

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

PAR
Nicolas LUSSIER-CLÉMENT

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL, PAR SIMULATION NUMÉRIQUE, D'AIDE À LA
DÉCISION POUR LE POSITIONNEMENT DES ÉOLIENNES EN TERRAIN COMPLEXE

MONTRÉAL, LE 19 MARS 2013

© Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

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

M. Christophe Sibuet Watters, codirecteur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Simon Joncas, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jonathan Nicolle, examinateur externe
Chercheur pour l'unité d'expertise mécanique, métallurgique et hydro-éolien à Hydro-Québec

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

LE VENDREDI 1ER FÉVRIER 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier plusieurs personnes. Tout d'abord, monsieur le professeur Christian Masson pour l'opportunité, le soutien et les conseils qu'il m'a généreusement donnés. Mon codirecteur monsieur Christophe Sibuet Watters qui a été d'une aide précieuse dans ce projet. Je souhaite aussi remercier l'École de technologie supérieure, les différents professeurs qui se sont montrés très disponibles, monsieur Dufresne et monsieur Benoit.

Deuxièmement, je remercie monsieur Simon Joncas d'avoir accepté de présider ma soutenance, ainsi que Jonathan Nicolle d'avoir accepté d'être examinateur externe.

Tout au long de ce travail j'ai eu la chance de prendre part à diverses discussions constructives au sein de la chaire de recherche sur la mécanique des fluides dans le contexte de l'éolien, la programmation et bien d'autres sujets. Beaucoup de ces échanges ont été très utiles dans le cadre de ce projet et la réussite de ce travail est en partie grâce à ceux-ci. Plus particulièrement mes remerciements vont à Jörn Nathan, Hajer Ben Younes, David Lapointe, Marc Pelletier, Francis Pelletier, Mary Bautista, Hugo Olivares, Eric Jeannotte, et Jonathon Sumner .

Je souhaite aussi remercier Simon Breton qui a été mon contact pour obtenir les données de soufflerie de Røkenes (2009), dont l'auteur a généreusement donné avec explication, Louis-Étienne Boudreault, pour son travail sur lequel le mémoire présent est en partie basé, et Hydro-Québec, pour la bourse généreusement offerte.

Finalement, je veux remercier ma famille pour sa présence, particulièrement mon épouse Annie-Claude qui a été un soutien tout au long de ce travail. Il serait pour moi inconcevable de ne pas remercier celui sans qui rien n'aurait été possible, Jésus-Christ, mon Sauveur. De lui, j'ai reçu bien plus que la connaissance de la science. C'est grâce à lui que je puis dire que je suis héritier du Dieu vivant et que j'ai l'espérance de la gloire auprès de lui. Il a été pour moi un encouragement dans les temps difficiles.

Merci à tous.

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL, PAR SIMULATION NUMÉRIQUE, D'AIDE À LA DÉCISION POUR LE POSITIONNEMENT DES ÉOLIENNES EN TERRAIN COMPLEXE

Nicolas LUSSIER-CLÉMENT

RÉSUMÉ

Le secteur de l'éolien est en croissance au Québec et les terrains plats sont de plus en plus rares. Cependant, la ressource éolienne est encore loin d'être exploitée à son maximum. Les sites potentiels pour de nouveaux parcs éoliens sont de plus en plus situés en terrains complexes. Les outils linéaires traditionnels d'aide à la décision dans le positionnement des éoliennes, comme WaSP Engineering, sont, alors, hors de leur limite d'utilisation. Ce mémoire porte sur la simulation de la couche limite atmosphérique par la méthode des volumes finis et le développement d'un outil de post-traitement. Il s'inscrit dans les efforts déployés pour mieux comprendre et extraire la ressource éolienne des terrains complexes. Dans cet outil, la norme IEC 61400-1 est utilisée pour déterminer certains paramètres pertinents pour le secteur de l'éolien à partir de simulations avec un modèle de turbulence à deux équations. Les simulations effectuées sont comparées à des mesures en soufflerie. Les résultats de l'outil développé sont également comparés aux résultats de WaSP Engineering. La méthode proposée apporte une amélioration par rapport à WaSP Engineering sur l'évaluation des paramètres d'intérêt en terrains complexes.

Mot-clés : Éolien, Positionnement, Terrain complexe, Couche Limite Atmosphérique, Mécanique des Fluides Numérique, OpenFOAM, WaSP Engineering.

DEVELOPMENT OF TOOL, WITH NUMERICAL SIMULATION, TO HELP THE ASSESSMENT OF WIND TURBINE SITING IN COMPLEX TERRAIN

Nicolas LUSSIER-CLÉMENT

ABSTRACT

The wind industry is growing in Quebec and flat land are increasingly rare. However, the wind resource is far from being exploited to its maximum. Potential sites for new wind farms are increasingly located in complex terrain. Traditional linear tools to assist wind turbines siting decision, as WaSP Engineering, are then out of their usage limit. This thesis focuses on the simulation of the atmospheric boundary layer by the finite volume method and the development of a post-processing tool. It is part of efforts to better understand and extract the wind resource in complex terrain. In this tool, the IEC 61400-1 standard is used to determine some parameters relevant to wind turbine siting from simulations with a two-equation turbulence model. The simulations are compared to wind tunnel measurements. The results of the developed tool are also compared with the results of WaSP Engineering. The proposed method provides an improvement over WaSP Engineering on the evaluation of parameters of interest in complex terrain.

Keywords: Wind turbine, Siting, Complex terrain, Atmospheric Boundary Layer, Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM, WAsP Engineering.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Revue des pratiques en industrie.....	3
1.1.1 Normes IEC 61400–1 (2005).....	3
1.1.1.1 Classes d'éoliennes.....	3
1.1.1.2 Caractéristiques de l'écoulement.....	6
1.1.1.3 Anisotropie de la turbulence.....	7
1.1.1.4 Intégrité structurelle.....	8
1.1.2 WAsP et l'indice de complexité RIX.....	9
1.1.3 Communications privées.....	10
1.1.4 Étude non-linéaire pour les terrains complexes.....	11
1.1.5 Navier-Stokes stationnaire.....	11
1.1.6 Modèles de turbulence.....	11
1.1.6.1 $k - \epsilon$	12
1.1.6.2 $k - \omega$ SST.....	13
1.2 Erreur proche de la paroi.....	13
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	17
2.1 Simulation numérique.....	17
2.1.1 Condition frontière au sommet.....	18
2.1.1.1 L' ensemble de condition <i>Shear</i>	19
2.1.2 Condition frontière au sol.....	20
2.1.2.1 Dissipation visqueuse.....	21
2.1.2.2 Viscosité tourbillonnaire.....	21
2.2 Maillage de terrain complexe.....	23
2.3 Outil de post-traitement.....	25
2.3.1 Structure du code.....	25
2.3.2 Positionnement des éoliennes.....	27
2.3.3 Marche à travers le maillage.....	27
2.4 Lien avec les normes.....	29
2.4.1 Intensité de turbulence comme indice d'exclusion.....	29
2.4.2 Caractéristique du vent comme indice d'exclusion.....	31
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....	35
3.1 Écoulement 2D colline Rushil.....	35
3.1.1 Constantes des modèles de turbulence et maillages.....	35
3.1.2 Conditions aux frontières.....	36
3.1.3 Analyse des résultats.....	38
3.1.3.1 Validation.....	38

	3.1.3.2	Application de l'outil de post-traitement	42
3.2		Écoulement 2D homogène de Røkenes (2009)	49
	3.2.1	Profils du terrain homogène pour les simulations à l'échelle de la soufflerie	49
	3.2.2	Profils du terrain homogène pour les simulations à l'échelle du terrain ..	53
3.3		Écoulement 2D cas V de Røkenes (2009)	55
	3.3.1	Constantes de simulations et maillages	56
	3.3.2	Domaine et conditions frontière	58
	3.3.3	Analyse des résultats	60
	3.3.3.1	Validation	60
	3.3.3.2	Application de l'outil de post-traitement	65
3.4		Écoulement 2D cas VI de Røkenes (2009) à l'échelle de la soufflerie	70
	3.4.1	Constantes de simulations	70
	3.4.2	Analyse des résultats	72
	3.4.2.1	Recirculation	72
	3.4.2.2	Validation	73
	3.4.2.3	Application de l'outil de post-traitement	85
CONCLUSION			93
RECOMMANDATIONS			97
ANNEXE I	AUTRE SIMULATION DU CAS V		99
ANNEXE II	PROCÉDURE D'OBTENTION DE HAUTEUR DE SOL		121
ANNEXE III	MÉTHODE ITÉRATIVE POUR LOCALISER LES EXTREMUMS...		123
ANNEXE IV	VALIDATION DE L'OUTIL DE POST-TRAITEMENT		139
BIBLIOGRAPHIE			142

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Classes d'éoliennes 3
Tableau 1.2	Quelques valeurs d'anisotropie en terrain complexe, tiré de Jiménez (2009) 7
Tableau 3.1	Constantes du modèle $k - \epsilon$ 35
Tableau 3.2	Constantes du cas H3 de la colline Rushil 36
Tableau 3.3	Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec trois conditions frontière du sommet pour le terrain homogène, Fig. 3.7..... 51
Tableau 3.4	Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI ; ainsi que la valeur absolue des différences entre solutions $abs(\epsilon_{32})$ et $abs(\epsilon_{21})$ pour la Fig. 3.8 52
Tableau 3.5	Constantes pour le cas V de Røkenes (2009) 56
Tableau 3.6	Valeurs moyennes et maximales de $abs(\epsilon_{21}) = \varphi_2 - \varphi_1 $ et de $abs(\epsilon_{32}) = \varphi_3 - \varphi_2 $ avec les conditions fixes à la frontière du sommet pour le cas V 61
Tableau 3.7	Constantes à l'échelle de grandeur de la soufflerie pour le cas V et VI de Røkenes (2009) 71
Tableau 3.8	Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière <i>Shear</i> du cas VI 75
Tableau 3.9	Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière <i>Fixe</i> du cas VI 80

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Repère cartésien qui définit les axes $i=1,2,3$ 5
Figure 1.2	écart-type σ_1 pour les trois classes, Eq. 1.8 6
Figure 1.3	Intensité de turbulence I pour les trois classes, où I est défini comme suit : $I = \frac{\sigma_1}{V_{hub}}$ 6
Figure 1.4	Erreur prévue en fonction du RIX pour le logiciel WASP Engineering, tiré de WASP 10 Help 10
Figure 1.5	Région de l'écoulement perturbé, figure tirée de Solacity Inc. (2009) 10
Figure 1.6	Facteurs de correction pour deux maillages de 150 et 50 cellules en z avec $z_0 = 0.5$ et $FEG = 1.02$ 14
Figure 1.7	Facteurs de correction pour deux maillages de 150 et 50 cellules en z avec $z_0 = 0.05$ et $FEG = 1.02$ 15
Figure 2.1	Interaction entre les outils développés pour l'initialisation et la simulation des écoulements atmosphériques dans OpenFOAM 18
Figure 2.2	Non-orthogonalité des faces à l'intersection des boîtes de raffinement horizontal 23
Figure 2.3	Autre cause d'erreur numérique liée aux faces près d'une grande déformation du maillage 24
Figure 2.4	Interaction entre les outils développés pour le post-traitement 26
Figure 2.5	Structure d'un maillage de surface accessible par un polyPatch 28
Figure 2.6	Procédure pour la fonction de recherche de face implémentée 29
Figure 2.7	Relation entre $\sqrt{k}$ et σ_1 selon différentes hypothèses d'anisotropie : la limite imposée par la norme IEC, Eq. 2.14, l'hypothèse d'isotropie, Eq. 2.13, trois terrains complexes étudiés par Jiménez (2009) (Tableau 1.2), et le pire cas théorique, Eq. 2.15 30
Figure 2.8	Représentation d'une approximation par la loi de puissance décalée avec une valeur de β négative et positive 32

Figure 3.1	Conditions frontière utilisées pour le cas 2D de Rushil, voir L.H. Khurshudyan et Nekrasov (1981) 37
Figure 3.2	Cas H3 de Rushil : profils verticaux des données de mesures en soufflerie et des simulations pour les positions $-2 \leq x/a \leq 0$ 40
Figure 3.3	Cas H3 de Rushil : profils verticaux des données de mesures en soufflerie et des simulations pour les positions $1 \leq x/a \leq 5$ 41
Figure 3.4	Cas H3 : profils horizontaux des données de soufflerie, simulation et des résultats de WAsP Engineering à hauteur de la nacelle 44
Figure 3.5	Cas H3 : Valeur de χ^2 de la méthode linéaire et non-linéaire pour les données de soufflerie et les simulations numériques 46
Figure 3.6	Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des solutions à l'aide de la loi de puissance linéaire et non-linéaire du cas H3 48
Figure 3.7	Profils homogènes à l'échelle de la soufflerie avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur un maillage de 120, 170 et 240 cellules en hauteur pour des conditions au sommet de gradients, <i>Grad</i> , de cisaillement, <i>Shear</i> , avec $u^* = 0.4745 \text{ m/s}$, ainsi que de valeurs fixes, <i>Fixe</i> , comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009) 50
Figure 3.8	Profils homogènes à l'échelle de la soufflerie avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur un maillage de 120, 170 et 240 cellules en hauteur pour la condition au sommet de cisaillement, <i>Shear</i> , avec $u^* = 0.53 \text{ m/s}$ comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009) 52
Figure 3.9	Profils du terrain homogène à l'échelle du terrain avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur maillage de 120, 170 et 240 cellules en hauteur pour la condition <i>Fixe</i> au sommet, avec $u^* = 0.4745 \text{ m/s}$ comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009) 53
Figure 3.10	Profils du terrain homogène à l'échelle du terrain avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur maillage de 684, 969 et 1368 cellules en hauteur pour la condition <i>Fixe</i> au sommet, avec $u^* = 0.4745 \text{ m/s}$ comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009) 54
Figure 3.11	Ligne d'élévation de la colline de Røkenes (2009) avec le cas <i>V</i> 55

Figure 3.12	Agrandissement du maillage $9 \times 10 - 12$ utilisées pour obtenir la solution $k - \epsilon \varphi_3$ du cas V de Røkenes (2009).....	57
Figure 3.13	Conditions frontière utilisées pour le cas V de Røkenes (2009) représenté sur un maillage de base de 9×10 déformé et avec des régions de raffinement	58
Figure 3.14	Facteur de correction de la condition frontière au sol, à partir des équations de la section 1.2, pour la série de cas V à l'échelle du terrain avec maillage de base 9×10	59
Figure 3.15	Facteur de correction de la condition frontière au sol, à partir des équations de la section 1.2, pour la série de cas V à l'échelle du terrain avec maillage de base 57×57	59
Figure 3.16	Cas V de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des simulations pour les positions adimensionnelles $2.5 \leq x/h \leq 6.7$	62
Figure 3.17	Cas V de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des simulations pour les positions adimensionnelles $7.3 \leq x/h \leq 8.9$	63
Figure 3.18	Cas V de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des simulations pour les positions adimensionnelles $9.3 \leq x/h \leq 11.0$	64
Figure 3.19	Cas V : profils horizontaux à la hauteur de la nacelle des données mesurées en soufflerie, des simulations et de WAsP	66
Figure 3.20	Cas V : valeur de χ^2 de la régression linéaire et non-linéaire pour les mesures en soufflerie et les simulations	66
Figure 3.21	Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide de régression linéaire et non-linéaire aux positions adimensionnelles $2.5 \leq x/h \leq 8.9$ du cas V	68
Figure 3.22	Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide de régression linéaire et non-linéaire aux positions adimensionnelles $9.3 \leq x/h \leq 11.0$ du cas V	69
Figure 3.23	Ligne d'élévation de la coline de Røkenes (2009) et identification des cas VI et IV	70

Figure 3.24	Facteur de correction de la condition frontière au sol, à partir des équations de la section 1.2, pour la série de cas <i>V</i> et <i>VI</i> échelle soufflerie avec maillage de base 9×10	71
Figure 3.25	Cas VI de Røkenes (2009) : vitesse à 1 au dessus du plateau de hauteur $z/h = 0.71$ pour les positions $10.36 \geq x/h \geq 11.07$	72
Figure 3.26	Maillage grossier φ_3 cas VI de Røkenes (2009) : agrandissement au niveau du plateau de hauteur $z/h = 0.71$ pour les positions $10.6 \geq x/h \geq 11.4$	73
Figure 3.27	Cas VI de Røkenes (2009) : hauteur du terrain évaluée par l'outil de post-traitement développé et différence entre la hauteur représentative du sol des différents maillages du terrain	74
Figure 3.28	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $14.8 \geq x/h \geq 9.6$ avec les conditions frontière <i>Shear</i>	76
Figure 3.29	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $8.5 \geq x/h \geq 6.7$ avec les conditions frontière <i>Shear</i>	77
Figure 3.30	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $6.1 \geq x/h \geq 4.6$ avec les conditions frontière <i>Shear</i>	78
Figure 3.31	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $4.1 \geq x/h \geq 2.3$ avec les conditions frontière <i>Shear</i>	79
Figure 3.32	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $14.8 \geq x/h \geq 9.6$ avec les conditions frontière <i>Fixe</i>	81
Figure 3.33	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $8.5 \geq x/h \geq 6.7$ avec les conditions frontière <i>Fixe</i>	82
Figure 3.34	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $6.1 \geq x/h \geq 4.6$ avec les conditions frontière <i>Fixe</i>	83
Figure 3.35	Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $4.1 \geq x/h \geq 2.3$ avec les conditions frontière <i>Fixe</i>	84

Figure 3.36	Cas VI : fonction χ^2 et recherche du minimum quadratique par régression non-linéaire à partir des résultats des simulations avec les conditions frontière <i>Shear</i> à la position $x/h = 10.89$ du maillage φ_1	86
Figure 3.37	Cas VI : fonction χ^2 et recherche du minimum quadratique par régression non-linéaire à partir des résultats des simulations avec les conditions frontière <i>Shear</i> à la position $x/h = 11.01$ du maillage φ_1	86
Figure 3.38	Cas VI : profils horizontaux des mesures en soufflerie, des résultats des simulations avec les conditions frontière <i>Shear</i> et des résultats de WAsP à hauteur de la nacelle	87
Figure 3.39	Cas VI : valeur de χ^2 de la régression linéaire et non-linéaire à partir des mesures en soufflerie et des résultats des simulations avec les conditions frontière <i>Shear</i>	87
Figure 3.40	Cas VI : profils horizontaux des mesures en soufflerie, des résultats des simulations avec les conditions frontière <i>Fixe</i> et des résultats de WAsP à hauteur de la nacelle	88
Figure 3.41	Cas VI : valeur de χ^2 de la régression linéaire et non-linéaire à partir des mesures en soufflerie et des résultats des simulations avec les conditions frontière <i>Fixe</i>	88
Figure 3.42	Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière <i>Shear</i> , et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $14.8 \geq x/h \geq 6.1$	89
Figure 3.43	Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière <i>Shear</i> , et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $5.6 \geq x/h \geq 2.3$	90
Figure 3.44	Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière <i>Fixe</i> , et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $14.8 \geq x/h \geq 6.1$	91
Figure 3.45	Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière <i>Fixe</i> , et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $5.6 \geq x/h \geq 2.3$	92

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

LETTRES LATINES

C_1	Constantes 1 du modèle de turbulence
C_2	Constantes 2 du modèle de turbulence
C_μ	Constantes 3 du modèle de turbulence
d	Opérateur de dérivée total
$\hat{e}_i$	Le repère de base $\hat{e}_i = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$
f_i	Composantes du vecteur de force volumique
I	Intensité de turbulence
k	Énergie cinétique turbulente
$\vec{n}$	Vecteur normal à une surface
p	Pression divisée par la masse volumique
s_i	Vecteur de surface
s_{ij}	Partie symétrique du gradient des vitesses $sym(u_{i,j})$
S_{ij}	Partie symétrique du gradient des vitesses moyennées $sym(\overline{u_{i,j}})$
t	Temps
u_i	Composantes du vecteur de vitesse
V	Valeur de la vitesse dans la direction horizontale du vent
$\hat{x}_i$	Composantes du vecteur de base dans la direction principale du vent
$\hat{y}_i$	Composantes du vecteur de base perpendiculaire à $\hat{x}_i$ et $\hat{z}_i$
$\hat{z}_i$	Composantes du vecteur de base vertical
z	Hauteur par rapport au sol

LETTRES GRECQUES

α	Exposant de la loi de puissance
β	Paramètre d'optimisation
δ_{ij}	Delta de Kronecker
Δ	Désigne une distance considérée comme petite
ϵ	Dissipation visqueuse
θ	Angle
κ	Constante de Von Kármán (≈ 0.4)
ν	Viscosité cinématique
ν_t	Viscosité cinématique turbulente
ν_{eff}	Viscosité cinématique efficace $\nu + \nu_t$
π	Nombre de pi, 3.1415...
ρ	Masse volumique
σ	Écart type
ω	Dissipation visqueuse par unité d'énergie cinétique turbulente, ϵ/k
Ω	Volume de controle

SYMBOLES SUR LA VARIABLE ζ

ζ	Variable quelconque
ζ_{moy}	Moyenne de ζ
ζ_{hub}	Valeur de ζ à hauteur de la nacelle
ζ_{ref}	Valeur de ζ de référence
$\zeta_{,i}$	Composantes du gradient de ζ
ζ_i	Composantes du vecteur ζ
$\zeta_{\hat{x}}$	Composante du vecteur ζ dans la direction $\hat{x}_i$

$\zeta_{\hat{y}}$	Composante du vecteur ζ dans la direction $\hat{y}_i$	$\zeta _{top}$	Valeur ζ évaluée à la condition frontière du haut
$\zeta_{\hat{z}}$	Composante du vecteur ζ dans la direction $\hat{z}_i$	ζ_p	Valeur ζ au centre de cellule
ζ_{ij}	Composantes du tenseur d'ordre 2 ζ	ζ_f	Valeur ζ à la face
$\zeta_{\hat{x}\hat{y}}$	Composante du tenseur d'ordre 2 ζ dans les directions $\hat{x}_i$ et $\hat{y}_i$	ζ_n	Valeur ζ au centre de cellule voisine
ζ_{ii}	Trace du tenseur d'ordre 2 ζ	ζ_w	Valeur ζ à la paroi
$\bar{\zeta}$	Moyenne de Reynolds de ζ	OPÉRATEUR	
ζ'	Partie fluctuante selon la décomposition de Reynolds de ζ	d	Opérateur de dérivée total
$\vec{\zeta}$	Vecteur, ou tenseur d'ordre 1, ζ	∂	Opérateur de dérivée partielle
$\vec{\zeta}^n$	Le n -ième produit tensoriel du vecteur $\vec{\zeta}$, tenseur symétrique d'ordre n	$ $	Opérateur d'évaluation, $\zeta _p$
ζ^n	L'exposant n du scalaire ζ ou le n -ième produit tensoriel du tenseur ζ , symétrique sur les paires d'indice de ζ	$,$	Opérateur de dérivée partielle, désigne le gradient dans la notation indicielle, $\zeta_{,i}$
$\zeta _p$	Valeur ζ évaluée au centre de cellule	∇	Opérateur nabla, désigne le gradient
$\zeta _f$	Valeur ζ évaluée à la face	∇^n	L'opérateur tensoriel du n -ième gradient. Pour ζ , un tenseur d'ordre m le tenseur $\nabla^n \zeta$ est un tenseur d'ordre $n + m$ symétrique sur les n indices par propriété des dérivées partielles, $\nabla^2 \vec{\zeta} \equiv \nabla \nabla \vec{\zeta} \equiv \zeta_{i,jk} \hat{e}_i \hat{e}_j \hat{e}_k$
$\zeta _{fb}$	Valeur ζ évaluée à la face du bas	$\otimes$	Produit tensoriel
$\zeta _{fh}$	Valeur ζ évaluée à la face du haut	$\overline{\otimes}^n$	Produit tensoriel contracté n fois
$\zeta _n$	Valeur ζ évaluée au centre de cellule voisine	$\cdot$	Produit tensoriel contracté 1 fois ou produit scalaire

INTRODUCTION

Le domaine de l'éolien prend un intérêt grandissant comme source d'énergie. Cependant malgré une très bonne ressource de vents au Québec, les sites potentiels en terrain plat encore accessibles se font rares. Les nouveaux sites potentiels pour les éoliennes sont donc sur des terrains complexes dans leur topographie et leur écoulement. Une étude par CFD devient indispensable pour le succès d'un tel projet de parc éolien. Il n'est cependant pas suffisant de bien modéliser numériquement l'écoulement atmosphérique. Pour savoir où positionner une éolienne, il faut aussi pouvoir traiter ces informations et les relier aux normes établies dans le domaine de l'éolien. Ce travail consiste au développement d'un outil d'analyse de l'écoulement local, simulé préalablement, pour indiquer comme exclusion les régions possédant des caractéristiques indésirables telles que, la présence de régions de séparation, des niveaux élevés de turbulence et un cisaillement trop important. Dans ce mémoire, le logiciel OpenFOAM sera utilisé pour résoudre numériquement les équations stationnaires de Navier-Stokes avec un modèle de turbulence à deux équations décrivant le comportement micro-échelle de la couche limite atmosphérique, CLA, en stratification neutre. OpenFOAM est une librairie C++ basée sur la méthode des volumes finis. Cette librairie utilise un maillage de polyèdres général qui permet d'utiliser tant un maillage structuré qu'un maillage non structuré. Le caractère orienté objet de cette librairie permet la définition de différents utilitaires de résolution d'équation différentielle de manière générale, de nouvelles conditions frontière et de nouveaux outils d'initialisation ou de post-traitement. Dans le cadre de ce travail un modèle de turbulence $k-\omega$ -SST modifié par Boudreault *et al.* (2011) a été utilisé. Ce travail vise à développer un utilitaire de post-traitement utilisé avec OpenFOAM pour permettre de déterminer les zones d'exclusions en fonction de la norme IEC 61400-1 (2005).

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Revue des pratiques en industrie

Le processus de décision pour le positionnement des éoliennes en terrains complexes peut varier selon l'ingénieur responsable de vérifier l'adéquation du site. Ce dernier peut toutefois s'inspirer de la norme IEC 61400–1 (2005) et d'autres outils simples pour effectuer son travail en terrain complexe. Les paramètres d'intérêt sont rapportés dans ce chapitre.

1.1.1 Normes IEC 61400–1 (2005)

Plusieurs paramètres sont établis par la norme IEC 61400–1 (2005) pour assurer l'intégrité structurelle de l'éolienne. Les paramètres qui peuvent être évalués par une simulation numérique d'un cas stationnaire avec un modèle de fermeture de turbulence à deux équations sont considérés.

1.1.1.1 Classes d'éoliennes

La norme IEC 61400–1 (2005) sépare les éoliennes en dix classes allant de la classe I_A à III_C avec une classe à part S qui englobe toutes éoliennes exclues de ces dernières. Dans le Tableau 1.1, les valeurs des paramètres sont évaluées à la hauteur de la nacelle.

Tableau 1.1 Classes d'éoliennes

Classes d'éoliennes		I	II	III
V_{ref}	(m/s)	50	42.5	37.5
A	I_{ref} (-)		0.16	
B	I_{ref} (-)		0.14	
C	I_{ref} (-)		0.12	

I_{ref} est l'intensité de la turbulence attendue à 15 m/s. V_{ref} est le vent de référence et est relié à la vitesse moyenne annuelle du vent, V_{moy} , par :

$$V_{moy} = 0.2V_{ref} \quad (1.1)$$

De plus, la norme impose une distribution de Rayleigh, où $P_R(V_{hub})$ est la fonction de densité de probabilité de la vitesse V_{hub} , qui est la composante du vecteur vitesse dans la direction perpendiculaire au disque de l'éolienne à la hauteur de la nacelle :

$$P_R(V_{hub}) = 1 - \exp \left[-\pi \left(\frac{V_{hub}}{2V_{moy}} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

L'intensité de la turbulence, $\bar{I}$, et l'énergie cinétique turbulente, k , peuvent s'écrire avec la notation indicielle comme le présente l'Eq. 1.3. Cependant, cette équation implique l'hypothèse d'isotropie de la turbulence, hypothèse qui, comme il sera démontré à la section 2.4.1, sous-estime le dommage à l'éolienne.

$$\bar{I} = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}}{V}; \quad k = \frac{1}{2}\overline{v'_i v'_i} \quad (1.3)$$

Où v'_i est la partie fluctuante selon la décomposition de Reynolds et l'opérateur barre est une moyenne sur une période de temps.

$$\bar{v}_i = \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} v_i(t) dt \quad (1.4)$$

Pour chaque direction $i = 1, 2, 3$, voir Fig. 1.1, une relation peut s'écrire entre la moyenne du carré des fluctuations de vitesse, $\overline{v_1'^2}$, $\overline{v_2'^2}$, $\overline{v_3'^2}$, et leur écart-type, σ_1 , σ_2 , σ_3 . Le terme v_{1a} indique une des N mesures instantanées du vent pour la direction $i = 1$. Par exemple pour $i = 1$:

$$\frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} (v_1'(t))^2 dt = \frac{1}{N} \sum_{a=0}^{N-1} (v_{1a} - \bar{v}_1)^2 \quad (1.5)$$

La relation précédente, Eq. 1.5, peut s'écrire plus simplement pour chaque direction :

$$\overline{v_1'^2} = \sigma_1^2; \quad \overline{v_2'^2} = \sigma_2^2; \quad \overline{v_3'^2} = \sigma_3^2 \quad (1.6)$$

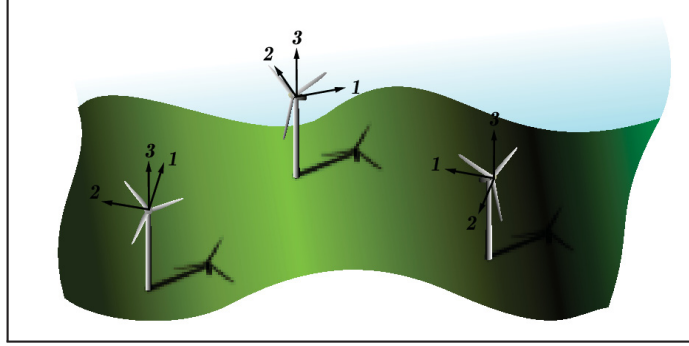


Figure 1.1 Repère cartésien qui définit les axes $i=1,2,3$

L'énergie cinétique turbulente peut donc être décrite en terme des écarts-types, Eqs (1.3) et (1.6) :

$$k = \frac{1}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) \quad (1.7)$$

L'intensité de la turbulence peut alors être vue comme l'écart-type de la vitesse du vent sur la moyenne du vent. Les valeurs de l'écart-type et de l'intensité de la turbulence utilisées par les normes en dessous desquelles l'éolienne doit pouvoir opérer normalement sont décrites par l'Eq. 1.8 et les Figs (1.2 et 1.3).

$$\sigma_1 = I_{ref} (0.75V_{hub} + b); \quad b = 5.6m/s \quad (1.8)$$

Ces critères d'intensité de turbulence et d'écart-type ne doivent pas être dépassés pour une utilisation normale de l'éolienne. La norme impose les conditions suivantes, Eq. 1.9, limitant l'anisotropie qui sert pour le calcul de structure de l'éolienne.

$$\sigma_2 \geq 0.7\sigma_1; \quad \sigma_3 \geq 0.5\sigma_1 \quad (1.9)$$

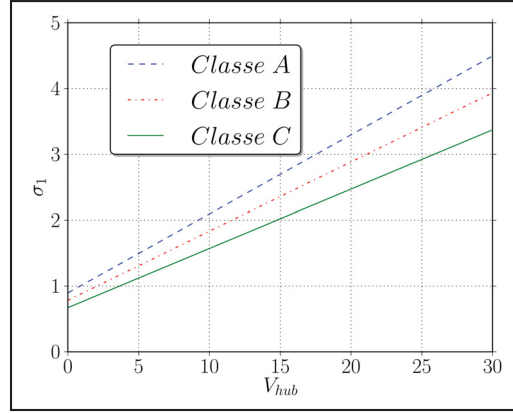


Figure 1.2 écart-type σ_1 pour les trois classes, Eq. 1.8

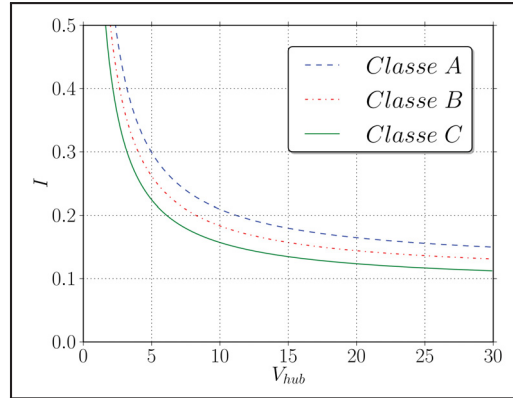


Figure 1.3 Intensité de turbulence I pour les trois classes, où I est défini comme suit : $I = \frac{\sigma_1}{V_{hub}}$

1.1.1.2 Caractéristiques de l'écoulement

Selon la norme, les éoliennes doivent supporter de façon sécuritaire une inclinaison de l'écoulement moyen jusqu'à un maximum de 8 degrés avec l'horizontale. Cette inclinaison est considérée comme constante avec la hauteur. Le profil du vent normal est considéré comme suivant la loi de puissance avec comme valeur maximale de l'exposant $\alpha = 0.2$:

$$V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (1.10)$$

Ce profil cisailé doit être considéré comme une limite en fonctionnement normal de l'éolienne. Il est donc nécessaire de développer un critère permettant d'évaluer le cisaillement de la distribution verticale du vent afin de la comparer avec cette valeur limite.

1.1.1.3 Anisotropie de la turbulence

En écoulement atmosphérique et en terrain complexe la turbulence est anisotropique et il n'est pas garanti que son anisotropie soit à l'intérieur des limites exprimées par l'Eq. 1.9. Toutefois, les valeurs d'anisotropie indiquées par Jiménez (2009) et reproduites au Tableau 1.2, sont bel et bien dans les limites de la norme, Eq. (1.9 et 2.14).

Tableau 1.2 Quelques valeurs d'anisotropie en terrain complexe, tiré de Jiménez (2009)

	Etxagiñe 41.55 m	San Ciprián 56 m	Cabezo Negro 90 m
σ_2/σ_1	1.02636	0.89056	0.91926
σ_3/σ_1	0.77262	0.71093	0.65893

Dans Jiménez (2009), des relations pour les facteurs d'anisotropie sont proposées, voir les Eqs (1.11 et 1.12). Il est intéressant de remarquer que dans ces relations, le paramètre de rugosité z_0 s'avère très important. Cependant, ces relations demandent une connaissance préalable de σ_1 qui peut être obtenue par des mesures sur le terrain, mais qui n'est pas disponible dans le modèle de turbulence utilisé dans ce mémoire sans connaître a priori une relation entre les facteurs d'anisotropie.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.8 + 2.0096 \left(\frac{\sigma_1}{V_{hub}} \ln \frac{z_{hub}}{z_0} - 0.96 \right) \quad (1.11)$$

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0.52 + 2.1529 \left(\frac{\sigma_1}{V_{hub}} \ln \frac{z_{hub}}{z_0} - 0.96 \right) \quad (1.12)$$

En effet, l'énergie cinétique turbulente Eq. 1.7 est la moyenne des fluctuations reliées aux variances. Or, la quantité d'intérêt, plus spécifiquement σ_1 , ne sera pas directement calculée par le modèle. Malheureusement, ces valeurs sont hautement dépendantes du site et cela spécialement dans le cas des terrains complexes selon Jiménez Álvaro (2010). Les relations d'anisotropie qu'il a proposé dans sa présentation, Jiménez (2009), Eq. (1.11 et 1.12), ne peuvent donc pas être utilisées pour déterminer l'anisotropie de la turbulence avec les modèles de fermeture à deux équations, comme $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST.

1.1.1.4 Intégrité structurelle

Une éolienne doit, pour assurer son intégrité structurelle pouvoir résister à certaines contraintes découlant de barèmes établis par la norme (IEC 61400–1, 2005, chap 11.9). Ainsi, une éolienne est appropriée pour un site donné lorsque trois conditions sont respectées :

1. La valeur de V_{hub} de période d'occurrence de 50 ans doit être moins élevée que la valeur de référence, V_{ref} .
2. La valeur au site de la densité de probabilité de la vitesse à la nacelle, $P_{R_{site}}(V_{hub})$, doit être plus faible que la valeur prescrite par la norme, Eq. 1.2, pour V_{hub} entre $0.2V_{ref}$ et $0.4V_{ref}$.
3. La valeur représentative de la turbulence utilisée pour les calculs structuraux, σ_1 , voir Eq. 1.8, doit être plus grande ou égale à la valeur du quatre-vingt-dixième percentile de la valeur réelle du site aux vitesses V_{hub} entre $0.2V_{ref}$ et $0.4V_{ref}$.

De plus, pour que le site soit considéré propice en terrain complexe, la norme impose que les valeurs décrivant l'écoulement soient plus faibles en toute direction que celles décrites dans (IEC 61400–1, 2005, chap 6.3). Ceci inclut une restriction sur la longueur caractéristique de la turbulence Λ_1 , une restriction sur les conditions dynamiques de vents sous différentes occurrences ainsi qu'une restriction sur la densité spectrale de puissance. L'échelle de longueurs de la turbulence du site, Λ_1 , doit donc être plus faible que décrit dans Eq. 1.13.

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z & z \leq 60m \\ 42m & z \geq 60m \end{cases} \quad (1.13)$$

Cependant, pour relier l'échelle de longueur de la turbulence Λ_1 au modèle de turbulence $k - \epsilon$ une difficulté de la même nature que dans le cas de σ_1 survient. Une autre condition, Eq. 1.14, doit aussi être respectée en terrain complexe, où σ_1 est défini par Eq. 1.8. La variable $\hat{\sigma}$ est la moyenne de l'écart-type au site dans la direction principale et $\hat{\sigma}_\sigma$ est son écart-type entre la vitesse de mise en fonction, V_{in} , et la vitesse d'arrêt, V_{out} , de l'éolienne :

$$\sigma_1 \geq \hat{\sigma} + 1.28\hat{\sigma}_\sigma \quad (1.14)$$

De plus, la moyenne dans toutes les directions de l'exposant α mesurée sur terrain complexe, Eq. 1.10, doit être plus faible que $\alpha = 0.2$ et plus grande que $\alpha = 0$. Enfin, lorsque sur le site, aucune mesure n'est faite pour les composantes de la turbulence, la norme (IEC 61400–1, 2005, chap 11.10), propose d'assumer que les écarts-types sont égaux dans la direction principale latérale et verticale. Cette hypothèse est représentée à la Fig. 2.7.

D'autres facteurs importants comme la distance avec les maisons, les possibilités de givrage ou positionnement relatif des éoliennes et la trace turbulente causée par celles-ci Gu et Ji (2010) sont à prendre en compte pour le positionnement des éoliennes. Dans cette étude ces facteurs ne seront toutefois pas pris en compte.

1.1.2 WAsP et l'indice de complexité RIX

L'indice de complexité RIX est une mesure de l'ampleur des pentes escarpées dans une zone. Cet indice est utilisé dans le logiciel WAsP Engineering, un code spécialisé pour l'estimation des vents extrêmes et des zones de trop forte intensité de turbulence ou cisaillement, voir J. Mann (2002), pour permettre à l'utilisateur de juger si les calculs sont effectués dans la plage de validité du logiciel. Il permet aussi de quantifier les valeurs approximatives de ces erreurs, voir Mortensen et Petersen (1998) et Fig. 1.4. La documentation de WAsP Engineering mentionne qu'un RIX d'approximativement 0 % implique des pentes plus faibles que 0.3

et ajoute qu'il est peu probable d'avoir des zones de séparation dans ce cas. Une procédure permettant d'améliorer les résultats de prédiction de WAsP en terrain complexe, en utilisant le RIX, est proposée par Mortensen et Antoniou (2006).

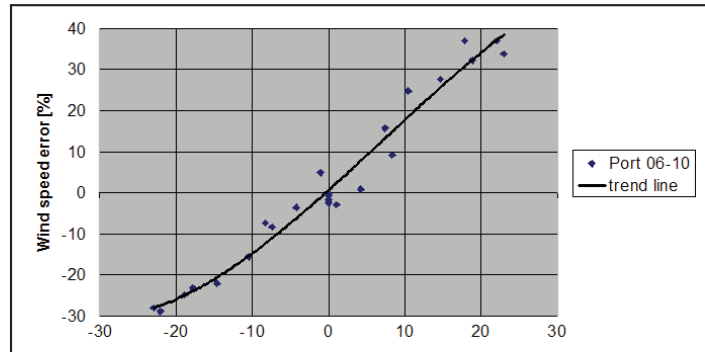


Figure 1.4 Erreur prévue en fonction du RIX pour le logiciel WAsP Engineering, tiré de WAsP 10 Help

1.1.3 Communications privées

Une des pratiques en industrie pour le positionnement des éoliennes en terrain complexe est l'utilisation d'une zone approximative où l'écoulement est perturbé par un obstacle tel que mentionné par Pelletier (2010). Cette zone est définie approximativement par la hauteur de l'obstacle et est illustrée à la Fig. 1.5.

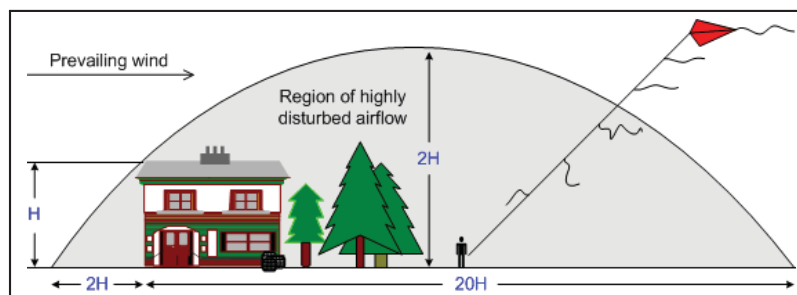


Figure 1.5 Région de l'écoulement perturbé, figure tirée de Solacity Inc. (2009)

Plusieurs professionnels du domaine ont été interrogés par Sibuet Watters (2010) au sujet des pratiques en industrie qui existent en ce qui concerne les limitations relatives au positionnement d'éoliennes. Cependant, personne n'a pu citer de chiffres précis au sujet de la turbulence, ou du cisaillement du vent. Il y a toutefois consensus sur des critères vagues liés au terrain : « pas d'obstacle significatif aux alentours de l'éolienne, pas de variations brusques du terrain... ».

