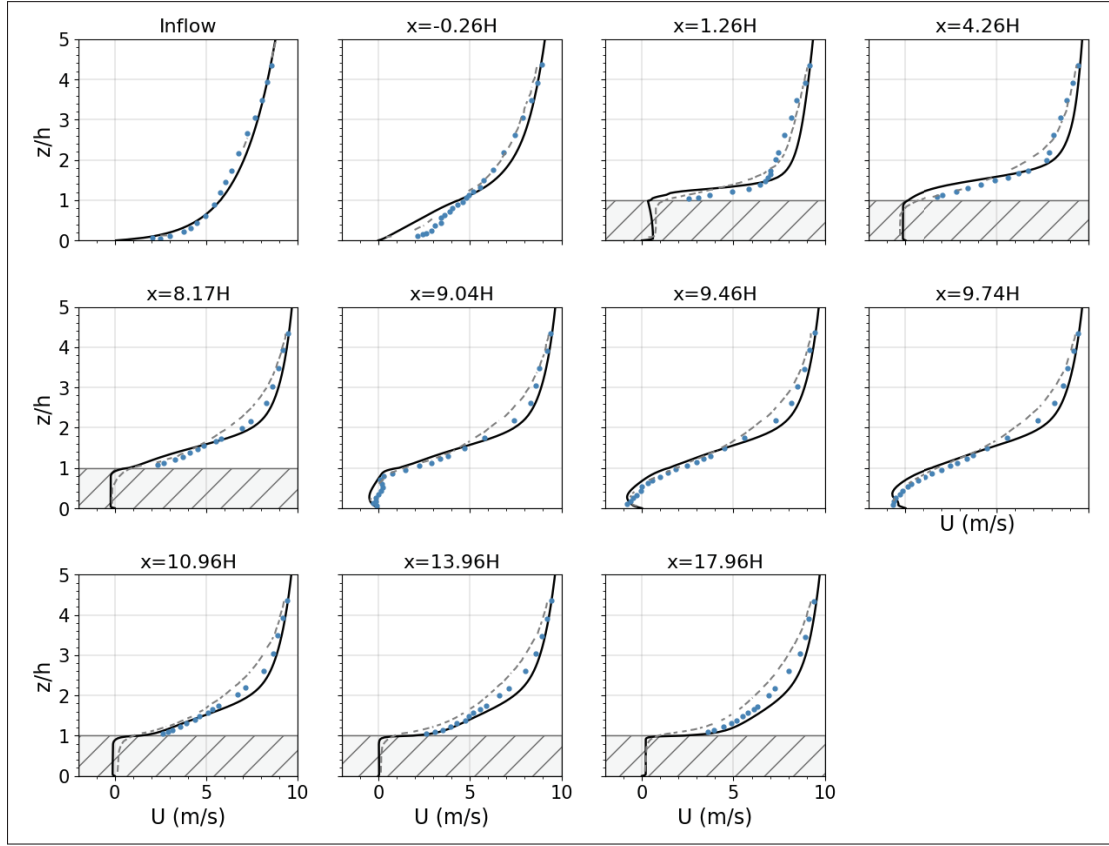


Figure 3.5 Vertical profiles of the stream-wise velocity from the present results (solid line) against experimental data (triangles) and numerical data (dotted) (Frank & Ruck, 2008) at different locations

The measured and computed data was digitally extracted from Frank & Ruck (2008) and the vertical profiles of streamwise velocity and TKE for the mean flow are compared with the present study's results at various downstream locations in figures 3.5 and 3.6. Both the velocity and TKE are quite satisfactory and show better agreement with the experimental results than the simulated data of Frank & Ruck (2008), who had large differences between measured and computed results, especially for the TKE. This is explained by the fact that they were not able to properly implement additional source and sink terms of a usual canopy model in their software

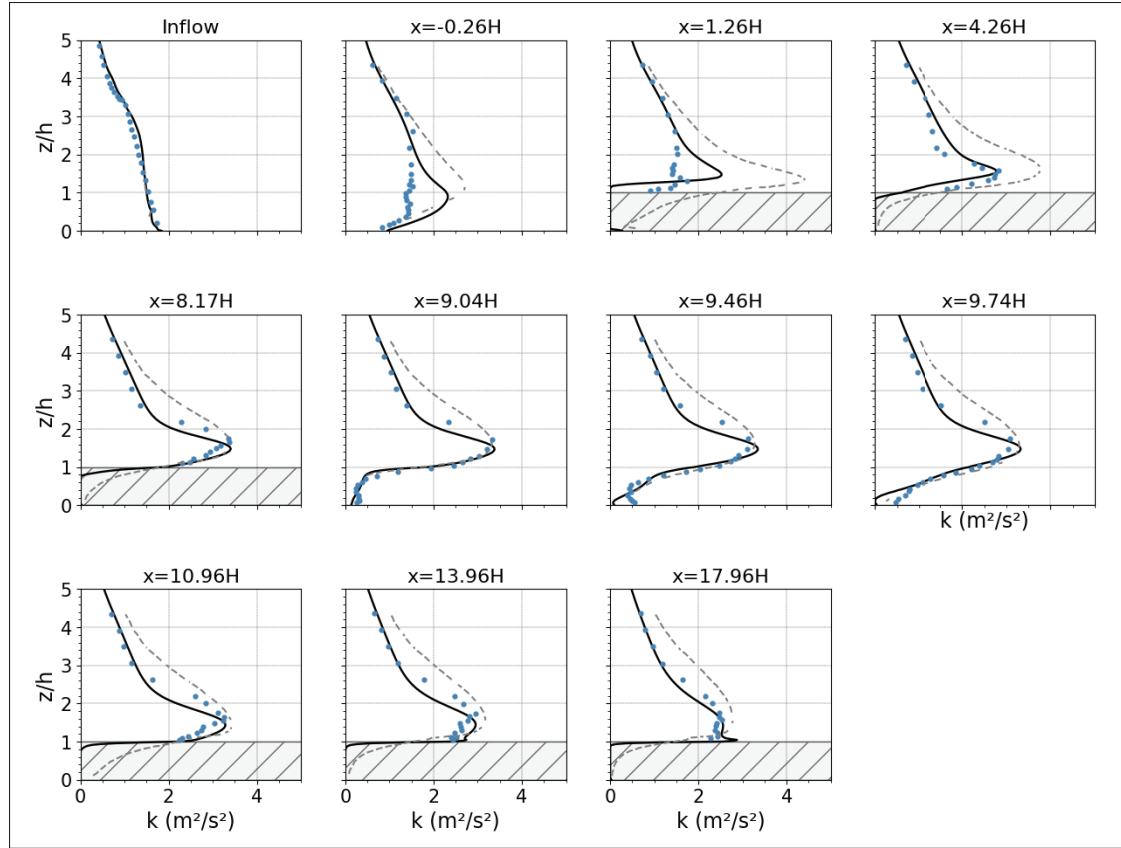


Figure 3.6 Vertical profiles of the TKE from the present results (solid line) against experimental data (triangles) and numerical data (dotted) (Frank & Ruck, 2008) at different locations

and therefore had to define simplified terms for the TKE and its dissipation rate in the transport equations.

### 3.6 Results

This section presents the results of a parametric study with clearings of varying lengths in the range of  $D/h = 1$  to  $D/h = 100$ . The simulations were conducted for a typical boreal forest and for three other LAD distributions and three other LAI, ranging from 2.5 to 10. The section is presented in three parts : the vertical profiles of the mean velocity and the TKE in the middle of the clearing, the longitudinal profiles of these same variables over the clearing, and the spatial distribution of the wind-energy-related variables above the clearing as a function of the clearing

lengths. The case of a reference boreal forest, the effect of the variation of the forest morphology (*i.e.* the LAD and the LAI) and the effect of the hub height are presented. In all the presented figures, the wind direction over the clearings is from the left to the right and the hatches indicate the forested area.

### 3.6.1 Flow profiles in the middle of the clearings

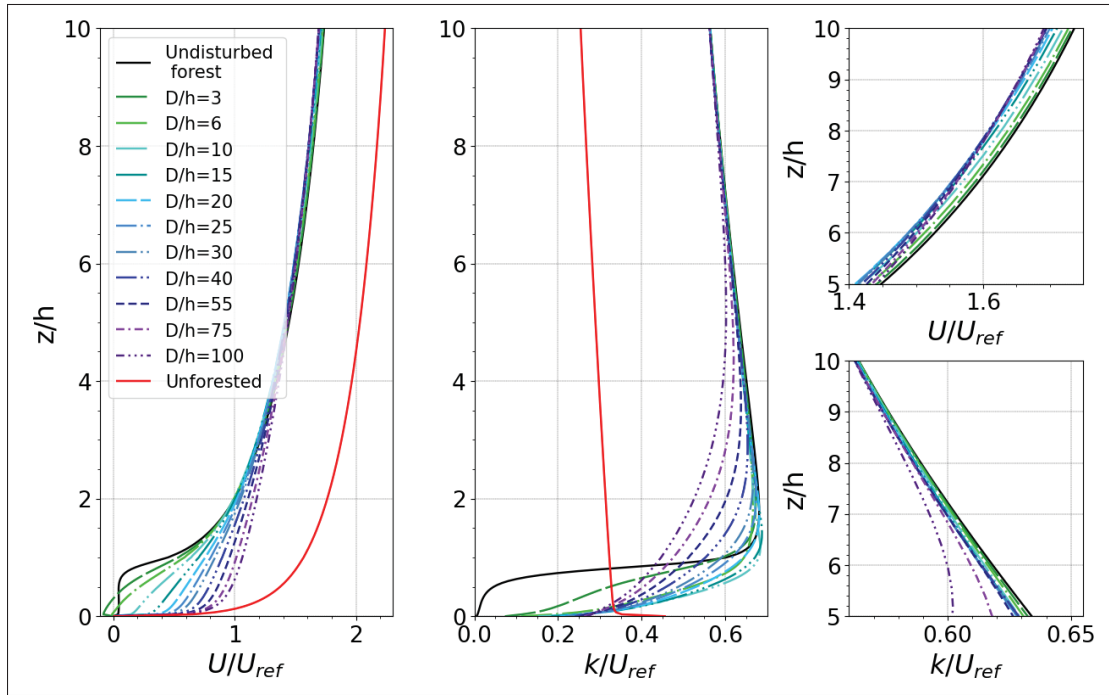


Figure 3.7 Vertical profiles of mean velocity and TKE in the middle of clearings of different diameters ( $3h \leq D \leq 100h$ ) compared with the profile above undisturbed forest and the profile without any vegetation

Vertical profiles in the middle of clearings of varying sizes are shown in figure 3.7. The middle position is chosen because, in a circular clearing, placing a wind turbine in the middle minimizes the effect of wind direction on energy production (Sogachev *et al.*, 2009). The results are normalized by values at the reference height of  $z_{ref} = 2h$  of the flow above an undisturbed forest.

The results are compared against two reference profiles : the profile over an undisturbed homogeneous forest with the same characteristics and the profile in absence of vegetation. The

analysis of these results is shortened as a detailed analysis can be found in the article of Sogachev *et al.* (2009). It is worth noting that the wind flow is never restored to the “unforested state”, even with large clearings of  $75h$  or  $100h$ . Indeed, there is a reduction of velocity between 25% and 30% that always remains, as well as an excess of TKE of between 21% and 120% that increases with height. The gain in wind speed and the reduction in TKE with increasing clearing size is strongly reduced with increasing heights. More surprisingly, above a height of around  $4h$ , the wind velocity decreases with the clearing size (see magnification top right).