1.1.4 Étude non-linéaire pour les terrains complexes

Avec la croissance de la filière éolienne et la rareté grandissante des sites en terrain plat possédant une ressource éolienne de bonne qualité, de plus en plus d'études sont effectuées avec des outils non-linéaires de la mécanique des fluides. Différents terrains complexes ont été étudiés avec ces méthodes tel que, Henriksen (2009), Brodeur et Masson (2008), et en région côtière Palma *et al.* (2008).

1.1.5 Navier-Stokes stationnaire

Les équations de Navier-Stokes stationnaires moyennées sont présentées, en notation tensorielle où ν_{eff} est la viscosité effective, Eq. 1.15, voir Pieter (2000, p. 12-15) et Wilcox (1993, p. 15). La notation dans ce mémoire utilisant la virgule pour désigner l'opérateur de dérivées est aussi utilisé dans Pieter (2000) et dans Aris (1962). Ainsi dans l'Eq. 1.15, $\bar{u}_{i,j} \equiv \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$.

$$\bar{u}_{i,i} = 0 \quad (1.15)$$

$$\bar{u}_j \bar{u}_{i,j} = -\bar{p}_{,i} + 2(\nu_{eff} S_{ij})_{,j}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i})$$

1.1.6 Modèles de turbulence

Dans ce travail, la viscosité effective est évaluée à l'aide de deux modèles de turbulence à deux équations de transport.

1.1.6.1 $k - \epsilon$

Le modèle $k - \epsilon$ utilisé est standard, voir Wilcox (1993, p. 83), les constantes du modèle de turbulence ont toutefois été modifiées pour un écoulement pour représenter un écoulement atmosphérique. Les équations décrivant l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation visqueuse sont déduites en utilisant les notions de vitesse moyenne et vitesse instantanée Wilcox (1993, p. 83). Pour un fluide incompressible en régime permanent, les équations s'écrivent :

$$\begin{aligned}\bar{u}_j k_{,j} &= \nu_t 2S_{ij}S_{ij} - \epsilon + \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right\}_{,j} \\ \bar{u}_j \epsilon_{,j} &= C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t 2S_{ij}S_{ij} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \epsilon_{,j} \right\}_{,j} \\ \nu_t &= C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \nu_{eff} = \nu + \nu_t\end{aligned}\tag{1.16}$$

Ce modèle de turbulence utilise également une loi de paroi qui demande une hauteur adimensionnelle, z^+ , de la première cellule entre 30 et 100. Cette dernière est définie en utilisant la vitesse de cisaillement prescrite, u^* , ainsi que la viscosité moléculaire, ν , par l'équation $z^+ = zu^*/\nu$. Il a été démontré que bien au-dessus de ces valeurs, la production, la dissipation ainsi que les gradients de vitesse sont mal représentés, voir Sumner et Masson (2011) et S. E. Norris (2010). Le terme de production d'énergie cinétique turbulente, qui s'écrit normalement : $\nu_t(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i})\bar{u}_{i,j}$ peut s'écrire comme deux fois le double produit scalaire, ou produit tensoriel contracté deux fois, de la partie symétrique du gradient des vitesses, Eq. 1.17. En effet ceci est possible car le double produit scalaire d'un tenseur symétrique avec un tenseur antisymétrique donne le scalaire zéro. Dans la classe de turbulence `kEpsilon` de OpenFOAM, la formulation symétrique de la production est utilisé.

$$\nu_t(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i})\bar{u}_{i,j} = 2\nu_t \frac{1}{2}(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}) \frac{1}{2}(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}) = \nu_t 2S_{ij}S_{ij}\tag{1.17}$$

1.1.6.2 $k - \omega$ SST

Le modèle de $k - \omega$ utilisé est la variante de $k - \omega$ SST modifiée par Boudreault *et al.* (2011). Les équations décrivant l'énergie turbulente et la dissipation visqueuse du modèle $k - \epsilon$ sont transformées dans la formulation $k - \omega$ et les deux systèmes d'équations, $k - \epsilon$ reformulé et $k - \omega$, sont combinés par une constante de mélange, F_1 , pour donner un nouveau modèle $k - \omega$ BSL. À ce modèle de base, des limiteurs sont ajoutés pour créer le modèle $k - \omega$ SST, voir Menter (1994). Le modèle $k - \omega$ BSL est écrit à l'Eq. 1.18. Lorsque $F_1 = 0$, ces équations sont équivalentes au modèle $k - \epsilon$. Pour plus de détails sur le modèle $k - \omega$ SST utilisé dans ce travail, voir Menter (1994) et Boudreault *et al.* (2011). Le terme τ_{ij} est la relation de constitution décrivant les contraintes du fluide en fonction de l'écoulement.

$$\begin{aligned} \bar{u}_j k_{,j} &= \tau_{ij} u_{i,j} - \beta^* \omega k + \{(\nu + \sigma_k \nu_t) k_{,j}\}_{,j} \\ \bar{u}_j \omega_{,j} &= \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} u_{i,j} - \beta \omega^2 + \{(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \omega_{,j}\}_{,j} + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega_2}}{\omega} k_{,j} \omega_{,j} \\ \nu_t &= \frac{k}{\omega} \end{aligned} \quad (1.18)$$

1.2 Erreur proche de la paroi

Dans la méthode des volumes finis, les dérivées et les intégrales sont discrétisées. Il est donc important d'avoir un maillage avec des caractéristiques appropriées à la solution recherchée. Un maillage plus fin aux endroits de grande variation des variables d'intérêt est nécessaire. À partir des équations du modèle de turbulence 1.16, des schémas de discrétisation et des solutions analytiques, il est possible de définir des facteurs de correction sur différentes variables permettant d'évaluer plus précisément les différents termes des équations pour les cellules proches de la paroi, Eqs (1.20 à 1.26). Les facteurs de correction des deux équations de turbulence sont montrés à l'Eq. 1.19. Les facteurs de correction f_α et $f_{\partial u}$ sont respectivement liés au gradient, $u_{,i}$, et au laplacien, $u_{,ii}$, de la vitesse, Eq. 1.15.

$$\bar{u}_j k_{,j} = f_G \nu_t 2 S_{ij} S_{ij} - f_\epsilon \epsilon + \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right\}_{,j} \quad (1.19)$$

$$\bar{u}_j \epsilon_{,j} = f_{G\epsilon} C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t 2 S_{ij} S_{ij} - f_{\epsilon^2} C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) f_{\partial\epsilon} \epsilon_{,j} \right\}_{,j}$$

Les facteurs de correction, Eqs (1.20 à 1.26), ont été calculés analytiquement. Ils sont présentés dans Sumner et Masson (2011). Les Figs (1.6 et 1.7) montrent ces facteurs de correction pour différents cas. Il est à noter que ces facteurs dépendent de z_0 ainsi que des caractéristiques du maillage. Ces dernières figures montrent que les erreurs sont moins grandes avec une valeur de z_0 plus élevé. Un maillage plus fin proche de la paroi diminue également ces facteurs de correction. Ceci explique bien les erreurs proches de la paroi des différentes simulations de ce travail.

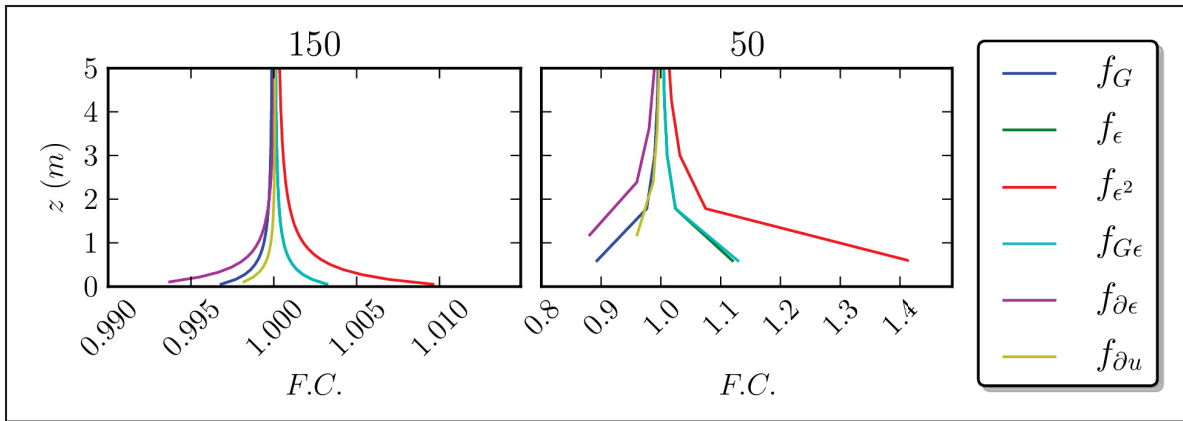


Figure 1.6 Facteurs de correction pour deux maillages de 150 et 50 cellules en z avec $z_0 = 0.5$ et $FEG = 1.02$

$$f_\epsilon = \frac{\int_{z'_{fb}}^{z'_{fh}} \epsilon dz'}{\epsilon_p \Delta z} = \frac{z'_p + z_0}{\Delta z} \log \left(\frac{z'_{fh} + z_0}{z'_{fb} + z_0} \right) \quad (1.20)$$

$$f_{\epsilon^2} = \frac{\int_{z'_{fb}}^{z'_{fh}} \epsilon^2 dz'}{\epsilon_p^2 \Delta z} = \frac{(z'_p + z_0)^2}{(z'_{fh} + z_0)(z'_{fb} + z_0)} \quad (1.21)$$

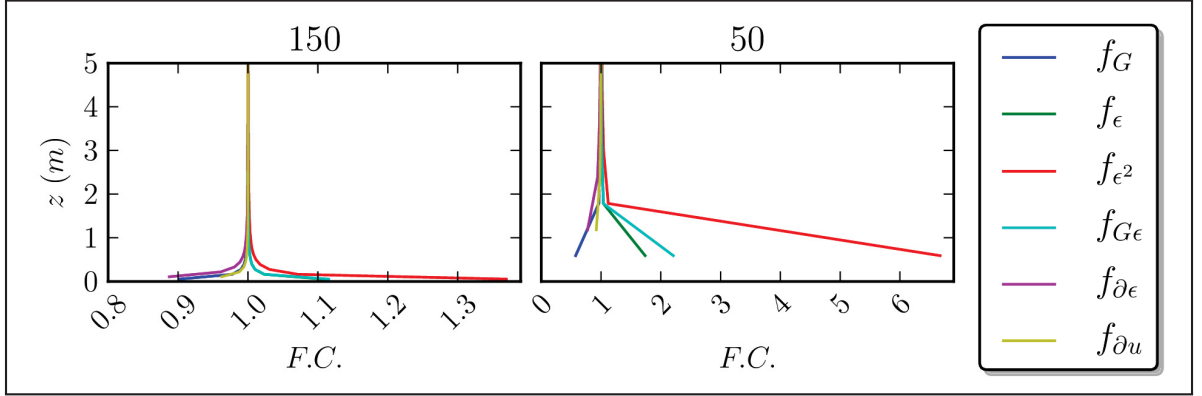


Figure 1.7 Facteurs de correction pour deux maillages de 150 et 50 cellules en z avec $z_0 = 0.05$ et $FE G = 1.02$

$$f_G = \frac{\int_{z'_{fb}}^{z'_{fh}} G dz'}{G_p \Delta z} = \frac{1}{f_\epsilon} \quad (1.22)$$

$$f_{G\epsilon} = \frac{\int_{z'_{fb}}^{z'_{fh}} G \epsilon dz'}{G_p \epsilon_p \Delta z} = \frac{(\Delta z)^2}{(z'_{fb} + z_0)(z'_{fh} + z_0) \left[\log \left(\frac{z'_{fh} + z_0}{z'_{fb} + z_0} \right) \right]^2} \quad (1.23)$$

$$f_{\partial\epsilon} = \frac{\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \Big|_f}{\frac{\Delta \epsilon}{\Delta z} \Big|_f} = \frac{(z'_p + z_0)(z'_n + z_0)}{(z'_f + z_0)^2} \quad (1.24)$$

$$f_{\partial u} = \frac{\frac{\partial u'_x}{\partial z} \Big|_f}{\frac{\Delta u'_x}{\Delta z} \Big|_f} = \frac{z'_p - z'_n}{(z'_f + z_0) \log \left(\frac{z'_p + z_0}{z'_n + z_0} \right)} \quad (1.25)$$

$$f_\alpha = \frac{\log \left(\frac{z'_n + z_0}{z'_f + z_0} \right)}{\log \left(\frac{z'_n + z_0}{z'_p + z_0} \right)} \quad (1.26)$$

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Simulation numérique

Ce mémoire utilise la mécanique des fluides numérique pour prédire la solution aux équations de Navier-Stokes. Le logiciel OpenFOAM a été utilisé pour résoudre numériquement des équations décrivant le comportement de la couche limite atmosphérique, CLA. OpenFOAM est une librairie C++ basée sur la méthode des volumes finis. Il utilise un maillage défini d'une façon générale qui permet d'utiliser tant un maillage structuré qu'un maillage non structuré. Le caractère orienté objet de cette librairie permet la définition de différents programmes de résolution d'équations différentielles. En particulier, la méthode SIMPLE, Semi-Implicite Method for Pressure Linked Equations, voir Pieter (2000, page 296), y est disponible pour des écoulements laminaires ou turbulents. OpenFOAM possède aussi différents modèles de turbulence et, puisque le code est libre au sens de la FSF, Free Software Foundation, il est possible pour un utilisateur motivé d'y définir son propre modèle de turbulence. Dans le cadre de ce travail un modèle de turbulence $k-\omega$ -SST modifié par Boudreault *et al.* (2011) et le modèle de turbulence $k-\epsilon$ standard ont été utilisés. De plus, différents outils en lien avec la simulation de la couche limite atmosphérique ont été développés. La Fig. 2.1 montre les outils développés et la relation entre eux. Des conditions aux frontières, pour l'entrée, la paroi et le sommet, ont été développées dans le cadre de ce travail. Les librairies en C++ créées pour alimenter d'autres utilitaires ou utilisées conditions aux frontières sont encadrées par des lignes pointillées. Deux outils pour initialiser la solution ont été codés. `InitABL` initialise la solution avec les valeurs théoriques homogènes alors que `InitArrayABL` initialise le domaine avec des listes de valeurs et de hauteurs représentant un profil quelconque. `InitArrayABL` est utilisé pour initialiser le domaine avec les profils homogènes trouvés numériquement ce qui accélère la convergence. Dans les cercles pointillés en brun, deux scripts écrits dans le langage Bash, sont mis en évidence. Ils sont utilisés pour la création d'un maillage selon la procédure décrite à la section 2.2 et pour le lancement des différentes simulations. Le cercle pointillé jaune M4 est une liste d'outils

dans le langage m4 conçus pour automatiser la création de certains fichiers nécessaires pour le maillage et la simulation. L'outil topCF est une classe écrite dans le langage Python utilisée pour calculer automatiquement les valeurs ou les gradients au sommet du domaine pour les différentes variables de la simulation.

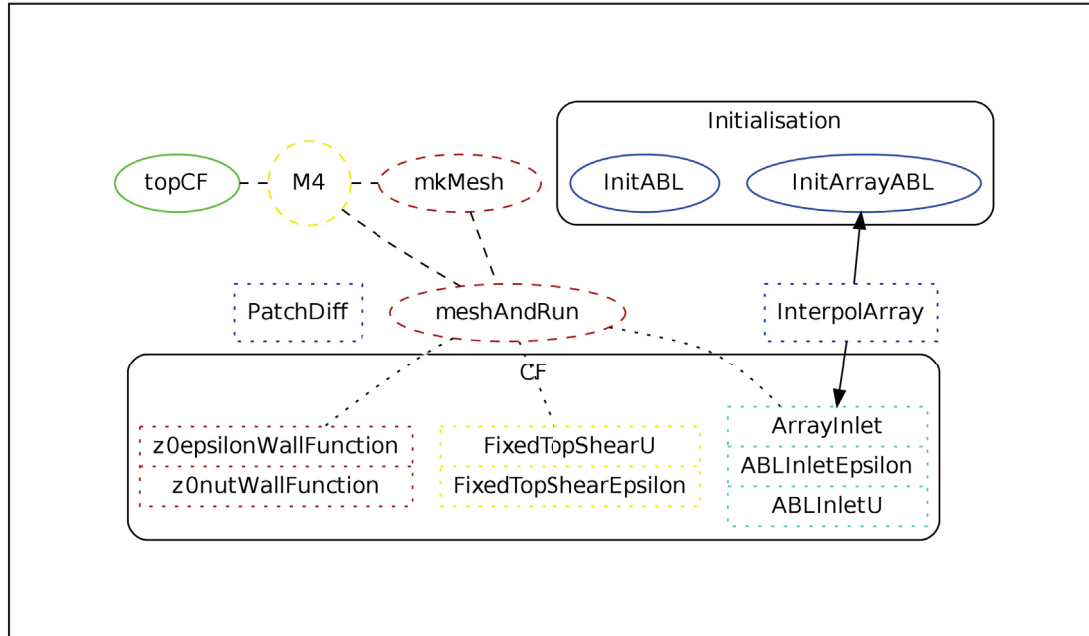


Figure 2.1 Interaction entre les outils développés pour l'initialisation et la simulation des écoulements atmosphériques dans OpenFOAM

2.1.1 Condition frontière au sommet

La condition frontière au sommet représente un cisaillement. Le vent géostrophique et l'accélération de Coriolis ne sont pas considérés. Ces derniers ne sont pas présents dans les écoulements en soufflerie. Dans ce mémoire, trois types de conditions au sommet sont testés : des conditions aux limites de Dirichlet, de Neumann et un ensemble condition de Neumann calculé à partir d'un cisaillement prescrit. Cet ensemble condition est nommée *Shear* dans ce mémoire et le cisaillement est mieux transmis aux équations discrétisées au sommet par celui-ci.

2.1.1.1 L' ensemble de condition *Shear*

Le gradient au centre des cellules, p , dans la formulation des volumes finis est évalué en utilisant le théorème de Stokes, voir Eq. 2.1 et Lovelock et Rund (1975,1989, p. 5.29). Le gradient est donc moyenné sur le volume, Ω . Sachant ceci, il est possible de calculer le gradient à la face, ce qui correspond à une condition de Neumann, nécessaire à une bonne évaluation des variables au centre des cellules en fonction du cisaillement :

$$u_{j,i} \big|_p = \frac{1}{\Omega} \oint u_j ds_i \quad (2.1)$$

Au sommet, la valeur du cisaillement est constante et est prescrite. Parce qu'au sommet les dérivées secondes sont faibles, une simplification est utilisée. Cette simplification consiste à considérer le gradient au centre de la cellule égale au gradient à la frontière. Le gradient de la vitesse est évalué à l'aide de la vitesse de cisaillement prescrite, Eq. 2.2. Le gradient de la dissipation visqueuse, voir Eq. 2.3, est évalué de la même manière utilisant la dérivée analytique correspondant. La valeur de la viscosité sert en quelque sorte de hauteur percue à la condition frontière du sommet. Sa valeur analytique en terrain homogène est $\nu_t = u^* \kappa (z + z_0)$. Finalement au sommet un gradient nul pour l'énergie cinétique turbulente est utilisé.

$$\frac{\partial u_{\hat{x}}}{\partial z} \bigg|_{top} = \frac{u^{*2}}{\nu_t \big|_p} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \bigg|_{top} = - \frac{u^{*5} \kappa}{\nu_t^2 \big|_p} \quad (2.3)$$

Le fait d'utiliser la valeur de ν_t au centre des cellules lie les conditions frontière aux équations de la turbulence, Eq. 1.16. Ceci a pour effet d'assurer que le bon cisaillement est transmis aux équations discrétisées malgré les variations de viscosité tourbillonnaire, ν_t , tout au long de la convergence vers la solution. Cet ensemble de conditions frontière au sommet pourrait être utile dans une simulation incluant une modélisation de la forêt. En effet, ce type de simulation crée un déplacement vers le haut du profil logarithmique rendant ainsi le choix de la vitesse

et de la dissipation visqueuse au sommet difficile. L'ensemble de conditions frontière *Shear* offre alors l'avantage de s'ajuster avec l'écoulement selon le cisaillement prescrit.

2.1.2 Condition frontière au sol

Plusieurs auteurs ont traité de la difficulté des conditions frontière au sol, en particulier, S. E. Norris (2010), Richards et Hoxey (1993), O'Sullivan *et al.* (2011a) et Yang *et al.* (2009). Une équation importante à respecter lors de la calibration des constantes du modèle de turbulence est :

$$\sigma_\epsilon = \frac{\kappa^2}{(C_2 - C_1) \sqrt{C_\mu}} \quad (2.4)$$

Dans le cadre de ce travail, de nouvelles conditions frontière ont dû être développées pour améliorer la précision des résultats des simulations. Des conditions de la frontière pour ϵ , k , u et ν_t au sol ont été développées dans la librairie d'OpenFOAM à cette fin. Voici leurs caractéristiques principales :

- Une vitesse égale à zéro ;
- Un gradient perpendiculaire au sol égal à zéro pour la pression ;
- Un gradient perpendiculaire au sol égal à zéro pour l'énergie cinétique turbulente ;
- Un calcul de la dissipation visqueuse à partir du cisaillement évalué numériquement ;
- Un calcul de la viscosité tourbillonnaire à partir du cisaillement évalué numériquement.

Le calcul du taux de dissipation visqueuse et de la viscosité tourbillonnaire est détaillé plus bas dans cette section.

Dans le cas du modèle de turbulence $k-\omega$ SST, les conditions de la frontière au sol développées par Louis-Étienne Boudreault, pour lesquelles l'auteur de ce mémoire a eu l'opportunité de contribuer, sont utilisées. Voici leurs caractéristiques principales :

- Une vitesse fixe égale à zéro ;
- Un gradient perpendiculaire au sol égal à zéro pour la pression ;
- Un calcul de l'énergie cinétique turbulente au sol par le cisaillement évalué numériquement ;
- Un calcul de la dissipation visqueuse par unité d'énergie cinétique turbulente ;
- Un calcul de la viscosité tourbillonnaire à partir de la relation avec k et ω .

2.1.2.1 Dissipation visqueuse

Pour le taux de dissipation visqueuse, ϵ du modèle $k - \epsilon$, la valeur analytique provenant du cas homogène à cette position est prescrite au centre de la première cellule qui touche la condition frontière au sol, selon l'équation :

$$\epsilon_p = \frac{u_g^{*3}}{\kappa(z + z_0)} \quad (2.5)$$

Où u_g^* est le cisaillement calculé avec l'énergie cinétique turbulente, voir Eq. 2.7.

2.1.2.2 Viscosité tourbillonnaire

Dans le but de fixer un cisaillement à la paroi, deux méthodes peuvent être utilisées avec le modèle $k - \epsilon$. La première est de modifier la vitesse à la paroi, la seconde est de modifier la viscosité tourbillonnaire. Ces deux méthodes fonctionnent, mais la première comporte un traitement plus délicat puisque la valeur modifiée est un vecteur et non un scalaire. Pour fixer le cisaillement, la viscosité tourbillonnaire est donc modifiée. Les équations programmées dans le code OpenFOAM pour la modification de la viscosité tourbillonnaire pour une paroi rugueuse s'écrivent comme suit et les modifications apportées font apparaître le terme z_m dans les équations pour prendre en compte que le maillage commence à cette hauteur.

$$\nu_{tw} = \max \left[\min \left[\left(\frac{y^+ \kappa \left[\frac{y}{y + z_m} \right]}{\log(\max[E^* y^+, 1 + 10^{-4}])} - 1 \right) \nu_w, 2\nu_w^l \right], 0.5\nu_w^l \right] \quad (2.6)$$

où

$$\begin{aligned}
 \nu_w^l &= \max[\nu_{tw}, \nu_w] \\
 E^* &= \begin{cases} E & \text{si } k_s^+ < 2.25 \\ \frac{E}{\left[\frac{k_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+\right]^{\sin(0.4258[\log(k_s^+) - 0.811])}} & \text{si } k_s^+ < 90 \\ \frac{E}{1 + C_s k_s^+} & \text{sinon} \end{cases} \\
 y^+ &= \frac{u^* y + z_m}{\nu_w} \\
 y &= z_p - z_w \\
 u^* &= C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \\
 k_s^+ &= \frac{u^* k_s}{\nu_w}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

La viscosité tourbillonnaire à la paroi se simplifie à l'aide de l'Eq. 2.8 dans un cas pleinement rugueux, $k_s^+ > 90$:

$$k_s = \frac{E}{C_s} z_0 \tag{2.8}$$

$$\nu_{tw} = \frac{\kappa u_g^* y}{\log\left(\frac{y + z_m}{\frac{\nu_w}{Eu^*} + z_0}\right)} - \nu_w \tag{2.9}$$

Le cisaillement à la paroi se calcule avec la viscosité effective et le gradient de vitesse :

$$\tau_w = \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\kappa u_g^* y}{\log\left(\frac{y + z_m}{\frac{\nu_w}{Eu^*} + z_0}\right)} \frac{u_p - u_w}{z_p - z_w} \tag{2.10}$$

En imposant $u_w = 0$ et $z_m = z_0$:

$$\tau_w = \frac{\kappa u_g^* u_p}{\log\left(\frac{y + z_0}{\frac{\nu_w}{Eu^*} + z_0}\right)} \tag{2.11}$$

où

$$u_g^* = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \quad (2.12)$$

Sachant que $\frac{\nu_w}{Eu^*} \ll z_0$, cette procédure est équivalente à celle proposée par Richards et Hoxey (1993), voir Hargreaves et Wright (2007).

2.2 Maillage de terrain complexe

Les maillages pour les terrains étudiés dans ce travail sont faits à partir des outils de OpenFOAM. Différents indicateurs de qualité comme la non-orthogonalité et l'allongement des mailles sont évalués. Les maillages pour les cas étudiés aux sections 3.3 et 3.4 sont effectués par une succession de raffinements et une déformation du maillage partiellement automatisé par le script `mkMesh`, Fig 2.1. Dans ce cas, l'interface entre trois cellules à la frontière d'une boîte de raffinement horizontale est susceptible de causer des problèmes de non-orthogonalité si les cellules du maillage ont un allongement trop grand. La Fig.2.2 met ce fait en évidence. La non-orthogonalité est une cause d'erreur numérique pour l'évaluation du gradient, en particulier pour le gradient de la divergence.

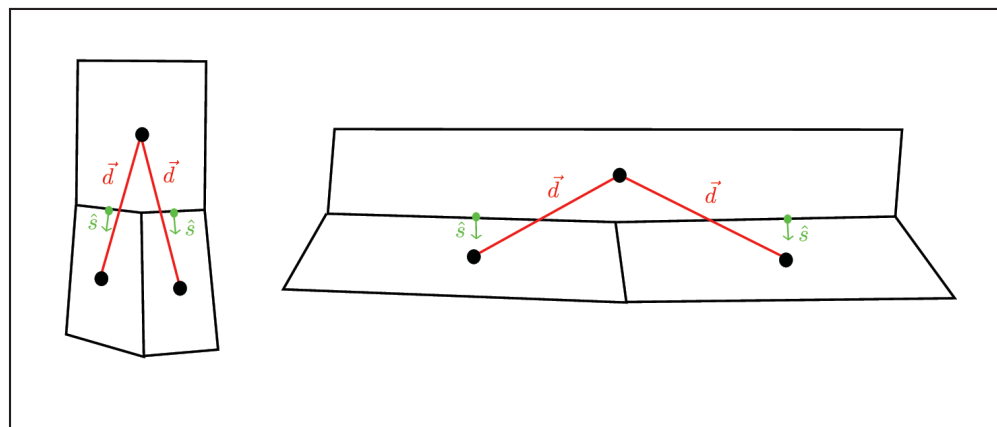


Figure 2.2 Non-orthogonalité des faces à l'intersection des boîtes de raffinement horizontal

Le gradient d'une variable est en effet évalué par le théorème de Stokes qui démontre, de façon générale, l'identité entre l'intégrale volumique du gradient d'un champ de tenseur sur

un domaine et l'intégrale fermée de ce champ sur la surface de ce domaine, voir Lovelock et Rund (1975,1989, p. 5.29). D'un point de vue de la discrétisation, l'erreur de non-orthogonalité est causée par une mauvaise évaluation de la partie de l'intégrale fermée sur la face non-orthogonale. Dans un maillage orthogonal, le vecteur unitaire de surface, $\hat{s}$, et le vecteur $\vec{d}$ entre le centre de cellule, p , et le centre voisin, n , sont parallèles, voir Jasak (1996, p. 83).

Une erreur de la même nature que celle causée par la non-orthogonalité serait une mauvaise interpolation vers les centres de faces des valeurs de centre de cellules. Le même type d'erreur pour les dérivées aux faces est décrit dans Fresiger (2001, p. 237) pour le cas du calcul du terme diffusif. La Fig. 2.3 montre que des cellules possédant un allongement élevé sont plus propices à ce type d'erreur. Bien sûr, plusieurs schémas d'interpolation aux faces peuvent être utilisés et sont plus ou moins appropriés en fonction des caractéristiques du maillage.

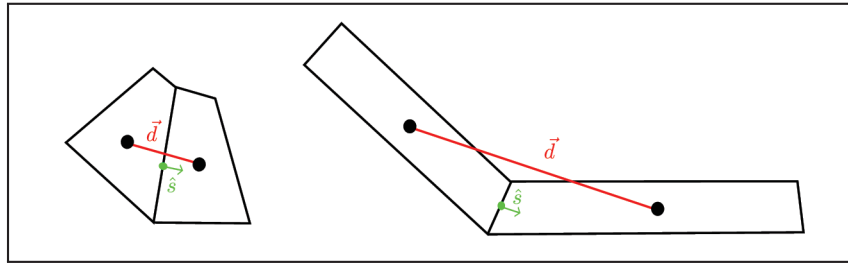


Figure 2.3 Autre cause d'erreur numérique liée aux faces près d'une grande déformation du maillage

Il est toutefois important de noter que l'utilitaire `moveDynamicMesh` est sensible à ces erreurs et un allongement plus élevé que 2 proche de la paroi dans les maillages créés pour les cas étudiés entraînent des inversions de faces et un échec de la déformation du maillage. Pour cette raison un allongement inférieur à 2 proche de la paroi a été utilisé afin d'assurer la qualité de maillage. Il ne serait pas nécessaire de garder un rapport allongement aussi faible aux endroits où la courbure du sol est nulle si un processus permettait de détecter ces zones et déplacer les cellules en conséquence lors du maillage. Une condition frontière spéciale pour l'utilitaire `moveDynamicMesh` pourrait par exemple faire ce travail. Malheureusement, une telle condition frontière n'est pas disponible pour le moment.

2.3 Outil de post-traitement

Afin de pouvoir comparer les résultats que donne les études par CFD utilisée dans ce travail à la norme IEC 61400–1 (2005) et d’en ressortir des caractéristiques qui vont permettre l’évaluation des zones d’exclusions, un outil de post-traitement a été développé. Dans cet outil, un champ de positionnement possible d’éoliennes est déterminé. À chaque éolienne, les valeurs de vitesse et d’énergie cinétique turbulente sont déterminées sur un plan croisant l’axe de la tour de l’éolienne et parallèle à la surface balayée par les pales. Les axes 2 et 3 de la Fig. 1.1 sont dans ce plan. Les valeurs ainsi obtenues à différents points représentant l’éolienne sont traitées pour en obtenir la vitesse, U , l’intensité de turbulence, I_x , l’angle de l’écoulement, ϕ , et l’exposant de la loi de puissance, α . Ce dernier est obtenu par une méthode des moindres carrés.

2.3.1 Structure du code

Le travail principal réalisé dans le cadre de ce projet est le post-traitement de solutions non-linéaires d’écoulements turbulents pour le positionnement des éoliennes. Le code développé pour réaliser ces tâches est divisé en quelques classes et fonctions. Dans OpenFOAM, le post-traitement des données permettant de trouver la valeur de vitesse à la nacelle, l’angle de l’écoulement et le cisaillement, nécessite l’interpolation des valeurs aux points de calcul vers un point quelconque. La librairie C++ utilisée permet de faire ceci en utilisant un utilitaire d’échantillonnage. Cependant, ce dernier n’est pas optimisé et écrit un fichier des valeurs interpolées. Dans le but de faciliter l’interpolation des valeurs utilisées dans les calculs de post-traitement, une autre classe nommée `interpolationList` utilisant la classe purement virtuelle `interpolation` a été créée. La classe `interpolationList` est utile pour obtenir des listes interpolées des valeurs d’intérêts à partir de positions (x, y, z) quelconques. La classe `ground` permet d’obtenir la hauteur du sol à différentes positions (x, y) du domaine. Ces classes utilisent une recherche de cellules et de faces en marchant à travers le maillage pour obtenir les données rapidement. De plus, des classes pour évaluer la loi de puissance sont écrites, `lmsPowerLaw` est la classe mère de ceux-ci pour permettre de mieux structurer le code. Toutes ces classes et fonctions sont rassemblées dans un utilitaire, `turbineSiting`,

qui s'occupe de pourvoir une interface utilisateur par l'intermédiaire d'un dictionnaire, de façon similaire à la plupart des outils de OpenFOAM. Cet utilitaire écrit dans des fichiers les résultats du post-traitement. Par la suite, des graphiques sont créés pour la visualisation.

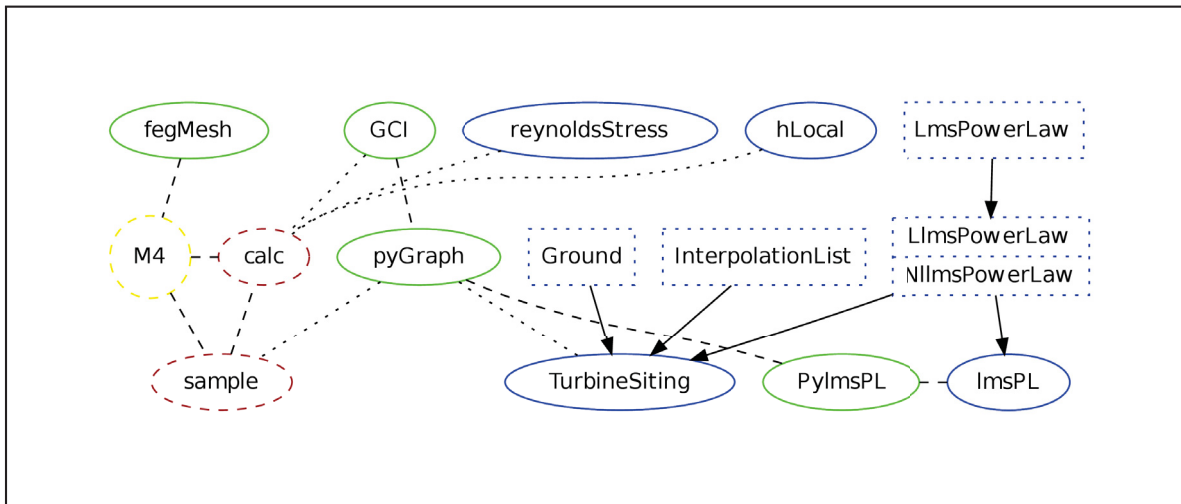


Figure 2.4 Interaction entre les outils développés pour le post-traitement

La Fig. 2.4 montre l'interaction entre les différentes parties de code développé pour le post-traitement. Le processus se termine avec les codes de création des graphiques, `pyGraph`. Les boîtes en bleu pointillé sont les bibliothèques mentionnées plus haut, les ovales bleus sont les exécutables C++ de post-traitement, `turbineSiting` est l'outil principal mentionné plus haut, `reynoldsStress` sert pour le calcul du cisaillement turbulent, `hLocal` sert pour la grandeur des cellules dans le calcul du GCI, voir Ishmail B. Celik (2008), et `lmsPL` sert pour la régression linéaire. L'exécutable `lmsPL` a été créé pour traiter les données de soufflerie. Dans les ovales verts sont les codes en Python, `PylmsPL` servant d'interface entre `lmsPL` et la création de graphiques, `fegMesh` un outil de maillage 1D pour obtenir une liste de positions selon une expansion géométrique permettant d'avoir des positions d'interpolation de valeurs pour le calcul du GCI et finalement, `pyGraph`, un ensemble de codes utilisant `matplotlib` pour créer les graphiques. Les outils `calc` et `sample` sont des scripts dans le langage Bash pour automatiser des opérations répétitives alors que `M4` est un ensemble de scripts dans le langage `m4` qui sert à générer les fichiers nécessaires aux différents outils de OpenFOAM et aux nouveaux exécutables de post-traitement développés dans le cadre de ce travail.

2.3.2 Positionnement des éoliennes

Pour interpoler les données aux points représentant l'éolienne à la position étudiée, deux méthodes sont envisageables. La première est d'utiliser les centres des faces représentant le sol dans la discrétisation comme base de chaque position d'évaluation d'éolienne. La deuxième est de définir un champ de valeur $[x \ y]$ où les caractéristiques de l'écoulement pour le positionnement des éoliennes seront évaluées. Dans le premier cas, la position $[x \ y \ z]$ de chaque face au sol est déjà définie dans OpenFOAM, dans le deuxième cas un calcul doit être fait pour obtenir les positions z correspondant aux positions $[x \ y]$ choisies. Pour un maillage raffiné par morceau en utilisant les outils de OpenFoam, comme ceux utilisés dans ce travail, la numérotation des cellules devient difficile à suivre et la deuxième approche devient avantageuse.

2.3.3 Marche à travers le maillage

Pour trouver une cellule, OpenFOAM utilise la fonction `findCell`. Elle utilise la fonction `findNearestCell`. Cette dernière n'est pas optimisée dans OpenFOAM. Elle consiste en une boucle simple sur toutes les cellules du maillage. Puisque cette fonction est appelée pour chaque point de la liste définissant l'éolienne à chaque emplacement potentiel, une méthode plus efficace, associée à l'outil de post-traitement, a été développée. De même, cette méthode est utilisée pour la recherche de faces appartenant à la frontière du sol, afin de déterminer la hauteur du sol à une coordonnée arbitraire. Le gain en vitesse est discuté dans la section des résultats. Pour pouvoir mieux expliquer la procédure implémentée, la structure de deux fonctions membre de la classe d'un `polyPatch` est présentée à la Fig. 2.5. Cette classe est utilisée par OpenFOAM dans la définition du maillage à travers la fonction membre `boundaryMesh` et permet d'obtenir des informations sur le maillage à une frontière. La fonction membre `localFaces`, retourne la liste de faces qui sont elles-mêmes une liste d'indices de points du `polyPatch`. Cette liste relie donc chaque face du `polyPatch` aux points de la frontière. Par exemple, le deuxième élément de la liste `localFaces` est la face 1 définie par la liste de quatre points 4 (1 4 5 2). La fonction membre `pointFaces` retourne une liste de listes. Ces dernières contiennent les indices de faces du `polyPatch` en contact avec les points de la

frontière. Par exemple, le quatrième élément de la liste `pointFaces`, `2 (0 2)`, est la liste de face appartenant à la frontière avec lesquels le point `3` est en contact.

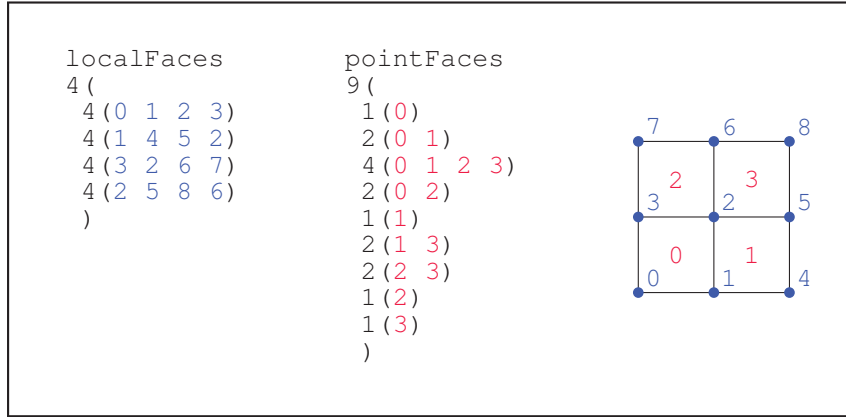


Figure 2.5 Structure d'un maillage de surface accessible par un polyPatch

Avec l'utilisation des listes reliant les faces aux points, Fig. 2.5, la face dont le centre est le plus près de l'emplacement désigné est trouvée. La Fig. 2.6 illustre la procédure implémentée, dans la fonction `findNearestFace` pour accomplir cette tâche. À droite est une image, vue de haut, des faces de la frontière représentant le sol évalué dans cette procédure :

- en noir, le point p indique la position $[x\ y]$ où la hauteur du sol doit être déterminée ;
- en vert, le centre de face de départ ;
- en blanc, les centres de faces qui n'ont pas été retenues lors de la recherche ;
- en bleu, les points obtenus pendant la marche à travers le maillage et ayant la distance, $||c_n - p||$, la plus faible pour l'ensemble de coins, c_n , listés par la face dont le centre est à la position f ; et finalement,
- en rouge, les centres de faces ayant la distance, $||f_n - p||$, la plus faible parmi l'ensemble de centres de faces, f_n , dont les indices sont obtenus par la fonction `membre pointFaces` en utilisant l'indice du point c_n retenu.

La procédure utilise en alternance un centre de face et un coin de face pour s'approcher du point d'intérêt. Lorsqu'une face est trouvée comme étant la plus proche à deux reprises, la procédure s'arrête. La procédure décrite est utilisée dans la classe `ground`, le même type de procédure est exécuté pour l'interpolation des données dans la classe `interpolationList`. Cependant, la face la plus proche n'est pas nécessairement la face dans laquelle le point réside. De plus, la hauteur au point p est évaluée en considérant l'angle de la face, voir Annexe II.

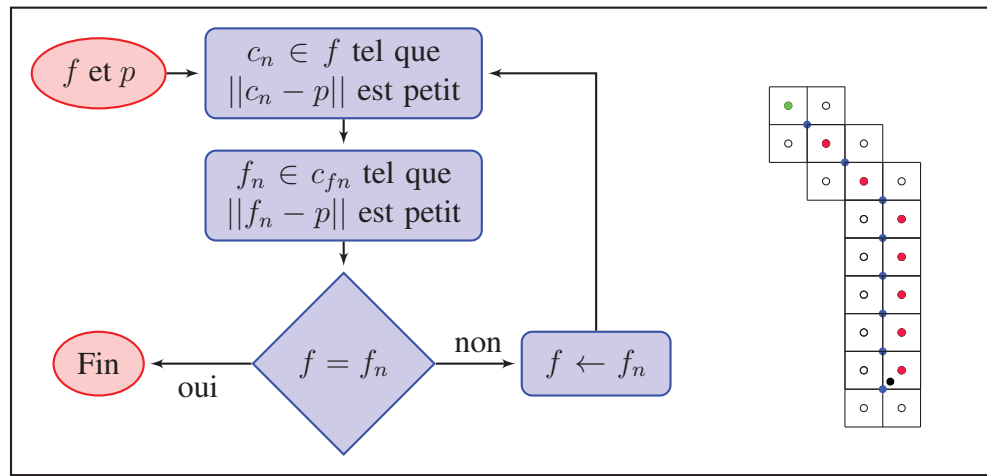


Figure 2.6 Procédure pour la fonction de recherche de face implémentée

2.4 Lien avec les normes

Dans le contexte du positionnement d'éoliennes, les normes IEC 61400-1 (2005) et IEC 61400-12-1 (2005) sont les références. Cependant, ces normes ne proposent pas un lien direct avec variable des solutions non-linéaires des équations de Navier-Stokes avec les modèles de turbulence utilisés.

2.4.1 Intensité de turbulence comme indice d'exclusion

Pour lier l'énergie cinétique turbulente, provenant des modèles $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST utilisés, avec les limites posées par la norme sur l'intensité de turbulence, des relations sont développées, Eqs. (2.13 à 2.15). À l'aide de l'Eq. 1.7 et de l'hypothèse d'isotropie, une relation reliant l'énergie cinétique turbulente, k , à l'écart-type σ_1 peut être déduite :

$$k = \frac{3}{2}\sigma_1^2 \Rightarrow \sigma_1 = 0.8165\sqrt{k} \quad (2.13)$$

En utilisant les relations d'anisotropie, Eq. 1.9 :

$$k \geq 0.87\sigma_1^2 \Rightarrow \sigma_1 \leq 1.0721\sqrt{k} \quad (2.14)$$

Le pire cas théorique est celui où toute l'énergie cinétique turbulente est utilisée pour la fluctuation de vitesse dans la direction du vent, σ_1^2 . Ce qui implique que $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Ce cas théorique donne la relation :

$$k = \frac{1}{2}\sigma_1^2 \Rightarrow \sigma_1 = \sqrt{2}\sqrt{k} \quad (2.15)$$

Le pire cas déduit à partir des limitations d'anisotropie de la norme, Eq. 2.14, est plus restrictif pour le positionnement des éoliennes que l'hypothèse d'isotropie. La Fig.2.7 représente la relation entre l'écart-type de la vitesse principale, σ_1 , et la racine carrée de l'énergie cinétique turbulente, $\sqrt{k}$, pour les trois hypothèses précédentes ainsi que les mesures sur trois terrains complexes de Jiménez (2009). Elle montre aussi que les valeurs provenant de l'hypothèse d'isotropie sont les moins restrictives pour le positionnement des éoliennes.

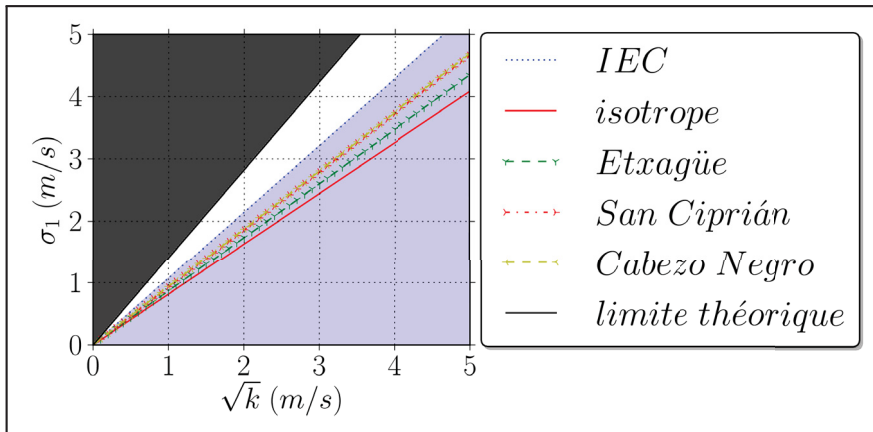


Figure 2.7 Relation entre $\sqrt{k}$ et σ_1 selon différentes hypothèses d'anisotropie : la limite imposée par la norme IEC, Eq. 2.14, l'hypothèse d'isotropie, Eq. 2.13, trois terrains complexes étudiés par Jiménez (2009) (Tableau 1.2), et le pire cas théorique, Eq. 2.15

Pour donner le maximum d'information, l'outil de post-traitement permet de définir une pente minimale et maximale entre $\sqrt{k}$ et σ_1 . Les pentes de l'équation d'isotropie et de la relation données par la norme IEC 61400-1 (2005) sont proposées comme minimum et maximum. Cependant, ces paramètres pourraient être ajustés avec une connaissance plus précise de l'anisotropie de la turbulence à un site donné. L'outil de post-traitement retournera alors une plage de valeurs d'intensité de turbulence probable à la hauteur de la nacelle.

2.4.2 Caractéristique du vent comme indice d'exclusion

Deux caractéristiques de l'écoulement sont examinées de façon plus détaillée pour permettre un choix plus éclairé du positionnement des éoliennes : le vecteur de vitesse du vent et l'énergie cinétique turbulente. Dans le cas du vent, une attention particulière doit être portée à son caractère vectoriel.

Moindres carrés sur la loi de puissance

Pour évaluer l'exposant de la loi de puissance, α , une liste de points situés sur le plan décrit par les axes 2 et 3 est déterminée. Cette liste est utilisée pour chaque position potentielle de l'éolienne. Avec cette liste de vitesse et de position, l'exposant α est déterminé par la méthode des moindres carrés. Ce sont les classes `llmsPowerLaw` et `nllmsPowerLaw` qui exécutent cette tâche avec une méthode des moindres carrés linéaires (1 inconnue) et une méthode des moindres carrés non-linéaires (2 inconnues). Cette dernière introduit un nouveau paramètre, la différence de hauteur apparente de la nacelle, β . La valeur négative de β peut aussi être vue comme la hauteur apparente du sol. La fonction à minimiser est donnée par l'Eq. 2.17. Pour calculer le logarithme de la vitesse, un repère local à chaque éolienne est introduit, Fig. 1.1. L'axe 1 du repère local à l'éolienne est dans la direction du vecteur vitesse dans le plan horizontal à la hauteur de la nacelle par rapport au sol et à la position de sa tour. L'origine du repère est à la hauteur de référence, z_r , dans l'axe du mât. La liste de vitesse V_i est une liste de scalaires composée des normes des vitesses dans la direction 1 aux hauteurs z_i . La liste de hauteur z_i représentant l'éolienne sur le plan décrit par les axes 2 et 3 provient d'une définition dans le dictionnaire de l'outil ; une liste de points appartenant à ce plan et une hauteur de nacelle. De

la même manière, la variable V_r est le scalaire de la vitesse de référence dans la direction 1. En décalant la loi de puissance Eq. 1.10, elle peut s'écrire :

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \left(\frac{z + \beta}{z_r + \beta} \right)^\alpha \quad (2.16)$$

L'ajout du paramètre β de l'Eq. 2.16 permet un degré de liberté de plus donnant la possibilité de réduire l'erreur quadratique. La Fig. 2.8 montre deux représentations d'une approximation par la loi de puissance. Une valeur positive de β indique que la meilleure approximation par la loi de puissance implique une plus grande hauteur apparente de l'éolienne par rapport au sol, Fig. 2.8 à droite. L'inverse, à gauche de la Fig. 2.8, implique une hauteur apparente de l'éolienne par rapport au sol plus faible. Une valeur élevée du paramètre β est donc une caractéristique souhaitable.

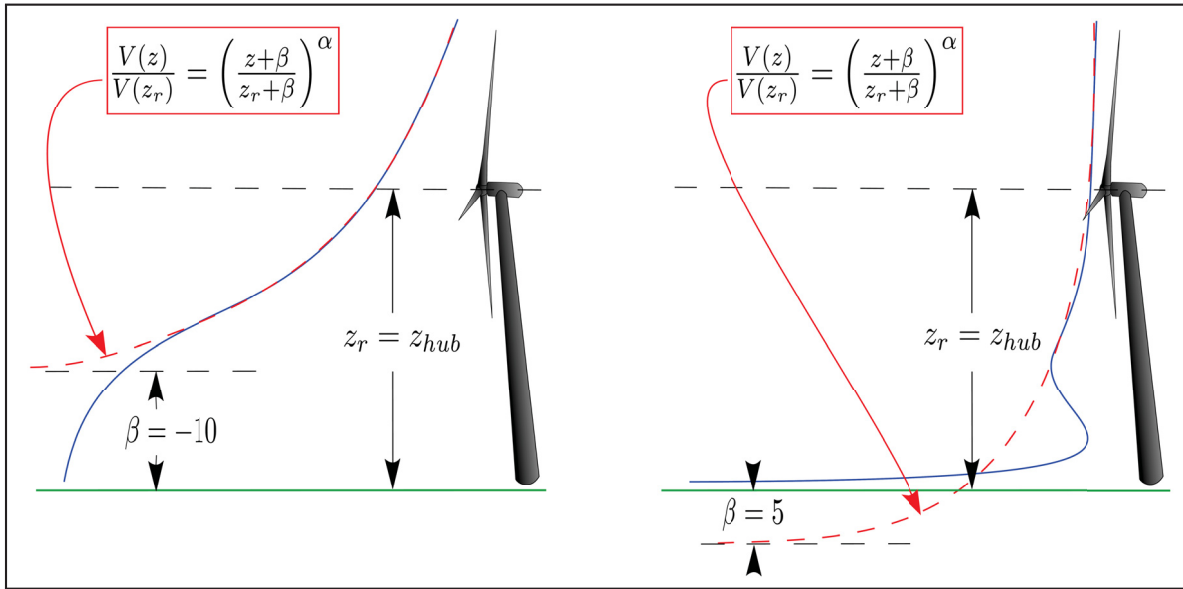


Figure 2.8 Représentation d'une approximation par la loi de puissance décalée avec une valeur de β négative et positive

La hauteur apparente du sol, $-\beta$, est évidemment limitée par le point le plus bas appartenant à la liste de z_i : $z_i + \beta \leq 0$. Finalement, l'équation des moindres carrés à minimiser, dans sa forme pratique, est décrite avec les paramètres α et β comme suit :

$$\chi^2(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{V_i}{V(z_r)} \right) - \alpha \ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right]^2 \quad (2.17)$$

Il est évident que poser $\beta = 0$ permet d'utiliser la méthode des moindres carrés linéaires. Dans ce cas, la solution est simple à obtenir et ne demande aucun processus itératif. La méthode des moindres carrés non-linéaire apporte une plus grande précision sur l'approximation du profil de vent par la loi de puissance. Plus de détails sur l'implémentation de la méthode des moindres carrés non-linéaire sont présentés à l'Annexe III.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Les résultats sont divisés en quatre sections, premièrement les résultats pour le cas de soufflerie Rushill, deuxièmement pour les profils homogène d'entrée des cas V et VI de soufflerie étudiés par Røkenes et Krogstad (2009), troisièmement le cas V , puis finalement le cas VI .

3.1 Écoulement 2D colline Rushil

Les simulations ont été effectuées avec OpenFOAM. L'exécutable utilise la méthode SIMPLE pour les écoulements incompressibles, stationnaires et turbulents et se nomme `simpleFoam`. Le cas présenté est validé par comparaison avec des données en soufflerie, voir L.H. Khurshudyan et Nekrasov (1981). Les deux modèles de turbulence $k - \omega$ SST et $k - \epsilon$ ont été utilisés.

3.1.1 Constantes des modèles de turbulence et maillages

Les constantes des deux modèles de turbulence ont été fixées selon les recommandations de Boudreault *et al.* (2011). Pour le modèle $k - \epsilon$ les valeurs correspondantes utilisées sont présentées dans le Tableau 3.1 et sont cohérentes avec Boudreault *et al.* (2011). Les valeurs de la hauteur de rugosité, du cisaillement, des dimensions de la colline, des dimensions du domaine, du nombre de cellules et des facteurs d'expansion géométrique (FEG) sont présentées dans le Tableau 3.2. Le maillage a été effectué avec l'utilitaire de base `blockMesh`. Une représentation du maillage pour le cas de $k - \epsilon$ avec les conditions frontière utilisées est illustrée à la Fig. 3.1.

Tableau 3.1 Constantes du modèle $k - \epsilon$

κ	σ_ϵ	σ_k	C_μ	C_2	C_1
0.4	1.5	1	0.03	1.92	1.304

Tableau 3.2 Constantes du cas H3 de la colline Rushil

z_0 (m)	1.57×10^{-4}
u^* (m/s)	0.178
H (m)	0.117
a (m)	0.351
Domain (m)	9.36×2.0
Maillage $_{k-\epsilon}$	480×120
Maillage $_{k-\omega}$	480×160
FEQ	1.03 à 1.10

3.1.2 Conditions aux frontières

Les différentes conditions aux frontières représentant l'entrée, le sol, la sortie et le sommet sont discutées dans cette section.

Pour chaque modèle de turbulence, les valeurs d'entrée sont obtenues avec une simulation en terrain plat en utilisant la même expansion géométrique en hauteur et une condition cyclique dans la direction de l'écoulement. Pour la sortie, la valeur de la pression est imposée à zéro alors que les autres variables sont déterminées par un gradient perpendiculaire nul.

Pour la condition frontière au sommet du domaine de calcul, les gradients théoriques homogènes des variables sont imposés malgré qu'il soit pratique courante d'imposer des gradients nuls comme dans le cas de Askervein étudié par Prospathopoulos et Voutsinas (2006). Ces gradients, cohérents avec les profils de U , k et ω sont les conditions à la frontière du sommet qui introduisent les plus faibles erreurs dans les profils homogènes dans l'étude de O'Sullivan *et al.* (2011b). L'imposition des profils homogènes a été préférée aux nouveaux profils proposés par Yang *et al.* (2009) pour assurer une plus grande cohérence des profils d'entrée avec la condition frontière au sol utilisée. En effet, la solution numérique sur le domaine discret diffère quelque peu de la solution analytique et utiliser les solutions analytiques à l'entrée cause un léger saut de pression dans les premières cellules au sol.

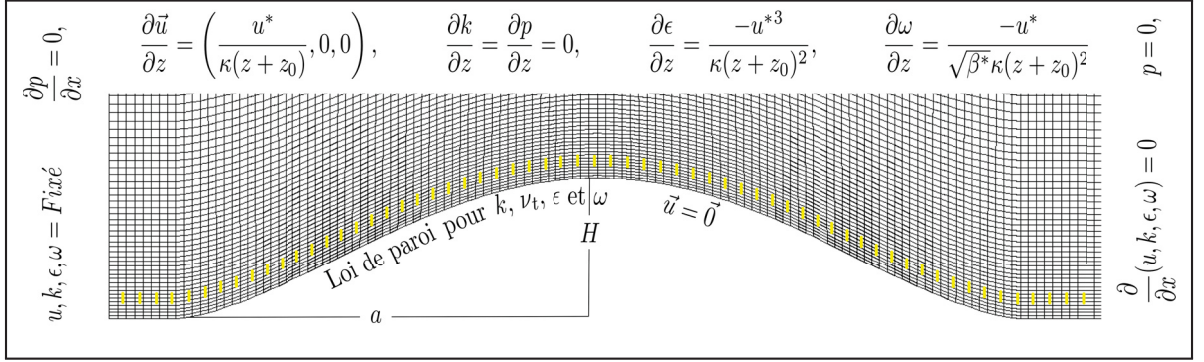


Figure 3.1 Conditions frontiere utilisées pour le cas 2D de Rushil, voir L.H. Khurshudyan et Nekrasov (1981)

La condition frontiere au sol pour le modèle $k - \epsilon$ est l'équivalent d'un cisaillement calculé en utilisant la vitesse de la première cellule. La loi logarithmique et la relation entre l'énergie cinétique turbulente et le cisaillement, Eq. 3.2, sont utilisées pour calculer ce cisaillement. Une condition frontiere du même type existe déjà dans OpenFOAM. Cependant, comme le mentionne Blocken *et al.* (2007), il y a certains problèmes dans l'utilisation d'une implémentation comme celle-ci pour des écoulements atmosphériques. Elle a donc été modifiée pour être plus compatible avec les écoulements atmosphériques et le maillage de $k - \epsilon$ qui commence au-dessus de z_0 , voir section 2.1.2. La valeur du cisaillement est imposée par une modification de la viscosité tourbillonnaire au sol ce qui est à peu près équivalent à Eq. 3.1 pour des grandes valeurs de z_0 .

$$\tau_w = \frac{\kappa u_g^* u_p}{\log\left(\frac{y+z_0}{z_0}\right)} \quad (3.1)$$

$$u_g^* = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \quad (3.2)$$

La variable y est défini dans OpenFOAM comme la distance perpendiculaire à la paroi entre la condition frontiere du sol et le centre de la cellule proche paroi. Plus de détails sont présentés à la section 2.1.2. Pour le modèle de $k - \omega$ SST, la condition frontiere au sol utilisée est celle proposée par Boudreault *et al.* (2011).

3.1.3 Analyse des résultats

La section des résultats pour le cas de Rushil est divisée en deux parties. Premièrement, une partie validation compare les résultats obtenus en utilisant OpenFoam avec les deux modèles de turbulence aux mesures en soufflerie de Rushil. Ensuite, une deuxième section compare les mesures en soufflerie avec les résultats obtenus à l'aide du logiciel OpenFOAM utilisant les deux modèles de turbulence et ceux obtenus avec WAsP Engineering. Les résultats présentés dans cette deuxième section sont en lien direct avec la problématique du positionnement des éoliennes. Pour ce faire, les propriétés suivantes à la hauteur de la nacelle sont interpolées : la vitesse, l'angle du vent à la hauteur de la nacelle, l'intensité de turbulence, l'exposant de la loi de puissance (à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires).

3.1.3.1 Validation

Les simulations numériques de cette section sont validées par comparaison avec les mesures en soufflerie de Rushil, voir L.H. Khurshudyan et Nekrasov (1981), et l'analyse de ces mesures. Ces mesures en soufflerie consistent en une série de tests d'écoulement par-dessus une colline symétrique de hauteur $H = 117 \text{ mm}$ avec différents ratios hauteur/longueur et une hauteur de rugosité $z_0 = 1.57 \times 10^{-4} \text{ m}$. Une série complète de données mesurées est disponible, ce qui en fait une bonne base de comparaison. Les résultats des simulations ont été obtenus pour la colline H3. Le nombre a dénote le ratio de la demi-longueur sur la hauteur (a/H).

- **Domaine**

Le domaine de calcul est de $80H$ dans la direction de l'écoulement et de $17H$ de hauteur par rapport au sol. Le maillage pour $k - \omega$ SST est plus raffiné en hauteur que celui de $k - \epsilon$ comme l'indique le Tableau 3.2. Les points de calculs du maillage sont concentrés autour de la colline et des facteurs d'expansion géométrique verticale et horizontale de 1.03 à 1.10 sont utilisés. Le nombre de cellules total pour $k - \omega$ SST est de 76800 et pour $k - \epsilon$ de 57600.

• Profils

Les Figs. (3.2 et 3.3) comparent entre les mesures et les simulations des profils de u_x , ϕ , k et $\overline{u'w'}$ à diverses positions horizontales. Ces positions sont représentées de façon adimensionnelle en utilisant la demi-longueur a . La position $x/a = 0$ correspond au centre de la colline alors que $x/a = -1$ correspond au début de cette colline (du côté amont). La vitesse en x , l'énergie cinétique turbulente et le cisaillement turbulent sont adimensionnalisés à l'aide d'une vitesse de référence qui est la vitesse de frottement expérimentale $u^* = 0.178 \text{ m/s}$. La valeur expérimentale de la turbulence, k_{exp} , est calculée avec les mesures des deux composantes $\overline{u'u'}$ et $\overline{w'w'}$ du tenseur de Reynolds en utilisant l'hypothèse que la troisième composante de la diagonale $\overline{v'v'}$ est égale à la moyenne des deux autres, Eq. 3.3. Le cisaillement turbulent provenant des simulations numériques, $\overline{u'w'}$, est calculé en utilisant l'approximation de Boussinesq, Eq. 3.4

$$k_{exp} \approx \frac{3}{4} (\overline{u'u'} + \overline{w'w'}) \quad (3.3)$$

$$\overline{u'w'} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.4)$$

Les Figs. (3.2 et 3.3) montrent que les simulations numériques reproduisent très bien les profils de vitesse horizontale, u_x , ainsi que l'angle de l'écoulement, ϕ , et par conséquent la vitesse verticale. La bonne prédiction numérique du vent se produit, avant, au-dessus et même après la colline malgré les difficultés généralement associées à la séparation.

En ce qui concerne l'angle de l'écoulement, donc la vitesse verticale, les positions $x/a = 0.5$, 0.75 et 1 montrent que l'angle ϕ n'est pas aussi bien reproduit malgré le bon comportement de la vitesse u_x . Ceci semble indiquer que la zone de recirculation n'est pas parfaitement reproduite. Comme le souligne la comparaison à $x/a = 2$, Fig. 3.3, les deux modèles de turbulence prédisent un ré-attachement plus près de la colline que celui mesuré en soufflerie. Il est aussi important de noter que l'angle de l'écoulement du vent au sommet de la colline prédit par les simulations est plus faible que celui mesuré en soufflerie. Cependant comme il sera vu plus tard dans les profils horizontaux, cet angle varie très rapidement et la Fig. 3.4 montre que le comportement de l'angle ϕ à hauteur de la nacelle est très bien reproduit à cet endroit.

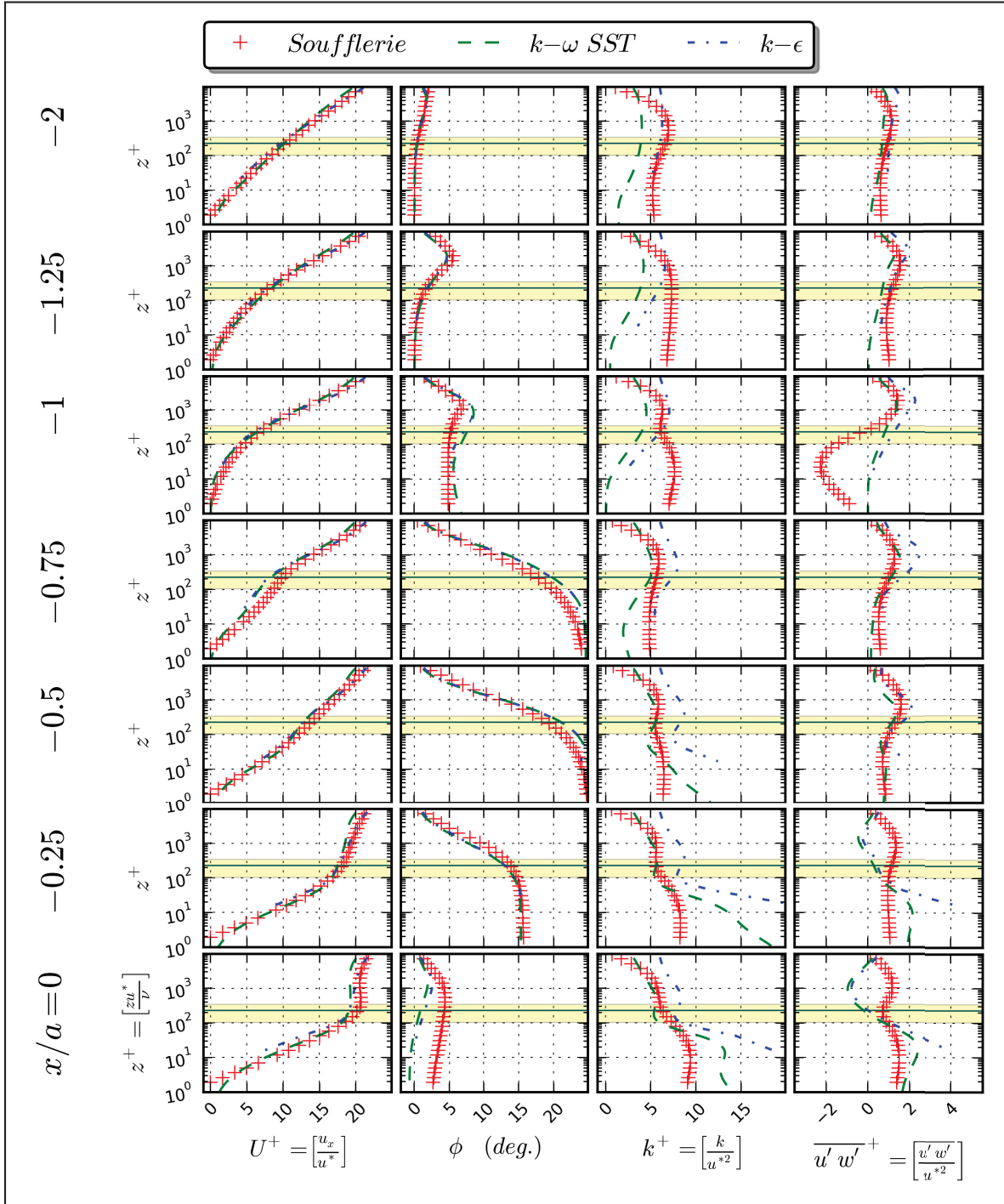


Figure 3.2 Cas H3 de Rushil : profils verticaux des données de mesures en soufflerie et des simulations pour les positions $-2 \leq x/a \leq 0$

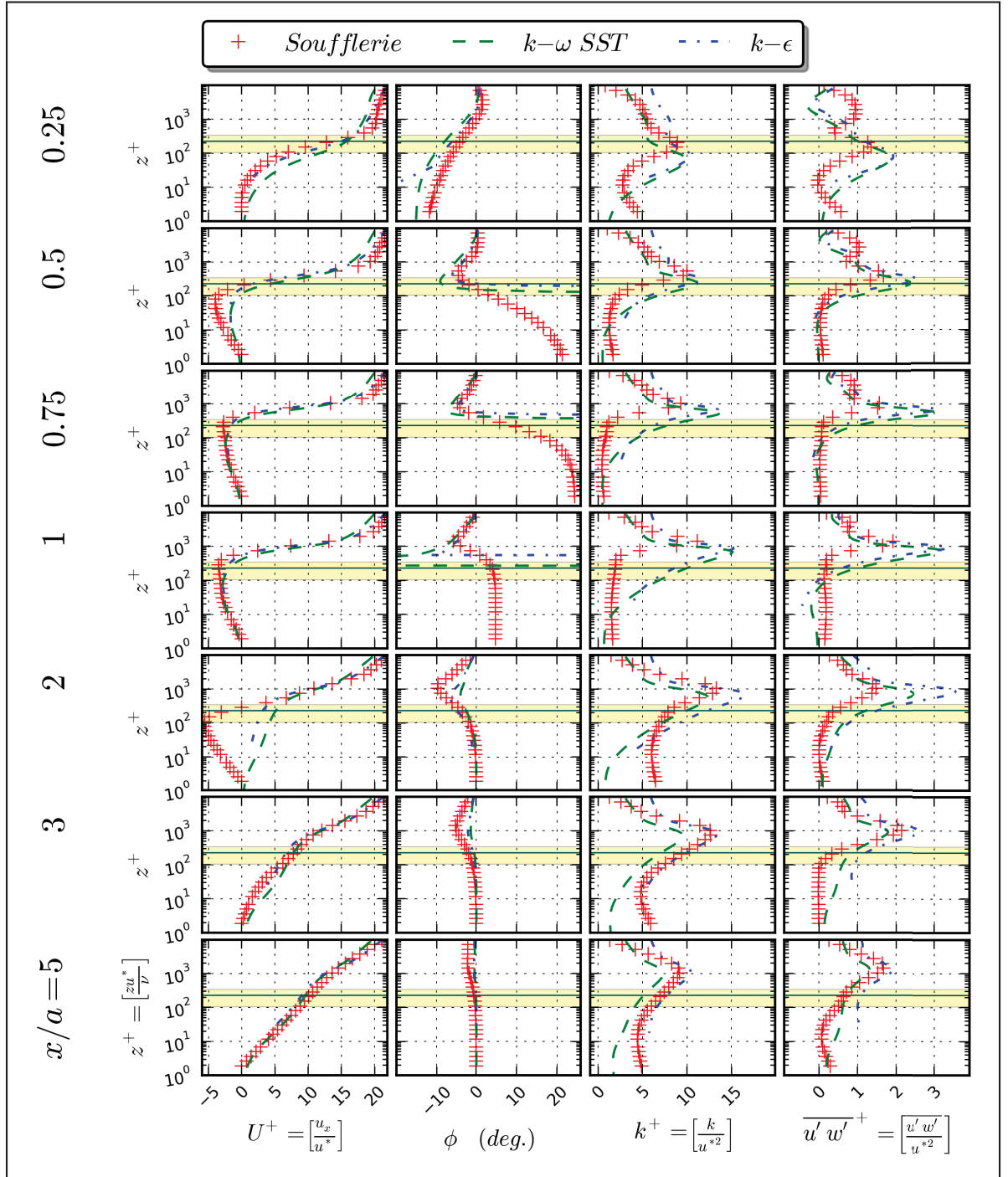


Figure 3.3 Cas H3 de Rushil :profils verticaux des données de mesures en soufflerie et des simulations pour les positions $1 \leq x/a \leq 5$

Pour ce qui est de l'énergie cinétique turbulente, k , et le cisaillement turbulent, $\overline{u'w'}$, les valeurs numériques s'accordent moins bien avec les mesures en soufflerie et on observe des sous-évaluations et des sur-évaluations. Il est cependant intéressant de noter que l'ordre de grandeur et la variation verticale des simulations numériques concordent avec les mesures en soufflerie. Les différences entre le modèle $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST sont notables dans la production d'énergie cinétique turbulente ainsi que dans le cisaillement turbulent. Il peut être remarqué que l'énergie cinétique turbulente prédite par le modèle $k - \epsilon$ est généralement plus élevée que celle prédite par le modèle $k - \omega$ SST. Quelques exceptions peuvent être notées, en particulier dans la zone de recirculation après la colline. Ceci semble indiquer que $k - \epsilon$ est un modèle plus prudent que le modèle $k - \omega$ SST pour le positionnement d'éoliennes par rapport au paramètre de l'intensité de turbulence, I .

Les résultats de cette section présentés pour les deux modèles de turbulence ont été réalisés à l'échelle de la soufflerie. C'est pourquoi les valeurs de z^+ à la hauteur de la nacelle sont faibles. Ceci rend les simulations plus faciles à effectuer particulièrement dans le cas du modèle $k - \omega$ SST modifié qui nécessite un z^+ très faible et donc une première maille très petite. À l'échelle du terrain où la hauteur du domaine serait de trois kilomètres, répondant à une exigence numérique afin de limiter une accélération par effet de blocage, l'exigence sur la valeur z^+ oblige un très grand nombre de cellules dans la direction verticale si l'on veut limiter le facteur d'expansion géométrique à une valeur raisonnable.

3.1.3.2 Application de l'outil de post-traitement

L'outil de post-traitement est utilisé dans cette section pour analyser les mesures en soufflerie et les simulations afin de comparer des caractéristiques de l'écoulement pertinentes au positionnement des éoliennes. Les résultats du logiciel linéaire WAsP Engineering sont également présentées pour fin de comparaison. Les éoliennes sont représentées par une ligne verticale constituée de points équidistants. Le nombre de points peut être défini dans le dictionnaire de l'outil de post-traitement. Dans ce travail, 15 points ont été choisis. Ces lignes sont représentées à la Fig. 3.1 par des traits jaunes. La valeur du facteur d'échelle a été choisie pour que la hauteur de la nacelle soit de 80m. Avec ce facteur d'échelle, la colline serait de 500m de

hauteur et le diamètre des éoliennes de $80m$. À l'échelle de la soufflerie et des simulations numériques dans OpenFOAM, la hauteur de la nacelle est de $0.019m$.

- **Paramètres d'aide au positionnement**

La Fig. 3.4 montre les résultats de WAsP Engineering et ceux de l'outil développé dans ce travail (post-traitement des résultats calculés avec OpenFOAM) pour les valeurs à la hauteur de la nacelle de la vitesse adimensionnelle, U_{hub}^+ , dans la direction x , de l'angle de l'écoulement, ϕ_{hub} , de l'intensité de turbulence, $I_{x_{hub}}$, dans la direction du vent perpendiculaire au disque de l'éolienne, de l'exposant de la loi de puissance par régression linéaire, α_l , et régression non-linéaire, α_{nl} , ainsi que de la différence de hauteur apparente adimensionnalisée, β_{nl}^+ . La Fig. 3.5 montre l'erreur quadratique des méthodes de régression linéaire et non-linéaire pour l'évaluation des paramètres α et β provenant des simulations $k - \epsilon$ et $k - \omega$ ainsi que des mesures en soufflerie.

Les solutions calculées par WAsP Engineering ont été obtenues avec la hauteur de $500m$ pour la colline. Le rectangle couleur saumon représente la zone de recirculation déterminée avec les solutions des simulations non-linéaire avec OpenFOAM. Les paramètres de souffleries liés à la loi de puissance, α , β et χ^2 , ont été obtenu avec les mêmes classes basées sur `lmsPowerLaw` que pour le post-traitement des simulations numériques, en utilisant une liste de 15 points et des valeurs interpolées.

Dans cette étude, la vitesse à la hauteur de la nacelle, U_{hub}^+ , pour le modèle $k - \epsilon$ et pour le modèle $k - \omega$ SST est très bien représentée avant la recirculation. Après la recirculation, le modèle $k - \omega$ SST semble être plus précis que le modèle $k - \epsilon$, en particulier à $x/a = 3$. Les valeurs de vitesse à la hauteur de la nacelle vers la fin de la recirculation ne sont pas aussi bien représentées. WAsP Engineering prédit très bien cette vitesse avant la recirculation. Toutefois, comme ce modèle linéaire ne peut pas reproduire la recirculation, ses résultats sont complètement erronés à l'intérieur de celle-ci. Cette erreur reste élevée jusqu'à une grande distance en aval de la zone de recirculation. Il est à noter que la technique proposée par Mortensen et Antoniou (2006) pour améliorer les résultats de WAsP Engineering en terrain complexe n'a pas été utilisée en raison d'un manque de temps.

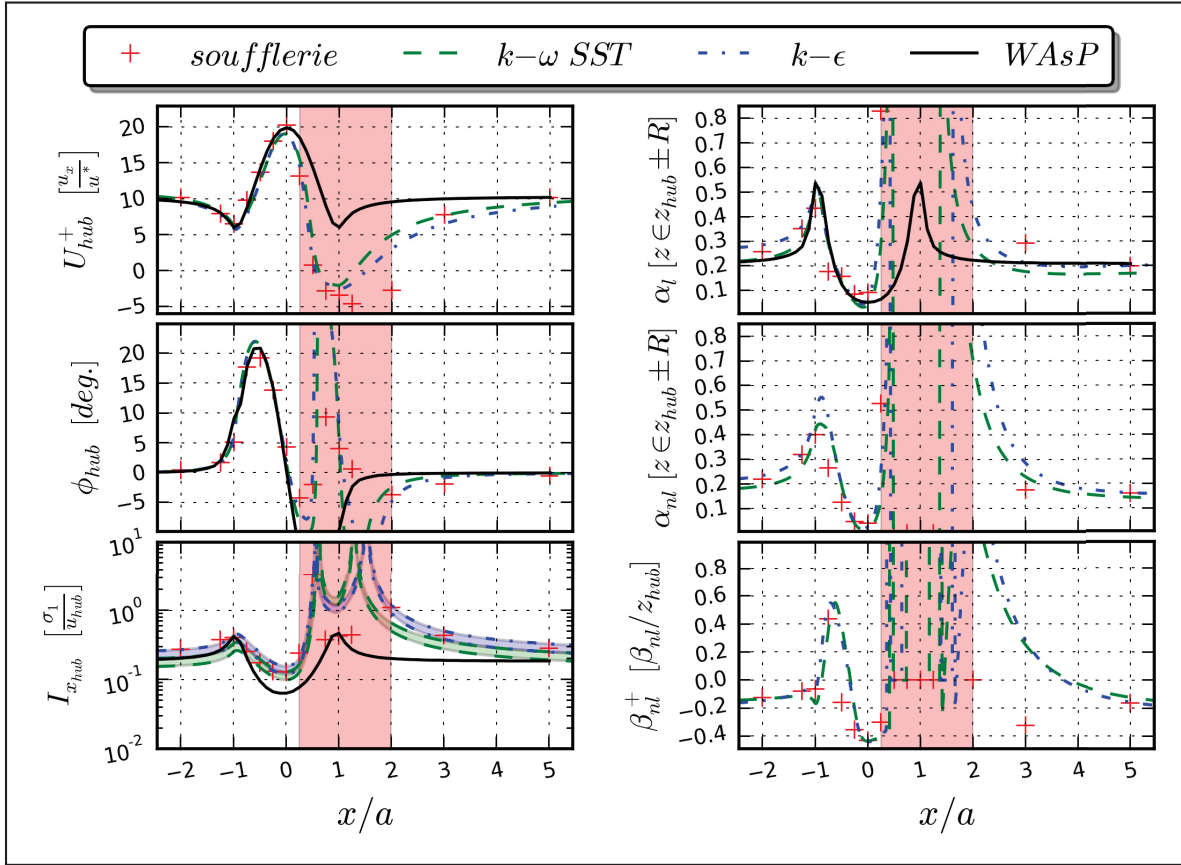


Figure 3.4 Cas H3 : profils horizontaux des données de soufflerie, simulation et des résultats de WASP Engineering à hauteur de la nacelle

L'angle ϕ_{hub} , tel que calculé dans l'outil de post-traitement, est l'angle entre l'horizontale et le vecteur vitesse sur le plan défini par la vitesse à la nacelle et la verticale. Dans le cas 2D cette définition peut être résumée plus simplement par l'angle entre l'horizontale et le vecteur vitesse. Donc, pour ce cas 2D, dans la zone de recirculation cet angle est défini entre l'axe négatif de x et le vecteur vitesse, qui pointe aussi dans la direction négative. Cette précision a été mise en place en prévision des cas 3D où le vent peut être orienté dans toutes les directions. Comme avec la vitesse horizontale, les valeurs des angles, ϕ_{hub} , prédites par les deux modèles de turbulence et WASP Engineering sont en accord avec les mesures de l'amont jusqu'au sommet de la colline. En aval de la colline jusqu'à la fin de la zone de recirculation, seulement les 2 simulations réalisées avec OpenFOAM obtiennent des résultats comparables aux mesures en

soufflerie. WAsP Engineering prédit des résultats acceptables en aval de la colline seulement lorsque x/a est supérieur à 3.

L'intensité de turbulence dans la direction de la vitesse du vent à la position de l'éolienne est calculée, pour les données de soufflerie, avec l'équation exacte, $\frac{\sigma_1}{|V_{hub}|}$, voir la Fig. 1.3. Les modèles de turbulence $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST ne peuvent donner directement la valeur de σ_1 et une hypothèse sur l'anisotropie de la turbulence doit être posée. Les hypothèses d'isotropie, Eq. 2.13, et les relations d'anisotropie de la norme IEC 61400-1 (2005), Eq. 2.14, sont utilisées respectivement comme valeur minimale et maximale de σ_1 . Une zone ombrée représente la plage entre ces limites. Comme le montre la Fig. 2.7, l'écart entre la limite minimum et maximum de σ_1 s'accroît avec l'augmentation de l'énergie cinétique turbulente k . Cependant, l'échelle semi-logarithmique utilisée et la division par la vitesse du vent à la nacelle, pour obtenir l'intensité de turbulence, sont deux facteurs qui expliquent que ce phénomène n'est pas facilement discernable dans les graphiques de la Fig. 3.4. Il est intéressant de noter que pour l'intensité de la turbulence, le modèle $k - \epsilon$ produit des résultats particulièrement pertinents dans tout le domaine à l'exception de la zone de recirculation où les résultats concordent moins avec les mesures en soufflerie. Malgré tout, c'est le modèle $k - \epsilon$ qui offrent les meilleurs résultats dans la zone de recirculation. L'intensité de turbulence prévue par WAsP Engineering s'éloigne des mesures en soufflerie à partir de $a/x = -0.5$ et revient à des écarts plus faibles en aval de $a/x = 4$. Il est par ailleurs, notable que tous les résultats de WAsP Engineering sont symétriques par rapport au centre de la colline.

La valeur de l'exposant de la loi de puissance, représentatif du cisaillement, obtenue par régression linéaire, α_l , est relativement bien calculée par les différentes méthodes, voir Fig. 3.4. L'exposant croît rapidement juste avant la colline puis décroît lors de la montée pour arriver au sommet avec une valeur de α plus faible qu'en terrain plat. Ce comportement est relativement bien prédit avant séparation par WAsP Engineering sauf à la position $x/a = 0.25$, un peu en aval du sommet et tout près du début de la zone de séparation, où les résultats de WAsP Engineering sont loin de la prédiction des mesures en soufflerie. À cette position, les valeurs obtenues par post-traitement des données pour les solutions des modèles $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST

se comparent bien mieux à celles des mesures en soufflerie. Il est aussi important de noter qu'à cette position, l'erreur quadratique, χ^2 , commence à être élevée, ce qui implique que le profil de vent est moins bien représenté par la loi de puissance, voir Figs. (3.5 et 3.6). La zone recirculation est très grande par rapport à la dimension des éoliennes et le centre de la recirculation est plus haut que le point le plus élevé d'une éolienne à cette position. Ce qui explique la valeur négative de l'exposant de la loi de puissance à ces positions.