### 3.6.2 Flow profiles throughout the clearings

#### 3.6.2.1 Boreal forest

Figures 3.8 and 3.9 show several longitudinal profiles of mean wind speed and TKE nondimensionalized by the wind conditions above the identical undisturbed homogenous forest at the reference height of  $2h$ . The profiles are presented for the heights  $z_i/h = i$ , with  $i = 2, 4, 6, 8, 10$  and 14. These figures complement the previous vertical profiles taken at the middle of the clearing and together give a picture of the distributions throughout the clearing.

The figures reveal that the profiles are not homogeneous throughout the clearing and that the most significant changes are in the second half downwind, where the nature of the change (increase or decrease) depends on the size of the clearing. The observation of the previous section that the larger the clear-cut, the greater the magnitude of the change, is also valid throughout the clearing.

#### 3.6.2.2 Sensitivity to forest morphology

Figures II-1 and II-2 in the Appendix present the profiles for different LAD distributions and for different LAI (2.5, 5, 7.5 and 10). Above the undisturbed forest, the velocity presents almost no differences between the different cases but the ratio of TKE to the velocity differs more importantly between the different cases. Over the clearing, for both the velocity and the TKE, the forest morphology has a minor influence on their variations. However, it can be pointed out

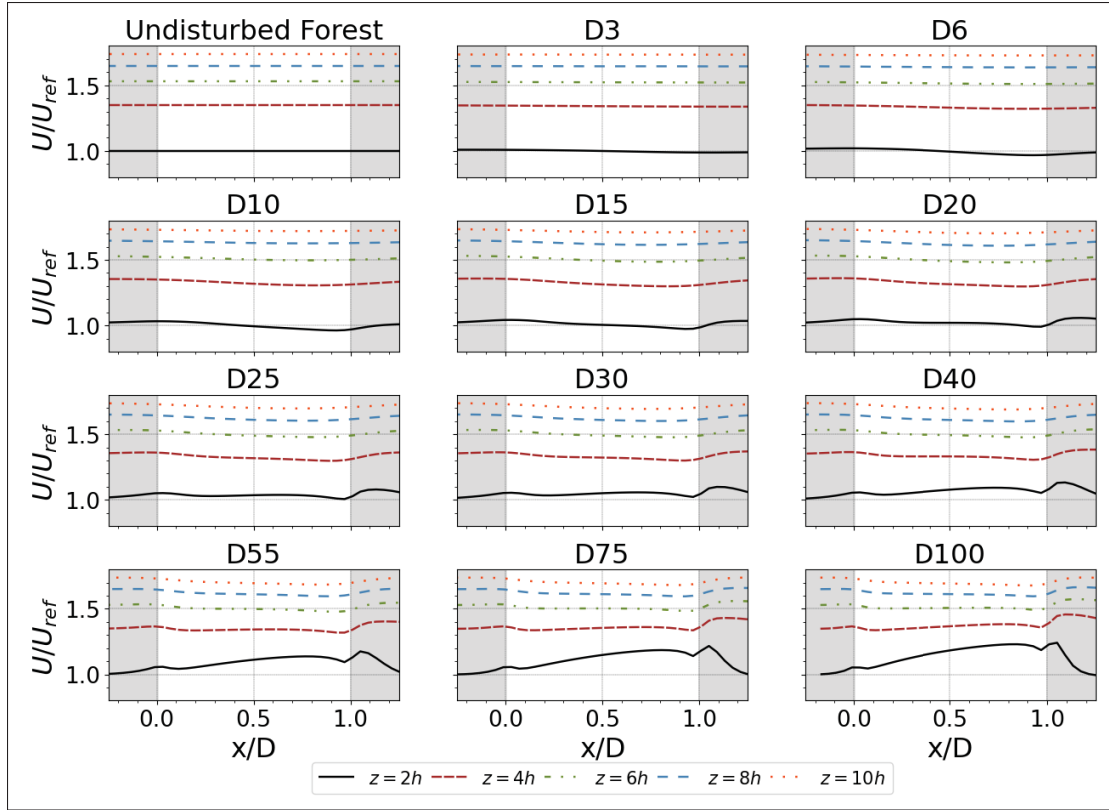


Figure 3.8 Horizontal profiles of mean velocity above clearings of different sizes compared with the profiles above undisturbed forest

that the increase in near-ground wind speed taking place in large clearings is reduced with the increase of LAI, with the maximum increase at  $z_i = 2h$  ranging from 25% for  $LAI = 2.5$  to 15% for  $LAI = 10$ .

### 3.6.3 Distribution of wind-energy-related variables

Following the method of Sogachev *et al.* (2009), a wind turbine with a rotor diameter of  $7h$  and a hub height of  $z_2 = 7.5h$  (*i.e.* a turbine of around 3MW) was assumed to be installed in the clearing. The available wind energy, average wind shear and cumulative TKE in the  $7h$  thick layer where the wind flow intersects with the swept area were estimated from the computed data. They were calculated following (Sogachev *et al.*, 2009) :



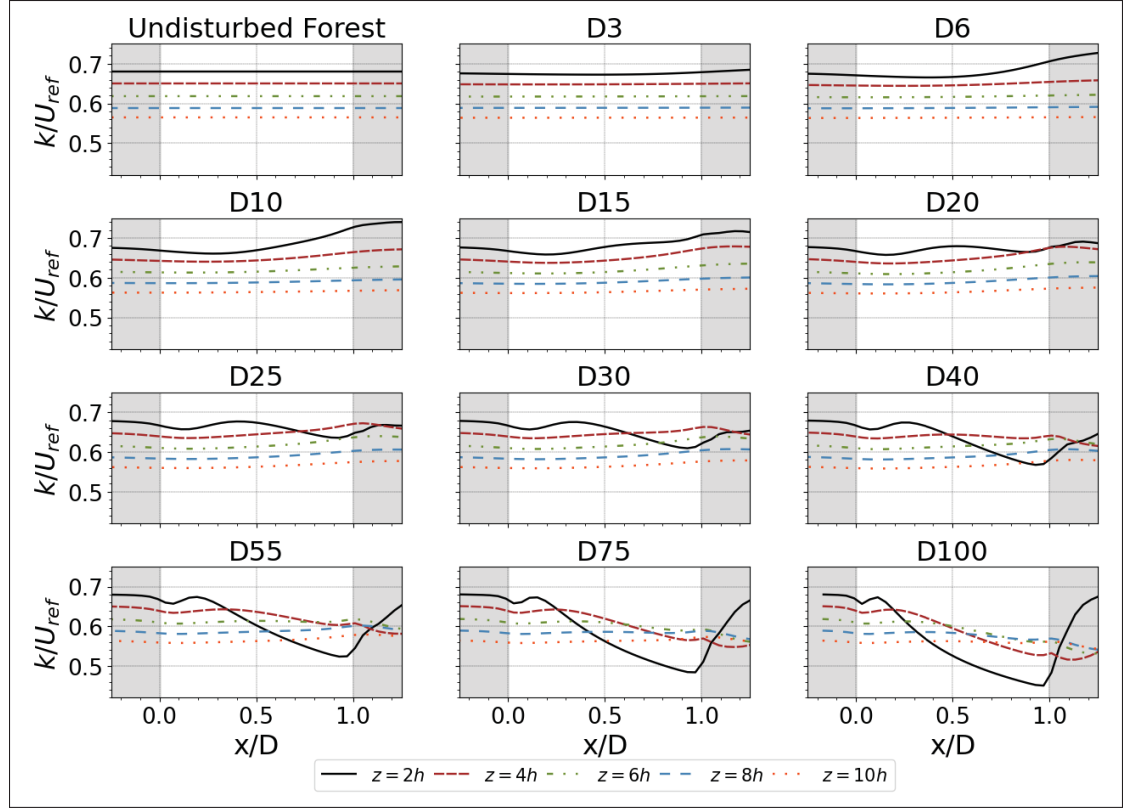


Figure 3.9 Horizontal profiles of TKE above clearings of different sizes ( $D/h = 3, 10, 25, 75$ ) compared with the profiles above undisturbed forest

$$E = \int_L^{L+7h} U^3(z) dz \quad (3.27)$$

$$cTKE = \int_L^{L+7h} k(z) dz \quad (3.28)$$

$$S = \frac{U(L+7h) - U(L)}{7h} \quad (3.29)$$

Cumulative TKE gives an estimation of the intensity of the fluctuations of the wind around its mean value. As the magnitude of the variables depends on the wind climate distribution, they are presented by their relative change with respect to the variables of the flow above an undisturbed

forest in the same layer. This methodology enables the extrapolation of measurements taken above a forest to a potential clear-cut.

### 3.6.3.1 Boreal forest

Figures 3.10, 3.11, 3.12 show the variation of the longitudinal distribution of the relative change of the variables within the clearing with respect to the clearing size for  $E$ ,  $cTKE$ , and  $AWS$ , respectively. Table 3.1 sums up the relative changes for different clearing sizes.

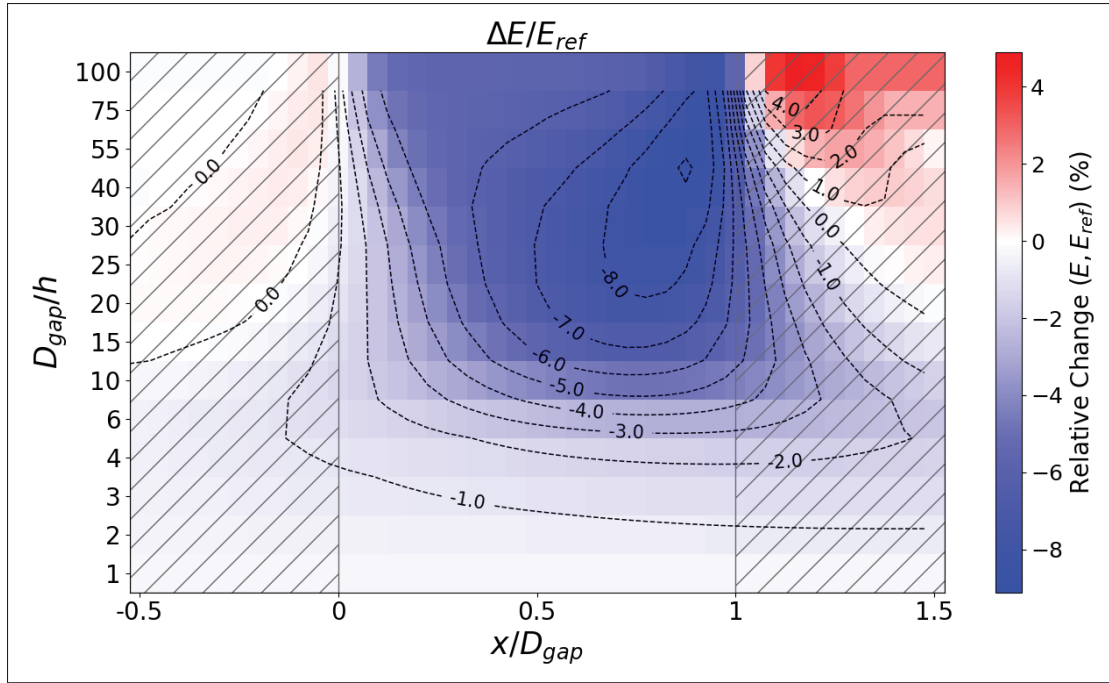


Figure 3.10 Longitudinal distribution of the relative change of  $E$  above the clearing in the  $7h$  thick layer as a function of the clearing size

Contrary to expectations, the results shows that the presence of a clearing in the forest does not necessarily lead to a gain in available wind power or to a reduction of  $cTKE$  or  $AWS$ . Actually, the presence of a clearing leads to a reduction of  $E$  for every clearing size and at every location in the clearing. Surprisingly, enlarging the clearing is not a solution to avoid this effect, as loss can become greater with increasing clearing sizes for  $D \leq 55$ , and decrease only slightly above this size. Regarding the  $cTKE$  and the  $AWS$ , a large clearing is necessary to obtain a significant