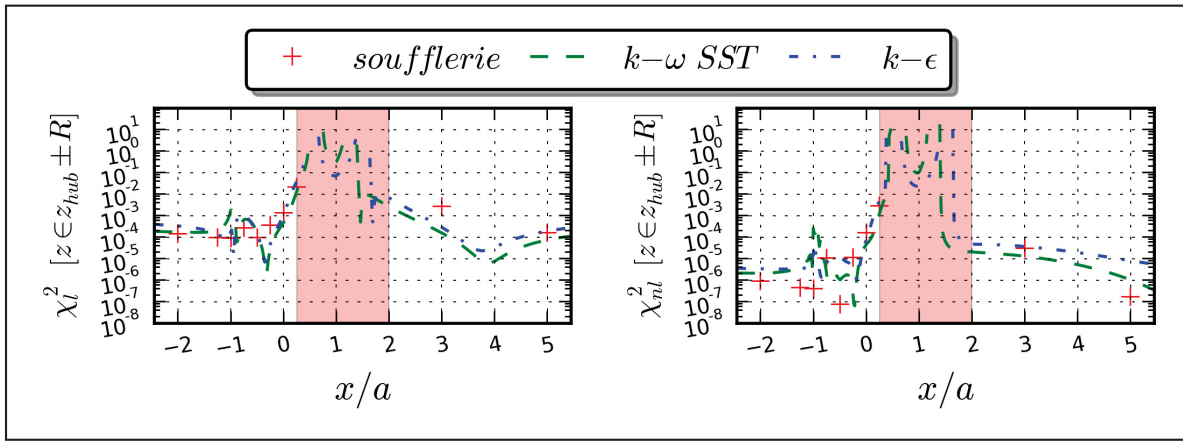


Figure 3.5 Cas H3 : Valeur de χ^2 de la méthode linéaire et non-linéaire pour les données de soufflerie et les simulations numériques

Les valeurs provenant de la régression non-linéaire, α_{nl} et β_{nl} de Eq. 2.17 semblent en accord avec celles obtenues à partir des mesures en soufflerie. La Fig. 3.5 montre que l'erreur quadratique de la méthode non-linéaire est en général plus faible que celle de la méthode linéaire.

• Erreur des profils reconstitués et simulés

L'erreur réelle d'un profil de vent est définie dans ce travail en utilisant la différence entre ce profil, u_x , et celui mesuré en soufflerie, $u_{x_{data}}$, selon l'Eq. 3.5. Cette erreur est évaluée à la hauteur adimensionnelle $z^\dagger$ entre les limites de -0.5 et 0.5 , qui représentent les extrémités des pales de l'éolienne.

$$err = \frac{u_x(z^\dagger) - u_{x_{data}}(z^\dagger)}{u_{x_{data}}(z^\dagger)} \quad (3.5)$$

La Fig. 3.6 montre l'erreur réelle des profils provenant des simulations avec OpenFOAM et des profils reconstitués à partir des régressions de la loi de puissance. Les profils reconstitués des simulations avec OpenFOAM et des données de soufflerie, par les régressions non-linéaires, avec les paramètres α , β , $V(z_r)$ et z_r sont obtenu avec l'Eq. 2.16. Pour la régression linéaire, l'équation de reconstitution est la loi de puissance décrite par la norme, Eq. 1.10. Les profils reconstitués à partir des solutions obtenues avec WAsP Engineering sont ajoutés à la comparaison des régressions linéaires, $err_l\%$. Les écarts entre les profils reconstitués à l'aide de la loi de puissance et leurs profils correspondant sont en général faibles. Il peut être remarqué, comme prévu, que ces écarts sont plus faibles avec la méthode des moindres carrés non-linéaires. Ceci est particulièrement bien visible aux positions $x/a = 0$ et $x/a = 3$ où les profils reconstitués à partir de la régression non-linéaire sont de meilleures approximations de leurs profils d'origines, surtout pour les données de soufflerie. À la position $x/a = 0.25$, la régression non-linéaire sur les données de soufflerie est moins bonne qu'aux autres positions. Comme l'indique la Fig. 3.5, l'erreur quadratique de la régression non-linéaire à ce point est plus élevée qu'aux autres positions hors de la recirculation. À cette position, l'écart entre les régressions et les données de soufflerie est plus faible lorsque la régression non-linéaire est utilisée. Un comportement similaire est observé pour les régressions obtenues à partir des résultats des simulations avec les modèles $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST. En effet, à $x/a = 0.25$ la régression linéaire s'éloigne des profils simulés à partir d'une hauteur adimensionnelle de 0.2. À cette position, l'erreur de la loi de puissance proposée par WAsP Engineering commence à sortir en dehors des limites de l'abscisse du graphique. En aval de la zone de recirculation, à $x/a = 3$, l'erreur du profil reconstituée de WAsP Engineering se situe entre 27% et 41% alors que les profils simulés avec OpenFOAM prédisent mieux le profil du vent. Finalement, c'est à la position $x/a = 5$ que le profil reconstitué de WAsP Engineering revient dans la plage d'erreur illustrée avec une bonne approximation des mesures en soufflerie.

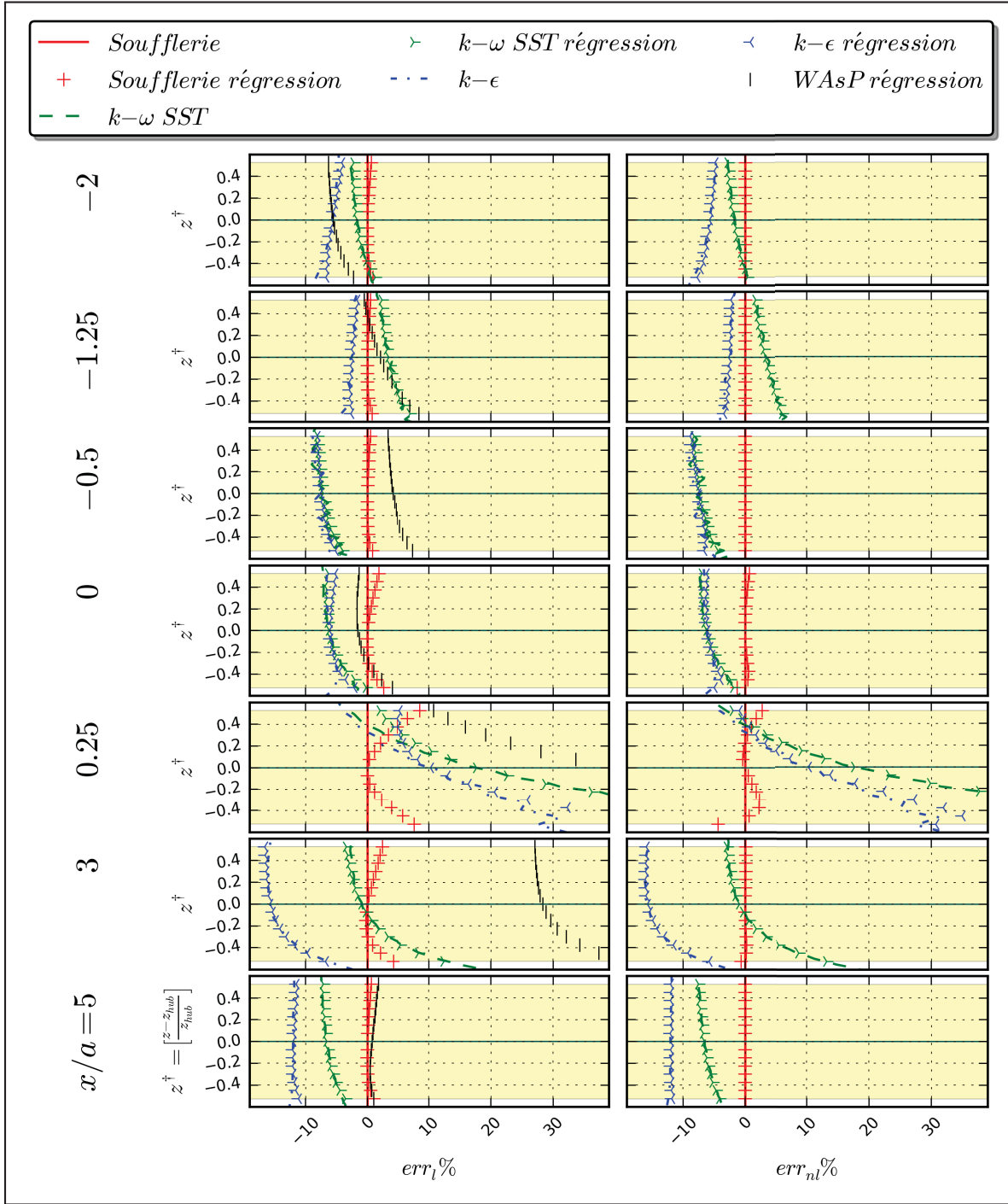


Figure 3.6 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des solutions à l'aide de la loi de puissance linéaire et non-linéaire du cas H3

3.2 Écoulement 2D homogène de Røkenes (2009)

Pour évaluer les performances des différentes implémentations des conditions au sommet, des simulations d'un terrain homogène horizontalement ont été effectuées avec OpenFOAM. La validation est faite par comparaison avec des données en soufflerie, voir Røkenes (2009). Seul le modèle de turbulence $k - \epsilon$ a été utilisé. En raison des exigences du modèle $k - \omega$ SST sur la hauteur des premières cellules au sol, qui doivent être en dessous de $z^+ = 1$, et de la restriction sur l'allongement des cellules de la méthode de génération du maillage par l'utilitaire `moveDynamicMesh`, ce modèle a été écarté. En effet, pour respecter ces deux conditions, un maillage beaucoup trop volumineux aurait dû être créé rendant le temps de calcul inacceptable.

3.2.1 Profils du terrain homogène pour les simulations à l'échelle de la soufflerie

Les simulations, Fig. 3.7, ont été exécutées jusqu'à l'obtention de résidus inférieurs à $1e-5$. De plus, il a été vérifié que les résultats ne varient plus avec l'avancement des pas de temps de la simulation. Les conditions aux frontières pour l'entrée et la sortie sont homogènes, c'est-à-dire une valeur fixe pour la pression et des gradients nuls pour les autres quantités. La condition au sol est celle décrite à la section 2.1.2 alors que la condition frontière utilisée au sommet est mentionnée à gauche de la Fig. 3.7, où *Grad* représente les gradients homogènes théoriques et *Shear* représente un cisaillement provenant du gradient au centre de cellule, voir section 2.1.1, finalement, la condition *Fixe* représente des valeurs théoriques imposées au sommet. La Fig. 3.7 montre que la condition *Shear* offre une meilleure homogénéité des profils que la condition *Grad* qui évalue un peu moins précisément le cisaillement au sommet. La condition *Fixe* montre clairement une meilleure concordance pour la vitesse. Cependant pour le cisaillement et l'énergie cinétique turbulente, l'erreur calculée à l'aide du GCI, voir Ishmail B. Celik (2008), devient très grande comme en témoigne les barres vertes. De plus, il peut être remarqué que la valeur théorique s'éloigne des valeurs en soufflerie. Ceci peut en partie s'expliquer par la valeurs de u^* proposée dans Røkenes (2009) qui implique une hauteur de déplacement du profil de vitesse de $0.9mm$ grandeur soufflerie. Cette hauteur de déplacement n'est pas présente dans le modèle utilisé pour la simulation.

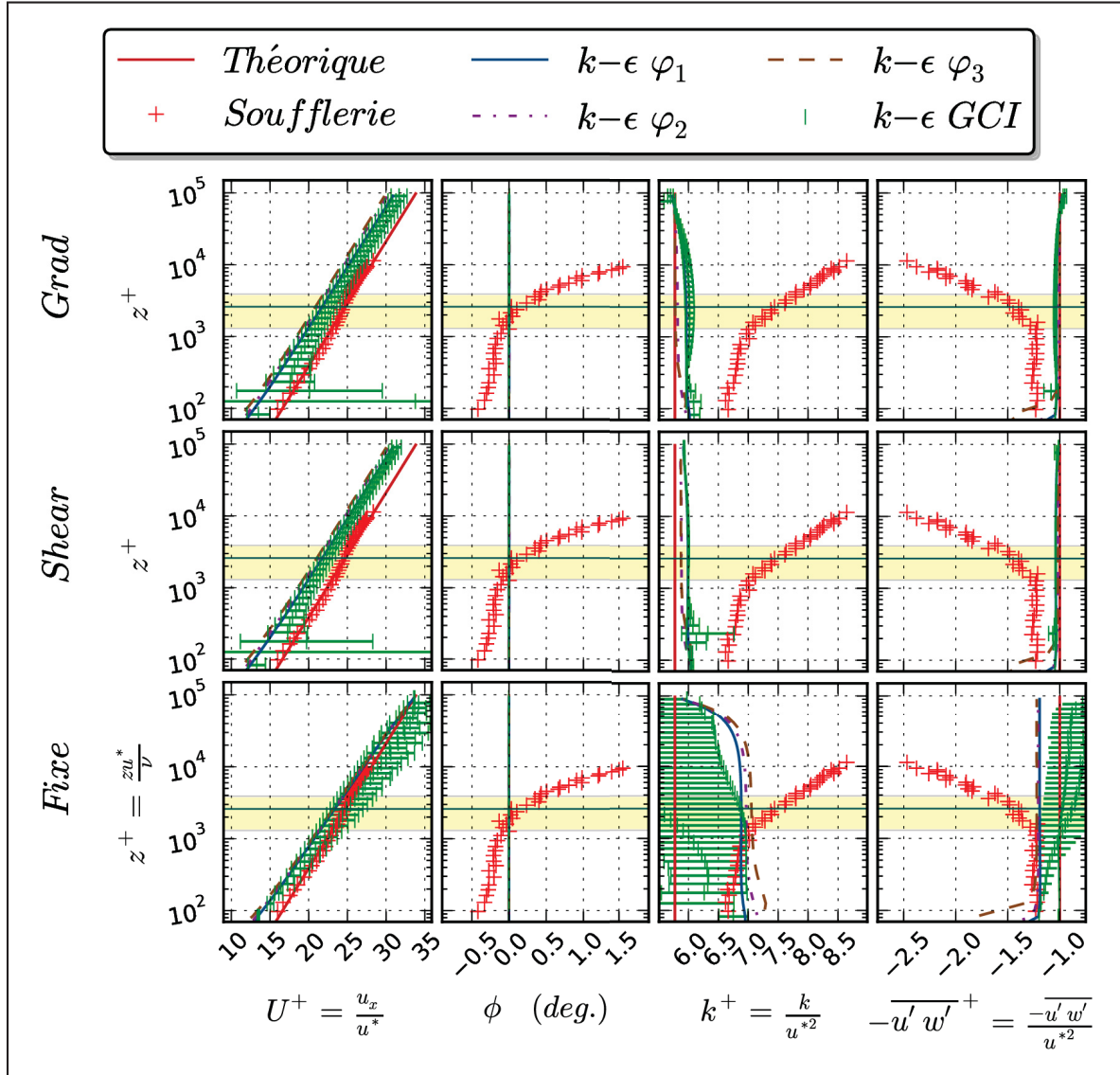


Figure 3.7 Profils homogènes à l'échelle de la soufflerie avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur un maillage de 120, 170 et 240 cellules en hauteur pour des conditions au sommet de gradients, *Grad*, de cisaillement, *Shear*, avec $u^* = 0.4745 \text{ m/s}$, ainsi que de valeurs fixes, *Fixe*, comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009)

Le Tableau 3.3 montre les valeurs minimum, moyen et maximum de l'ordre local de précision, p , ainsi que le pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI pour les trois conditions testées. Les conditions frontière *Shear* sont les conditions qui montrent l'ordre local de précision le plus élevé.

Tableau 3.3 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec trois conditions frontière du sommet pour le terrain homogène, Fig. 3.7

C.F.	Var	p			%	Var	p			%
		min	moy	max			min	moy	max	
<i>Fixe</i>	$\bar{U}$	0.02	0.33	2.9	0.0	$\emptyset$	0.06	1.39	4.9	0.0
<i>Grad</i>		0.07	1.36	1.8	0.0		1.61	2.18	2.5	0.0
<i>Shear</i>		0.04	1.60	2.2	0.0		1.85	2.50	2.8	0.0
<i>Fixe</i>	k	0.05	0.26	2.1	0.0	$\overline{u'w'}$	0.05	0.49	6.8	0.0
<i>Grad</i>		0.18	4.07	10.9	15.8		0.86	4.02	13.8	10.5
<i>Shear</i>		0.56	7.86	26.8	44.7		0.65	7.33	16.2	31.6

En augmentant le cisaillement au sommet par la condition frontière *Shear* il est possible d'un seul coup augmenter la valeur de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente. La valeur du cisaillement a été imposée à $u^* = 0.53 \text{ m/s}$ pour obtenir une meilleure adéquation avec les mesures en soufflerie de l'énergie cinétique turbulente et du cisaillement, voir Fig. 3.8. Cette valeur a été obtenue à partir des valeurs de cisaillement mesurées en soufflerie en dessous de la hauteur adimensionnelle $z^+ = 2000$. Au-dessus de cette hauteur adimensionnelle, les valeurs de cisaillement mesurées en soufflerie commencent à varier et n'ont donc pas été prises en compte pour le calcul de u^* . Les barres d'erreur sur le profil de U sont plus grandes pour $u^* = 0.53 \text{ m/s}$ que pour $u^* = 0.4745 \text{ m/s}$ tel qu'illustré à la Fig. 3.7. Il est à noter que les résultats des simulations obtenus avec $u^* = 0.53 \text{ m/s}$ collent très bien avec les valeurs théoriques et mesurées, avec l'exception de la vitesse qui s'accorde bien seulement avec ceux de la soufflerie. Ceci peut être associé aux erreurs de la condition frontière du sol. En effet, les facteurs de corrections proposés par Sumner et Masson (2011) et décrits dans la section 1.2 ne sont pas appliqués dans les simulations de ce travail. Les erreurs liées à l'absence de ces correctifs se répandent dans tout le domaine dans le cas des conditions de gradient au sommet comme pour les conditions *Grad* et *Shear*.

Les différences absolues entre les solutions, $abs(\epsilon_{21}) = |\varphi_2 - \varphi_1|$ et $abs(\epsilon_{32}) = |\varphi_3 - \varphi_2|$, sont faibles, voir Tableau 3.4. Pour la vitesse, les valeurs absolues maximales de ϵ_{21} et ϵ_{32} sont situées à la paroi. Près du point le plus bas des pales de l'éolienne, ces différences absolues

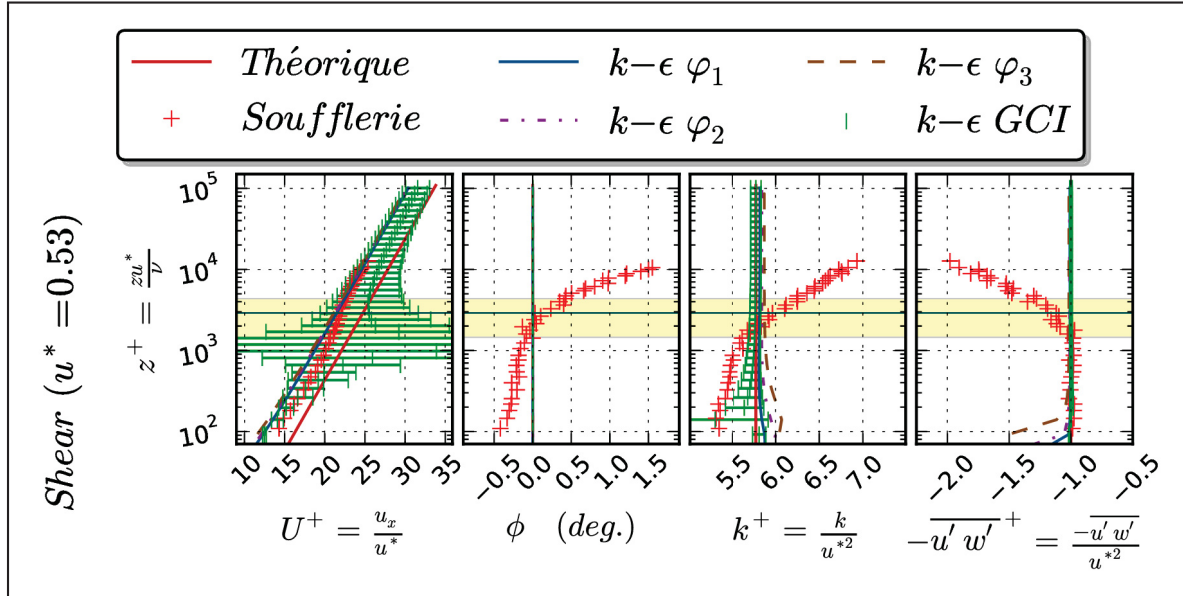


Figure 3.8 Profils homogènes à l'échelle de la soufflerie avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur un maillage de 120, 170 et 240 cellules en hauteur pour la condition au sommet de cisaillement, $Shear$, avec $u^* = 0.53 \text{ m/s}$ comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009)

Tableau 3.4 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI ; ainsi que la valeur absolue des différences entre solutions $abs(\epsilon_{32})$ et $abs(\epsilon_{21})$ pour la Fig. 3.8

Var	p			%	Dim	$abs(\epsilon_{21})$		$abs(\epsilon_{32})$	
	min	moy	max			moy	max	moy	max
U	0.00	0.32	2.4	0.0	m/s	0.1145	0.7373	0.1750	1.7167
ϕ	9.14	9.66	10.0	0.0	deg	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
k	0.51	1.11	3.3	0.0	m^2/s^2	0.0093	0.0354	0.0122	0.0348
$\overline{u'w'}$	1.00	1.40	7.3	0.0	m^2/s^2	0.0076	0.1685	0.0111	0.1734

sont approximativement de 0.1 m/s . Les grandes barres d'erreur sont dues au fait que les différences sont légèrement plus élevées dans le cas de ϵ_{32} . Les différences absolues entre les solutions pour l'angle ne sont pas nulles mais en dessous de 10^{-6} degré. En fait, la valeur maximale de la vitesse verticale des trois simulations est de l'ordre de grandeur de 10^{-10} .

3.2.2 Profils du terrain homogène pour les simulations à l'échelle du terrain

Pour évaluer la variation des profils verticaux tout au long d'un domaine, des simulations en terrain plat ont été effectuées. Elles ont été effectuées avec les mêmes conditions aux frontières que pour le cas V calculées à la grandeur du terrain (voir section 3.3) c'est-à-dire, l'imposition des profils homogènes théoriques à l'entrée, gradient nul à la sortie, valeurs théoriques fixes au sommet et loi de paroi au sol, voir section 2.1.2. La condition d'entrée se situe à $x = 0\text{ m}$ et celle de sortie à $x = 10000\text{ m}$.

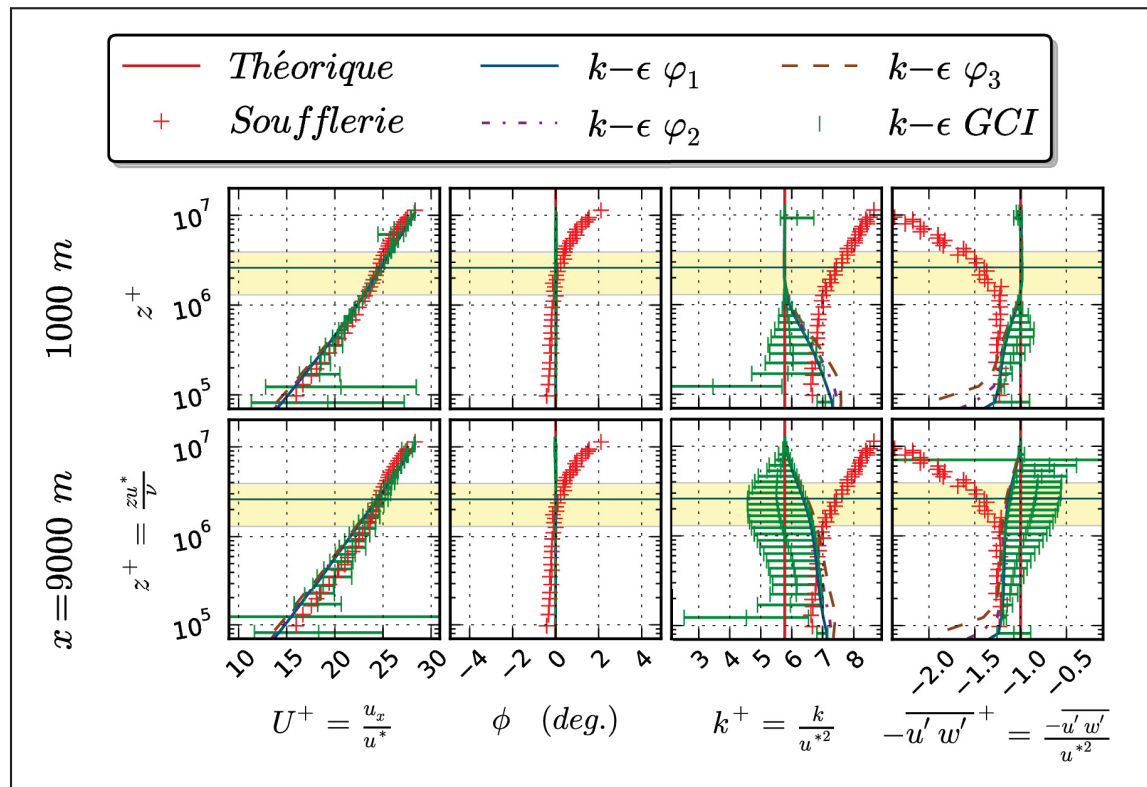


Figure 3.9 Profils du terrain homogène à l'échelle du terrain avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur maillage de 120, 170 et 240 cellules en hauteur pour la condition *Fixe* au sommet, avec $u^* = 0.4745\text{ m/s}$ comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009)

Il peut être remarqué que la variation des profils pour le cas des maillages plus fins, Fig. 3.10, est moins prononcé que pour le cas des maillages grossier, Fig. 3.9. De plus, il est notable que l'erreur due à la non-utilisation des facteurs de correction à la loi de paroi, proposé par Sumner

et Masson (2011), se répand au-dessus de la zone de positionnement potentiel des éoliennes. À la position $x = 9000m$ cette erreur est passée au-dessus des pales de l'éolienne et le terrain homogène en grandeur terrain avec la condition *Fixe* au sommet, Fig. 3.7, montre que cette erreur continue à se répandre verticalement en s'éloignant de la frontière d'entrée. Ceci est plus facile à remarquer en regardant les valeurs du cisaillement et de l'énergie cinétique turbulente des Figs. (3.9 et 3.10). Dans le cas des maillages grossiers, Fig. 3.9, l'erreur de la loi de paroi est plus grande et la diffusion de cette erreur plus facile à remarquer.

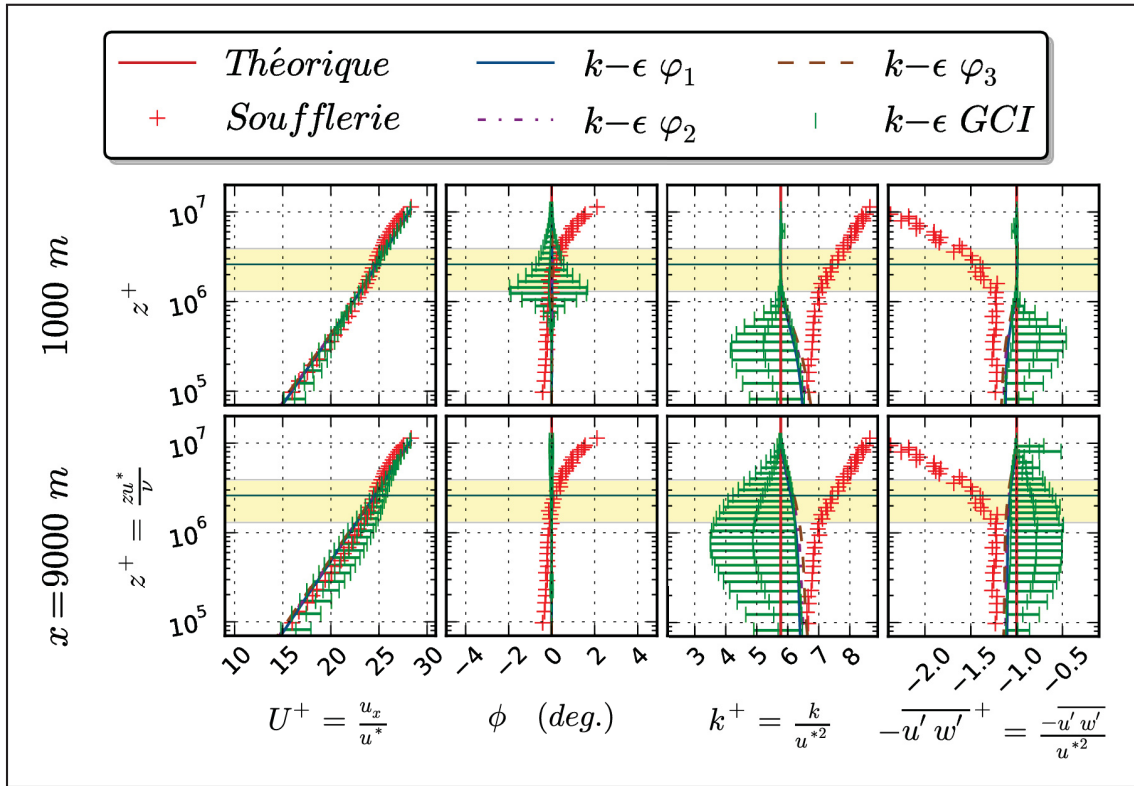


Figure 3.10 Profils du terrain homogène à l'échelle du terrain avec les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 sur maillage de 684, 969 et 1368 cellules en hauteur pour la condition *Fixe* au sommet, avec $u^* = 0.4745 \text{ m/s}$ comparées aux valeurs théoriques et aux données en soufflerie, voir Røkenes (2009)

3.3 Écoulement 2D cas V de Røkenes (2009)

Des cas en soufflerie spécifique au domaine éolien ont été étudiés par Røkenes et Krogstad (2009). Dans la thèse Røkenes (2009) plus de détails sont apportés. Dans cette section, les résultats de simulations pour le cas *V* de Røkenes (2009) sont présentés. Ces cas de soufflerie ont été réalisés avec une topographie représentant un terrain complexe. Les lignes de contours de l'horographie du terrain ont été calculées à partir d'un fichier d'élévation fourni par l'auteur des tests en soufflerie. Le cas *V* peut être considéré comme un cas en deux dimensions puisque les variations de terrain dans la direction y sont éloignées des positions de mesures représentées par les points noirs sur la Fig. 3.11. Ces mesures en soufflerie consistent en une série de tests d'écoulement par-dessus un ensemble de colline représenté à la Fig. 3.11 où la flèche représente la direction du vent. Le facteur d'échelle en soufflerie est de $1/1000$. La plus grande élévation du terrain, h , est utilisé pour adimensionner les distances. À l'échelle du terrain, $h = 350\text{ m}$ et la rugosité est de $z_0 = 0.004\text{ m}$.

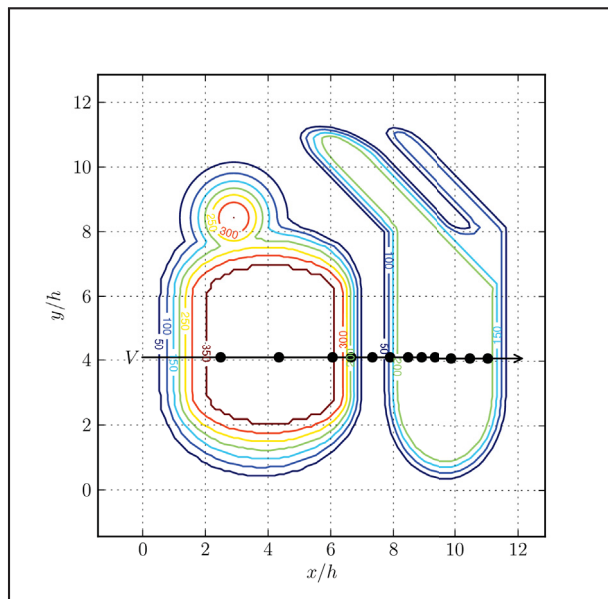


Figure 3.11 Ligne d'élévation de la colline de Røkenes (2009) avec le cas *V*

Quatre séries de simulations par CFD ont été lancées sur OpenFOAM et une série avec le logiciel WAsP. Pour les simulations sur OpenFOAM, deux séries ont été réalisées avec l'échelle

de grandeur du terrain (une série avec maillage de base fin, 57×57 , ainsi que grossier, 9×10). Dans le but de ne pas surcharger cette section de figures, seulement les résultats de simulations grandeur terrain avec le maillage fin sont présentés ici. Les trois autres séries de simulation sont à l'Annexe I.

3.3.1 Constantes de simulations et maillages

Les constantes du modèle de turbulence $k - \epsilon$ ont été fixées pour être cohérentes avec Boudreault *et al.* (2011). Pour le cas V , elles sont les mêmes que pour le cas de Rushil, voir Tableau 3.1. Les valeurs de la hauteur de rugosité, du cisaillement, des dimensions de la colline, des dimensions du domaine, du nombre de cellules et des facteurs d'expansion géométrique (FEG) sont décrites dans le Tableau 3.5. Ils correspondent à un facteur d'expansion de OpenFOAM (FOF) de 50. Ce facteur d'expansion correspond au ratio entre la première et dernière cellule. L'Eq. 3.6 décrit la relation entre ces deux ratios où n est le nombre de cellules dans la direction de l'expansion. Le nombre de cellules en hauteur utilisée varient entre 120 et 1368.

$$FEG = FOF^{\frac{1}{n-1}} \quad (3.6)$$

Tableau 3.5 Constantes pour le cas V
de Røkenes (2009)

z_0 (m)	0.004
u^* (m/s)	0.4745
Domain (m)	15000×3000
Maillage de base _{grossier}	9×10
Maillage de base _{fin}	57×57
FEG	1.003 à 1.033

Le maillage a été effectué avec l'utilitaire de OpenFOAM `blockMesh` en combinaison avec `refineMesh` et `moveDynamicMesh`. Cette procédure a été en grande partie automatisée tel que mentionné à la section 2.2. La Fig. 3.12 montre un agrandissement de la colline de 250 m de haut du maillage le plus grossier utilisé. Les résultats produits avec ces maillages présentés sont présentés à l'Annexe I. Les traits jaunes de la Fig. 3.12 représentent les éoliennes de 80 m de diamètre dont la nacelle est à 80 m de hauteur. Dans cette figure, la déformation des boîtes de raffinement horizontale est visible et leurs délimitations est vue par la rangée de cellules biffées par des traits noirs. Ceci est une erreur de représentation de ParaView. En effet ces cellules mal représentées sont en fait des polyèdres ayant 7 faces dont deux d'entre elles possèdent 5 cotés. La Fig.2.2 donne une représentation de ce type de cellule. Une représentation du maillage de base 9×10 est montrée à la Fig. 3.13, après raffinement par régions et déformation, avec les conditions aux frontières utilisées. Les maillages utilisés ont été réalisés à partir des maillages de base, Tableau 3.5, et des outils mentionnés en utilisant 12 , 17 et 24 fois plus de cellules dans les deux directions de calcul du domaine. Les simulations du cas V présentées dans cette section utilisent le maillage de base 57×57 . Les maillages construits sont utilisés respectivement pour les solutions φ_3 , φ_2 et φ_1 . Les points de calculs du maillage sont concentrés autour de la colline par raffinement horizontal, une expansion géométrique verticale presque constante est utilisée sur tout le domaine. La légère variation de cette expansion géométrique verticale est dû au travail de `moveDynamicMesh` qui permet d'obtenir un maillage orthogonale à la paroi.

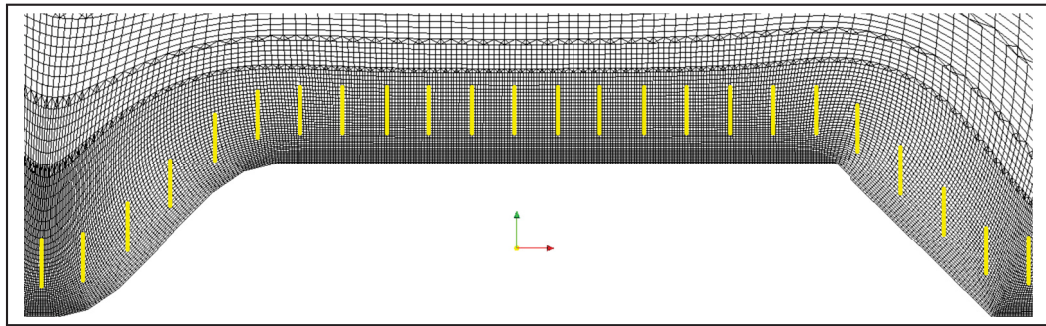


Figure 3.12 Agrandissement du maillage $9 \times 10 - 12$ utilisées pour obtenir la solution $k - \epsilon \varphi_3$ du cas V de Røkenes (2009)

3.3.2 Domaine et conditions frontière

Le domaine de calcul est de 15 km de long dans la direction de l'écoulement et de 3 km de haut. La hauteur de la plus haute colline est de 350 m ce qui donne un ratio de hauteur du domaine sur la hauteur maximale de l'obstacle de 8.6.

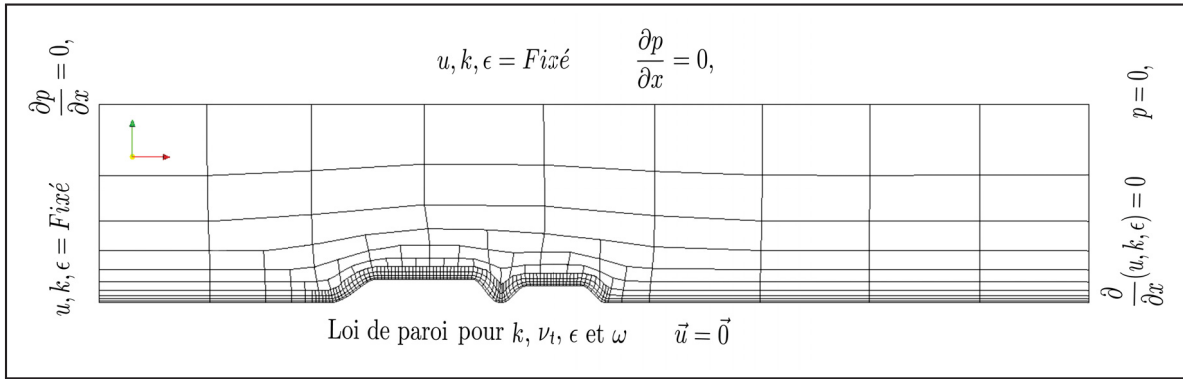


Figure 3.13 Conditions frontière utilisées pour le cas V de Røkenes (2009) représenté sur un maillage de base de 9×10 déformé et avec des régions de raffinement

Les conditions aux frontières utilisées pour ce cas sont différentes que pour le cas de Rushil, voir section 3.1. La raison principale est liée à l'incapacité des conditions de la frontière au sol développées pour le cas de Rushil à bien évaluer la production et dissipation d'énergie cinétique turbulente avec les valeurs de rugosité et les hauteurs de cellules utilisées pour ce cas. Ceci est dû au fait que les facteurs de correction proposés par Sumner et Masson (2011) ne sont pas utilisés. Ainsi, la combinaison des z^+ trop élevé et du z_0 faible ne permet pas une bonne évaluation des termes de production et de dissipation d'énergie cinétique turbulente qui varient très rapidement proche de la paroi. Cette erreur peut être appréciée en visualisant les facteurs de correction, voir Fig. (3.14 et 3.15). Toutefois, dans l'Annexe I, une simulation avec condition de cisaillement et utilisant le même type de procédure que pour le cas simulé de Rushil, section 3.1, est présenté. Dans le cas présenté dans cette section, les valeurs des profils théoriques pour U , k et ϵ ont été imposées à l'entrée avec une condition de gradient nul pour la pression. Au sommet, les valeurs théoriques de U , k et ϵ sont imposées et un gradient nul pour la pression est fixé comme condition frontière. Ces deux différences par

rapport aux conditions frontière du cas simulé de Rushil permettent en quelque sorte de limiter la propagation vertical des erreurs numériques causées par les conditions frontière à la paroi en forçant la solution par le haut. Les profils en terrain homogène démontre bien cette propagation, voir Figs. (3.9 et 3.10). Pour la paroi, les mêmes conditions frontière qu'à la section 3.1 sont utilisées. À la sortie, la valeur de la pression est imposée à zéro alors que pour les autres variables, un gradient nul est utilisé.

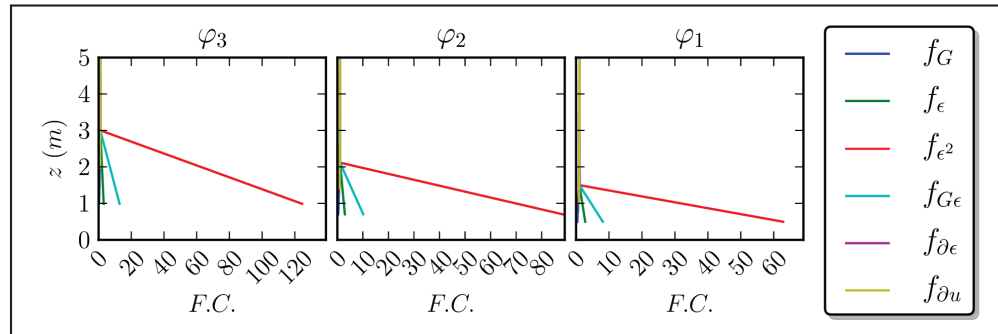


Figure 3.14 Facteur de correction de la condition frontière au sol, à partir des équations de la section 1.2, pour la série de cas V à l'échelle du terrain avec maillage de base 9×10

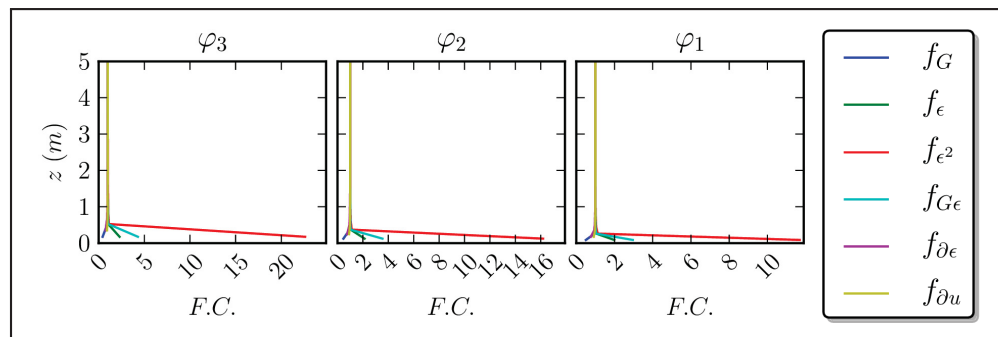


Figure 3.15 Facteur de correction de la condition frontière au sol, à partir des équations de la section 1.2, pour la série de cas V à l'échelle du terrain avec maillage de base 57×57

3.3.3 Analyse des résultats

Cette section de résultats est divisée en deux parties ; premièrement, la validation, qui compare les simulations aux mesures en soufflerie, dans le but de quantifier l'erreur numérique de la discrétisation, et deuxièmement, le post-traitement qui compare, à travers l'outil développé, les mesures en soufflerie et les résultats obtenus avec OpenFOAM, pour les différents maillages avec le modèle de turbulence $k - \epsilon$, aux résultats obtenus avec WAsP.