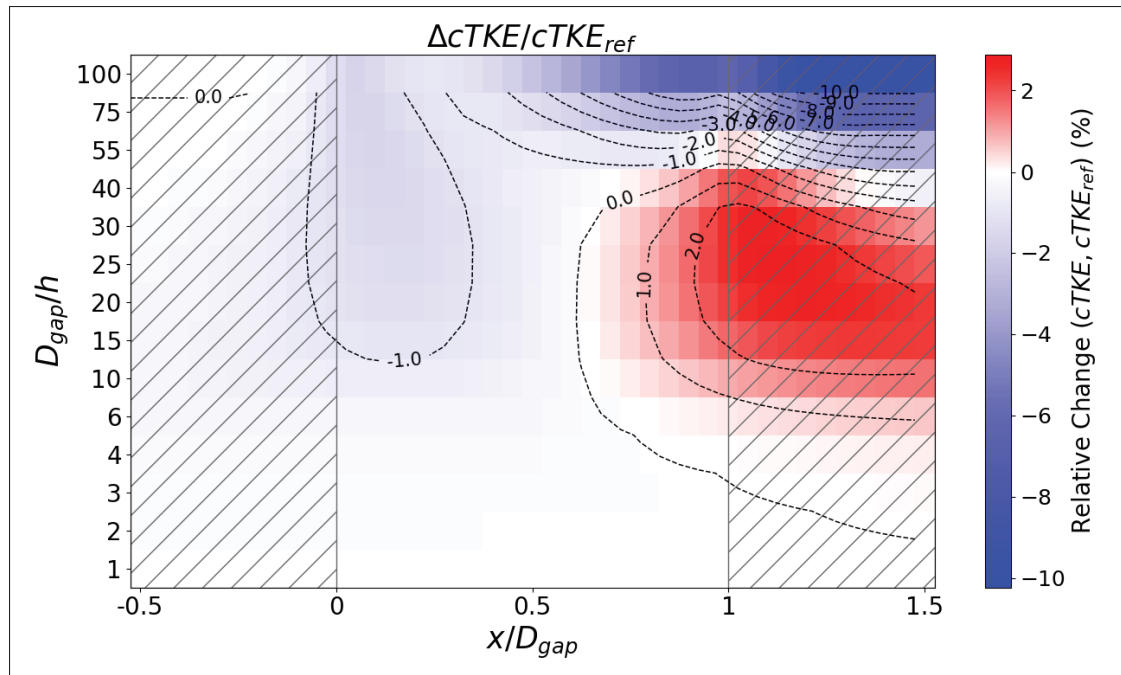


Figure 3.11 Longitudinal distribution of the relative change of cTKE throughout the clearing in the  $7h$  thick layer as a function of the clearing size

Tableau 3.1 Relative change of wind-energy-related parameters above the clearing with respect to the flow above an undisturbed forest

	Energy (%)		cTKE (%)		Average Wind Shear (%)	
D/H	All over	Center	All over	Center	All over	Center
3	-0.7 to -1.1	-0.9	-0.15 to -0.04	-0.12	0 to +1.6	+0.9
10	-1.4 to -4.9	-4	-0.7 to +0.9	-0.4	-2.5 to +6.2	+3.6
25	-0.75 to -8.2	-6.8	-1.15 to +2.5	-0.6	-5.2 to +3.7	-1.02
40	-0.4 to -8.8	-6.8	-1.6 to +2	-0.6	-6 to +0.4	-5.7
55	-0.24 to -9	-6.4	-1.65 to -0.1	-0.7	-10.1 to -2.9	-8.8
75	-0.18 to -8.7	-6	-3.2 to -0.9	-1.2	-15.5 to -3.0	-12.1
100	-0.17 to -8.2	-5.7	-6.7 to -0.9	-2.3	-21.8 to -3.4	-15.6

decrease. For the AWS, a medium clearing (around  $4h$  to  $20h$ ) can even cause an increase of the variable.

It is interesting to highlight that for really small clearings of  $D/h \leq 3$ , the loss in E is quite minor (around 1%), the cTKE is almost unchanged, and the AWS is only slightly increased.

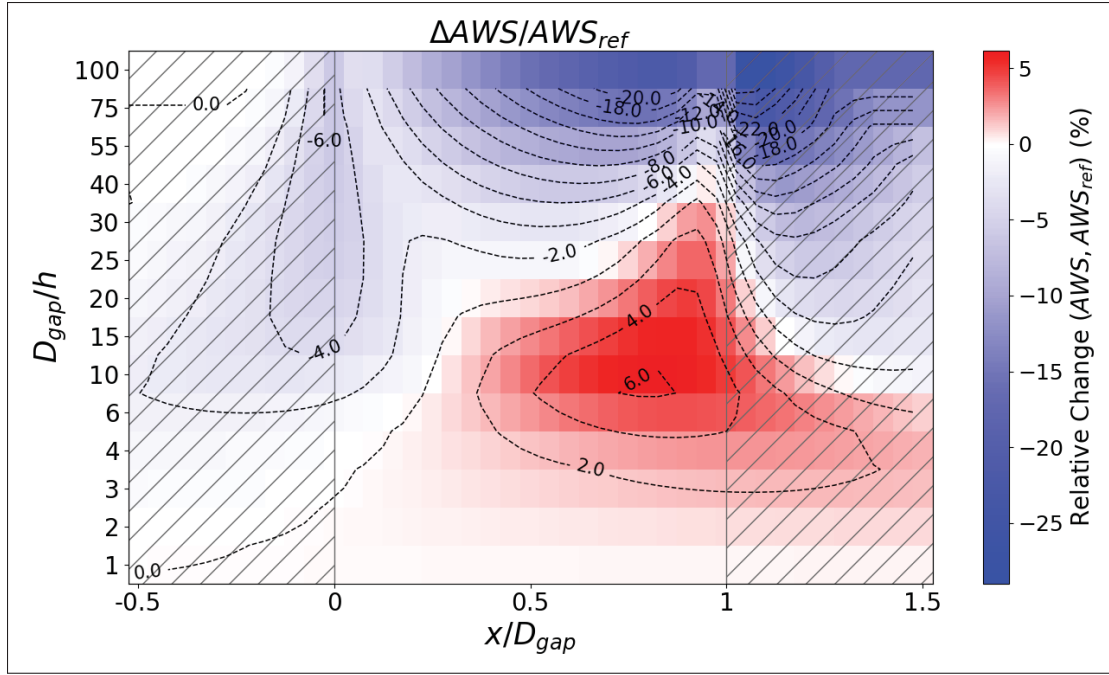


Figure 3.12 Longitudinal distribution of the relative change of the average wind shear throughout the clearing in the  $7h$  thick layers as a function of the clearing size

For large gaps of  $D/h \geq 55$ ,  $E$  is reduced (around 6% in the center of the clearing), but the  $cTKE$  and  $AWS$  are reduced around 1% or 2% and from 9% to 16% in the center of the clearing, respectively.

### 3.6.3.2 Variation with hub height

Spatial variations of  $E$ ,  $cTKE$  and  $AWS$  in the  $7h$  thick layer were calculated for two other hub heights :  $z_1 = 5.5h$  and  $z_3 = 9.5h$ .  $z_1$  provides a clearance between the rotor and the ground of  $2h$ , following the rule of thumb used in the wind industry and confirmed by Sanz Rodrigo *et al.* (2007) and Sogachev *et al.* (2009). The distribution of the variables were calculated and plotted in the same way as previously.

Figure 3.13 shows that the pattern of the relative changes are quite similar between the heights. Increasing the hub height does not reduce the relative changes in the flow generated by the

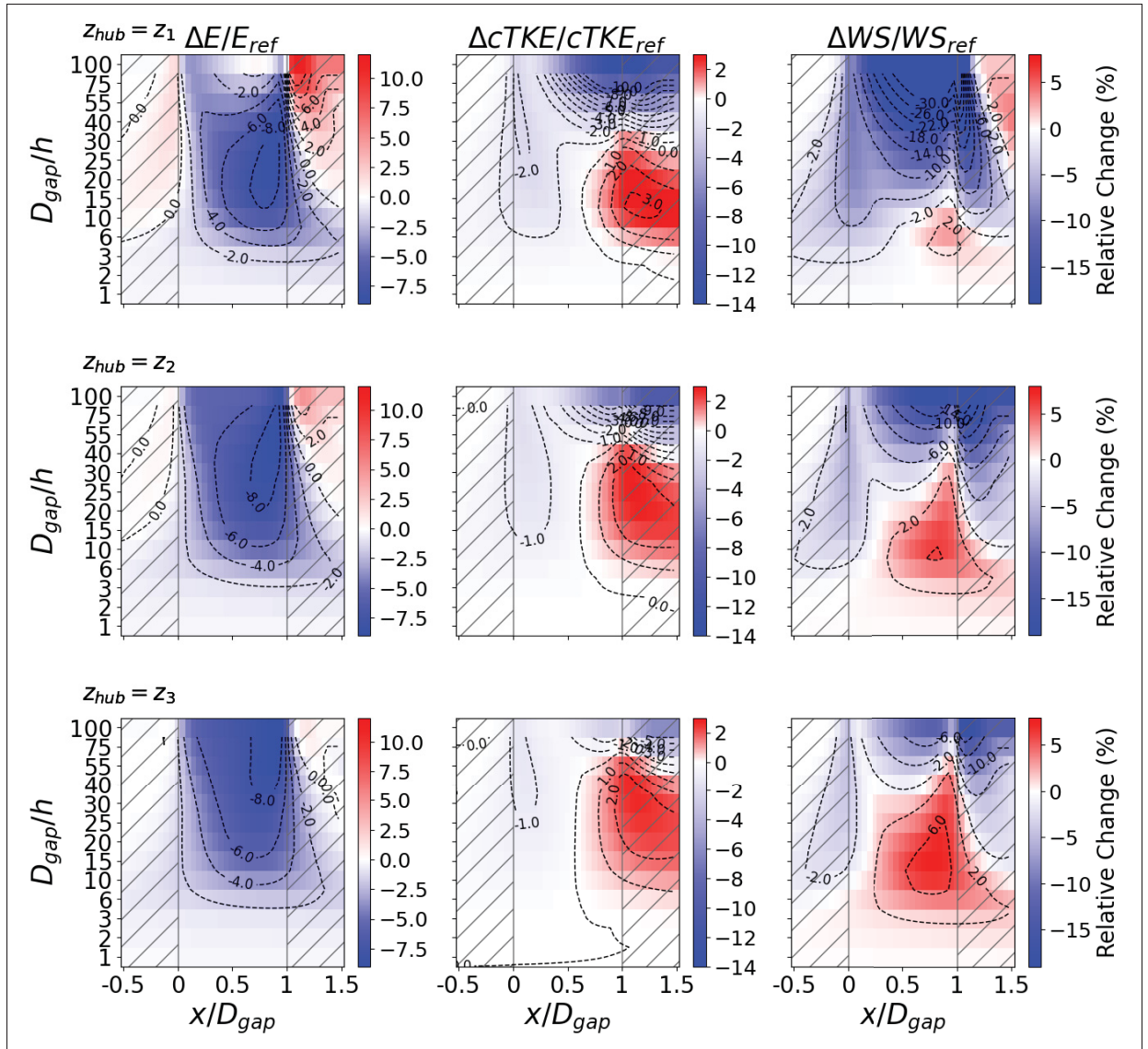


Figure 3.13 Longitudinal distribution of the cumulative wind-energy-related variables over the clearing in the  $7h$  thick layers as a function of the clearing size for three hub height

clearing. Since each variable behaves differently with increasing height, if they are all considered, there is no hub height for which the effect of clearing is more appealing.

### 3.6.3.3 Sensitivity to the forest morphology

Figures 3.14 and 3.15 presents the distribution of relative changes for the layer that corresponds to the hub height  $z_2 = 7.5h$  for the three LAD and the four LAI, respectively. These results complement those of the previous section as they investigate the impact of the LAD distribution and LAI on the flow over the clearing.

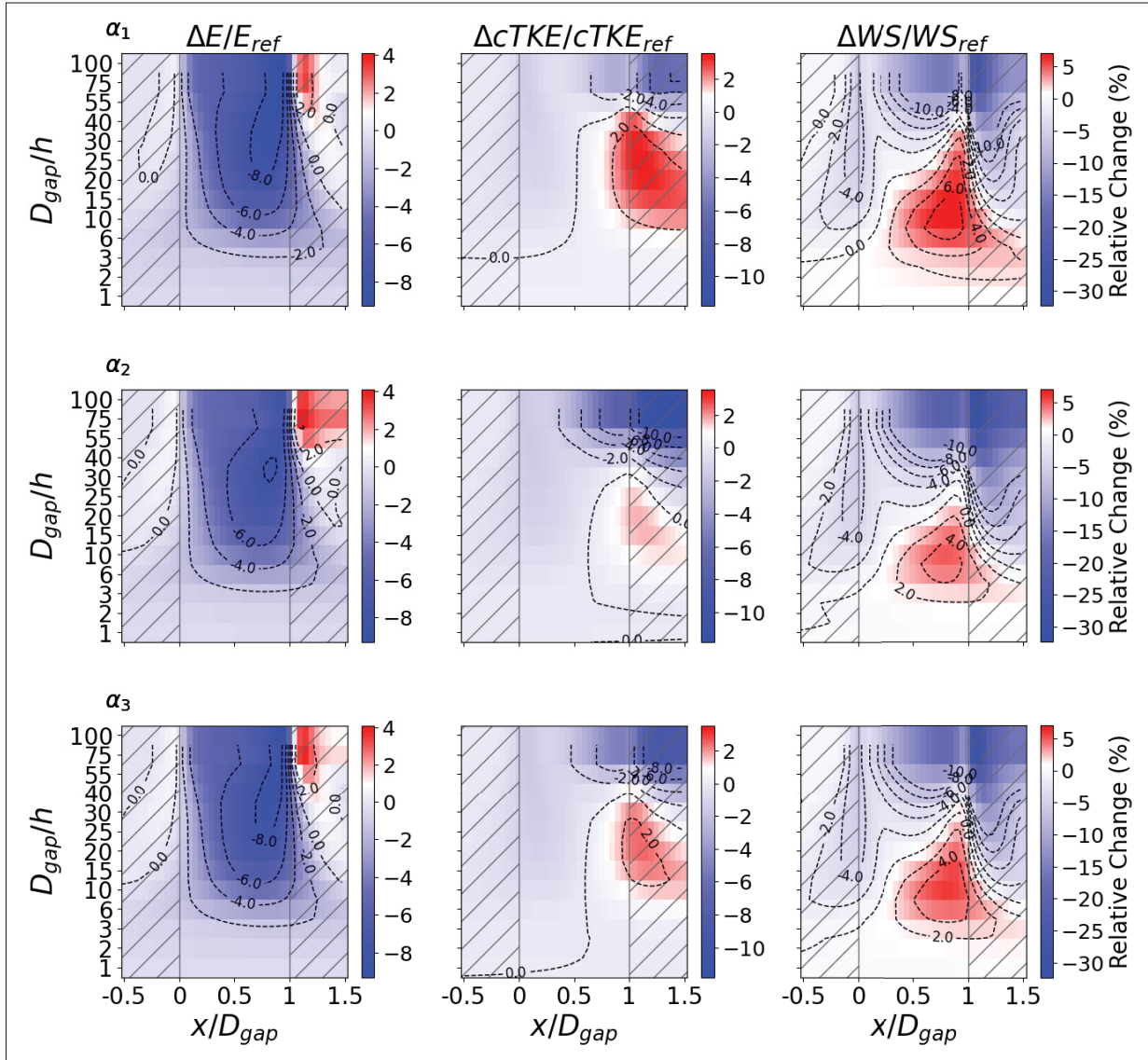


Figure 3.14 Longitudinal distribution of the cumulative wind-energy-related variables over the clearing in the  $7h$  thick layer as a function of the clearing size for the three LAD



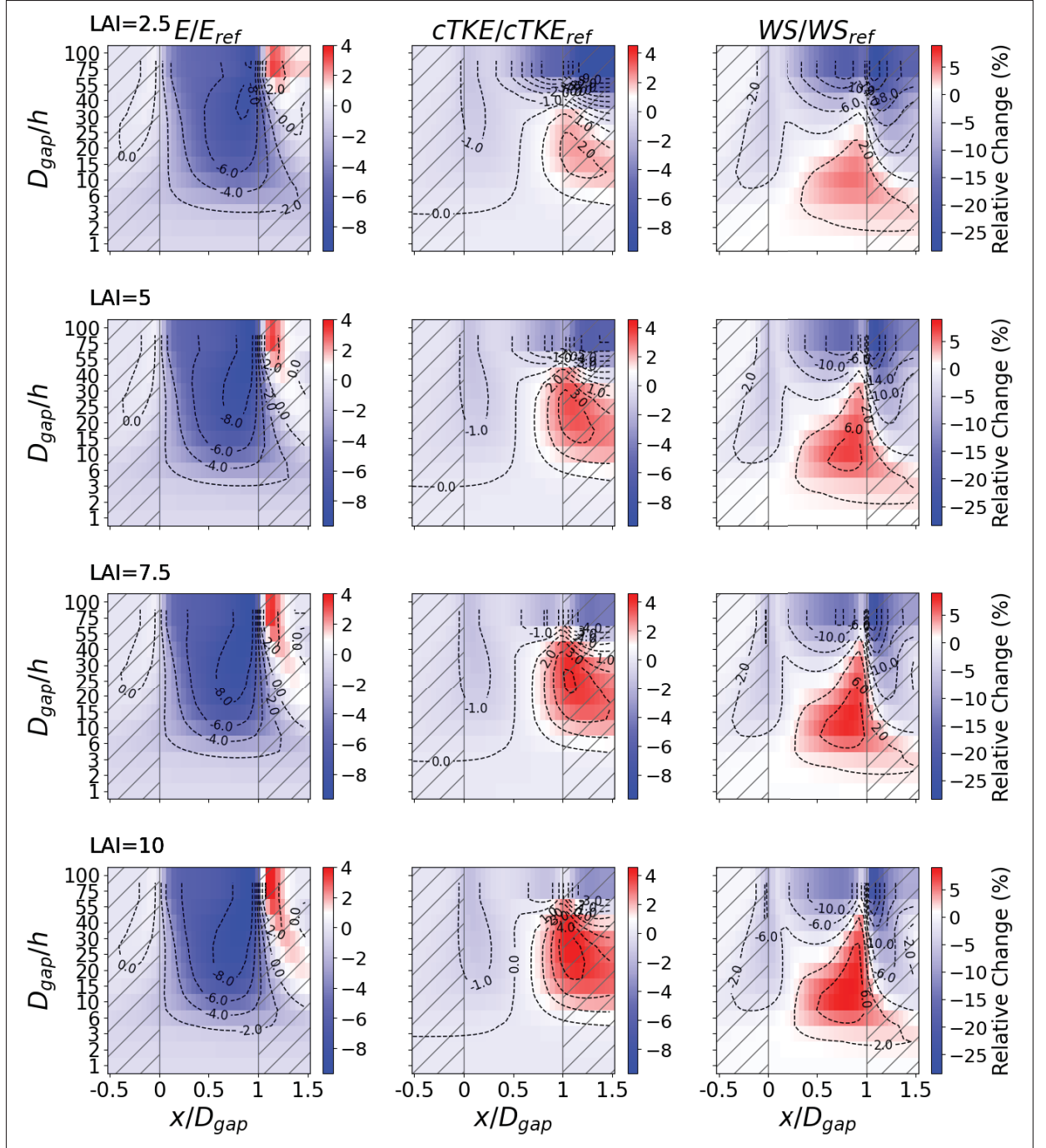


Figure 3.15 Longitudinal distribution of the cumulative wind-energy-related variables over the clearing in the 7h thick layer as a function of the clearing size for the four LAI

Figures 3.14 and 3.15 show that the pattern of the variables over the clearings is the same between the different forest morphologies and that increasing the forest density and concentrating the LAD towards the top of the tree intensifies the effect of the clearing.

### 3.7 Conclusion

With the aim of better understanding the behavior of wind flow above forest clearings for wind turbine development, the wind flow over horizontally homogeneous forests and above forest clearings of various sizes has been simulated (at fine scale) with a RANS simulation approach. A CFD model using a modified  $k - \varepsilon$  closure scheme to take into account the vegetation drag proposed by Sogachev & Panferov (2006) have been solved with OpenFOAM using the finite volume method. A neutrally stable HHASL has been modelled following the guidance of Richards & Norris (2019). As recently prescribed by Richards & Norris (2019), the shear stress was assumed to decrease linearly with height and the wind flow was partially driven by a pressure gradient and partially by a shear stress. New top boundary conditions for the TKE and its dissipation rate have been introduced. This new set of boundary conditions has been validated successfully in the case of a wind flow in and above a horizontally homogeneous canopy by comparing profiles of mean wind velocity and TKE with the field measurements of Arnqvist *et al.* (2015). The agreement using the boundary conditions presented in this paper was significantly better than when the shear stress is assumed to be constant through the domain. The proposed method to simulate the wind flow over a forest clearing has been validated against wind tunnel measurements from Raupach *et al.* (1987) and Frank & Ruck (2007) by comparing profiles of mean velocity and TKE. This validation shows that the numerical model is able to reproduce the flow above a clearing in a horizontally homogeneous canopy.

The wind flow was studied for a reference boreal forest over 14 clearings of different size, ranging from  $1h$  to  $100h$ . In addition, to investigate the sensitivity of the flow to the forest morphology, three other LAD distributions and three other LAI, ranging from 2.5 to 10, were tested. Vertical and longitudinal profiles of the mean velocity and the TKE were presented. Moreover, assuming that a wind turbine with a rotor diameter of  $7h$  and a hub height of  $7.5h$  (*i.e.* a turbine of around



3MW) was sitting in the clearing, spatial variations of available wind energy, average wind shear and cumulative TKE in the layer where the wind flow intersects with the swept area were estimated from the simulations, as each of these three quantities affects the operation of a wind turbine. In order to investigate if the hub heights change these distributions, two other hub heights were studied.

The study has some echoes of that of Sogachev *et al.* (2009), but is scaled to fit the size of current taller and larger wind turbines, and additionally investigates the influence of hub height and forest morphology. Contrary to expectations, the results show that the presence of a clearing in the forest does not necessarily lead to a gain in available wind power nor to a significant reduction of cTKE or average wind shear compared to a completely forested area, and enlarging the gap does not necessarily improve these variables. Considering that it also preserves the forest, the most advantageous choice for wind turbine exploitation is to keep the clearing to a small size, around  $4h$  or less, for which the presence of a clearing has almost no effect. Clearings of medium size, *i.e.* approximately between  $10h$  and  $30h - 40h$ , are the *least* suitable, as they provide the greatest reductions in  $E$  (up to 8%), and the greatest increases in cTKE and AWS (up to 2.5% and 6.2% respectively). While continuing to enlarge the clearing progressively restores more favorable conditions and reduces the cTKE and AWS, small clearing conditions are not restored for  $E$ , even for a large  $100h$  clearing. Unexpectedly, although increasing the hub height may be a way to reduce the negative effect of the forest on the wind flow encountered by the turbine, it does not reduce the relative changes in the flow generated by a clearing. With increased forest density, as well as an LAD more concentrated at the top of the trees, the effect of the clearing is intensified. However, the changes are not significant, thus the previous statements on suitable clearing sizes are fairly general regarding forest morphology.