3.3.3.1 Validation

Les Figs. (3.16 à 3.18) montrent la comparaison entre les mesures et les simulations des différents profils de u_x , ϕ , k et $\overline{u'w'}$ à plusieurs positions horizontales. Ces positions sont représentées avec un nombre sans dimension et correspondent numériquement à la position en millimètre ou mètre sur le domaine à l'échelle de soufflerie ou terrain. La vitesse en x , l'énergie cinétique turbulente et le cisaillement turbulent sont adimensionnalisés à l'aide d'une vitesse de référence qui est la vitesse de frottement expérimentale $u^* = 0.5 \text{ m/s}$ déterminée par Røkenes et Krogstad (2009). La valeur expérimentale de la turbulence, k_{exp} , et le cisaillement turbulent, $\overline{u'w'}$, sont calculés avec les Eqs. (3.4 et 3.3) de la même manière que pour le cas de Rushil, section 3.1. Les simulations reproduisent très bien les profils de vitesse horizontale, u_x , ainsi que l'angle de l'écoulement, ϕ , et par conséquent la vitesse verticale. La bonne prédiction numérique du vent s'observe dans tout le domaine. Pour ce qui est de l'énergie cinétique turbulente, k , et du cisaillement turbulent, $\overline{u'w'}$, les résultats des simulations s'accordent moins bien avec les mesures en soufflerie et on observe en général une surévaluation. En dessous de la hauteur de 150 m , soit $z^+ = 5.1 \times 10^6$, le GCI est en général indéterminé pour ce cas. Ceci est dû au fait que malgré la faible différence entre les solutions, voir Tableau 3.6, la différence entre les deux solutions provenant des maillages les plus raffinés, ϵ_{21} , est légèrement plus grande que la différence entre les deux solutions obtenues avec les maillages les plus grossiers, ϵ_{32} dans cette zone. À $x/h = 4.3$, l'indice de convergence p de la vitesse varie entre 0.2 et 14.5 avec une moyenne de $p = 4.08$. Les valeurs de $abs(\epsilon_{21}) = |\varphi_2 - \varphi_1|$ et $abs(\epsilon_{32}) = |\varphi_3 - \varphi_2|$ varient entre 0.21 m/s et $5.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ avec une moyenne de 0.0134 m/s et 0.0104 m/s , respectivement. Les résultats du Tableau 3.6 montrent que la différence entre chaque solution

est faible permettant d'avoir une certaine confiance dans la valeur de ces résultats. D'ailleurs, l'Annexe I présente les résultats de ce même calcul avec la même échelle de grandeur et les mêmes conditions frontière mais avec un maillage plus grossier utilisant le maillage de base de 9×10 . Dans cette simulation, l'ordre local de précision et du pourcentage de convergence oscillatoire sont d'un ordre raisonnable. Pour le cisaillement turbulent, il peut être remarqué qu'au sommet, une variation rapide se produit en raison des conditions fixes à la frontière qui représentent mal le cisaillement local.

Tableau 3.6 Valeurs moyennes et maximales de $abs(\epsilon_{21}) = |\varphi_2 - \varphi_1|$ et de $abs(\epsilon_{32}) = |\varphi_3 - \varphi_2|$ avec les conditions fixes à la frontière du sommet pour le cas V

x/h	Var	$abs(\epsilon_{21})$		$abs(\epsilon_{32})$		Var	$abs(\epsilon_{21})$		$abs(\epsilon_{32})$	
		moy	max	moy	max		moy	max	moy	max
2.5	U (m/s)	0.01	0.21	0.01	0.21	ϕ (deg.)	0.00	0.01	0.00	0.01
4.3		0.01	0.17	0.01	0.16		0.01	0.01	0.00	0.01
6.1		0.03	0.22	0.02	0.20		0.04	0.08	0.02	0.05
6.7		0.04	0.35	0.02	0.22		0.49	4.67	0.12	1.09
7.3		0.17	0.43	0.08	0.30		0.46	7.38	0.39	12.4
7.9		0.05	0.20	0.06	0.24		0.38	2.52	0.30	1.74
8.5		0.03	0.14	0.04	0.19		0.05	0.11	0.07	0.34
8.9		0.02	0.11	0.03	0.17		0.03	0.06	0.02	0.07
9.3		0.02	0.09	0.03	0.15		0.03	0.05	0.01	0.02
9.9		0.02	0.12	0.03	0.13		0.03	0.05	0.00	0.01
10.5	k (m^2/s^2)	0.01	0.10	0.04	0.15	$\overline{u'w'}$ (m^2/s^2)	0.05	0.09	0.01	0.02
11.0		0.03	0.35	0.04	0.24		0.19	1.75	0.04	0.59
2.5		0.01	0.09	0.00	0.06		0.00	0.02	0.00	0.04
4.3		0.01	0.05	0.01	0.07		0.00	0.01	0.00	0.02
6.1		0.01	0.08	0.01	0.12		0.01	0.02	0.01	0.03
6.7		0.06	0.22	0.03	0.15		0.01	0.04	0.00	0.03
7.3		0.23	0.62	0.08	0.21		0.03	0.13	0.01	0.12
7.9		0.11	0.39	0.07	0.36		0.04	0.18	0.03	0.14
8.5		0.02	0.12	0.05	0.29		0.01	0.05	0.02	0.12
8.9		0.03	0.14	0.03	0.17		0.01	0.04	0.01	0.05
9.3		0.03	0.16	0.02	0.09		0.01	0.03	0.01	0.03
9.9		0.03	0.13	0.02	0.12		0.01	0.02	0.01	0.04
10.5		0.02	0.06	0.01	0.05		0.00	0.02	0.00	0.01
11.0		0.02	0.08	0.02	0.09		0.01	0.08	0.01	0.05

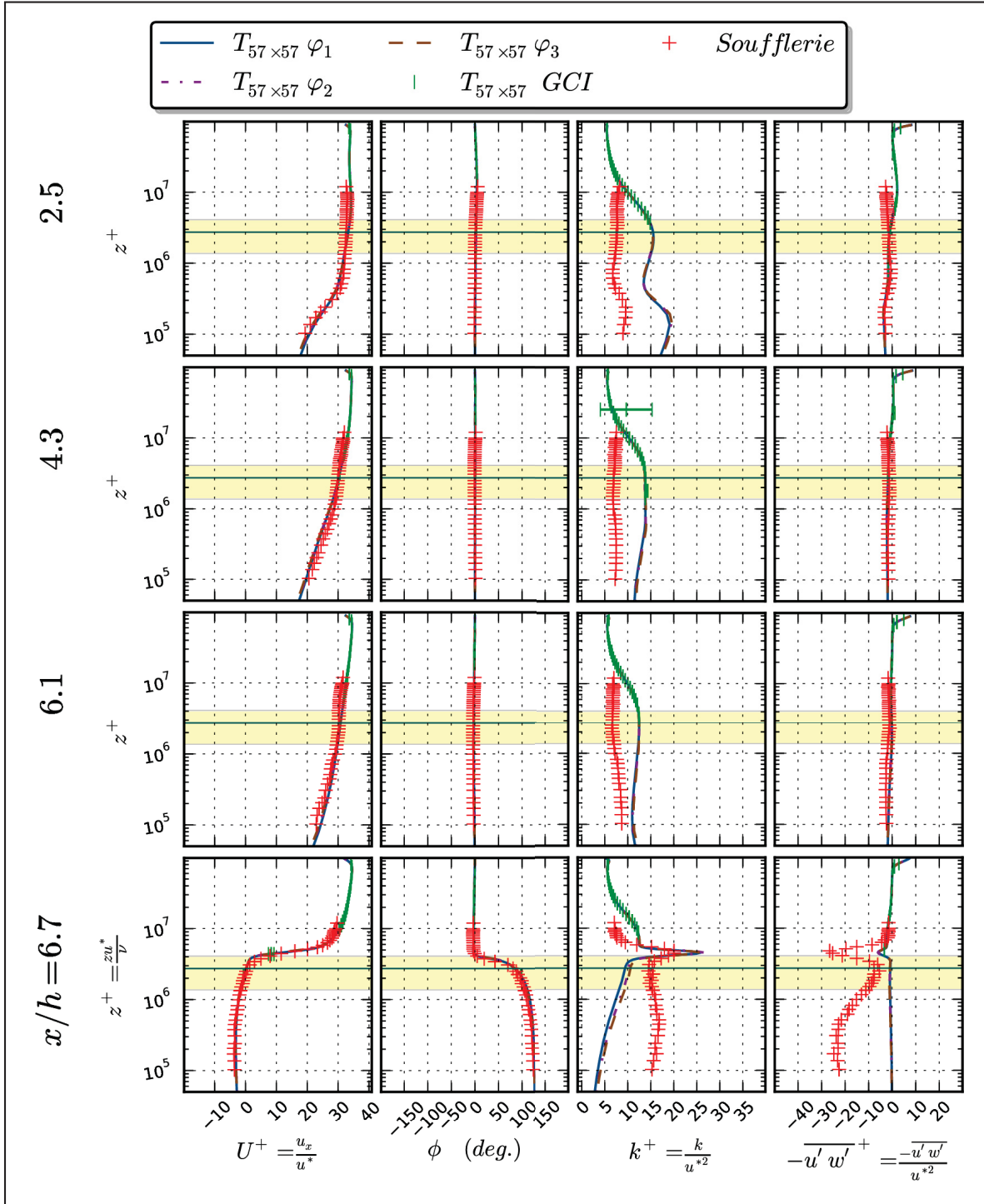


Figure 3.16 Cas V de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des simulations pour les positions adimensionnelles $2.5 \leq x/h \leq 6.7$

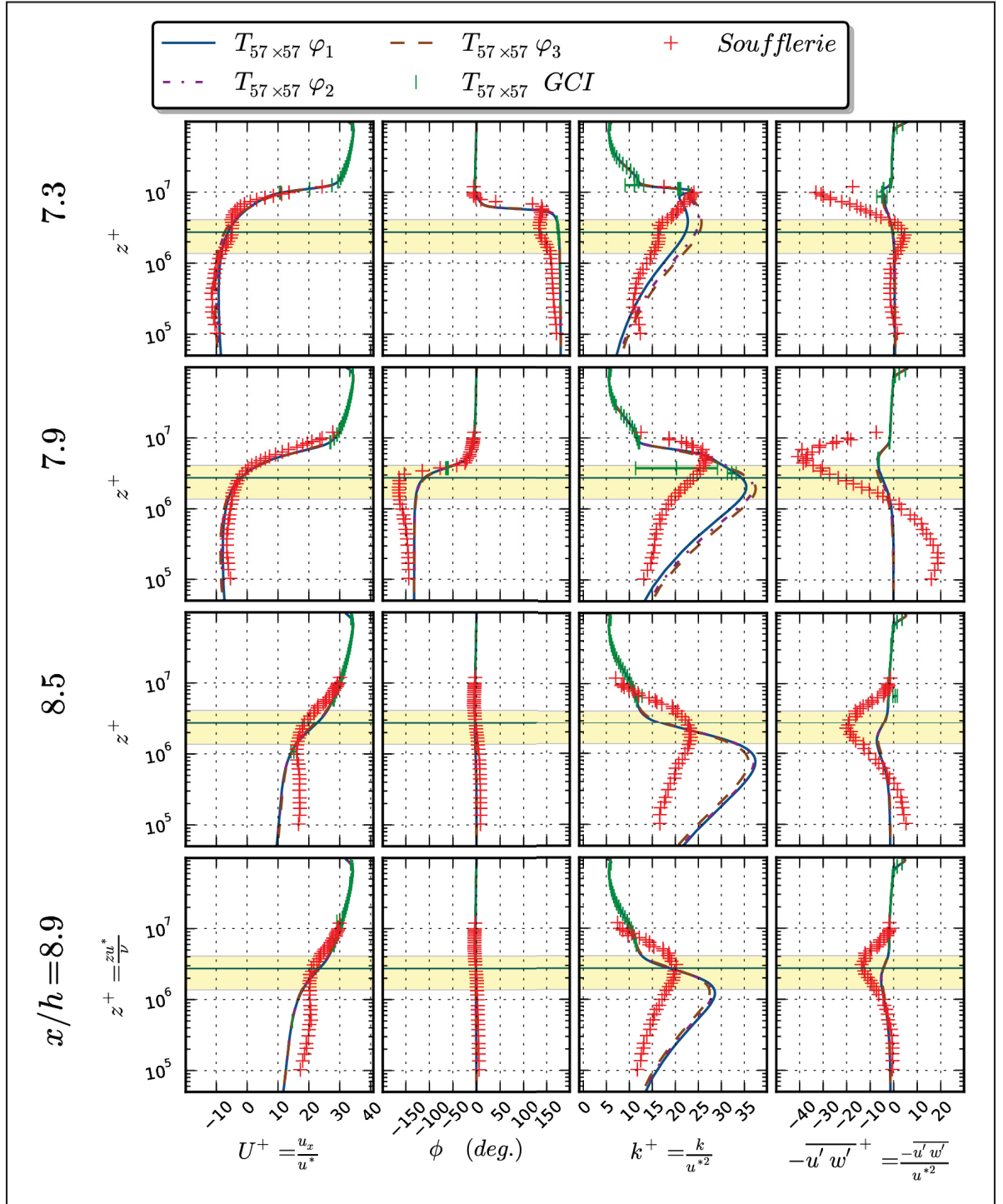


Figure 3.17 Cas V de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des simulations pour les positions adimensionnelles $7.3 \leq x/h \leq 8.9$

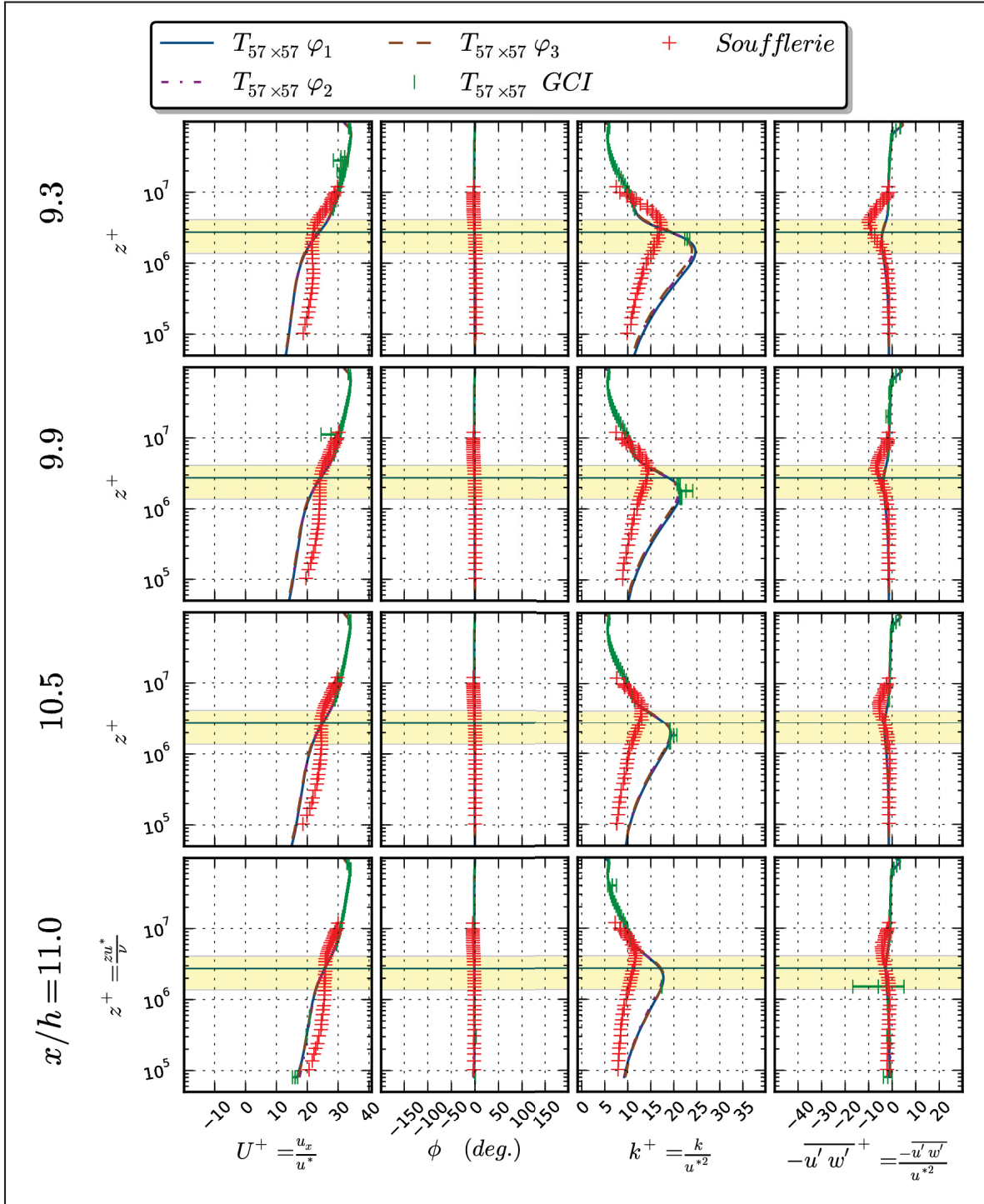


Figure 3.18 Cas V de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des simulations pour les positions adimensionnelles $9.3 \leq x/h \leq 11.0$

3.3.3.2 Application de l'outil de post-traitement

L'outil de post-traitement est utilisé pour analyser les mesures en souffleries et les solutions des simulations OpenFOAM afin de les comparer. Les résultats du logiciel linéaire WASP Engineering sont aussi ajoutés à la comparaison. Les éoliennes sont représentées par une ligne verticale constituée de points équidistants. Le nombre de points peut être défini dans le dictionnaire de l'outil de post-traitement. Dans ce travail, 15 points ont été choisis et sont représentés à la Fig. 3.12 par des traits jaunes. Ces traits représentent des éoliennes avec une hauteur de nacelle de 80 *m* et un diamètre de 80 *m*.

- **Paramètres d'aide au positionnement**

La Fig. 3.19 montre les résultats de WASP Engineering et ceux de l'outil développé dans ce travail (post-traitement des solutions non-linéaires provenant d'OpenFOAM) pour les valeurs à la hauteur de la nacelle de la vitesse adimensionnelle, U_{hub}^+ , dans la direction x , de l'angle de l'écoulement, φ_{hub} , de l'intensité de turbulence, $I_{x_{\text{hub}}}$, dans la direction du vent perpendiculaire au disque de l'éolienne, de l'exposant de la loi de puissance linéaire, α_l , et non-linéaire, α_{nl} , ainsi que de la différence de hauteur apparente adimensionnalisée, β_{nl}^+ . La Fig. 3.20 montre l'erreur quadratique des méthodes linéaire et non-linéaire pour l'évaluation des paramètres α et β des simulations $k - \epsilon$ pour φ_1 , φ_2 et φ_3 ainsi que des mesures en soufflerie. Les solutions calculées par WASP Engineering ont été obtenues à l'échelle du terrain. Les rectangles de couleur saumon représentent les zones de recirculation, obtenu à partir des simulations dans OpenFOAM. Les paramètres en soufflerie liés à la loi de puissance, α , β et χ^2 , ont été obtenu avec les outils développés dans le cadre de ce travail. Les valeurs provenant de la régression non-linéaire, α_{nl} et β_{nl} de l'Eq. 2.17 semblent en accord avec celles obtenues à partir des mesures de soufflerie. La Fig. 3.20 montre que l'erreur quadratique de la méthode par régression non-linéaire est en générale plus faible que celle de la méthode par régression linéaire. Une limite sur β_{nl} a été implémentée et peu être utilisée pour accélérer le traitement des données.

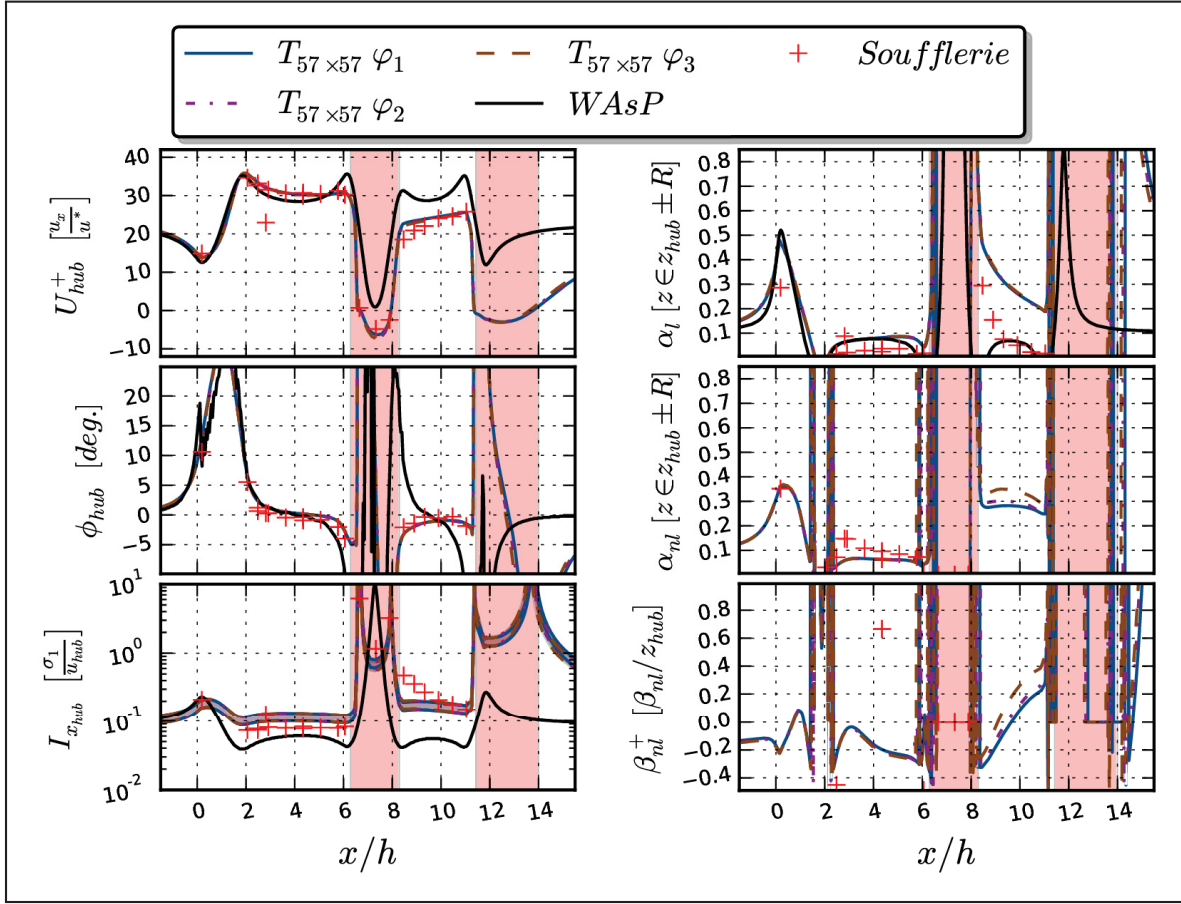


Figure 3.19 Cas V : profils horizontaux à la hauteur de la nacelle des données mesurées en soufflerie, des simulations et de WAsP

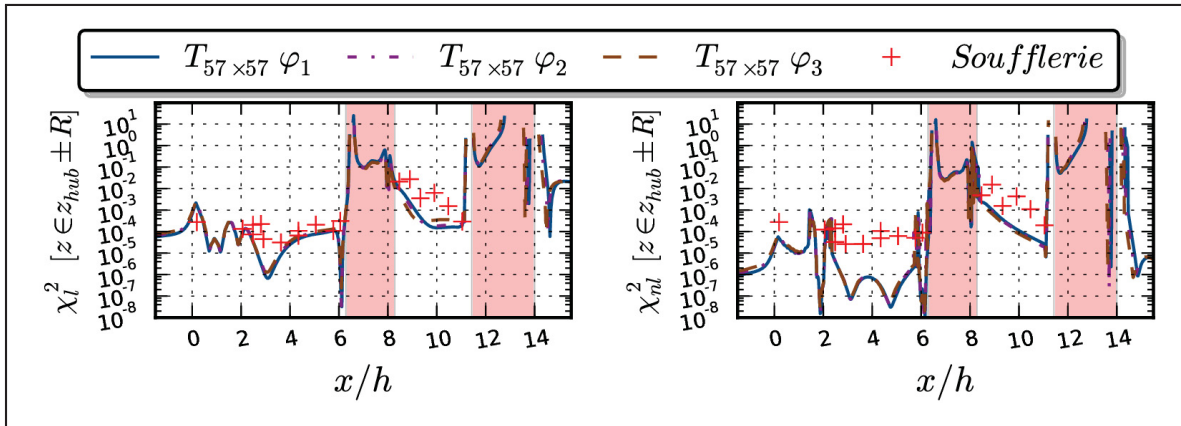


Figure 3.20 Cas V : valeur de χ^2 de la régression linéaire et non-linéaire pour les mesures en soufflerie et les simulations

- **Erreur des profils reconstitués et simulés**

Les Figs. (3.21 et 3.22) montre l'erreur réelle en pourcentage par rapport aux mesures en soufflerie des profils reconstitués à partir d'une régression de la loi de puissance et des profils simulés provenant directement d'OpenFOAM. L'erreur réelle est évaluée à la hauteur adimensionnelle $z^\dagger$ entre les limites de -0.5 et 0.5 , qui représentent les bouts de pales de l'éolienne, Eq. 3.5, en considérant les données de vitesse, $u_{x_{\text{data}}}$, mesurées en soufflerie comme référence. Dans le cas des profils reconstitués à partir de la régression linéaire, $err_l\%$, les profils de la loi de puissance calculées par WAsP sont ajoutés à la comparaison.

Les écarts entre les profils reconstitués par régression linéaire ou non-linéaire et leurs profils correspondants sont en général faibles, voir les Figs. (3.21 et 3.22). La méthode de régression non-linéaire apporte une amélioration négligeable par rapport à son homologue linéaire. Cependant, à la position $x/h = 8.5$, l'avantage de la méthode de régression par moindres carrés non-linéaire est visible. En effet, à cette position, les marqueurs des figures de droite correspondant à la méthode de régression non-linéaire s'approche mieux à leurs profils simulés pour φ_1 , φ_2 et φ_3 en comparaison aux marqueurs des figures de gauche correspondant à la méthode de régression linéaire. De plus, la Fig. 3.20 montre que l'erreur quadratique est généralement plus faible avec la méthode de régression non-linéaire.

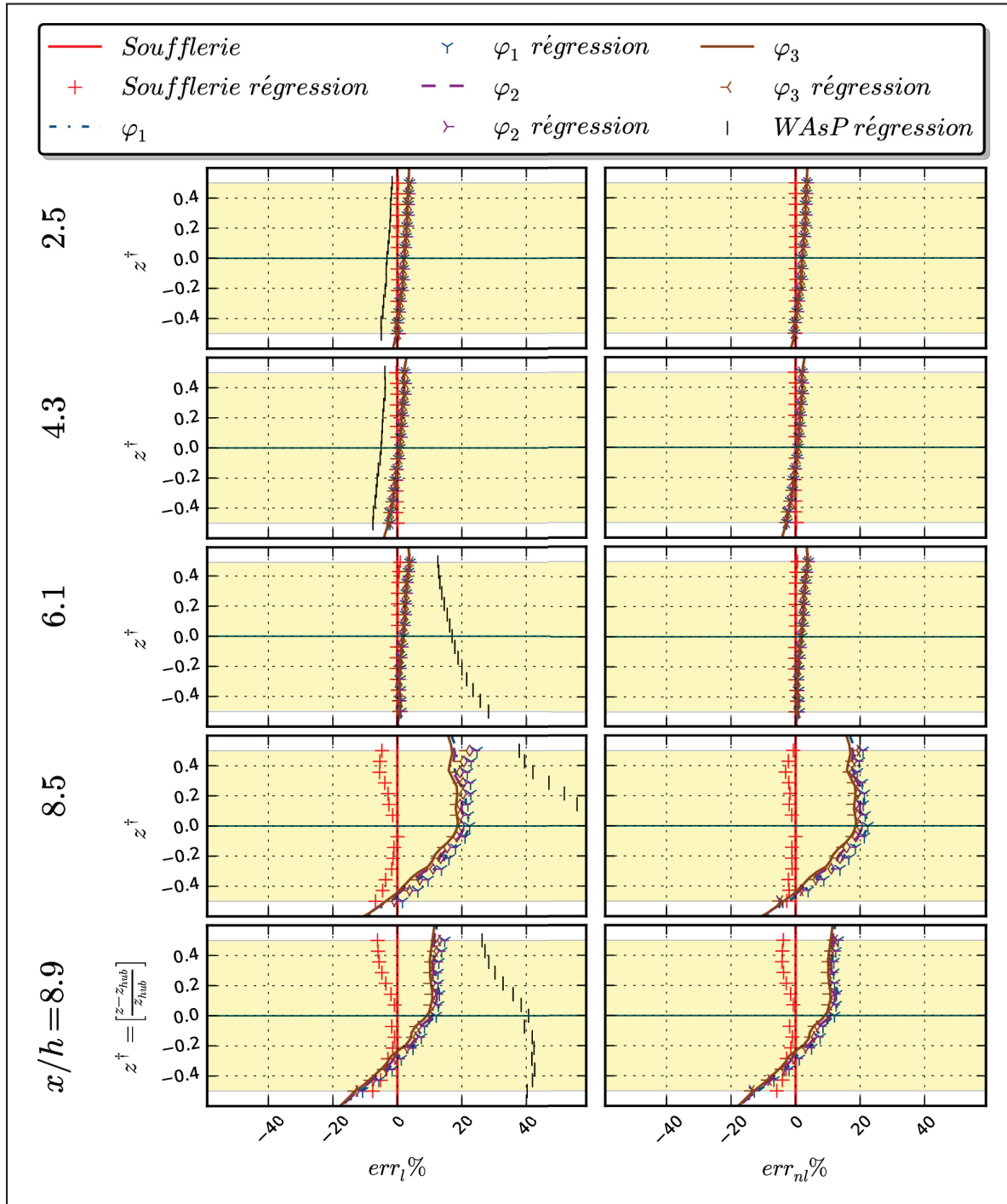


Figure 3.21 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide de régression linéaire et non-linéaire aux positions adimensionnelles $2.5 \leq x/h \leq 8.9$ du cas V

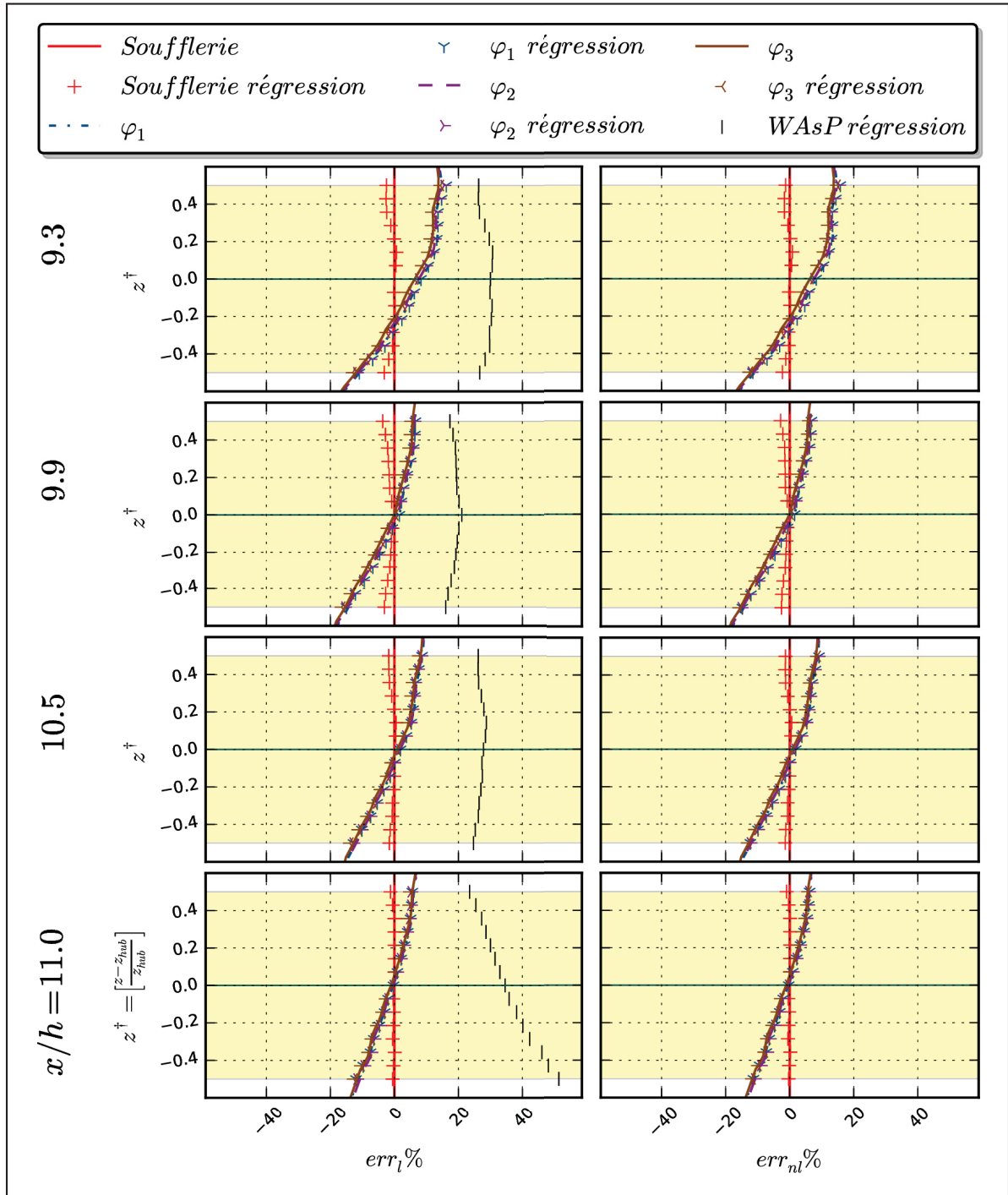


Figure 3.22 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide de régression linéaire et non-linéaire aux positions adimensionnelles $9.3 \leq x/h \leq 11.0$ du cas V

3.4 Écoulement 2D cas VI de Røkenes (2009) à l'échelle de la soufflerie

Le cas *VI* de Røkenes (2009) est étudié dans cette section. Ce cas est situé sur la même droite que le cas *V*, voir Fig. 3.23, mais le vent est dans la direction opposée au cas *V*. Le domaine a une longueur de 15000 *mm* et une hauteur de 3000 *mm* alors que le plus haut obstacle, *h*, a une hauteur de 350 *mm*. Comme à la section 3.3, le facteur d'échelle en soufflerie est de 1/1000 et la valeur de *h* est utilisé pour adimensionner les distances.

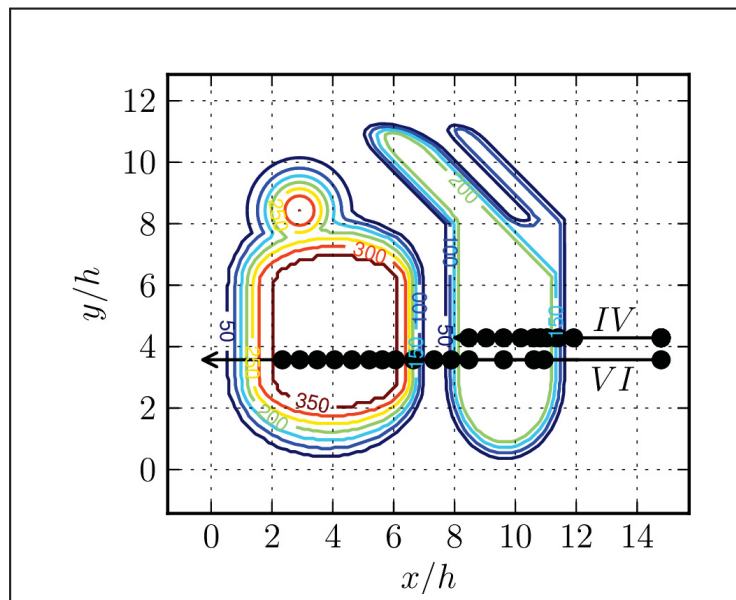


Figure 3.23 Ligne d'élévation de la coline de Røkenes (2009) et identification des cas *VI* et *IV*

3.4.1 Constantes de simulations

Les maillages ont été réalisés avec la même procédure que pour le cas *V*. Une distance de 3500 *mm* entre la condition d'entrée et le début du premier obstacle assure que la solution ne dépend pas de la position de l'entrée de domaine de calcul. Les conditions des différentes frontières pour les deux séries de simulations, du cas *VI*, sont les mêmes que pour le cas *V* à l'échelle soufflerie présenté à l'Annexe I, elles ont été discuté dans la section 3.3. Puisque les simulations de cette section ont été réalisés à l'échelle de la soufflerie, les constantes utilisées

sont présentées à nouveau au Tableau 3.7. Les valeurs de cisaillement, sont, dans les cas de conditions frontière *Fixe*, calculées à partir des valeurs de vitesse et dans le cas des conditions frontière *Shear*, voir Fig. 3.8 et section 2.1.1, imposée à la valeur de $u^* = 0.53 \text{ m/s}$.

Tableau 3.7 Constantes à l'échelle de grandeur de la soufflerie pour le cas *V* et *VI* de Røkenes (2009)

$z0 \text{ (mm)}$	0.004
$u^* \text{ (m/s)}$	0.4745 et 0.53
Domaine (mm)	15000×3000
Nb. CV	$62k249k$
FEG	1.003 à 1.016

La Fig. 3.24 montre les facteurs de correction, proposés par Sumner et Masson (2011), qui n'ont pas été utilisés pour corriger les erreurs de discrétisation près de la paroi avec les paramètres de simulation utilisés, voir Tableau 3.7. Il peut être remarqué que celle-ci est identique à la Fig. 3.14 mis à part de la hauteur z qui est 1000 fois plus faible. En effet, la mise à l'échelle de la rugosité et des cellules donne les mêmes résultats pour ces erreurs. En d'autres mots, le changement d'échelle n'influence pas l'erreur de discrétisation à la paroi.

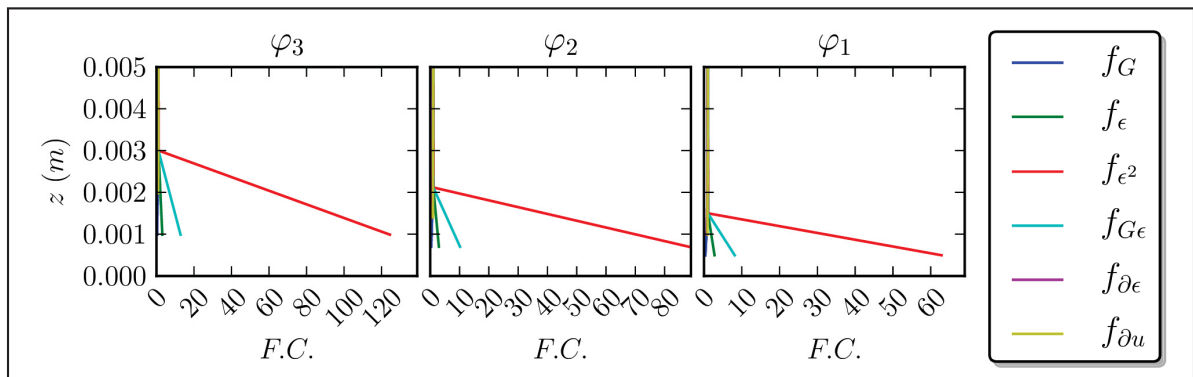


Figure 3.24 Facteur de correction de la condition frontière au sol, à partir des équations de la section 1.2, pour la série de cas *V* et *VI* échelle soufflerie avec maillage de base 9×10

3.4.2 Analyse des résultats

Puisque le cas VI est en fait le cas V avec la direction du vent inversée, certains détails mentionnés précédemment ne seront pas répétés.

3.4.2.1 Recirculation

À la position $x/h = 10.9$, une zone de recirculation entre le sol et la hauteur adimensionnelles $z^+ = 300$, peut être observée dans les mesures en soufflerie voir Fig. 3.28. Celle-ci correspond à une hauteur en soufflerie de 9 mm par rapport à la paroi. La recirculation est prédite par la simulation avec les conditions de cisaillement au sommet, voir Fig. 3.25. Cependant, sa hauteur adimensionnelle est de $z^+ = 74$. Elle n'est donc pas représentée à la Fig. 3.28. La vitesse maximale dans la direction opposée dans cette petite zone de recirculation est de 1.4 m/s ce qui donne une vitesse adimensionnelle de $\frac{-u_x}{u^*} = 2.8$. Il peut être remarqué que, pour les conditions frontière *Fixe*, la simulation au maillage intermédiaire, φ_2 , prédit une petite zone de recirculation. Cependant, aucune zone de recirculation n'est obtenue avec le maillage plus fin, φ_1 . Contrairement aux conditions frontière *Fixe*, les conditions frontière *Shear* prédisent pour tous les maillages une zone de recirculation à cette position. Ceci semble indiquer que les conditions de cisaillement au sommet sont plus appropriées.