Several assumptions and simplifications have been made to carry out this study. First, only flat terrains and homogeneous forests have been considered. Second, although it has been shown that the drag coefficient of the forest depends on the speed of the incoming flow (Mayhead, 1973), it has been assumed constant. However, as outlined by Sogachev *et al.* (2009), taking into account this dependency should not significantly change the results. Finally, the model does not take

into account the thermal stratification of the atmosphere or the thermal effects created by the clearing, which should be safe to neglect under the high wind velocities such as those of wind power production (Sogachev *et al.*, 2009).

## CHAPITRE 4

### DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats ont déjà été en partie discutés dans l'article présenté au chapitre précédent. Dans cette section, les points les plus importants sont approfondis et de nouveaux angles de réflexion sont apportés. Une synthèse de l'influence des différents paramètres étudiés est proposée en annexe I-1.

#### 4.1 Modélisation d'une CLSHH

##### 4.1.1 Originalité du travail

Lors de l'étude de l'écoulement dans la CLS pour l'éolien, la contrainte de cisaillement est généralement supposée constante à travers le domaine (Richards & Hoxey, 1993). Cette hypothèse est notamment suivie par Dalpé & Masson (2009) et Morales *et al.* (2019a). Dans leurs travaux, l'énergie cinétique turbulente continue d'augmenter au-dessus d' $1.5h$ , et la forme des profils ne correspond pas à celles des profils expérimentaux. Richards & Norris (2019) indiquent que le profil de l'énergie cinétique turbulente est fortement lié à celui de la contrainte de cisaillement. Il apparaît alors pertinent de modéliser différemment la contrainte de cisaillement.

Pour la modélisation de la CLSHH, les conditions aux limites habituelles qui supposent que la contrainte de cisaillement est constante à travers le domaine (Richards & Hoxey, 1993; Richards & Norris, 2011) ont été remplacées par une méthode plus récente qui consiste à modéliser la CLS comme un écoulement partiellement entraîné par un gradient de pression et partiellement par une contrainte de cisaillement, dont le profil décroît avec l'altitude au lieu d'être constant (Richards & Norris, 2019). A notre connaissance, il n'existe pas encore d'étude d'écoulement de la couche limite utilisant ces conditions aux limites. De plus, des conditions aux limites originales ont été proposées pour les quantités turbulentes à la limite supérieure du domaine afin de proposer un ensemble de conditions cohérent avec la nouvelle méthode.

Ce travail présente également la particularité de valider ces résultats à des hauteurs qui correspondent le mieux possible aux hauteurs d'opération des éoliennes actuelles compte tenu des données expérimentales disponibles dans la littérature. En effet, bien qu'ils aient simulé l'écoulement du vent dans la CLS dans le but de l'appliquer à l'éolien, Dalpé & Masson (2008) et Morales *et al.* (2019a) ont validé leurs résultats avec des données expérimentales à une altitude maximale de 2h.

#### **4.1.2 Apport du travail de recherche**

Le modèle proposé dans ce travail de recherche a permis d'obtenir des profils d'énergie cinétique turbulente qui sont validés par des données expérimentales collectées au-dessus d'une forêt (Arnqvist *et al.*, 2015). La forme de ces profils suit la forme caractéristique des profils expérimentaux (Sanz Rodrigo *et al.*, 2007; Arnqvist *et al.*, 2015), c'est à dire qu'après avoir atteint sa valeur maximale (autour d'environ 1.5h), l'énergie cinétique turbulente diminue avec l'altitude. Ces résultats sont plus satisfaisants que ceux proposés par Dalpé & Masson (2008) et Morales *et al.* (2019a), qui ont supposé la contrainte de cisaillement constante à travers la CLS. En effet, dans leur travaux, l'énergie cinétique turbulente continue d'augmenter au-dessus d'1.5h, et la forme des profils ne correspond pas à celles des profils expérimentaux. La méthode utilisée dans ce mémoire permet de mieux modéliser la CLS, en particulier le profil de l'énergie cinétique turbulente. Cela est cohérent avec les indications de Richards & Norris (2019), selon lesquelles le profil de l'énergie cinétique turbulente est fortement lié à celui de la contrainte de cisaillement.

### **4.2 Comportement de l'écoulement au-dessus des zones de coupe**

#### **4.2.1 Originalité du travail**

La plupart des études qui s'intéresse au comportement de l'écoulement dans les blocs de coupe ne s'intéresse pas au comportement de l'écoulement aux hauteurs d'opération des éoliennes mais à proximité du couvert végétal, notamment car elles étudient majoritairement les dommages

potentiellement causés aux arbres. Bien que ces études apportent un éclairage important sur le comportement de l'écoulement à proximité du couvert, et que les mesures expérimentales soient précieuses à la validation des modèles numériques, elles demeurent insuffisantes pour l'étude de la faisabilité d'implantation de turbines éoliennes.

Comme abordé dans la revue de littérature, à notre connaissance, seules deux études s'intéressent au comportement de l'écoulement dans les blocs de coupe pour l'éolien. La première, celle de Sogachev *et al.* (2009), ne s'intéresse pas à l'effet de la morphologie de la forêt ni à celui de la hauteur du moyeu, et étudie une couche d'air qui ne correspond plus aux altitudes auxquelles opèrent les éoliennes aujourd'hui. La seconde, celle de Sanz Rodrigo *et al.* (2007), n'étudie pas l'écoulement en sortie d'une forêt infinie, utilisent une longueur de coupe fixe, et modélise la forêt avec des mousses dont la densité n'est pas représentative de celles des forêts réelles. Ce travail présente donc l'originalité d'être adapté aux caractéristiques des éoliennes d'aujourd'hui, et d'étudier l'effet de la morphologie de la forêt tout comme celui de la hauteur du moyeu.

#### **4.2.2 Mise en parallèle avec les résultats à proximité du couvert**

Plusieurs similitudes peuvent être observées avec le comportement de l'écoulement à proximité de la forêt déjà mis en évidence dans la littérature.

Les résultats ont montré qu'au sein de la coupe, la vitesse moyenne du vent augmente proportionnellement à la longueur de celle-ci pour des hauteurs en dessous de  $4h$ , tandis qu'au-dessus, elle diminue avec l'augmentation de la taille du déboisement. Ces observations rejoignent celles de Frank & Ruck (2008), effectuées en dessous de  $4.25h$ , qui montrent qu'au sein du déboisement la vitesse moyenne du vent augmente proportionnellement à la longueur de celle-ci. Les simulations ont également montré que même lorsque le déboisement est long de plusieurs dizaines de fois  $h$ , il subsiste une réduction de la vitesse moyenne entre 25% et 30% par rapport à la valeur qu'elle aurait atteinte sur un terrain sans végétation. Ces résultats rappellent ceux de Chen *et al.* (1995), qui avait montré qu'après une distance de  $22h$ , la vitesse atteignait seulement 75% de la valeur qu'elle aurait atteinte sur terrain déboisé.

Concernant l'influence de la densité de la végétation, les similitudes sont moins systématiques. A l'augmentation de la densité, l'intensité de la turbulence est globalement augmentée, ce qui rejoint les résultats de Dupont & Brunet (2008b). Cependant, les résultats montrent que quand la densité de la végétation augmente, la vitesse globale diminue au sein de l'écoulement, ce qui est inverse au comportement près du couvert rapporté par Miller *et al.* (1991b).

#### 4.2.3 Comparaison avec l'état de l'art

Ce travail peut majoritairement être mis en parallèle avec celui de Sogachev *et al.* (2009). Il en reprend d'ailleurs la méthode de calcul des variables d'intérêt pour l'éolien, une partie des longueurs des zones de coupe testées, et la morphologie de la forêt de référence.

Dans cette étude, nous avons montré que la distribution des changements relatifs des variables d'intérêt pour l'éolien (par rapport à une absence de déboisement) dépend de la taille du déboisement et de la position en son sein, ce qui rejoint les résultats de Sogachev *et al.* (2009). Il a été montré que la présence d'un déboisement menait globalement à une diminution de l'énergie disponible, et ce jusqu'à des déboisements d'une longueur d'au moins 100h. Ces résultats rejoignent seulement en partie ceux de Sogachev *et al.* (2009), qui avait montré qu'au centre du déboisement, il y avait une baisse d'énergie pour les déboisements en dessous de 55h. Cependant, les résultats montrent qu'avec la diminution de l'altitude, la diminution d'énergie prend place dans des plus petits déboisements, et l'énergie augmente dans les plus grand déboisement. La différence entre les résultats de Sogachev *et al.* (2009) est donc probablement due à la différence de hauteur et d'épaisseur des couches d'air considérées. En effet, les auteurs avaient supposés que l'éolienne avait une hauteur de mat de 3.5h et un rotor de 3h.

Nous avons également montré que la présence d'un déboisement ne menait pas toujours à une diminution du cisaillement, mais qu'elle pouvait même, au contraire, mener à une augmentation pouvant atteindre 8%. Pourtant, Sogachev *et al.* (2009) avait montré que la présence d'un déboisement menait systématiquement à une diminution du cisaillement. Cependant, les résultats de la présente étude montre également que l'augmentation du cisaillement moyen s'intensifie

quand on augmente l'altitude du moyeu. La différence avec les résultats de Sogachev *et al.* (2009) est donc probablement due encore à la différence de hauteur des couches d'air.

Pour finir, les résultats ont montré que le changement de la densité du couvert avait une influence environ 2 fois plus forte sur le cTKE que sur l'énergie. Ces observations sont soutenues par les observations de Sanz Rodrigo *et al.* (2007), qui ont montré que la vitesse moyenne et l'énergie disponible était indépendantes de la densité du couvert tandis que l'intensité turbulente et les rafales augmentaient avec la densité.

#### **4.2.4 Retour sur les limites de la recherche**

Les effets thermiques dus à la stratification atmosphérique et à la végétation ont été négligés dans cette étude. Cependant, Sogachev *et al.* (2009) a fait la même simplification et indiquent que dans le cas des vitesses de vents élevées qui sont considérées lors de l'étude de la production d'énergie éolienne, les effets thermiques peuvent probablement être négligés sans effet significatif sur les résultats. Pour continuer, le coefficient de traînée de la forêt a été supposé constant, bien qu'il ait été démontré qu'il dépend de la vitesse du flux entrant (Mayhead, 1973). Néanmoins, Sogachev *et al.* (2009) a souligné que la prise en compte de cette dépendance ne devrait pas modifier les résultats de manière significative.

Pour finir, ce travail de recherche se limite à l'étude de forêts homogènes. De plus, un choix a dû être fait sur les caractéristiques de la morphologie des arbres. Le travail ayant pour but principal d'être utilisé au Québec, le modèle de forêt de référence correspond aux caractéristiques des forêts boréales. Dans la pratique, les forêts ne sont pas homogènes et il y a une très grande variété de formes et de densités de feuillage. Cependant, en testant différents types de morphologies "typiques" et différentes densités de forêt, ce travail a montré que le comportement global de l'écoulement était assez indépendant de la morphologie de la forêt pour que les conclusions de la recherche puissent être raisonnablement étendues à n'importe quelle forêt.





## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 Conclusion

Dans le but de mieux comprendre le comportement du vent au-dessus des zones déboisées dans les forêts pour l'installation des turbines éoliennes, une étude numérique de l'écoulement a été réalisée. L'écoulement du vent au-dessus de forêts horizontalement homogènes et au-dessus de zones de coupe de différentes tailles a été simulé à échelle fine. Une approche RANS couplée avec un schéma de fermeture  $k - \varepsilon$  modifié pour prendre en compte la traînée due à végétation proposée par Sogachev & Panferov (2006) a été utilisée. Le modèle CFD a été résolu avec le logiciel libre et ouvert OpenFOAM en utilisant la méthode des volumes finis.

Une CLS horizontalement homogène, neutre et stable a été modélisée en suivant les recommandations de Richards & Norris (2019). La pratique usuelle supposant que la contrainte de cisaillement est constante dans la CLS n'a pas été suivie et il a été supposé que la contrainte de cisaillement diminuait linéairement avec l'altitude (Richards & Norris, 2019). L'écoulement du vent a ainsi été partiellement conduit par un gradient de pression et partiellement par une contrainte de cisaillement. Afin d'obtenir un ensemble de conditions aux limites cohérent, de nouvelles conditions aux limites pour le TKE et son taux de dissipation en haut du domaine ont été introduites en s'appuyant sur le travail de O'Sullivan *et al.* (2011). Ce nouvel ensemble de conditions aux limites a été validé avec succès dans le cas d'un écoulement de vent dans et au-dessus d'une canopée horizontalement homogène en comparant les profils de la vitesse moyenne du vent et du TKE avec les mesures de terrain de Arnqvist *et al.* (2015). Les résultats obtenus en utilisant les conditions aux limites présentées dans cet article étaient significativement meilleurs que lorsque la contrainte de cisaillement est supposée être constante à travers le domaine. La méthode proposée pour simuler l'écoulement du vent au-dessus d'une clairière a été validée par rapport aux mesures en soufflerie de Raupach *et al.* (1987) et Frank & Ruck (2007) en comparant les profils de vitesse moyenne et de TKE. Deux études ont été utilisées dans la

validation afin d'assurer la validité du modèle à la fois pour les petits ( $1h$ ) et les grands ( $23h$ ) déboisements. Cette validation montre que le modèle numérique est capable de reproduire l'écoulement au-dessus d'une zone déboisée dans une forêt horizontalement homogène supposée infinie.

L'écoulement du vent a été étudié dans le cas d'une forêt boréale de référence au-dessus de 14 clairières de tailles différentes, allant d'une longueur de  $1h$  à  $100h$ . De plus, pour étudier la sensibilité de l'écoulement à la morphologie de la forêt, trois autres LAD et trois autres LAI, allant de 2.5 à 10, ont été testés. Les profils verticaux et longitudinaux de la vitesse moyenne et de l'énergie cinétique ont été présentés. En supposant qu'une éolienne avec un diamètre de rotor de  $7h$  et une hauteur de moyeu de  $7.5h$  (*i.e.* une turbine d'environ 3MW) était installée dans la clairière, les variations spatiales de l'énergie éolienne disponible, du cisaillement moyen du vent et du TKE cumulé dans la couche où le flux de vent croise la zone balayée ont été estimées à partir des simulations, car chacune de ces trois quantités affecte le fonctionnement d'une éolienne. Afin d'examiner si les hauteurs de moyeu modifient ces distributions, deux autres hauteurs de moyeu ont été étudiées.

Cette étude fait écho à celle de Sogachev *et al.* (2009), mais elle est mise à l'échelle pour correspondre à la taille des éoliennes actuelles, plus hautes et plus grandes, et étudie en outre l'influence de la hauteur du moyeu et de la morphologie de la forêt. Contrairement aux attentes, les résultats montrent que la présence d'une clairière dans la forêt ne conduit pas nécessairement à un gain de puissance éolienne disponible ni à une réduction significative du cTKE ou du cisaillement moyen du vent par rapport à une zone entièrement boisée, et qu'agrandir la clairière n'améliore pas nécessairement ces variables. Si l'on considère que cela préserve également la forêt, le choix le plus avantageux pour l'exploitation des éoliennes est de maintenir la clairière à une petite taille, environ  $4h$  ou moins, pour laquelle la présence d'une clairière n'a presque aucun effet. De manière inattendue, bien que l'augmentation de la hauteur du moyeu puisse être

un moyen de réduire l'effet négatif de la forêt sur le flux de vent rencontré par l'éolienne, elle ne réduit pas les changements relatifs du flux généré par une clairière. Avec une densité forestière accrue, ainsi qu'un LAD plus concentré à la cime des arbres, l'effet de la clairière est intensifié. Cependant, les changements ne sont pas significatifs et les schémas de distribution restent en grande partie les mêmes, ainsi les déclarations précédentes sur les tailles de défrichement appropriées sont assez générales en ce qui concerne la morphologie de la forêt.

## 5.2 Recommandations

Afin d'assurer la validité des résultats, une partie importante du travail de recherche a été consacrée à la bonne modélisation de la CLS, ainsi qu'à la validation du modèle de la canopée et de son implémentation dans le logiciel OpenFOAM. Ainsi, les bases du domaine ont été posées et une première réponse a pu être donnée à la problématique. Il serait maintenant intéressant, voir nécessaire, de pousser d'avantage la recherche dans ce domaine, notamment en élargissant les hypothèses et en se défaisant des simplifications faites. Tout d'abord, il serait pertinent de passer de simulations 2D à des simulations 3D. En plus de permettre la prise en compte de la force de Coriolis, cela permettrait également de prendre en compte les interactions entre l'écoulement et la turbine et d'étudier les effets du déboisement sur l'écoulement à proximité des pales. Ensuite, il serait intéressant d'étendre l'étude à des terrains plus complexes, afin d'explorer conjointement l'effet de la végétation et du relief sur l'écoulement au-dessus du déboisement. Pour finir, le même problème pourrait être considéré dans le cas d'un enchaînement de blocs de coupe, afin d'étudier l'influence de la présence d'autres zones déboisées en aval de l'écoulement, qui ne serait alors plus un écoulement pleinement développé sortant d'une forêt infinie. Il pourrait également être envisagé de vérifier si les effets thermiques sont effectivement négligeables, comme l'ont proposé (Sogachev *et al.*, 2009) et comme appliqué dans le présent travail. Un modèle permettant de prendre en compte les effets flottabilité dus à la stratification thermique sur les équations conjointement à l'effet de la végétation a été proposé par Sogachev,

Kelly & LeClerc (2012a), dans le cas, entre autres, de l'utilisation d'un modèle de fermeture  $k - \varepsilon$ . Les effets thermiques causés par la forêt elle même pourraient également être pris en compte. Cela pourrait être réalisé sans trop de difficulté, car ces deux modifications des équations ont été récemment (trop récemment pour être utilisées dans cette étude) implémentées dans OpenFOAM à l'aide d'options.

## ANNEXE I

### INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES SUR L'ÉCOULEMENT

Tableau-A I-1 Overall influence of the clearing size, the position of the hub, the height of the rotor, and the forest characteristics on the wind parameters above the clearings (Relative Change is abbreviated by RC)

Parameter	Relative Change (%)	Increasing clearing length	Going downwind above the clearing	Increasing height	Increasing LAD at the top	Increasing LAI
Mean velocity	-3 to +23	RC increases in amplitude	RC increases in amplitude	RC decreases in amplitude. $z/h \leq 2$ : (+) RC $z/h \geq 6$ : (-) RC	Quasi-independent	Quasi-independent
k	-34 to +7.5	Near-ground k decreases.	RC significantly increases in amplitude	RC greatly reduced in amplitude	(+) RC are diminished (-) are greater	(+) RC are greater (-) are diminished
Energy	-9 to -1	$D/h \leq 30$ : decrease $D/h \geq 30$ : slight increase	Significant decrease downwind	$D/h \leq 30$ : increase $D/h \geq 30$ : decrease	Slight decrease	Slight decrease
cTKE	-9 to +2	$D/h \geq 25$ : decrease $D/h \geq 40$ : (-) RC	RC increased in amplitude $10 \leq D/h \leq 40$ : (+) RC in the first half, (-) in the second	$D/h \geq 6$ : slight increase $30 \leq D/h \leq 55$ : (+) RC appears	Quasi-independent	Slight increase
Average WS	-30 to +6	$D/h \leq 10$ : increase $D/h \geq 10$ : decrease $3 \leq D/h \leq 25$ : (+) RC $D/h \geq 40$ : (-) RC	RC increase in amplitude	Increase. $10 \leq D/h \leq 40$ : (+) RC appears	Increase	Increase



## ANNEXE II

### PROFILS LONGITUDINAUX POUR DIFFÉRENTES MORPHOLOGIES DE FORÊT

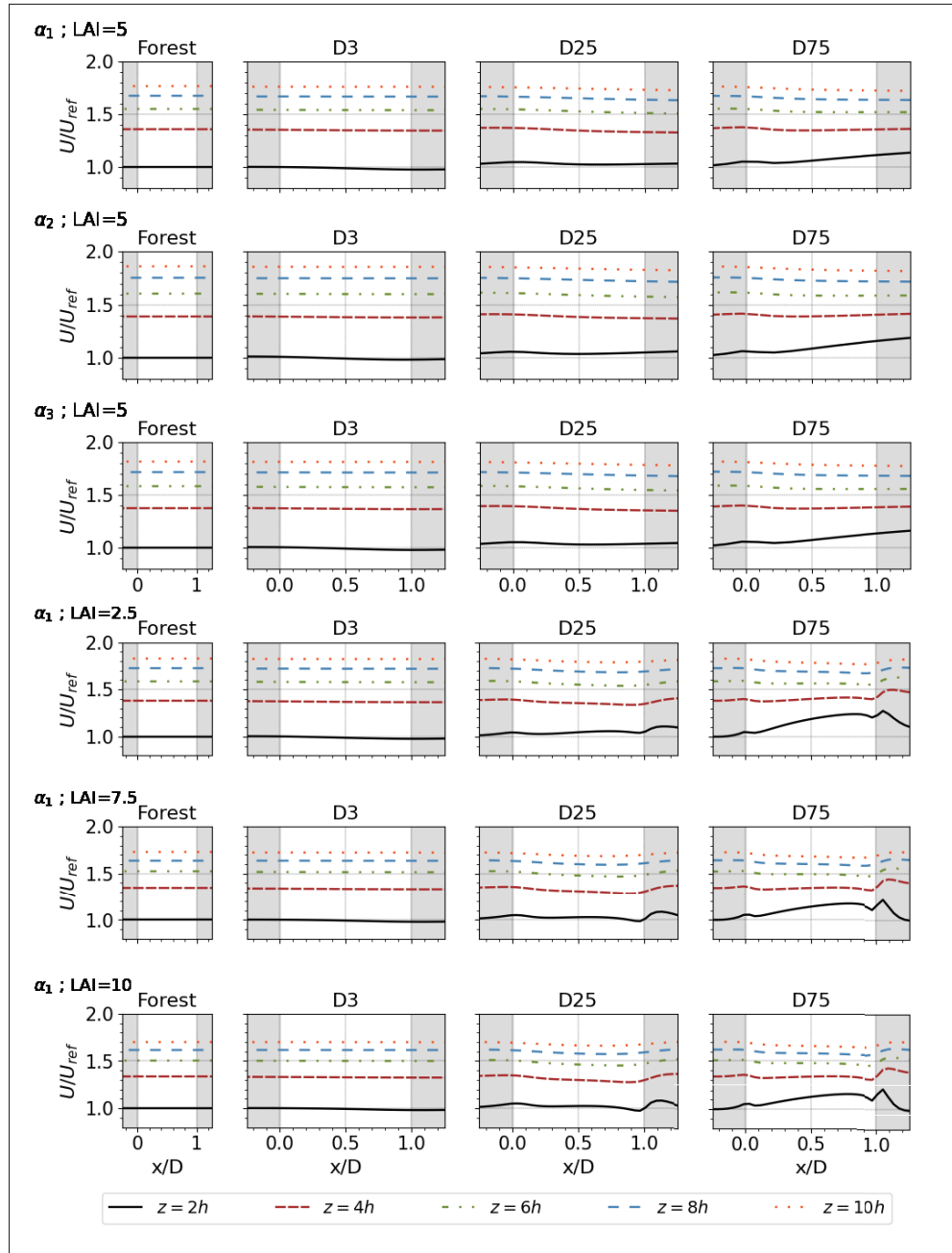


Figure-A II-1 Horizontal profiles of mean velocity above clearings of different sizes ( $D/h = 3, 10, 25, 75$ ) against profiles above undisturbed forest for different LAD and LAI