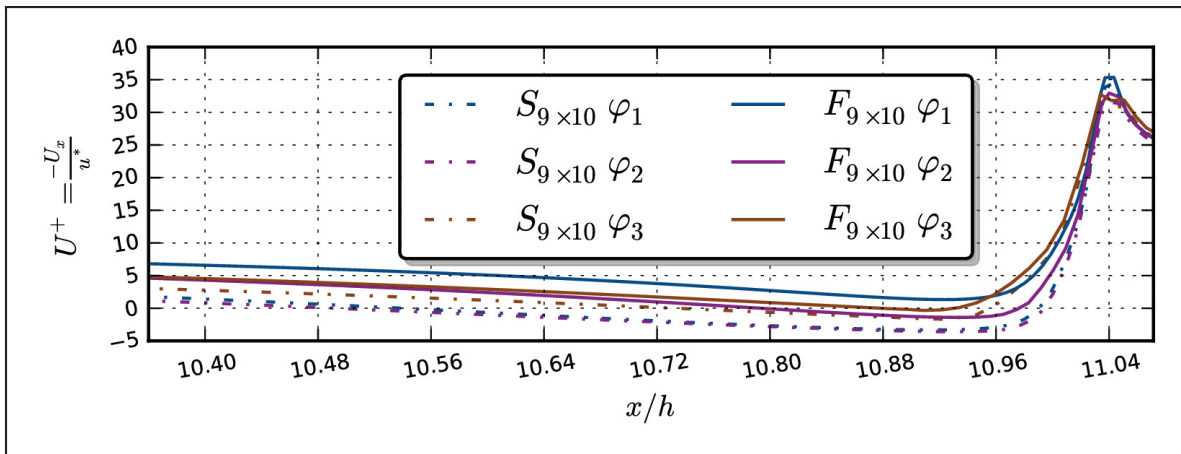


Figure 3.25 Cas VI de Røkenes (2009) : vitesse à 1 au dessus du plateau de hauteur $z/h = 0.71$ pour les positions $10.36 \geq x/h \geq 11.07$

Ceci est dû à la discontinuité dans l'inclinaison du terrain à cet endroit, bien visible à la Fig. 3.26. La qualité du maillage et l'orthogonalité de celui-ci sont aussi mises en valeur à la Fig. 3.26. Cette image est prise du maillage le plus grossier utilisé pour les simulations à l'aide du logiciel ParaView. Ce maillage est obtenu par déformation en utilisant les outils présentés à la section 2.2. La discontinuité est plus précisément à la position $x/h = 11.0$.

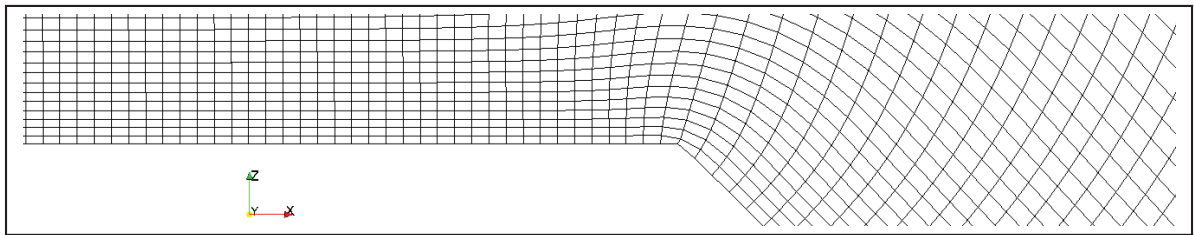


Figure 3.26 Maillage grossier φ_3 cas VI de Røkenes (2009) : agrandissement au niveau du plateau de hauteur $z/h = 0.71$ pour les positions $10.6 \leq x/h \leq 11.4$

La Fig. 3.27 montre la hauteur du sol telle qu'évaluée par l'outil de post-traitement où le groupe de croix *sl* représente la position de prise de mesures pour les solutions présentées à la Fig. 3.25.

3.4.2.2 Validation

Les profils verticaux obtenus avec les conditions frontière *Shear*, Figs. (3.28 à 3.31) montrent des erreurs pour le GCI plus faibles que les profils verticaux obtenus avec les conditions frontière *Fixe*, Figs. (3.32 à 3.35). Il est aussi à noter que le cisaillement adimensionnel, $\overline{u'w'}^+$, est constant près du sommet dans le cas des conditions frontière *Shear* contrairement au cas des conditions frontière *Fixe* où une rapide variation du cisaillement est notable au-dessus de $z^+ = 7 \times 10^4$. Une zone de recirculation est présente aux positions, $x/h = 6.7, 7.3$ et 7.9 .

Les résultats détaillés des valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière *Shear* du cas *IV* pour les valeurs de vitesse, U , angle du vent, ϕ , l'énergie cinétique turbulente, k , ainsi que le cisaillement turbulent, $\overline{u'w'}$, à toutes les positions x/h où les profils ont été mesurés, sont présentées aux Tableaux (3.8 et 3.9). Pour les simulations avec les conditions frontière *Shear*, l'ordre local

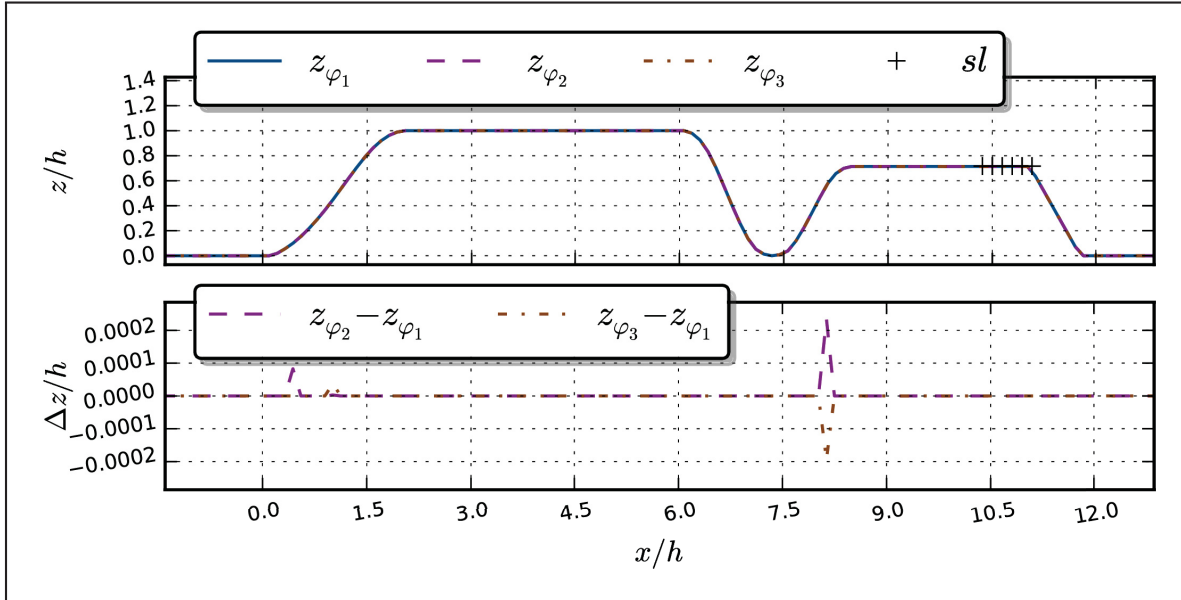


Figure 3.27 Cas VI de Røkenes (2009) : hauteur du terrain évaluée par l’outil de post-traitement développé et différence entre la hauteur représentative du sol des différents maillages du terrain

de précision minimale pour chaque profil varie entre 0 et 0.92. Sa valeur moyenne se situe entre 1.02 et 4.99. Finalement, sa valeur maximale se situe entre 2.2 et 23.7. Le pourcentage de convergence oscillatoire est situé entre 0 % et 97.2 %. Les plus grandes valeurs se trouvent dans les graphiques de l’angle d’élévation du vent, ϕ . Dans le cas des simulations avec les conditions frontière *Fixe*, l’ordre local de précision minimale pour chaque profil varie entre 0 et 1.16. Sa valeur moyenne se situe entre 0.73 et 5.30. Finalement, sa valeur maximale se situe entre 1.4 et 23.6. Le pourcentage de convergence oscillatoire est situé entre 0 % et 69.4 %. Les plus grandes valeurs se trouvent aussi dans les graphiques de l’angle d’élévation du vent, ϕ . Les valeurs de ces tableaux ont été obtenues en éliminant deux données qui posaient dans certains cas des problèmes de valeurs non déterminés, ou excessivement élevés pour l’ordre local de précision. Ces deux valeurs aux positions 0 et 23 du vecteur de solution correspondent aux positions $z^+ = 30$ et $z^+ = 1700$.

Tableau 3.8 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière *Shear* du cas *VI*

x/h	Var	p			%	Var	p			%
		min	moy	max			min	moy	max	
14.8	U	0.04	1.02	2.2	0.0	ϕ	0.39	4.81	15.5	33.3
10.9		0.07	1.75	10.0	5.6		0.40	4.38	19.1	97.2
10.6		0.65	1.54	6.2	13.9		0.29	2.57	10.2	88.9
9.6		0.03	1.53	14.7	22.2		0.43	4.91	11.9	52.8
8.5		0.13	1.44	13.5	27.8		0.10	1.62	5.9	0.0
7.9		0.08	1.71	18.3	19.4		0.64	2.81	5.2	2.8
7.3		0.08	1.76	10.7	8.3		0.49	4.99	17.4	50.0
6.7		0.03	2.55	10.0	36.1		0.01	2.88	9.4	91.7
6.1		0.00	1.79	14.6	19.4		0.02	2.17	11.6	94.4
5.6		0.02	2.14	11.1	22.2		0.12	3.02	9.5	86.1
5.2		0.04	2.27	14.3	19.4		0.28	4.17	11.1	61.1
4.6		0.03	2.55	10.7	13.9		0.16	4.22	13.0	41.7
4.1		0.07	2.93	12.9	5.6		0.31	3.63	14.4	33.3
3.5		0.08	2.48	9.5	0.0		0.05	1.63	11.0	22.2
2.9		0.01	2.68	10.1	0.0		0.06	0.68	2.2	0.0
2.3		0.11	3.43	18.3	19.4		0.04	1.20	3.3	0.0
14.8	k	0.02	1.75	7.2	11.1	$\overline{u'w'}$	0.00	1.83	10.7	11.1
10.9		0.01	3.35	9.6	30.6		0.12	3.54	16.4	27.8
10.6		0.03	3.45	13.7	25.0		0.03	2.73	8.9	5.6
9.6		0.01	3.70	12.8	22.2		0.19	3.51	17.3	19.4
8.5		0.04	4.02	13.3	33.3		0.92	3.05	9.4	36.1
7.9		0.11	3.18	14.2	25.0		0.27	3.18	15.6	19.4
7.3		0.17	2.13	8.7	11.1		0.02	2.50	11.5	8.3
6.7		0.17	3.82	19.0	16.7		0.21	3.24	16.1	11.1
6.1		0.17	2.29	8.5	11.1		0.13	3.49	14.9	36.1
5.6		0.14	2.07	7.5	11.1		0.04	3.75	13.9	27.8
5.2		0.23	2.05	6.5	11.1		0.00	2.60	8.1	36.1
4.6		0.24	2.01	6.6	11.1		0.22	3.23	10.0	36.1
4.1		0.23	2.10	8.0	11.1		0.00	4.09	15.4	30.6
3.5		0.27	2.21	9.3	11.1		0.06	4.18	15.2	25.0
2.9		0.22	2.67	23.7	11.1		0.01	3.84	12.0	30.6
2.3		0.07	2.19	11.4	8.3		0.10	2.86	7.9	41.7

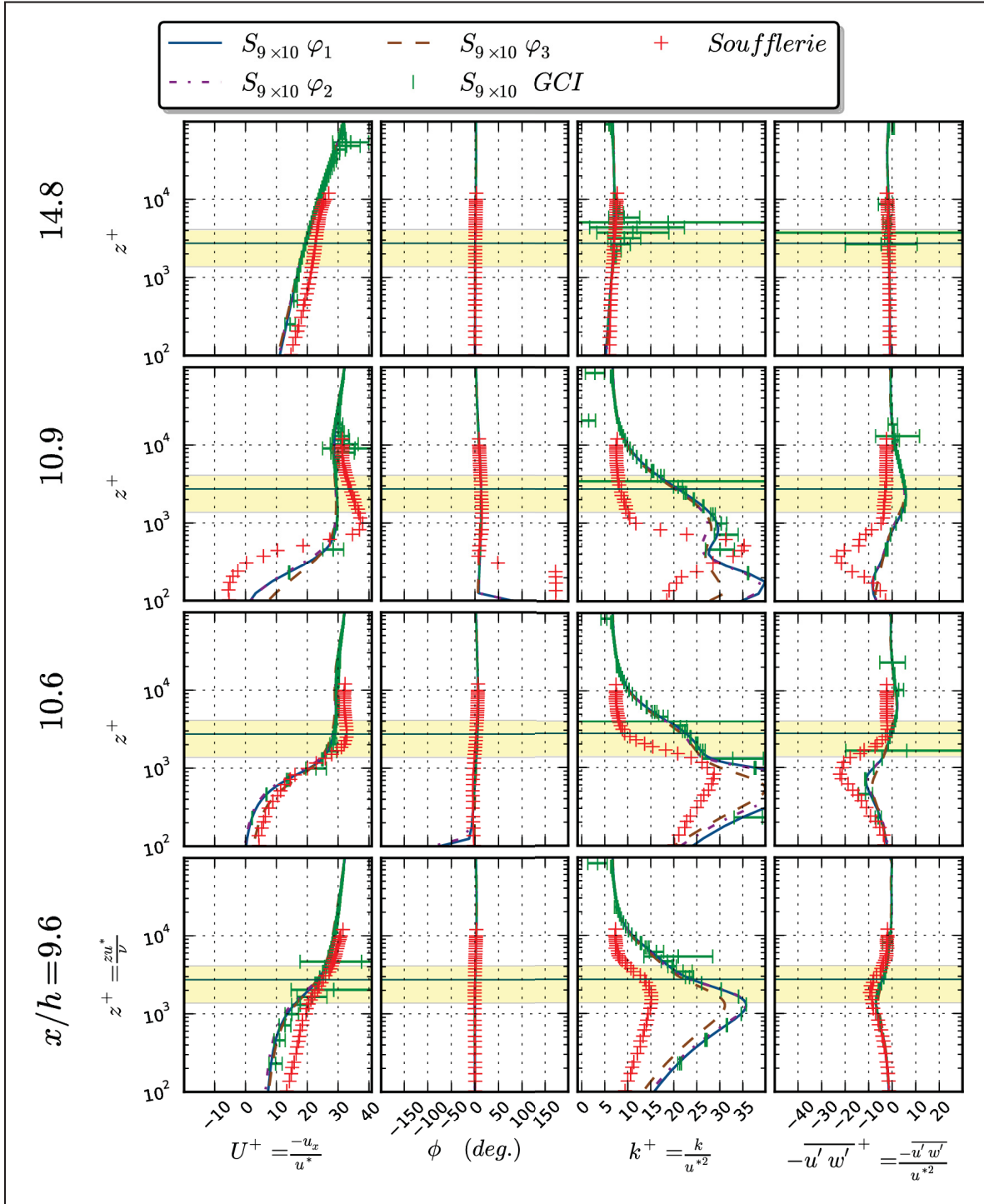


Figure 3.28 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $14.8 \geq x/h \geq 9.6$ avec les conditions frontière *Shear*

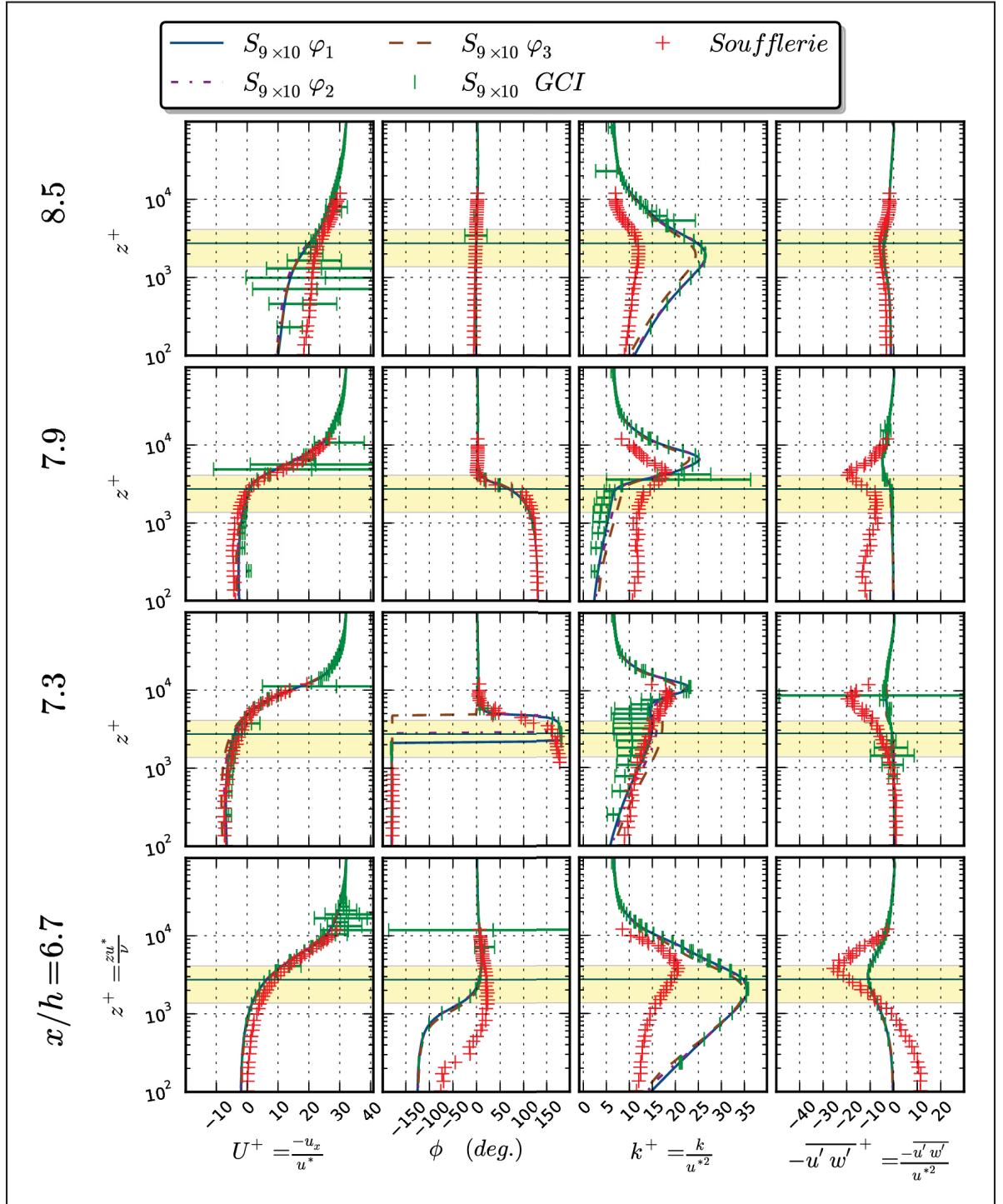


Figure 3.29 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $8.5 \geq x/h \geq 6.7$ avec les conditions frontière *Shear*

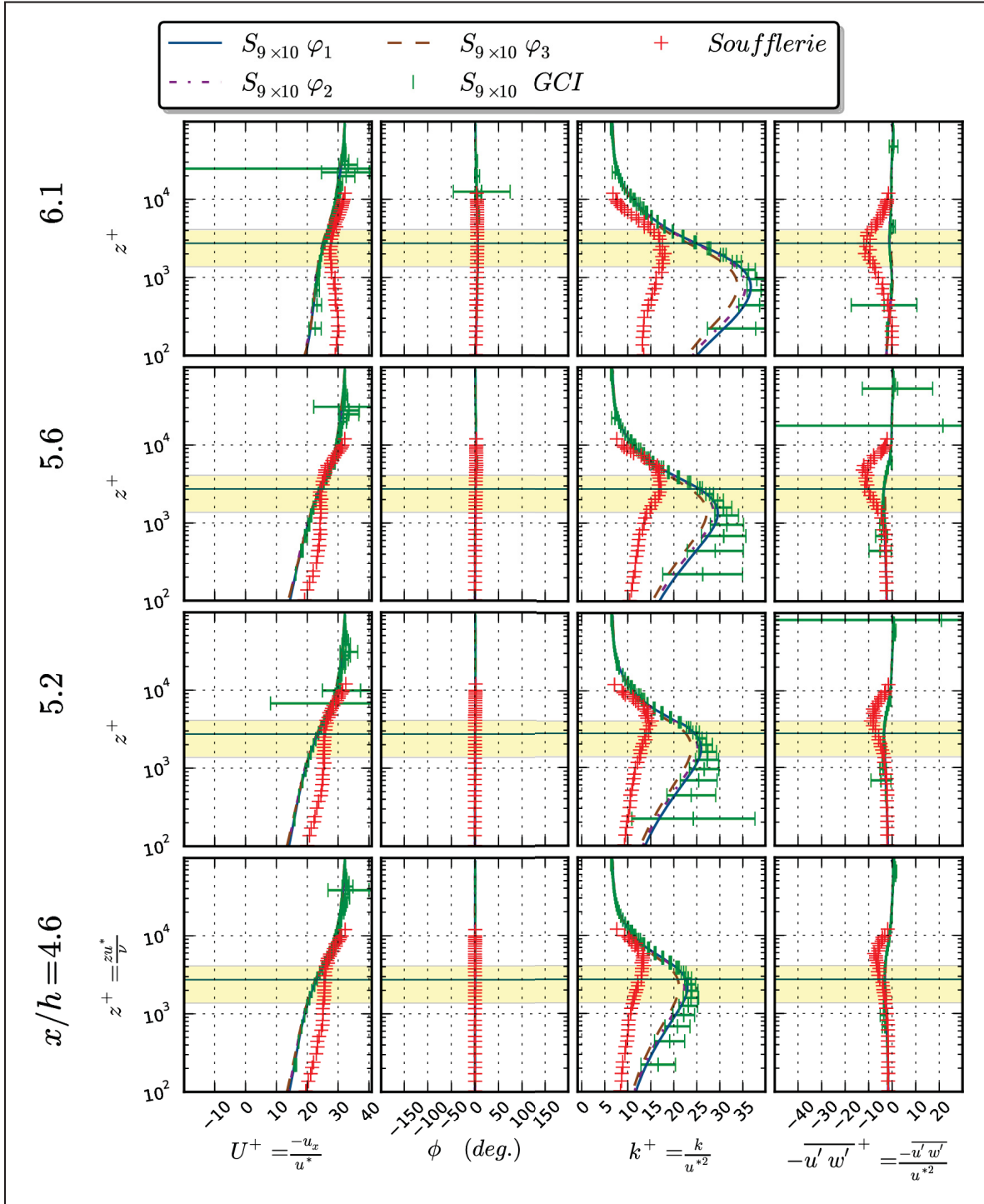


Figure 3.30 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $6.1 \geq x/h \geq 4.6$ avec les conditions frontière *Shear*

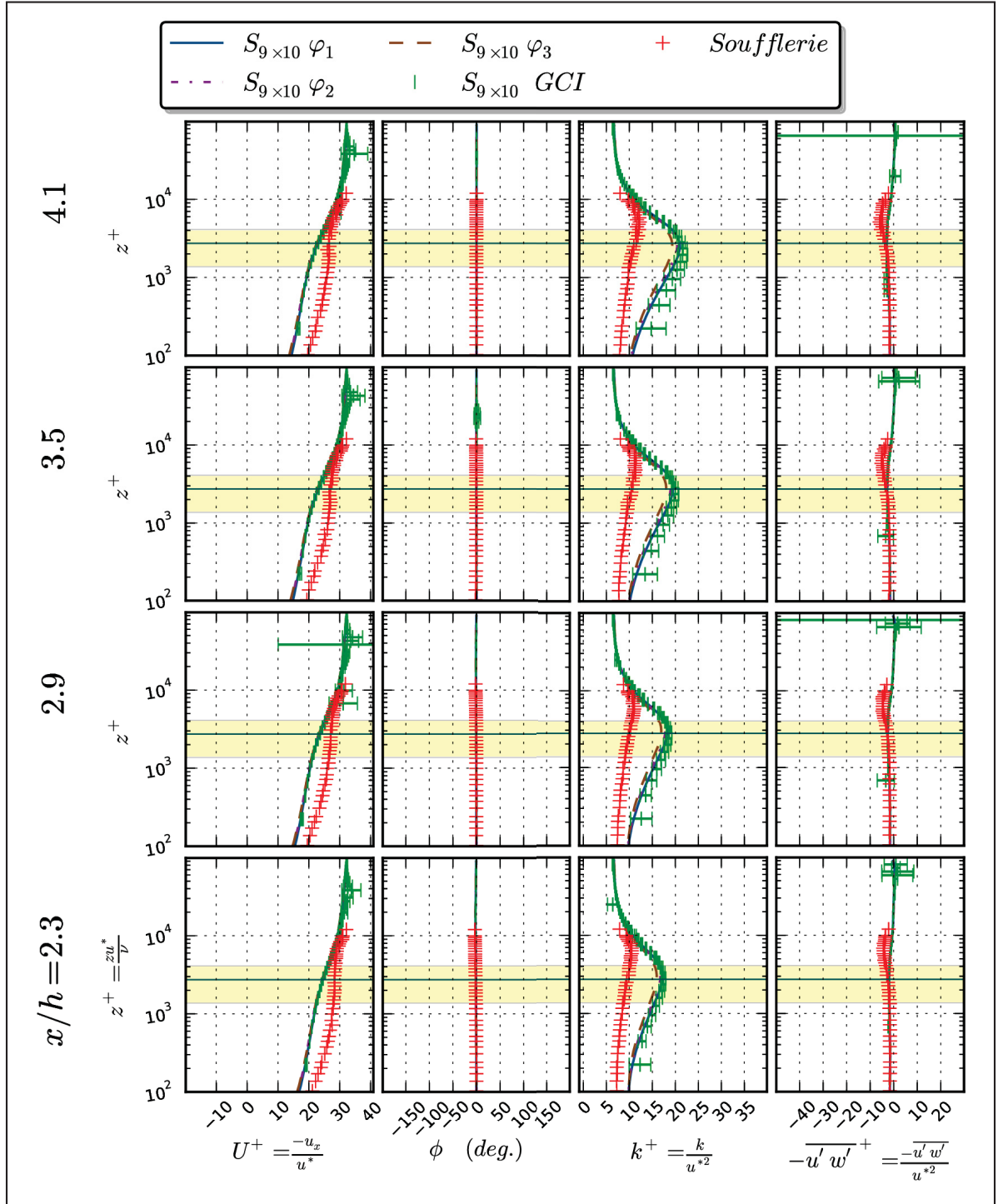


Figure 3.31 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $4.1 \geq x/h \geq 2.3$ avec les conditions frontière *Shear*

Tableau 3.9 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière
Fixe du cas VI

x/h	Var	p			%	Var	p			%
		min	moy	max			min	moy	max	
14.8	U	0.02	0.75	11.0	0.0	ϕ	0.57	1.59	3.6	0.0
10.9		0.32	0.66	1.4	5.6		0.06	2.87	11.1	50.0
10.6		0.09	1.14	5.5	11.1		0.19	4.13	22.7	8.3
9.6		0.05	1.47	13.1	16.7		0.11	2.13	9.5	27.8
8.5		0.08	1.83	17.0	13.9		0.12	1.49	12.0	8.3
7.9		0.18	1.83	13.7	11.1		0.06	2.09	7.9	25.0
7.3		0.33	1.28	5.6	8.3		0.38	4.64	16.3	30.6
6.7		0.26	1.57	8.3	33.3		0.11	4.47	21.7	69.4
6.1		0.09	0.95	3.2	0.0		0.02	4.33	13.7	72.2
5.6		0.15	0.97	6.4	0.0		0.06	3.68	15.9	47.2
5.2		0.13	0.74	3.4	2.8		0.02	2.50	9.7	16.7
4.6		0.11	0.80	6.1	0.0		0.04	0.68	2.3	0.0
4.1		0.07	0.83	5.8	2.8		0.16	1.84	7.8	13.9
3.5		0.04	0.77	4.1	2.8		0.12	3.22	12.1	38.9
2.9		0.07	0.91	4.6	2.8		1.74	5.30	15.9	33.3
2.3		0.05	1.25	10.5	2.8		2.01	5.98	19.6	41.7
14.8	k	1.21	2.22	5.7	2.8	$\overline{u'w'}$	0.11	1.86	6.6	5.6
10.9		1.16	1.87	4.4	0.0		0.02	1.86	8.7	8.3
10.6		0.57	2.04	9.1	0.0		0.06	2.41	9.8	27.8
9.6		0.01	2.19	9.3	5.6		0.07	1.32	5.1	19.4
8.5		0.29	1.58	3.1	0.0		0.04	1.78	11.2	8.3
7.9		0.05	1.68	7.5	2.8		0.09	1.54	8.8	8.3
7.3		0.06	1.40	4.2	2.8		0.06	1.01	5.6	2.8
6.7		0.27	1.27	2.5	0.0		0.10	1.75	13.3	8.3
6.1		0.06	1.21	2.7	0.0		0.11	2.20	23.6	33.3
5.6		0.33	1.34	3.7	0.0		0.07	1.05	4.7	0.0
5.2		0.24	1.20	3.7	0.0		0.01	0.84	5.7	2.8
4.6		0.51	1.23	3.4	0.0		0.02	0.86	6.0	2.8
4.1		0.37	1.20	3.5	0.0		0.04	0.73	2.4	2.8
3.5		0.59	1.27	5.5	0.0		0.00	0.75	3.2	2.8
2.9		0.32	1.26	4.6	0.0		0.00	0.80	2.8	2.8
2.3		0.04	1.28	3.7	0.0		0.01	1.40	7.9	2.8

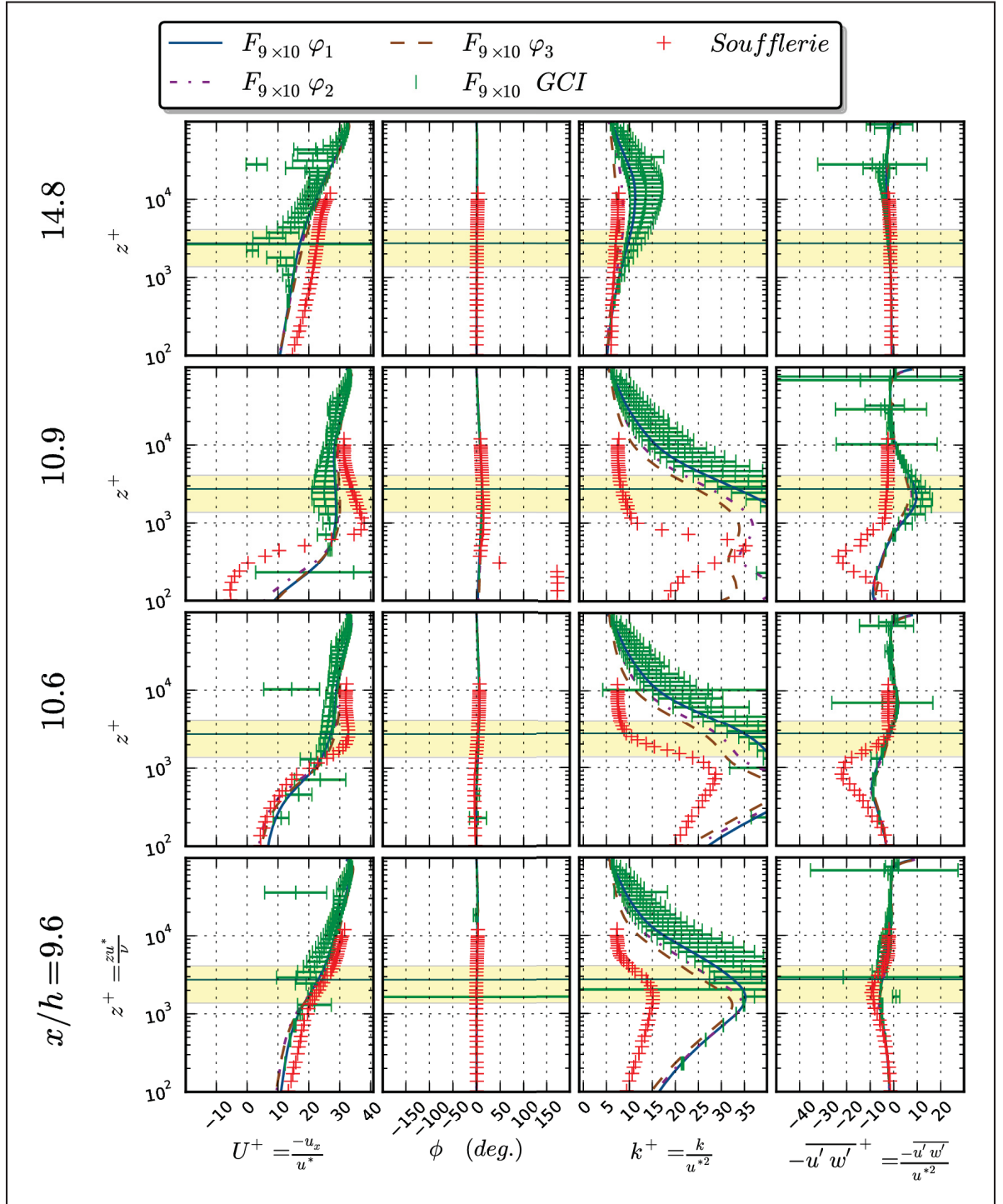


Figure 3.32 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $14.8 \geq x/h \geq 9.6$ avec les conditions frontière *Fixe*

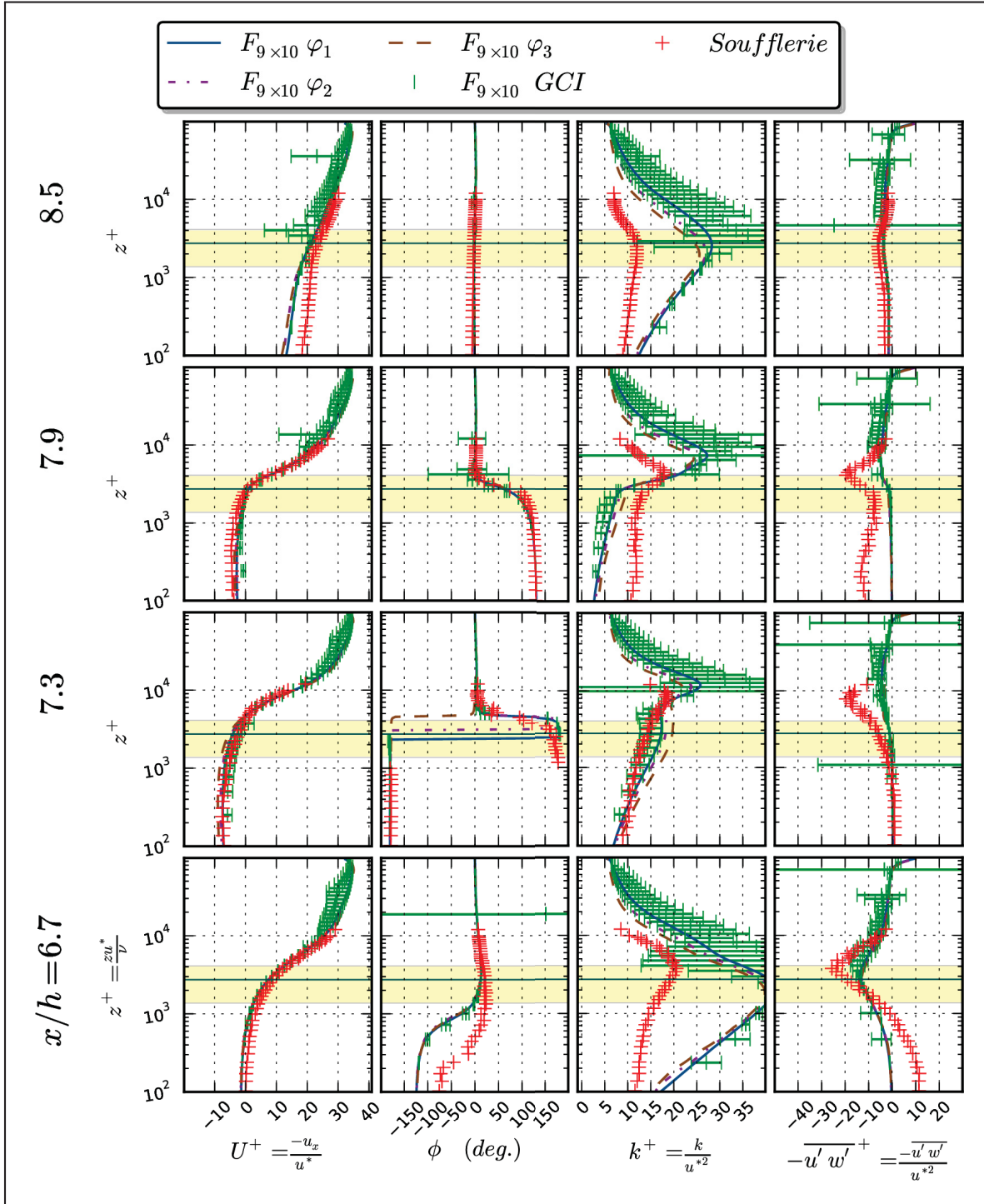


Figure 3.33 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $8.5 \geq x/h \geq 6.7$ avec les conditions frontière *Fixe*

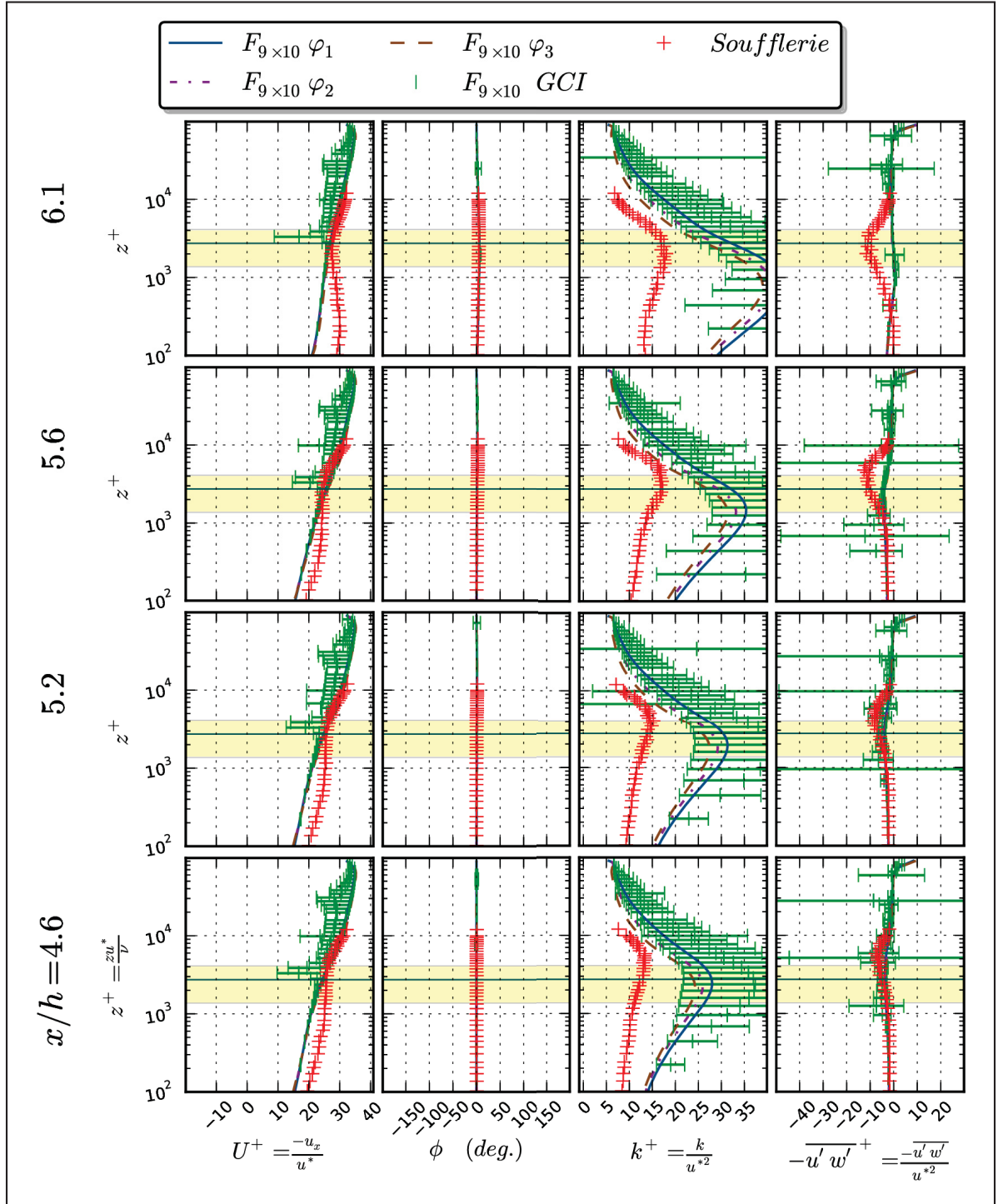


Figure 3.34 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $6.1 \geq x/h \geq 4.6$ avec les conditions frontière *Fixe*

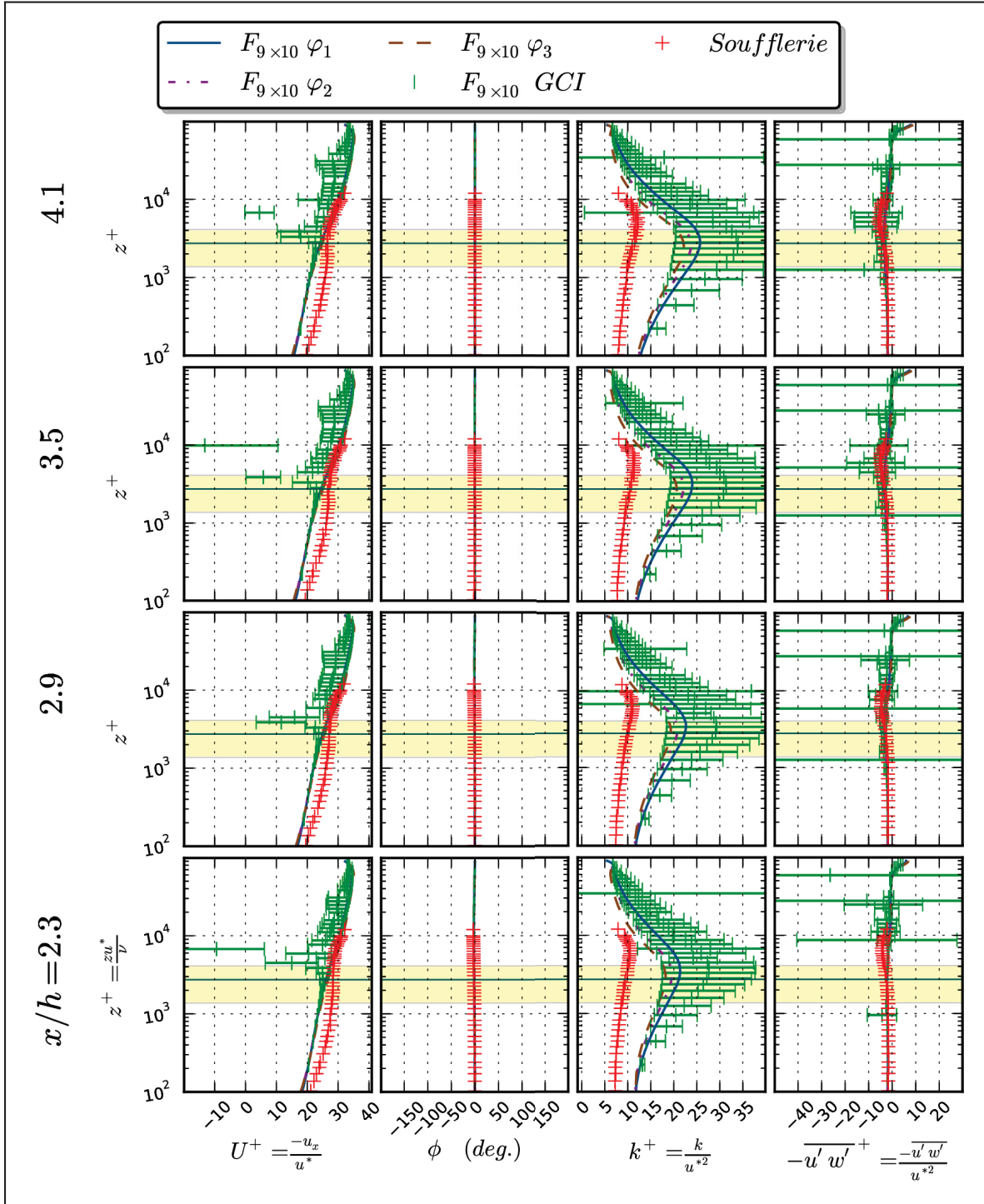


Figure 3.35 Cas VI de Røkenes (2009) : profils verticaux provenant des mesures en soufflerie et des résultats des simulations pour les positions $4.1 \geq x/h \geq 2.3$ avec les conditions frontière *Fixe*

3.4.2.3 Application de l'outil de post-traitement

Les profils horizontaux, de vitesse et de l'exposant de la loi de puissance, obtenus avec les conditions frontière *Shear*, Fig. 3.38, sont moins près des valeurs mesurées en soufflerie que les profils horizontaux obtenus avec les conditions frontière *Fixe*, Fig. 3.40. Il est important de noter la différence entre les valeurs prises en soufflerie du cas *VI* et *IV*. Le cas *IV* n'est pas celui simulé et diffère du cas présent par l'absence de la colline de hauteur h . Cependant, le cas *IV* explique bien le comportement du logiciel linéaire WaSP qui ne considère pas la colline en aval. En effet, le cas *IV* est beaucoup plus proche des résultats de WaSP dû à l'absence de la zone de recirculation. La présence de cette colline plus haute donne à la recirculation une plus grande ampleur et contribue au ralentissement de l'écoulement. Ce phénomène de séparation est bien prédit avec les deux séries de conditions frontière. Puisque ce phénomène est non-linéaire, le logiciel WaSP ne peut le prédire. À cette position, au lieu de prédire un ralentissement WaSP prédit une accélération qui n'est présente dans aucune des mesures en soufflerie du cas *VI* ou *IV*. Les Figs. (3.39 et 3.41) montrent certaines différences entre les simulations et les mesures. Une différence notable entre les Figs. (3.39 et 3.41) est l'augmentation graduelle de l'erreur quadratique non-linéaire entre l'entrée et la position $x/h = 12.9$ la solution obtenue avec les conditions frontière *Fixe*. Ce comportement n'est pas observé pour la solution obtenue avec les conditions de cisaillement.