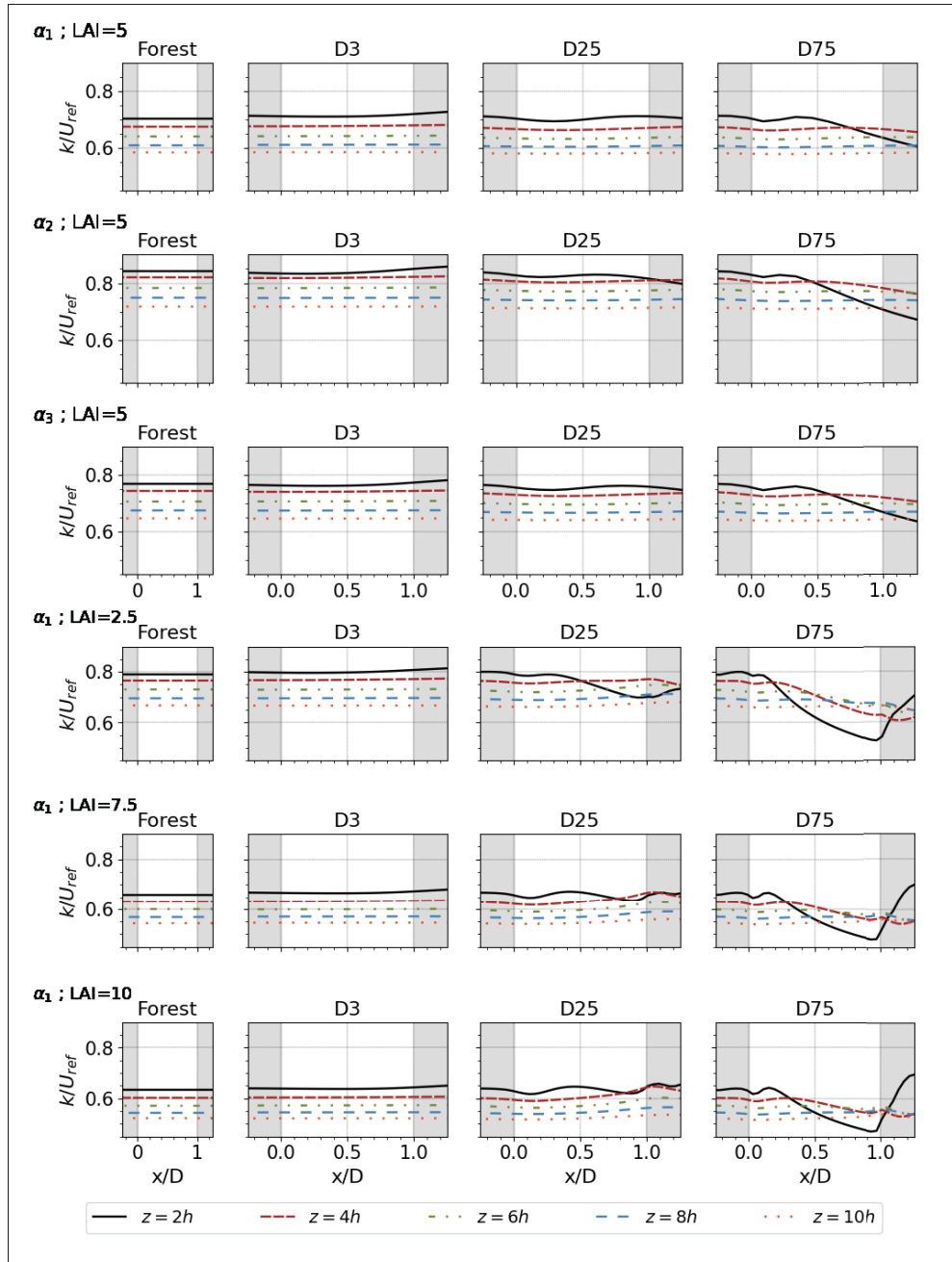


Figure-A II-2 Horizontal profiles of TKE above clearings of different sizes ( $D/h = 3, 10, 25, 75$ ) against profiles above undisturbed forest for different LAI and  $\alpha$



## BIBLIOGRAPHIE

- Adedipe, T. A., Chaudhari, A. & Kauranne, T. (2020). Impact of different forest densities on atmospheric boundary-layer development and wind-turbine wake. *Wind Energy*, 23(5), 1165-1180. doi : 10.1002/we.2464.
- Amiro, B. D. (1990a). Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 51(1), 99-121. doi : 10.1007/bf00120463.
- Amiro, B. D. (1990b). Drag coefficients and turbulence spectra within three boreal forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 52(3), 227-246. doi : 10.1007/bf00122088.
- Arnqvist, J., Segalini, A., Dellwik, E. & Bergstrom, H. (2015). Wind Statistics from a Forested Landscape. *Boundary-Layer Meteorology*, 156. doi : 10.1007/s10546-015-0016-x.
- Arroyo, R. C., Rodrigo, J. S. & Gankarski, P. (2014). Modelling of atmospheric boundary-layer flow in complex terrain with different forest parameterizations. *Journal of Physics : Conference Series*, 524, 012119. doi : 10.1088/1742-6596/524/1/012119.
- Arya, P. S. (2001). *Introduction to micrometeorology*. Elsevier.
- Bergen, J. D. (1975). Air movement in a forest clearing as indicated by smoke drift. *Agricultural Meteorology*, 15(2), 165-179. doi : [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(75\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(75)90002-3).
- Bergström, H., Alfredsson, H., Arnqvist, J., Carlén, I., Dellwik, E., Fransson, J., Ganander, H., Mohr, M., Segalini, A. & Söderberg, S. (2013). Wind power in forests : wind and effects on loads. Elforsk AB.
- Blocken, B., Stathopoulos, T. & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer : wall function problems. *Atmospheric environment*, 41(2), 238–252.
- Boudreault, L.-E., Bechmann, A., Tarvainen, L., Klemetsson, L., Shendryk, I. & Dellwik, E. (2015). A LiDAR method of canopy structure retrieval for wind modeling of heterogeneous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 86 - 97. doi : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.014>.
- Boussinesq, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Impr. nationale.
- CanWEA. (2019a, Novembre, 7). Marché éolien national [Web Page]. Repéré à <https://canwea.ca/fr/marches-eoliens/national/>.
- CanWEA. (2019b, Novembre, 7). L'éolien au Québec [Web Page]. Repéré à <https://canwea.ca/fr/marches-eoliens/quebec/>.

- Chen, J. M., Black, T. A., Novak, M. D. & Adams, R. S. (1995). A wind tunnel study of turbulent airflow in forest clearcuts. Dans Grace, J. & Coutts, M. P. (Éds.), *Wind and Trees* (pp. 71-87). Cambridge : Cambridge University Press. doi : DOI: 10.1017/CBO9780511600425.005.
- Dalpé, B. & Masson, C. (2008). Numerical Study of Fully Developed Turbulent Flow Within-and Above a Dense Forest. *Wind Energy*, 11(5), 503-515. doi : 10.1002/we.271.
- Dalpé, B. & Masson, C. (2009). Numerical simulation of wind flow near a forest edge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5-6), 228-241. doi : 10.1016/j.jweia.2009.06.008.
- Dalpé, B. (2007). *Couche de surface atmosphérique en présence d'un recouvrement forestier*. (Mémoire de maîtrise électronique). Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/574>.
- Deaves, D. & Harris, R. (1978). A mathematical model of the structure of strong winds, CIRIA Report 76. *Construction Industry Research and Information Association, London*.
- Desmond, C. J., Watson, S. J. & Hancock, P. E. (2017). Modelling the wind energy resource in complex terrain and atmospheres. Numerical simulation and wind tunnel investigation of non-neutral forest canopy flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 166, 48-60. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.014>.
- Desmond, C. J., Watson, S. J., Aubrun, S., Ávila, S., Hancock, P. & Sayer, A. (2014). A study on the inclusion of forest canopy morphology data in numerical simulations for the purpose of wind resource assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 126, 24-37. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.011>.
- Dupont, S. & Brunet, Y. (2008a). Influence of foliar density profile on canopy flow : A large-eddy simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(6), 976 - 990. doi : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.01.014>.
- Dupont, S. & Brunet, Y. (2008b). Edge flow and canopy structure : a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(1), 51-71.
- Endalew, A. M., Hertog, M., Gebrehiwot, M. G., Baelmans, M., Ramon, H., Nicolai, B. & Verboven, P. (2009). Modelling airflow within model plant canopies using an integrated approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 66(1), 9-24.
- Enevoldsen, P. (2017). *Managing the Risks of Wind Farms in Forested Areas : Design Principles for Northern Europe*. (Thesis).
- Ferziger, J. H., Perić, M. & Street, R. L. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer.

- Finnigan, J. (2000). Turbulence in Plant Canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1), 519-571. doi : 10.1146/annurev.fluid.32.1.519.
- Flesch, T. K. & Wilson, J. D. (1999). Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. : I. Measured winds in experimental cutblocks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93(4), 229-242. doi : [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00112-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00112-9).
- Foudhil, H., Brunet, Y. & Caltagirone, J. (2005). A Fine-Scale  $k - \varepsilon$  Model for Atmospheric Flow over Heterogeneous Landscapes. *Environmental Fluid Mechanics*, 5, 247-265. doi : 10.1007/s10652-004-2124-x.
- Frank, C. & Ruck, B. (2007). Windkanal Studie zur Strömung in Waldlichtungen.
- Frank, C. & Ruck, B. (2008). Numerical study of the airflow over forest clearings. *Forestry*, 81(3), 259-277. doi : DOI 10.1093/forestry/cpn031.
- Franke, J. & Baklanov, A. (2007). *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment : COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models*.
- Garratt, J. R. (1992). *The Atmospheric Boundary Layer, 1992* (éd. Cambridge University Press). doi : [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)90026-8](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)90026-8).
- Gash, J. (1986). Observations of turbulence downwind of a forest-heath interface. *Boundary-Layer Meteorology*, 36(3), 227-237.
- Green, S. (1992). Modeling Turbulent Air Flow in a Stand of Widely Spaced Trees. *PHOENICS Journal Computational Fluid Dynamics and its Applications*, 5, 294-312.
- Hajer, B. Y. (2016). Simulation de la couche limite atmosphérique sur un couvert forestier en terrain avec orographie.
- Hargreaves, D. M. & Wright, N. G. (2007). On the use of the  $k^\gamma \varepsilon$  model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(5), 355-369. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.08.002>.
- International Electrotechnical Commission. (1999). *Wind Turbine Generator Systems—Part 1 : Safety Requirements, second ed.* IEC61400-1.
- Issa, R. I. (1986). Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of computational physics*, 62(1), 40-65.

- Jasak, H. (1996). Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows.
- Jones, W. & Launder, B. (1972). The Prediction of Laminarization with a Two-Equation model of Turbulence. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 301-314.
- Kaimal, J. C. & Finnigan, J. J. (1994). *Atmospheric boundary layer flows : their structure and measurement*. Oxford university press.
- Katul, G. G. & Chang, W. (1999). Principal Length Scales in Second-Order Closure Models for Canopy Turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 38(11), 1631-1643. doi : 10.1175/1520-0450(1999)038<1631:Plsiso>2.0.Co;2.
- Katul, G. G., Mahrt, L., Poggi, D. & Sanz, C. (2004). One- and two-equation models for canopy turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(1), 81-109. doi : DOI 10.1023/B:BOUN.0000037333.48760.e5.
- Kobayashi, M. H., Pereira, J. C. F. & Siqueira, M. B. B. (1994). Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2D hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 53(3), 357-374. doi : [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90091-4).
- Lange, M. & Focken, U. (2006). *Physical approach to short-term wind power prediction*. Springer.
- Lee, X. (2000). Air motion within and above forest vegetation in non-ideal conditions. *Forest Ecology and Management*, 135, 3-18. doi : 10.1016/S0378-1127(00)00294-2.
- Liang, L., Xiaofeng, L., Borong, L. & Yingxin, Z. (2006). Improved  $k-\varepsilon$  two-equation turbulence model for canopy flow. *Atmospheric Environment*, 40(4), 762-770. doi : <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.010>.
- Liu, J., Chen, J. M., Black, T. A. & Novak, M. D. (1996).  $E-\varepsilon$  modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology*, 77(1), 21-44. doi : 10.1007/BF00121857.
- Lopes, A., Laginha Palma, J. & Lopes, J. (2013). Improving a Two-Equation Turbulence Model for Canopy Flows Using Large-Eddy Simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, 149. doi : 10.1007/s10546-013-9850-x.
- Lopes da Costa, J. C., Castro, F. A., Palma, J. M. L. M. & Stuart, P. (2006). Computer simulation of atmospheric flows over real forests for wind energy resource evaluation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(8), 603-620. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.02.002>.

- Lopes da Costa, J. C. (2008). *Atmospheric flow over forested and non-forested complex terrain*. (Thesis).
- Mayhead, G. (1973). Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology*, 12, 123–130.
- Miller, D., Lin, J. & Lu, Z. (1991a). Air flow across an alpine forest clearing : a model and field measurements. *Agricultural and forest meteorology*, 56(3-4), 209-225.
- Miller, D., Lin, J. & Lu, Z. (1991b). Some effects of surrounding forest canopy architecture on the wind field in small clearings. *Forest Ecology and Management*, 45(1-4), 79-91.
- Morales, V. (2017). *Evaluating the Accuracy of RANS Wind Flow Modeling and its Impact on Capacity Factor for Moderately Complex Forested Terrain*. (Thesis).
- Morales, V., Sumner, J., Nathan, J. & Masson, C. (2019a). Evaluating the Accuracy of RANS Wind Flow Modeling Over Forested Terrain-Part 1 : Canopy Model Validation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 141, 10. doi : 10.1115/1.4042242].
- Morales, V., Sumner, J., Nathan, J. & Masson, C. (2019b). Evaluating the Accuracy of RANS Wind Flow Modeling Over Forested Terrain. Part 2 : Impact on Capacity Factor for Moderately Complex Topography. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1-13. doi : 10.1115/1.4045145.
- Moukalled, F., Mangani, L. & Darwish, M. (2016). *The finite volume method in computational fluid dynamics*. Springer.
- Nebenführ, B. & Davidson, L. (2017). Prediction of wind-turbine fatigue loads in forest regions based on turbulent LES inflow fields. *Wind Energy*, 20(6), 1003–1015.
- Nebenführ, B. & Davidson, L. (2015). Large-eddy simulation study of thermally stratified canopy flow. *Boundary-layer meteorology*, 156(2), 253–276.
- O’Sullivan, J., Archer, R. & Flay, R. (2011). Consistent boundary conditions for flows within the atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(1), 65 - 77. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.10.009>.
- Panferov, O. & Sogachev, A. (2008). Influence of gap size on wind damage variables in a forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11), 1869-1881. doi : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.012>.
- Panofsky, H. & Dutton, J. (1984). *Atmospheric Turbulence*. John Wiley & Sons, New York.

- Parente, A., Gorlé, C., Beeck, J. & Benocci, C. (2011). Improved  $k-\varepsilon$  model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 267-278. doi : 10.1016/j.jweia.2010.12.017.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* (éd. Taylor & Francis).
- Patton, E. & Finnigan, J. (2012). Canopy turbulence. Dans Fernando, H. (Éd.), *Handbook of environmental fluid dynamics* (vol. 1 : overview and fundamentals). CRC Press, Boca Raton.
- Pinard, J. (2000). *Numerical simulation of wind in plant canopies*. (PhD).
- Pinard, J. D. J.-P. & Wilson, J. D. (2001). First- and Second-Order Closure Models for Wind in a Plant Canopy. *Journal of Applied Meteorology*, 40(10), 1762-1768. doi : 10.1175/1520-0450(2001)040<1762:Fasocm>2.0.Co;2.
- Poëtte, C., Gardiner, B., Dupont, S., Harman, I., Böhm, M., Finnigan, J., Hughes, D. & Brunet, Y. (2017). The Impact of Landscape Fragmentation on Atmospheric Flow : A Wind-Tunnel Study. *Boundary-Layer Meteorology*, 163(3), 393-421. doi : 10.1007/s10546-017-0238-1.
- Raupach, M. R. (1994). Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorology*, 71(1), 211-216. doi : 10.1007/BF00709229.
- Raupach, M. R., Bradley, E. & Ghadiri, H. (1987). *A wind tunnel investigation into the aerodynamic effect of forest clearings on the nesting of Abbott's booby on Christmas Island*. CSIRO Division of Environmental Mechanics.
- Raupach, M. & Thom, A. S. (1981). Turbulence in and above plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13(1), 97-129.
- Raynor, G. S. (1971). Wind and Temperature Structure in a Coniferous Forest and a Contiguous Field. *Forest Science*, 17, 351-363.
- Richards, P. J. & Hoxey, R. P. (1993). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the  $k-\varepsilon$  turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, 145-153. doi : <https://doi.org/10.1016/0167>.
- Richards, P. & Norris, S. (2011). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics - J WIND ENG IND AERODYN*, 99, 257-266. doi : 10.1016/j.jweia.2010.12.008.



- Richards, P. J. & Norris, S. E. (2019). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering : Still an issue after 25 years. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 190, 245 - 255. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.012>.
- Richards, P. & Norris, S. (2015). Appropriate boundary conditions for a pressure driven boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 43-52. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.003>.
- Sanz, C. (2003). A note on k-epsilon modelling of vegetation canopy air-flows. *Boundary-Layer Meteorology*, 108(1), 191-197. doi : Doi 10.1023/A:1023066012766.
- Sanz Rodrigo, J., van Beeck, J. & Dezsö-Weidinger, G. (2007). Wind tunnel simulation of the wind conditions inside bidimensional forest clear-cuts. Application to wind turbine siting. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(7), 609-634. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.001>.
- Sanz Rodrigo, J., Chávez Arroyo, R. A., Moriarty, P., Churchfield, M., Kosović, B., Réthoré, P.-E., Hansen, K. S., Hahmann, A., Mirocha, J. D. & Rife, D. (2017). Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Energy and Environment*, 6(2), e214. doi : 10.1002/wene.214.
- Seinfeld, J. (2015). TROPOSPHERIC CHEMISTRY AND COMPOSITION | Aerosols/Particles. Dans North, G. R., Pyle, J. & Zhang, F. (Éds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)* (éd. Second Edition, pp. 182-187). Oxford : Academic Press. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00438-2>.
- Sogachev, A., Menzhulin, G. V., Heimann, M. & Lloyd, J. (2002). A simple three-dimensional canopy – planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. *Tellus B : Chemical and Physical Meteorology*, 54(5), 784-819. doi : 10.3402/tellusb.v54i5.16729.
- Sogachev, A. (2009). A Note on Two-Equation Closure Modelling of Canopy Flow. *Boundary-Layer Meteorology*, 130(3), 423-435. doi : 10.1007/s10546-008-9346-2.
- Sogachev, A. & Panferov, O. (2006). Modification of Two-Equation Models to Account for Plant Drag. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(2), 229-266. doi : 10.1007/s10546-006-9073-5.
- Sogachev, A., Mann, J., Dellwik, E., Bingöl, F., Rathmann, O., Jørgensen, H. E. & Panferov, O. (2009). Wind energy availability above gaps in a forest. *EWEC 2009 Proceedings*, 6.
- Sogachev, A., Kelly, M. & LeClerc, M. (2012a). Consistent Two-Equation Closure Modelling for Atmospheric Research : Buoyancy and Vegetation Implementations. *Boundary-Layer Meteorology*, 145. doi : 10.1007/s10546-012-9726-5.

- Sogachev, A., Kelly, M. & Leclerc, M. Y. (2012b). Consistent Two-Equation Closure Modelling for Atmospheric Research : Buoyancy and Vegetation Implementations. *Boundary-Layer Meteorology*, 145(2), 307-327. doi : 10.1007/s10546-012-9726-5.
- Stacey, G., Belcher, R., Wood, C. & Gardiner, B. (1994). Wind flows and forces in a model spruce forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 69(3), 311-334.
- Stull, R. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=4n3y0Szvp9wC>.
- Sumner, J., Watters, C. S. & Masson, C. (2010). CFD in Wind Energy : The Virtual, Multiscale Wind Tunnel. *Energies*, 3(5), 989-1013. doi : 10.3390/en3050989.
- Sumner, J. (2006). *Influence de la stabilité atmosphérique sur les pratiques du secteur éolien*. (Thesis).
- Sumner, J. & Masson, C. (2012). k- $\epsilon$  simulations of the neutral atmospheric boundary layer : analysis and correction of discretization errors on practical grids. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(6), 724-741. doi : 10.1002/fld.2709.
- Svensson, U. & Häggkvist, K. (1990). A two-equation turbulence model for canopy flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 35, 201-211. doi : [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90216-Y](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90216-Y).
- Verhoef, A., McNaughton, K. G. & Jacobs, A. F. G. (1997). A parameterization of momentum roughness length and displacement height for a wide range of canopy densities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 1(1), 81-91. doi : 10.5194/hess-1-81-1997.
- Versteeg, H. & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method*.
- Ward, J. (1964). Turbulent flow in porous media. *Journal of the hydraulics division*, 90(5), 1-12.
- Wilson, J. & Flesch, T. (1999). Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. III. A windflow model to diagnose spatial variation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 259-282. doi : 10.1016/S0168-1923(98)00121-X.
- Wilson, J. D., Finnigan, J. J. & Raupach, M. R. (1998). A first-order closure for disturbed plant-canopy flows, and its application to winds in a canopy on a ridge. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(547), 705-732.



- Wooding, R. A. (1968). A low-speed wind tunnel for model studies in micro-meteorology. II. The Pye Laboratory wind tunnel. *Aust CSIRO Div Plant Ind Tech Pap*, 25, 1 - 24.
- Zendehbad, M., Chokani, N. & Abhari, R. S. (2016). Impact of forested fetch on energy yield and maintenance of wind turbines. *Renewable Energy*, 96, 548-558. doi : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.014>.