Les profils reconstitués obtenus par la méthode des moindres carrés à partir des solutions obtenues avec les conditions frontière *Shears*, Figs. (3.42 et 3.43), ainsi qu'avec les conditions frontière *Fixe* Figs. (3.44 et 3.45), montrent que les variables α et β obtenues par régressions non-linéaires représentent mieux les profils simulés et mesurés, en particulier aux positions $x/h = 10.6, 9.6$ et 6.7 . Les régressions linéaire et non-linéaire des Figs. (3.42 et 3.43) ont été réalisées avec les valeurs de vitesse aux positions d'intérêt. Dans une grande partie de ce domaine, une interpolation des variables α et β entre deux autres positions à proximité serait possible. Cependant, ce n'est pas le cas pour certaines positions. Par exemple, pour les deux simulations indiquant la plus forte recirculation près du sol à la position $x/h = 10.9$, voir Fig. 3.25. Dans ces cas, la non-linéarité de l'évolution du profil de vents entre les positions

$x/h = 10.89$ et 11.01 où sont évaluées les profils reconstitués les plus proches ne permettent pas une telle approche, malgré que les paramètres α et β des profils reconstitués aux deux positions à proximité soient bien évalués par la méthode des moindres carrés non-linéaires comme le montre les Figs. (3.36 et 3.37).

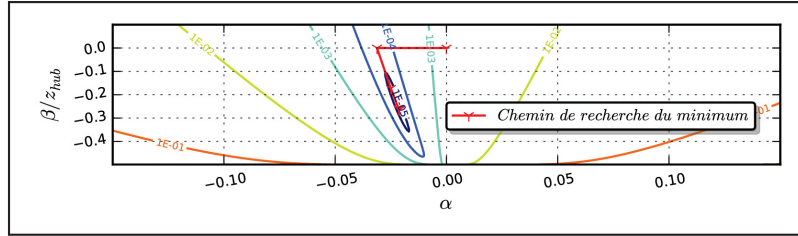


Figure 3.36 Cas VI : fonction χ^2 et recherche du minimum quadratique par régression non-linéaire à partir des résultats des simulations avec les conditions frontière *Shear* à la position $x/h = 10.89$ du maillage φ_1

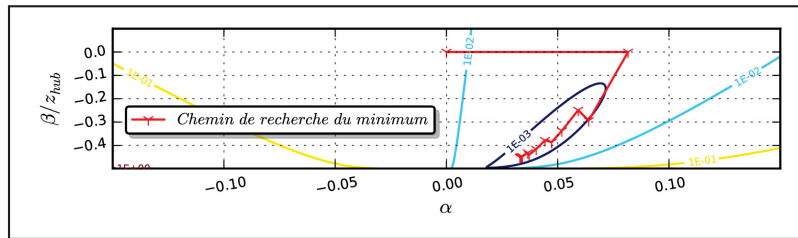


Figure 3.37 Cas VI : fonction χ^2 et recherche du minimum quadratique par régression non-linéaire à partir des résultats des simulations avec les conditions frontière *Shear* à la position $x/h = 11.01$ du maillage φ_1

À la position $x/h = 10.9$ le profil reconstitué obtenu à partir de la solution de WaSP est excellent. En général, les profils reconstitués avec les conditions frontière *Fixe* sont meilleurs que ceux obtenus avec les conditions frontière *Shear*. Il peut aussi être remarqué que les solutions obtenues sur les trois maillages, φ_1 , φ_2 et φ_3 , sont plus proches les unes des autres pour les cas simulés avec les conditions frontière *Shear* en particulier en aval de la recirculation située à $x/h = 7.1$. Les erreurs, hors de la zone de recirculation, des profils reconstitués, avec les deux séries de conditions frontière, sont en dessous de 20 % alors que dans le cas de WaSP ces erreurs montent dans certain cas à près de 40 %.

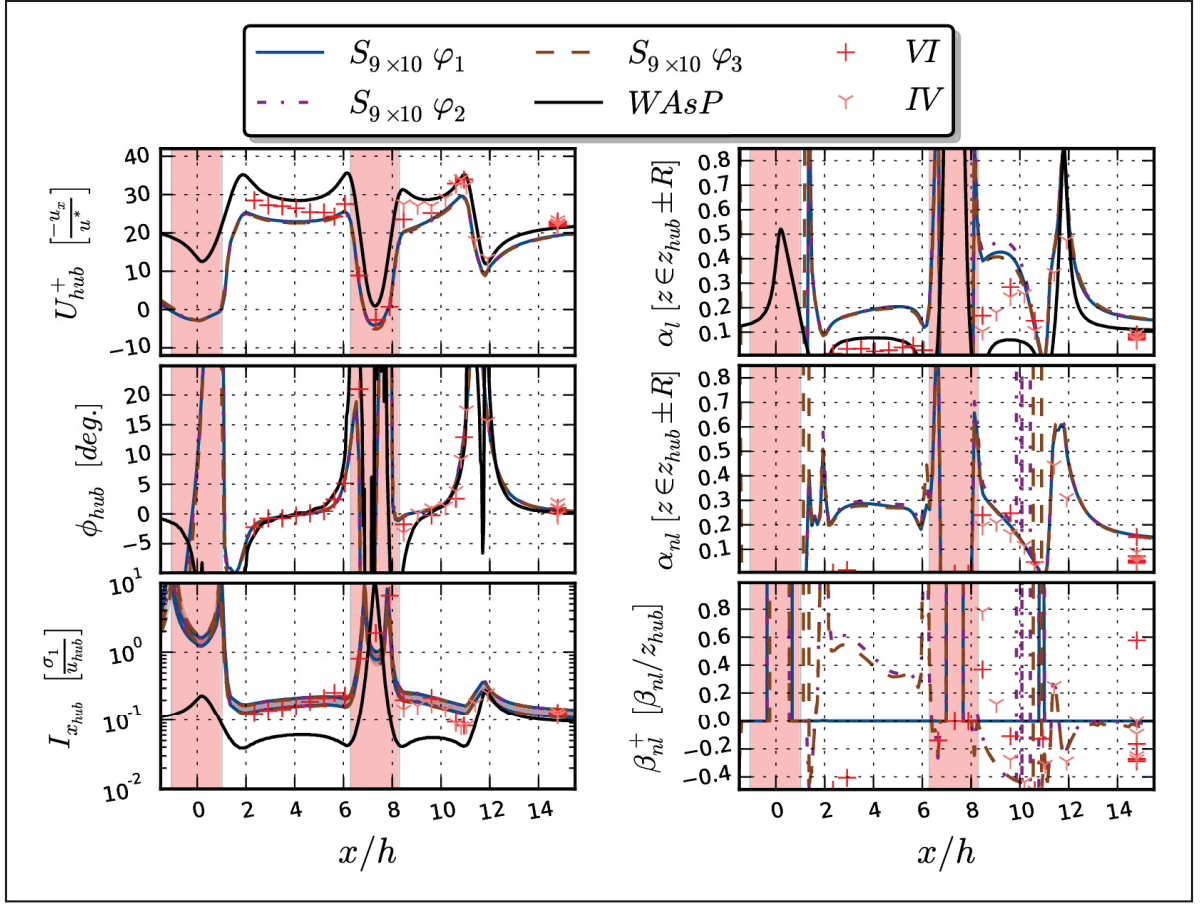


Figure 3.38 Cas VI : profils horizontaux des mesures en soufflerie, des résultats des simulations avec les conditions frontière *Shear* et des résultats de WASP à hauteur de la nacelle

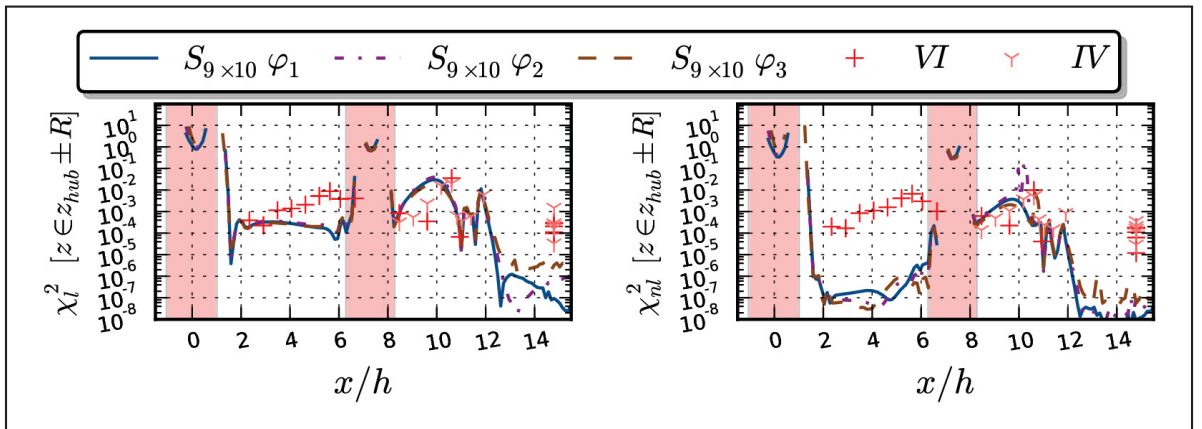


Figure 3.39 Cas VI : valeur de χ^2 de la régression linéaire et non-linéaire à partir des mesures en soufflerie et des résultats des simulations avec les conditions frontière *Shear*

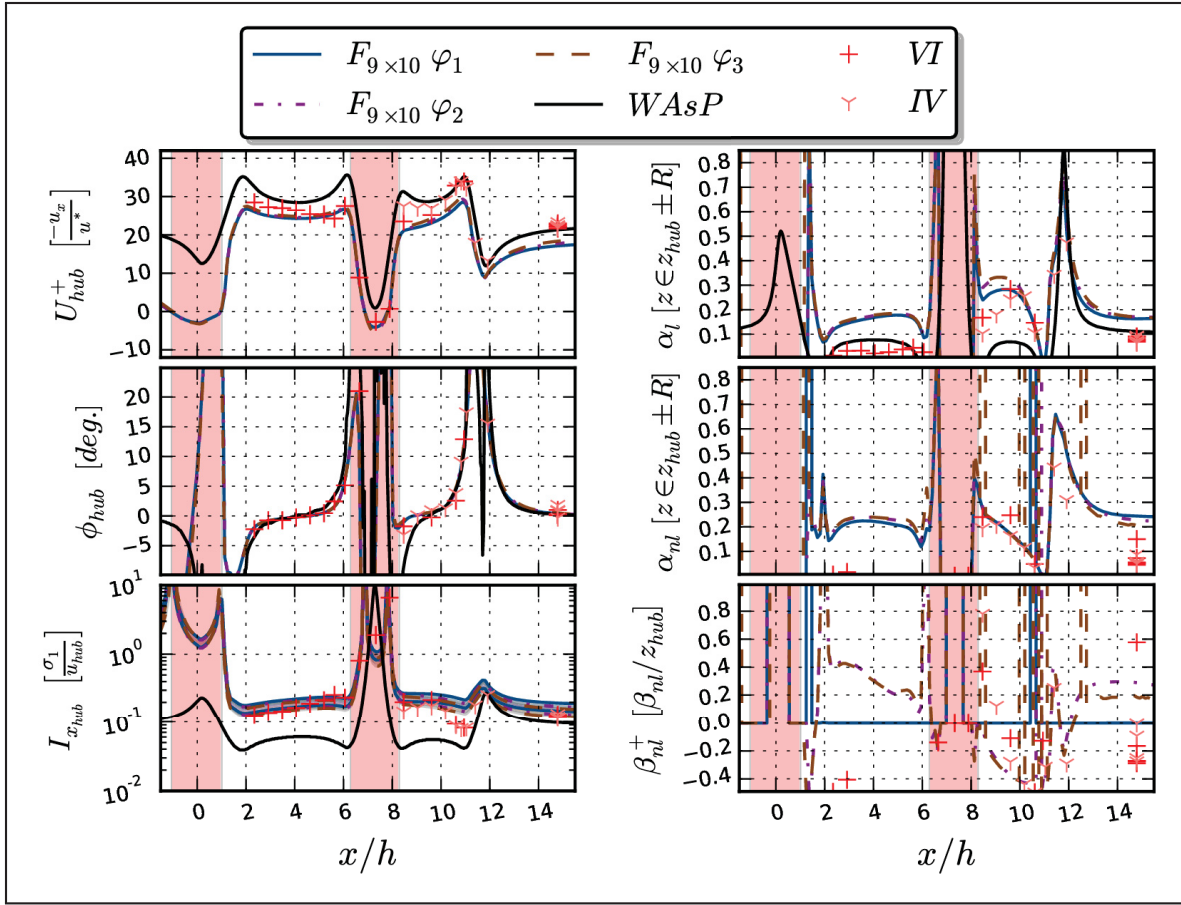


Figure 3.40 Cas VI : profils horizontaux des mesures en soufflerie, des résultats des simulations avec les conditions frontière *Fixe* et des résultats de WAsP à hauteur de la nacelle

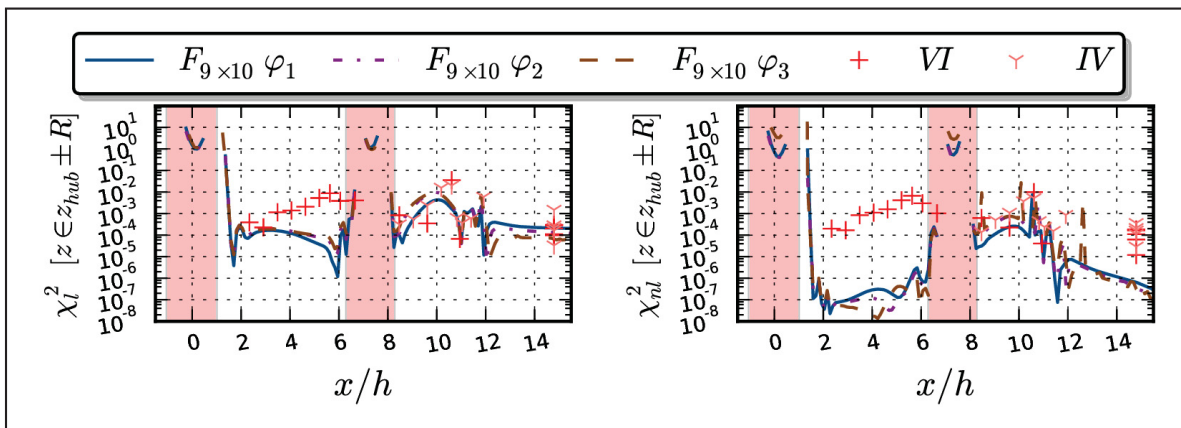


Figure 3.41 Cas VI : valeur de χ^2 de la régression linéaire et non-linéaire à partir des mesures en soufflerie et des résultats des simulations avec les conditions frontière *Fixe*

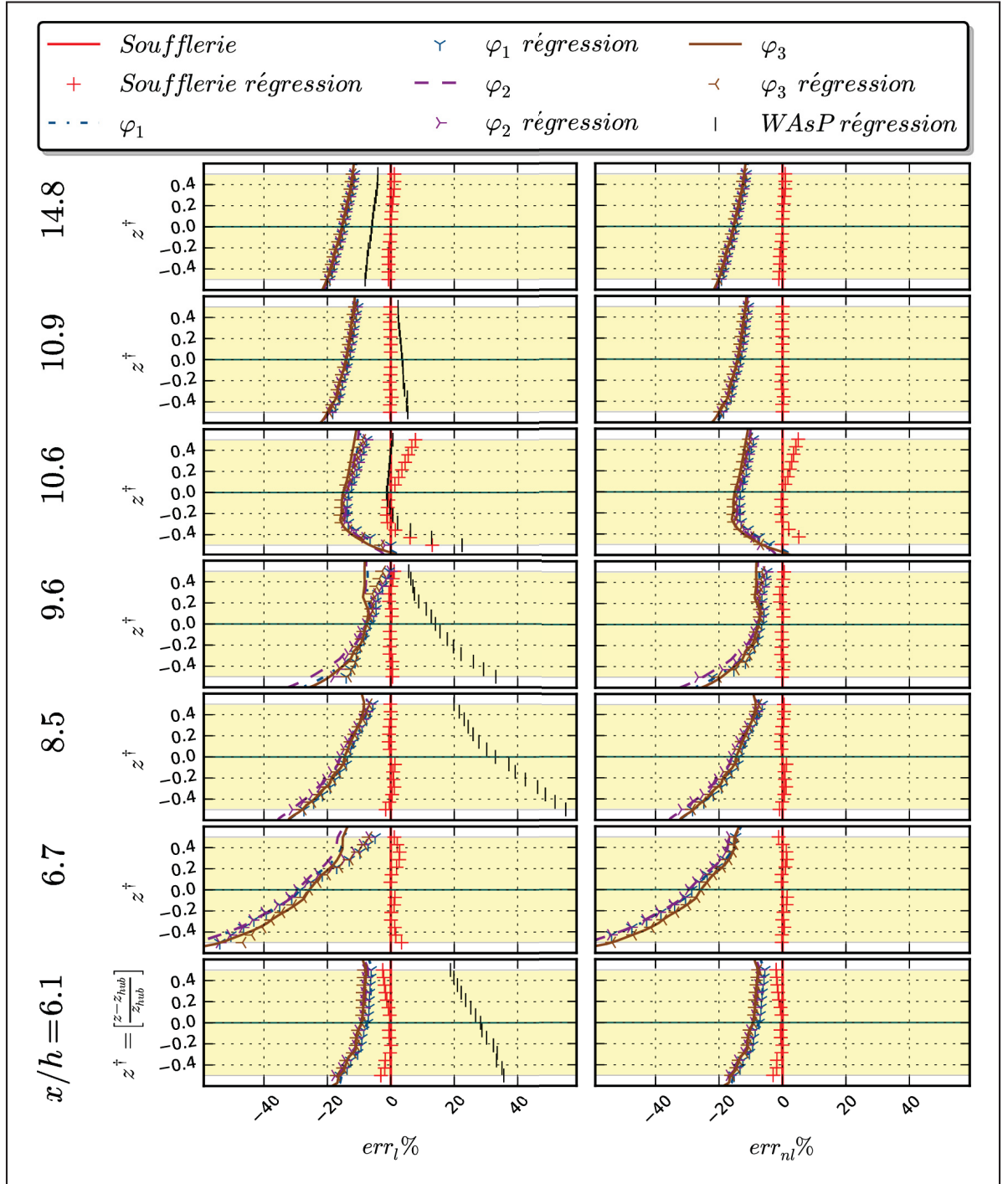


Figure 3.42 Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière *Shear*, et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $14.8 \geq x/h \geq 6.1$

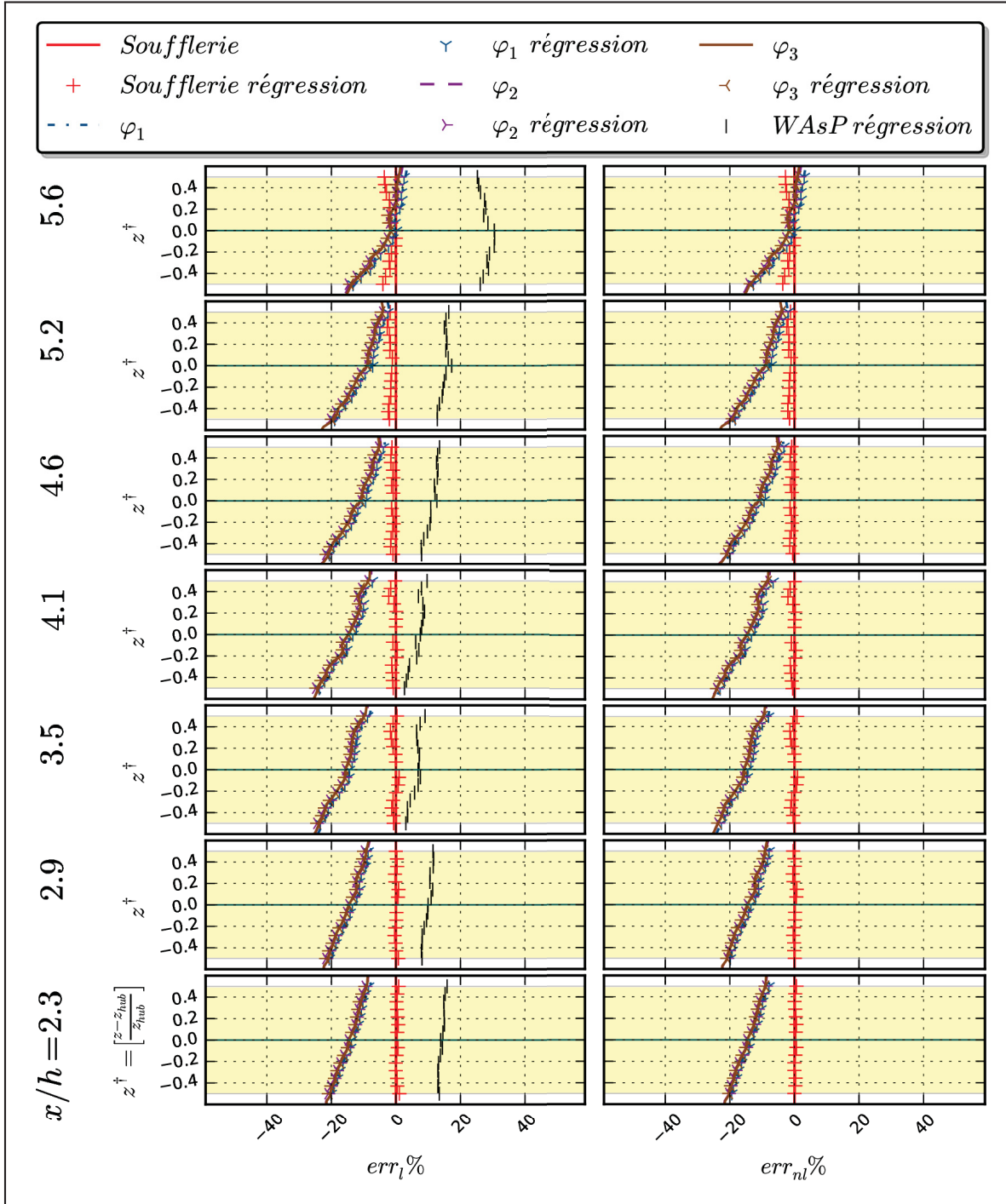


Figure 3.43 Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière *Shear*, et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $5.6 \geq x/h \geq 2.3$

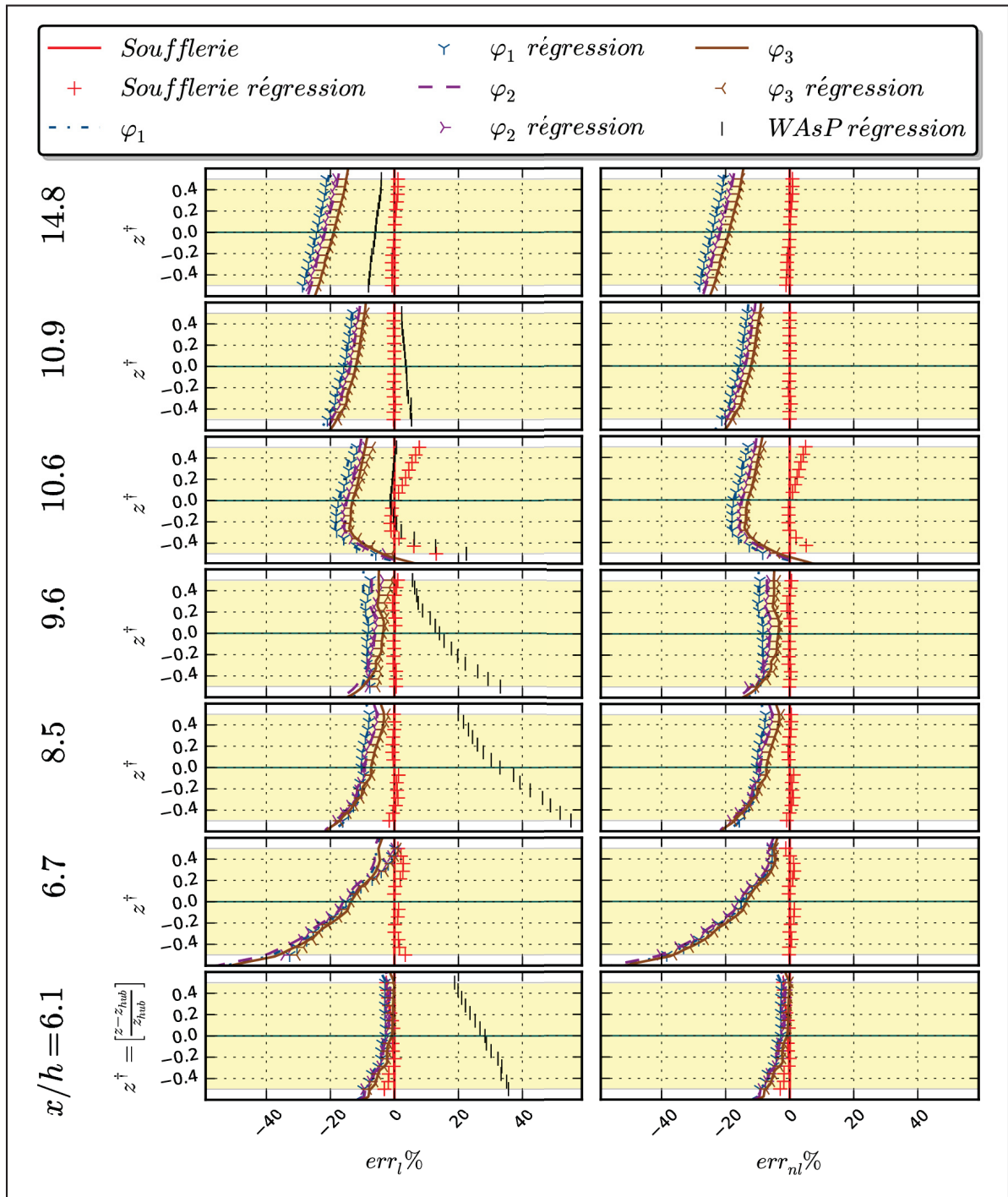


Figure 3.44 Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière *Fixe*, et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $14.8 \geq x/h \geq 6.1$

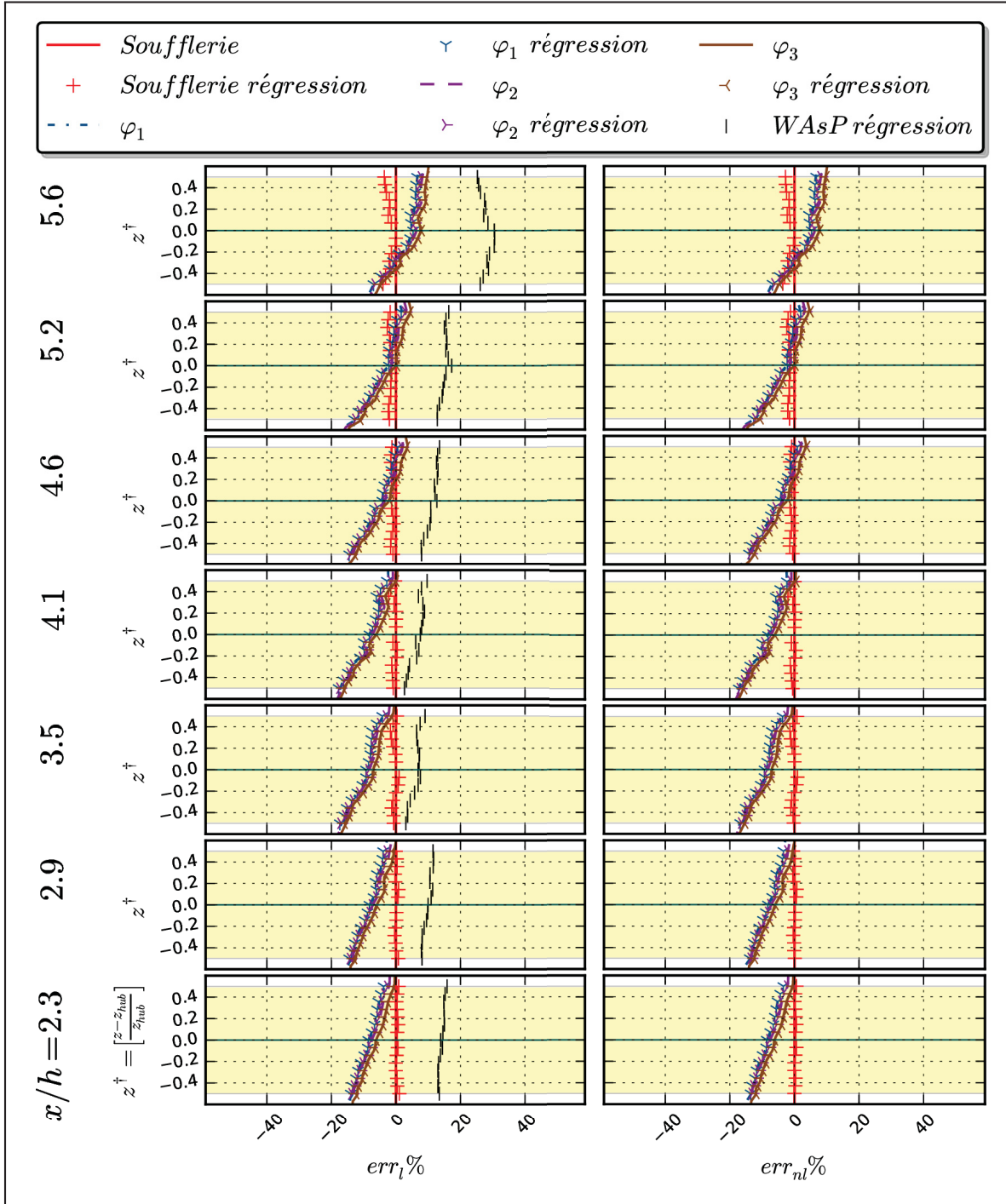


Figure 3.45 Comparaison entre les profils simulés, avec les conditions frontière *Fixe*, et mesurés en soufflerie, avec leurs approximations par la loi de puissance à l'aide des régressions linéaires et non-linéaires, du cas VI aux positions $5.6 \geq x/h \geq 2.3$

CONCLUSION

Des normes internationales dans le domaine de l'énergie éolienne établissent un niveau d'intensité de turbulence à chaque classe d'éoliennes en dessous de laquelle l'intégrité structurelle de l'équipement sera préservée. Une procédure, utilisant la librairie C++ de OpenFOAM, pour évaluer, à partir de simulation numérique, qu'un emplacement sur un site complexe est propice au positionnement d'une éolienne par rapport à son intégrité structurelle a été proposée. Cette procédure est basée sur les paramètres d'intensité de turbulence, de vitesse, d'angle et de profil cisailé du vent.

Afin d'évaluer la validité de la nouvelle procédure, des simulations numériques en terrain complexe ont été effectuées et comparées à des mesures en soufflerie. Une étude comparative entre les résultats des deux modèles de turbulence $k - \epsilon$ et $k - \omega$ SST a été effectuée pour le cas H3 de Rushil. Le modèle de turbulence $k - \omega$ SST a été écarté des études subséquentes en raison de la plus grande ressource informatique nécessaire à ce modèle et au manque d'amélioration apportée par rapport au modèle $k - \epsilon$. Pour le modèle $k - \epsilon$ un ensemble de conditions pour la frontière au sol a été implémenté pour un écoulement atmosphérique. Deux séries d'étude en terrain complexe comparant les mesures en soufflerie de Røkenes (2009) avec le modèle de turbulence $k - \epsilon$ d'OpenFOAM ont été effectuées. Une étude de convergence des résultats pour les profils verticaux a été effectuée à chaque position mesurée en soufflerie par Røkenes (2009). Ces séries de simulations ont été effectuées avec trois ensembles de conditions frontière au sommet et à l'entrée ; des valeurs fixes, des gradients théoriques imposés et un nouvel ensemble de conditions de cisaillement imposé appelé dans ce travail, *Shear*.

La condition frontière *Shear* a apporté une amélioration par rapport aux conditions habituellement utilisées. Un autre avantage de cette condition frontière est la possibilité de l'utiliser pour des cas avec un couvert forestier qui produit une hauteur de déplacement du profil logarithmique de la couche limite atmosphérique. L'avantage de la condition frontière *Shear* dans ce cas est qu'elle calcule automatiquement et de façon indirecte cette hauteur de déplacement à travers la viscosité tourbillonnaire. Ceci implique que l'utilisateur n'a besoin que du cisaillement du cas étudié. Ce cisaillement est normalement simple à obtenir, spécifiquement

compte tenu du fait qu'à partir d'une certaine hauteur ce dernier est constant verticalement. Un cas cyclique a été évalué et malgré ces nombreux avantages un désavantage de cette condition frontière est l'augmentation du pourcentage de convergence oscillatoire de l'énergie cinétique turbulente. Ceci est causé par le couplage entre la condition frontière et la viscosité tourbillonnaire calculé et implique une convergence plus lente.

C'est avec l'outil de post-traitement développé spécialement pour ce travail que des profils horizontaux ont été obtenus. Cet outil de post-traitement a été développé pour les cas 3D ou 2D. Les résultats de l'outil de post-traitement ont été comparés aux mesures en soufflerie de différents cas tests, pris de Røkenes (2009) et de L.H. Khurshudyan et Nekrasov (1981), ainsi qu'aux résultats du logiciel WAsP Engineering, J. Mann (2002), et trouvés supérieurs à ces derniers. Ce résultat était attendu puisque pour les cas étudiés WAsP Engineering était en dehors de sa plage de validité. Ceci dit la place de ce dernier est toujours pertinente dans le domaine de l'éolien. Cependant des outils de simulations pouvant tenir compte des effets non-linéaires de l'écoulement, comme celui présenté dans ce travail, deviennent nécessaires dans les cas de terrain complexe.

Pour accomplir ceci, la norme IEC 61400-1 (2005) a été utilisée dans laquelle la limite maximum de l'écart-type des fluctuations, σ_1 , est bien définie. Dans le cas d'une modélisation numérique avec un modèle de turbulence à deux équations tel qu'utilisé dans ce travail, il devient important d'avoir une idée de l'anisotropie de la turbulence pour pouvoir relier l'énergie cinétique turbulente, k , qui peut être vue comme une moyenne des variances, et l'écart-type dans la direction du vent. Cette intensité de turbulence est associée à la fluctuation du vent dans la direction principale de l'écoulement. Le profil cisailé du vent est un des paramètres importants. Il a été pris en compte par régression à travers l'exposant de la loi de puissance qui représente le cas de chargement qu'une éolienne doit pouvoir supporter.

Une nouvelle méthode non-linéaire d'évaluation de l'exposant de la loi de puissance a été proposée. Dans cette nouvelle méthode, un autre paramètre additionnel est inclus indiquant la différence de hauteur apparente de la nacelle, La nouvelle procédure par régression non-linéaire est plus précise que la régression linéaire pour décrire les différents profils de vent avec une loi

de puissance. Le paramètre supplémentaire β permet d'évaluer que le profil de vent est moins demandant structurellement si sa valeur est positive. Cependant, pour comparer avec le profil de la norme IEC dans le cas où l'exposant α dépasse la limite et β est très élevé ne peut être fait directement. Une analyse minutieuse du profil de vitesse doit être faite dans ce cas. Une étude pour évaluer les paramètres α et β produisant un profil de vents moins dommageables que celui imposé par la norme permettrait d'obtenir une directive claire à ce sujet pour une analyse simplifiée avec ces paramètres. L'erreur quadratique servant à l'évaluation de la validité des méthodes de régression pour une loi de puissance a été considérée. Cette erreur est plus faible de façon générale avec la méthode de régression non-linéaire qu'avec la méthode linéaire.

Finalement, la performance de recherche modifiée de faces et de cellules dans le cadre de ce travail a été testée. Aussi, l'outil de post-traitement a été modifié pour tester, sur un cas théorique, une procédure d'analyse détaillée du vent à la position des pales de l'éolienne pour toutes les positions angulaires possibles. Cette procédure devrait permettre une étude de chargement cyclique des pales d'éolienne et devrait être considérée pour évaluer plus précisément l'intégrité structurelle d'une éolienne sur un site donné. Il va sans dire qu'une étude d'adéquation d'un site éolien doit se faire pour les vents provenant de toutes les directions. Il est aussi possible d'utiliser la procédure proposée dans ce travail dans ce contexte.

RECOMMANDATIONS

Un travail pour évaluer l'adéquation d'un site en terrain complexe à l'égard de l'intégrité structurelle d'une éolienne a été effectué. Bien sûr il reste encore du travail à faire. Voici quelques suggestions et recommandations pour des travaux futurs :

- Il serait intéressant d'effectuer des simulations en 3D dans différentes directions en utilisant des vitesses selon une distribution de Rayleigh et de comparer les résultats en utilisant la procédure proposée dans ce travail avec les résultats de WAsP Engineering.
- Dans le cadre d'une simulation 3D, l'étude de différentes conditions dynamiques de vents limitées par la norme IEC 61400-1 (2005) serait intéressante. Ce travail pourrait être jumelé avec une étude détaillée des vitesses ou forces sur chaque pale en fonction de la position angulaire comme testée, pour un cas théorique, dans la section de validation de l'outil de post-traitement.
- Un profil de vent vertical est proposé avec l'équation de puissance par son exposant. En 3D, une procédure similaire pourrait être utilisée pour obtenir un profil de vent cisailé à l'horizontale.
- Toujours en 3D, un cas avec couvert forestier, en utilisant la nouvelle condition frontière *Shear*, pourrait être effectué. De plus, investiguer l'impact en terrain complexe de l'utilisation des facteurs de correction proposée par Sumner et Masson (2011) serait bénéfique.
- Lors de l'utilisation de WAsP Engineering en terrain complexe, il serait important d'évaluer l'amélioration apportée par la procédure proposée par Mortensen et Antoniou (2006), de la comparer avec des mesures et la procédure proposées dans ce travail.
- Par rapport aux paramètres de positionnement évalués par l'outil développé, il serait intéressant d'évaluer aussi la moyenne sur le disque de ces variables. Ceci permettrait d'avoir une meilleure compréhension des paramètres d'intérêt.
- Finalement, générer des cartes pour les paramètres de positionnement évalués par l'outil serait une tâche à faire pour les cas 3D

ANNEXE I

AUTRE SIMULATION DU CAS V

Les résultats des trois autres séries de simulation pour le cas V de Røkenes et Krogstad (2009) sont présentés ici. En général ces résultats sont en accord avec les mesures en soufflerie et les conclusions de la section 3.3 s'appliquent. Dans les profils verticaux, l'étendue des barres d'erreur varie selon les paramètres des différentes simulations.

Dans le cas des simulations grandeur soufflerie à la position $x/h = 11.0$ les hauteurs adimensionnelles proches parois sont faussées par la représentation grossière de la hauteur de la paroi à cette position. L'erreur de traitement ici est due au fait que la face au sol la plus proche n'est pas la face dans laquelle est incluse selon l'abscisse la position d'intérêt. Ceci introduit une erreur sur la hauteur calculée par la procédure décrite à l'Annexe II

1 Grandeur terrain avec un maillage de base 9×10 et conditions frontière *Fixe*

Tableau A I-1 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière *Fixe* au sommet du cas V en grandeur terrain pour la maillage de base 9×10

x/h	Var	p			%	Var	p			%
		min	moy	max			min	moy	max	
2.5	U	0.09	1.60	9.0	5.7	ϕ	0.56	1.82	4.9	5.7
4.3		0.03	2.39	9.5	17.1		0.05	1.82	5.2	0.0
6.1		0.08	2.58	11.0	8.6		0.10	2.71	9.8	8.6
6.7		0.09	2.34	6.6	2.9		0.23	3.71	9.8	20.0
7.3		0.17	2.13	5.2	5.6		0.08	1.68	16.4	5.6
7.9		0.27	2.54	9.5	0.0		0.01	1.54	4.6	0.0
8.5		0.03	2.69	15.6	31.4		0.18	1.20	4.2	0.0
8.9		0.10	2.64	13.0	17.1		0.34	1.21	2.5	0.0
9.3		0.00	2.09	13.5	17.1		0.21	1.68	7.2	0.0
9.9		0.03	1.82	13.8	17.1		0.11	3.95	14.2	54.3
10.5		0.04	1.67	9.3	14.3		0.00	1.70	12.0	8.6
11.0		0.08	1.67	4.8	8.6		0.02	0.87	7.2	8.6
2.5	k	0.09	1.50	9.9	14.3	$\overline{u'w'}$	0.01	3.20	36.9	14.3
4.3		0.02	1.30	4.6	2.9		0.04	2.10	7.3	14.3
6.1		0.09	2.11	12.9	8.6		0.29	2.55	7.7	5.7
6.7		0.12	2.81	7.8	17.1		0.20	3.03	10.0	17.1
7.3		0.17	2.64	11.0	27.8		0.01	2.22	12.4	8.3
7.9		0.09	2.29	9.9	5.6		0.01	1.81	8.3	11.1
8.5		0.10	1.18	6.5	5.7		0.06	2.04	17.2	0.0
8.9		0.03	1.23	9.1	5.7		0.03	1.05	6.9	5.7
9.3		0.02	0.92	6.1	2.9		0.03	1.18	7.5	5.7
9.9		0.03	1.57	10.1	2.9		0.02	1.05	6.7	8.6
10.5		0.03	1.19	8.5	11.4		0.05	1.16	7.5	8.6
11.0		0.00	1.16	7.3	2.9		0.02	0.90	5.3	5.7

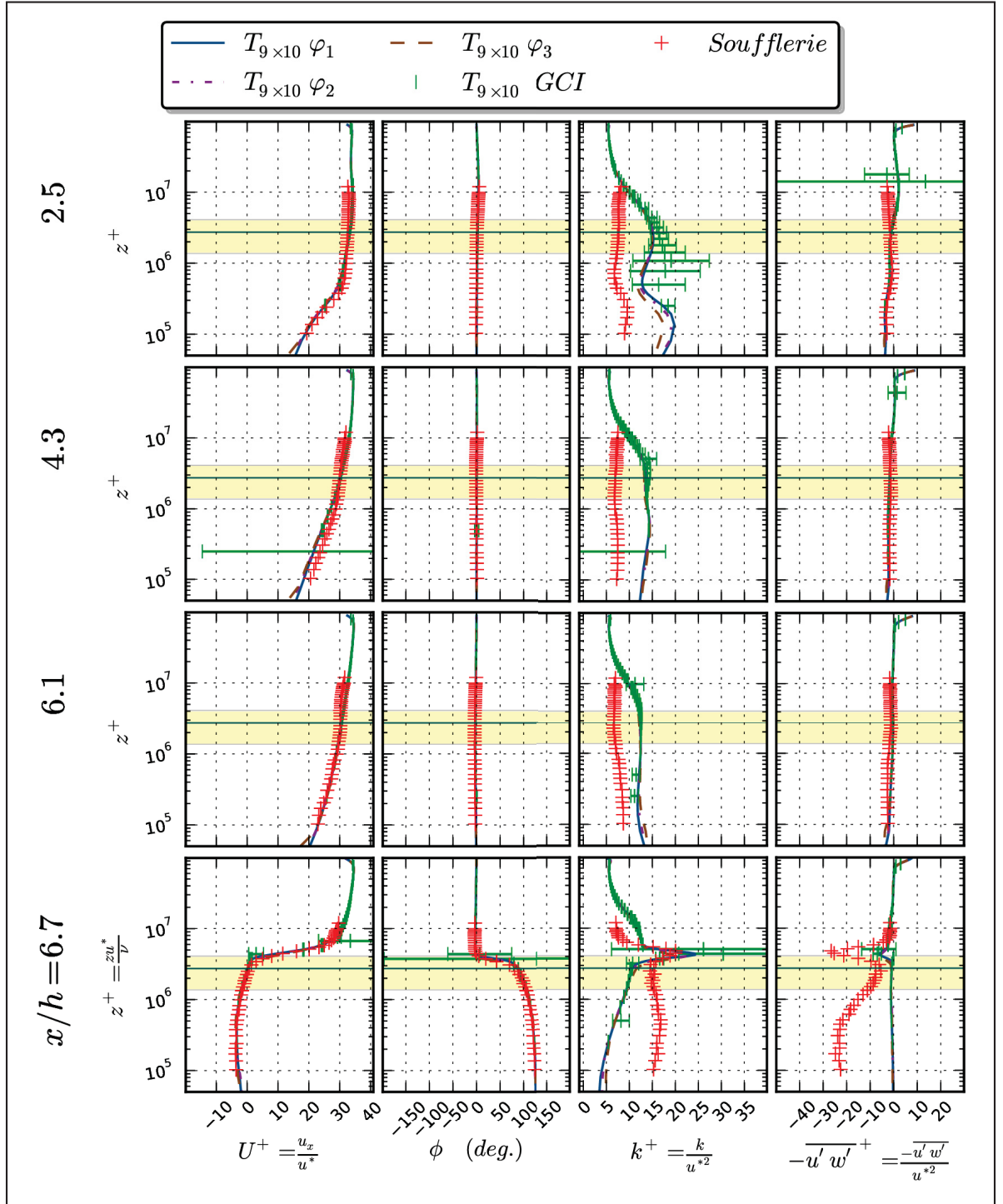


Figure A I-1 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $2.5 \leq x/h \leq 6.7$, grandeur terrain avec maillage de base 9×10 et condition frontière *Fixe*

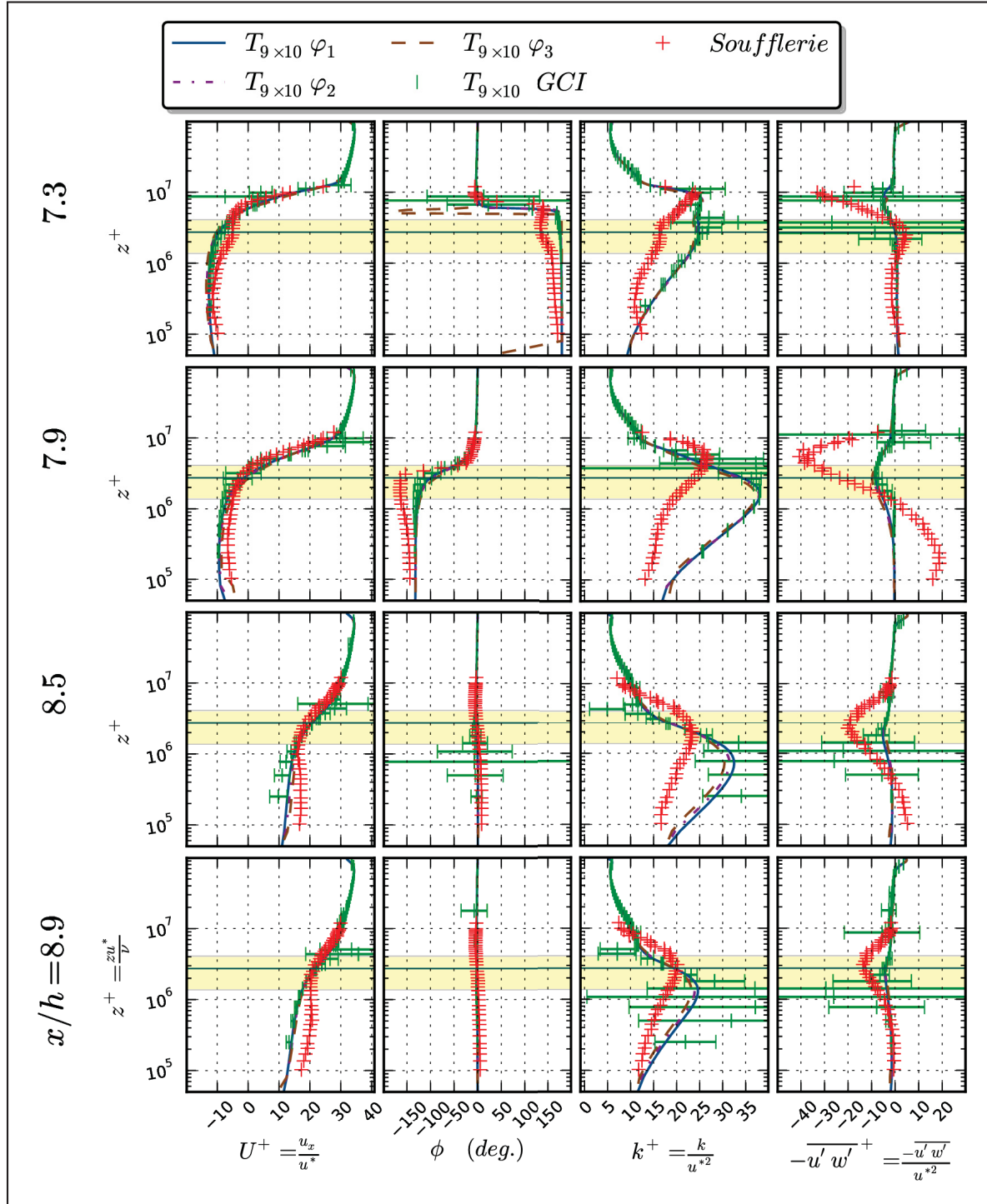


Figure A I-2 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $7.3 \leq x/h \leq 8.9$, grandeur terrain avec maillage de base 9×10 et condition frontière *Fixe*

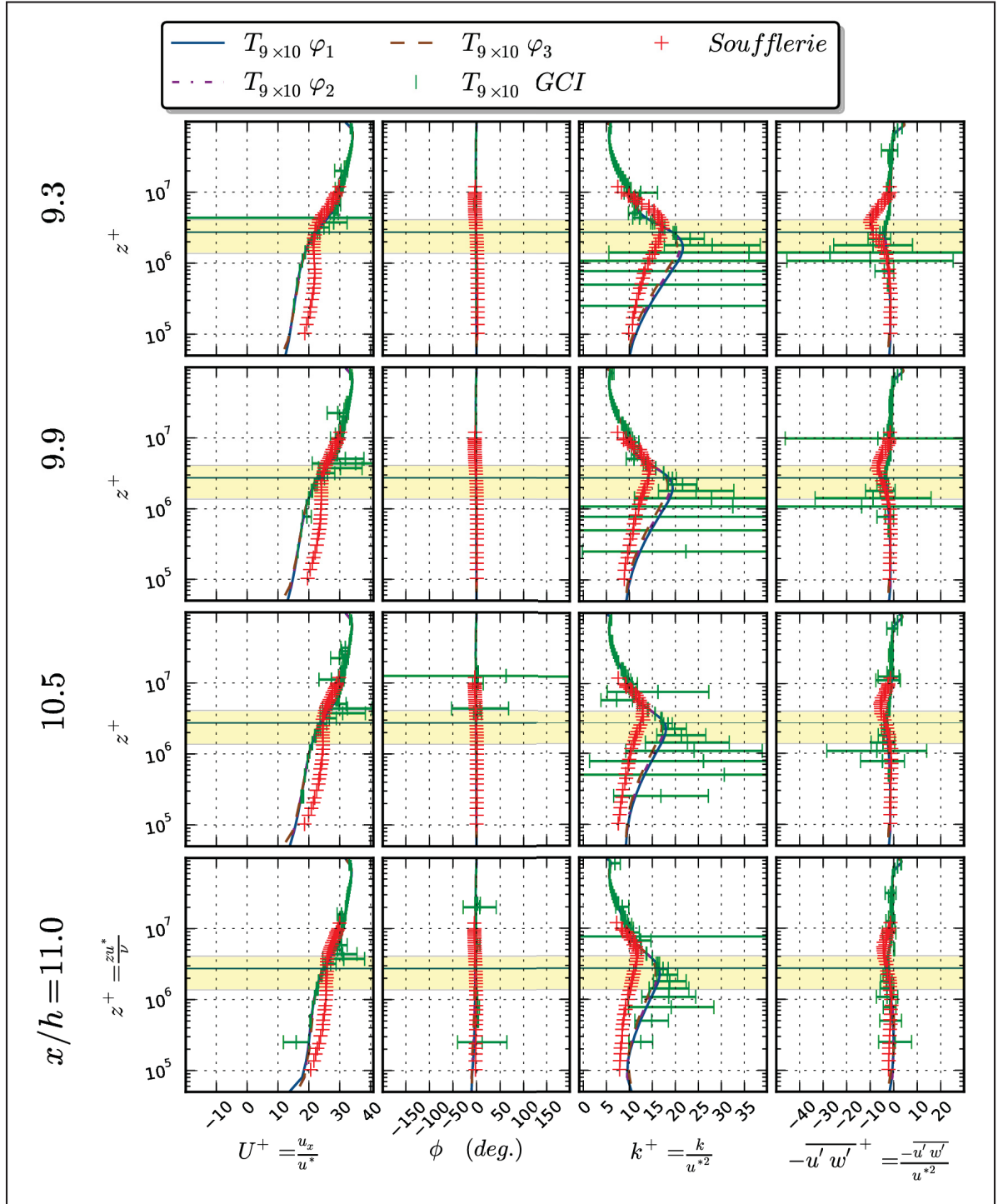


Figure A I-3 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $9.3 \leq x/h \leq 11.0$, grandeur terrain avec maillage de base 9×10 et condition frontière *Fixe*

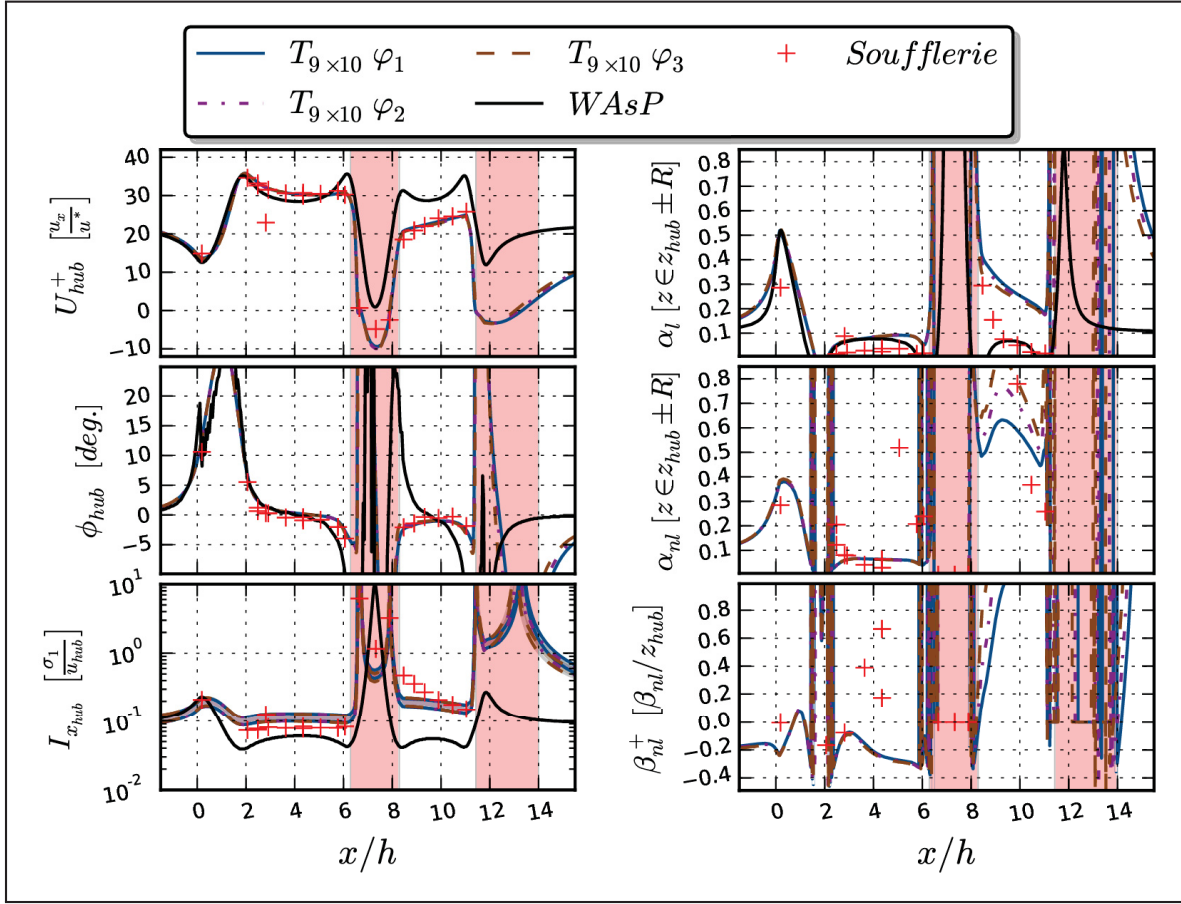


Figure A I-4 Profils horizontaux des données de soufflerie, simulation et des résultats de WAsP à hauteur de la nacelle, grandeur terrain avec maillage de base 9×10

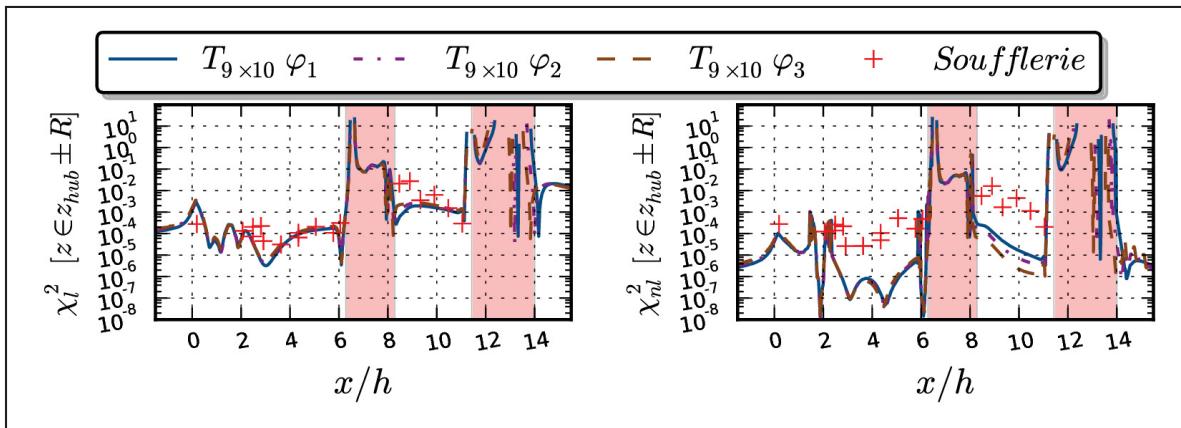


Figure A I-5 Valeur de $\chi^2(\alpha, \beta)$ de la méthode linéaire et non-linéaire pour les données de soufflerie et les simulations numériques, grandeur terrain avec maillage de base 9×10

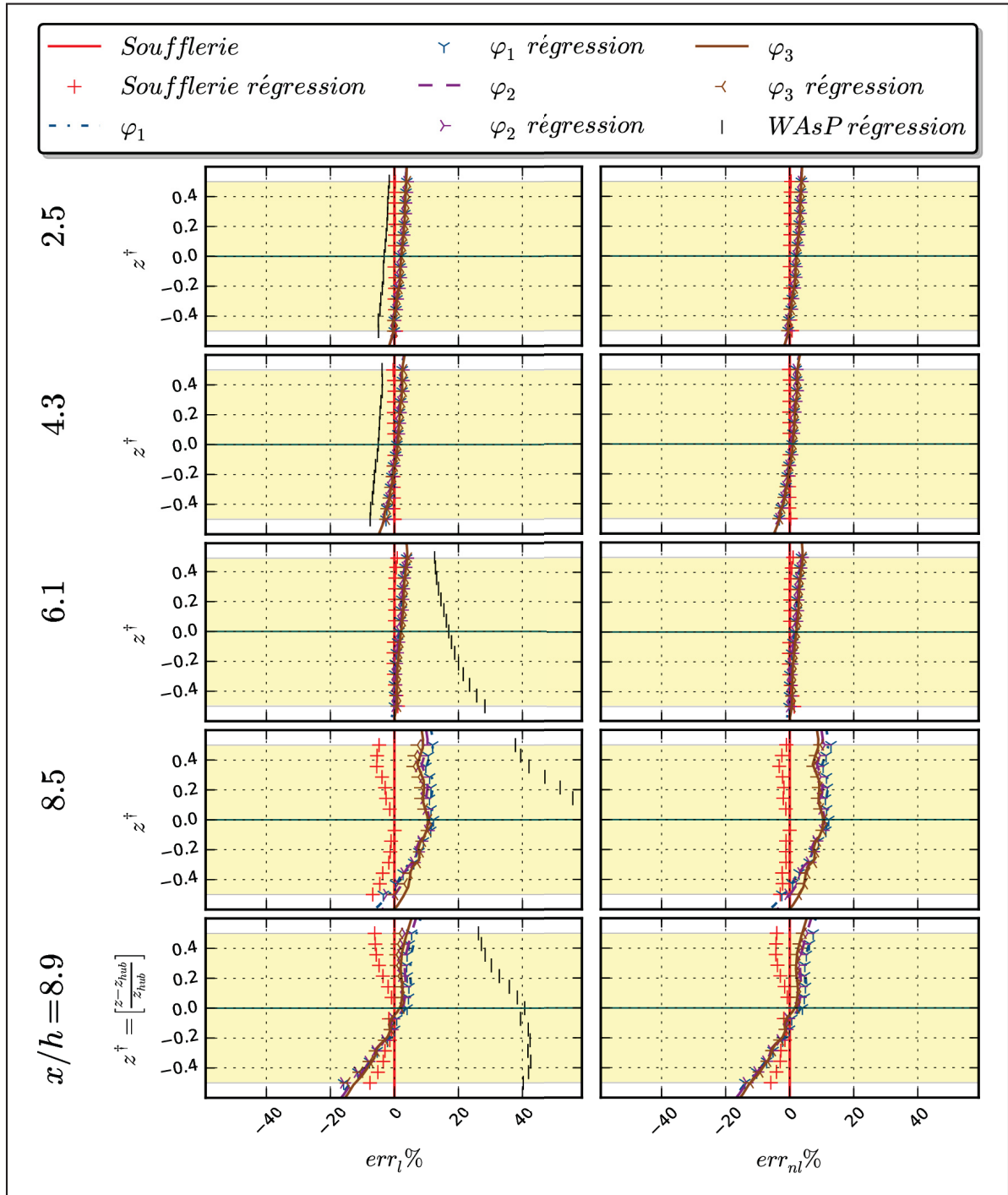


Figure A I-6 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des cas linéaire et non-linéaire du cas V grandeur terrain avec maillage de base 9×10 et condition frontière *Fixe*

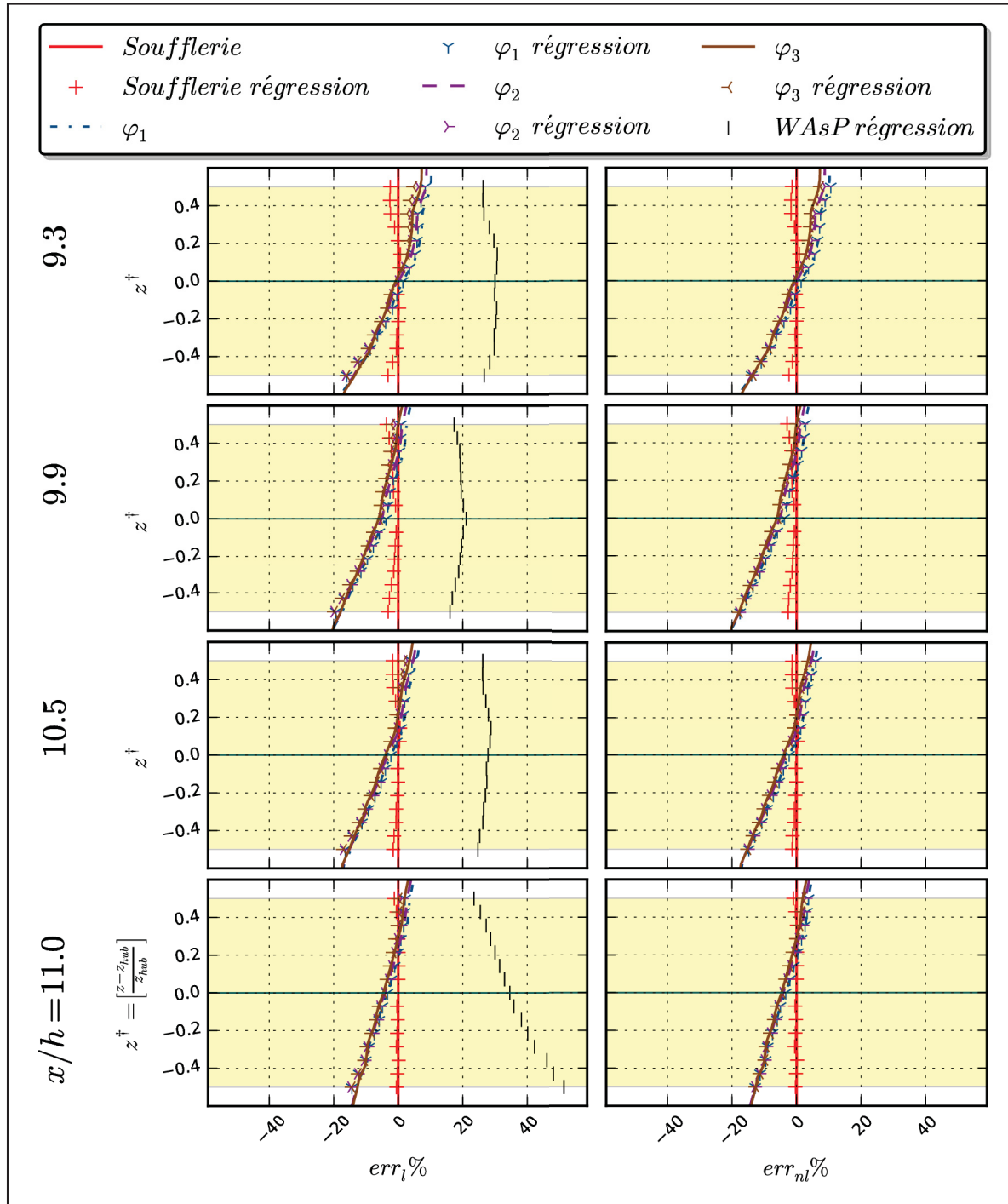


Figure A I-7 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des cas linéaire et non-linéaire du cas V grandeur terrain avec maillage de base 9×10 et condition frontière *Fixe*

2 Grandeur soufflerie avec un maillage de base 9×10 et conditions frontière *Fixe*

Tableau A I-2 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière *Fixe* au sommet du cas V en grandeur soufflerie pour la maillage de base 9×10

x/h	Var	p			%	Var	p			%
		min	moy	max			min	moy	max	
2.5	U	0.00	1.86	6.9	2.8	ϕ	0.23	1.90	5.6	2.8
4.3		0.34	2.38	9.9	11.1		0.06	1.90	5.2	0.0
6.1		0.47	2.30	6.4	5.6		0.88	2.92	11.0	13.9
6.7		0.07	2.17	7.7	8.3		0.07	3.35	14.3	22.2
7.3		0.17	2.29	11.9	5.6		0.10	1.68	12.9	5.6
7.9		0.05	2.28	10.5	0.0		0.43	1.60	5.2	0.0
8.5		0.08	2.33	6.4	19.4		0.19	1.24	4.4	0.0
8.9		0.01	2.12	7.9	11.1		0.34	1.51	10.8	0.0
9.3		0.06	1.81	5.8	11.1		0.23	1.59	4.5	0.0
9.9		0.03	1.82	15.8	11.1		0.13	3.59	12.5	41.7
10.5		0.02	1.69	11.0	5.6		0.01	1.64	11.5	13.9
11.0		0.03	1.57	8.2	8.6		0.01	0.97	7.9	14.3
2.5	k	0.14	1.67	11.7	11.1	$\overline{u'w'}$	0.03	2.16	11.1	13.9
4.3		0.35	1.69	9.4	5.6		0.05	2.01	7.1	8.3
6.1		0.11	2.26	11.7	8.3		0.10	2.33	9.3	8.3
6.7		0.05	2.46	9.7	2.8		0.06	2.79	8.9	19.4
7.3		0.07	2.64	23.6	16.7		0.00	2.22	7.8	11.1
7.9		0.09	1.88	11.0	16.7		0.04	1.83	23.1	5.6
8.5		0.07	1.31	10.6	2.8		0.04	1.36	7.7	0.0
8.9		0.02	1.11	8.0	5.6		0.02	1.34	8.8	5.6
9.3		0.00	1.13	8.8	2.8		0.02	0.79	3.3	5.6
9.9		0.01	1.04	6.0	2.8		0.03	1.03	4.8	5.6
10.5		0.02	1.10	4.8	5.6		0.09	1.13	6.5	5.6
11.0		0.03	1.07	3.9	8.6		0.16	1.35	6.0	5.7

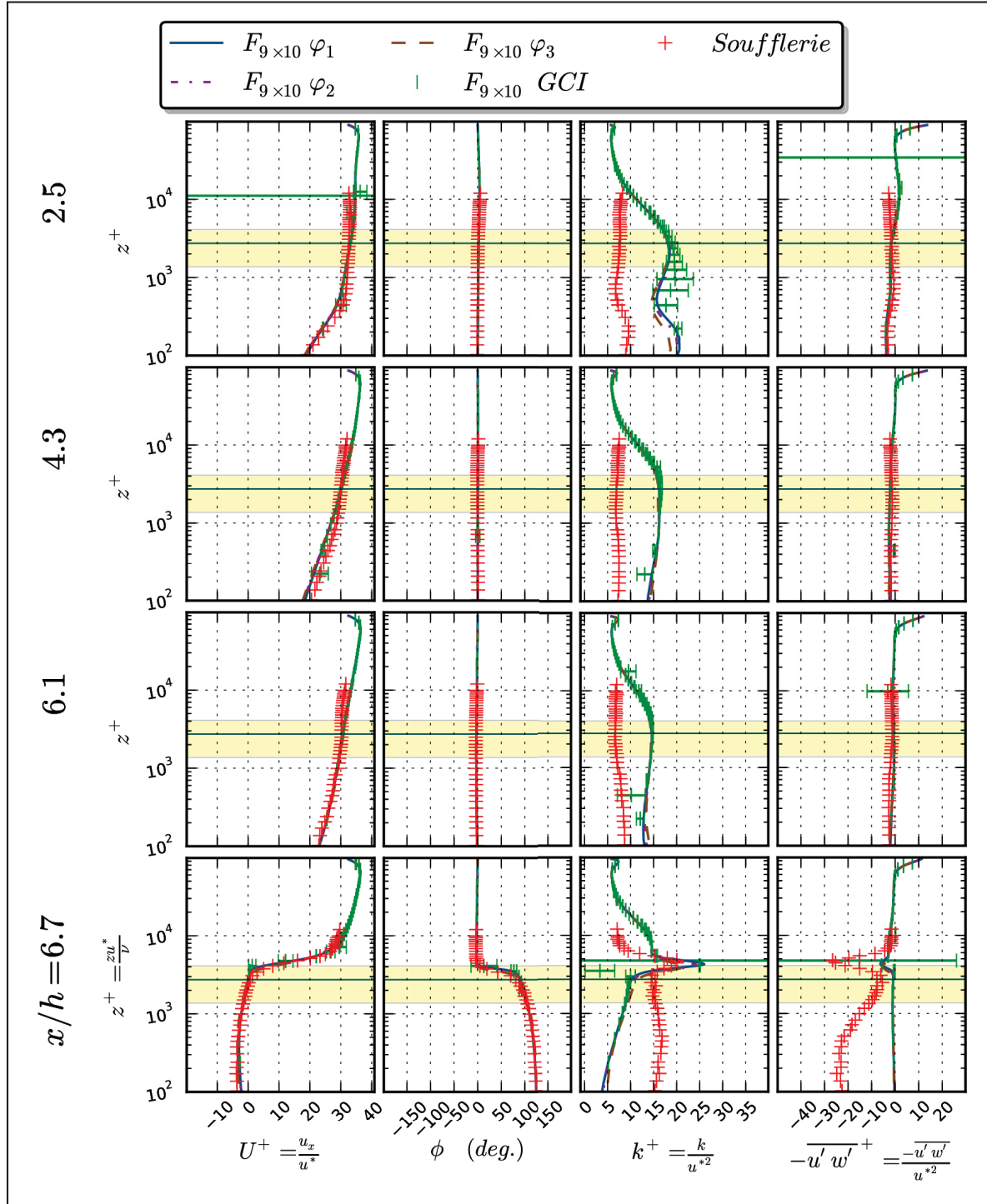


Figure A I-8 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $2.5 \leq x/h \leq 6.7$, conditions frontière *Fixe*

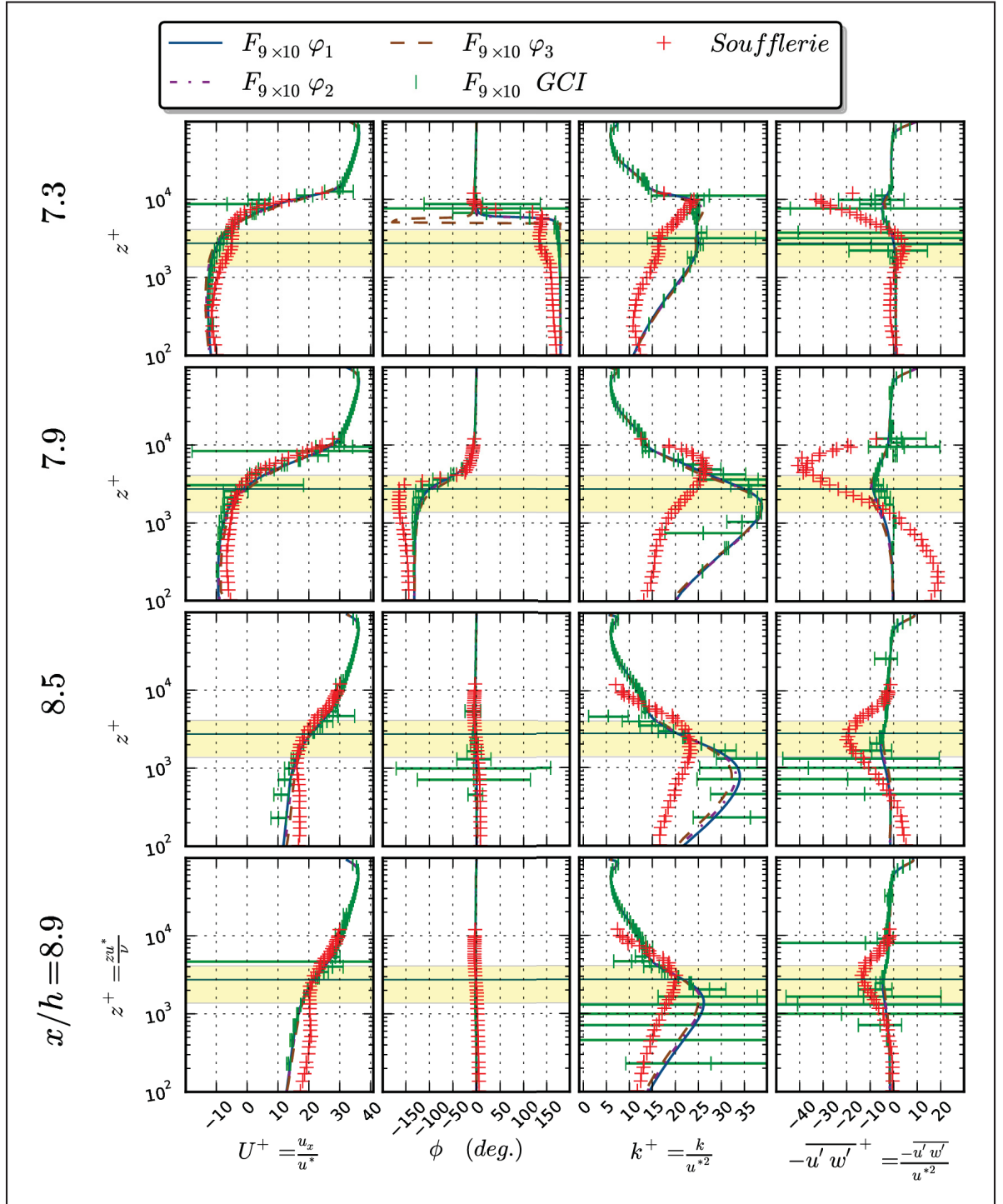


Figure A I-9 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $7.3 \leq x/h \leq 8.9$, conditions frontière *Fixe*

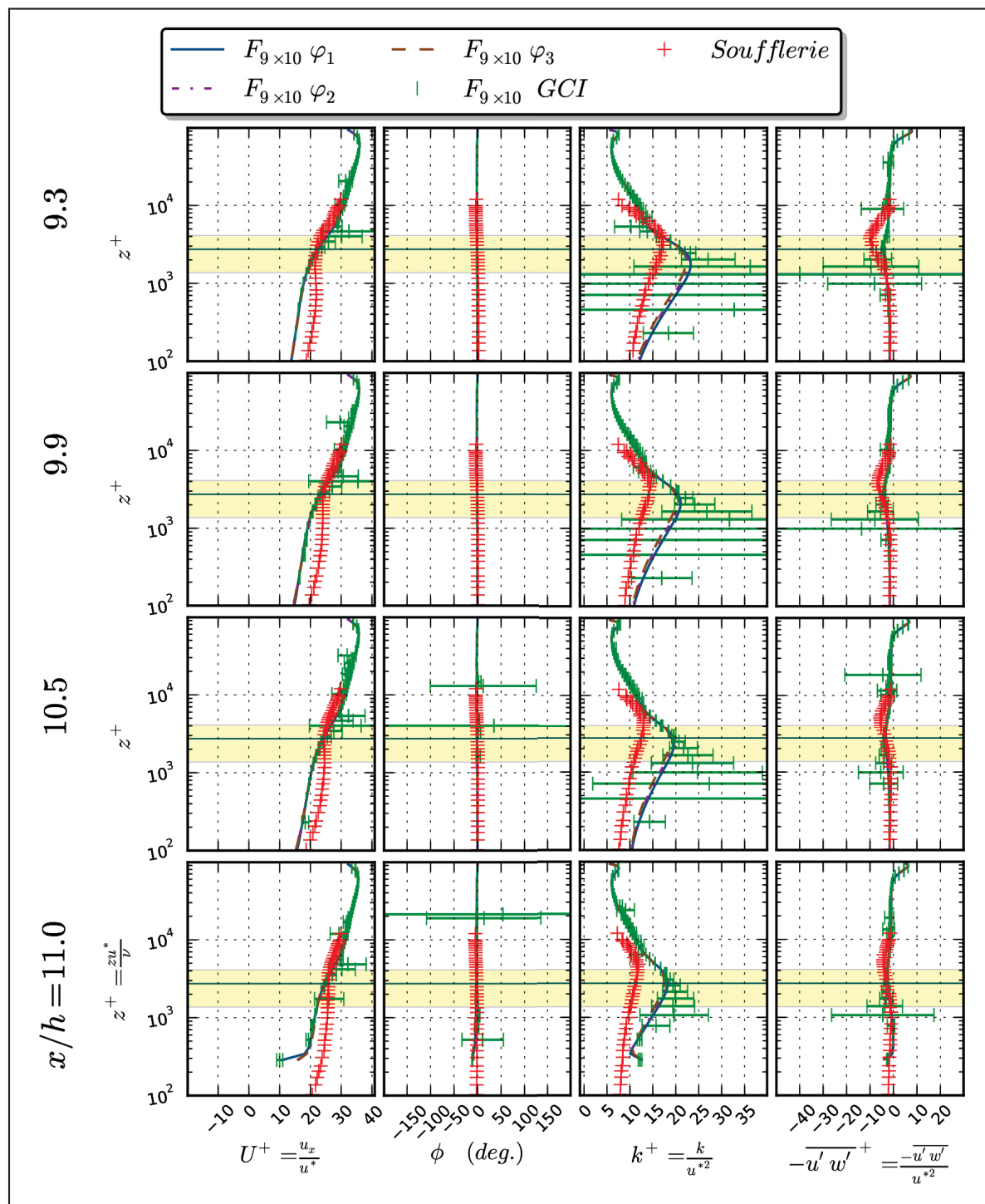


Figure A I-10 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $9.3 \leq x/h \leq 11.0$, conditions frontière *Fixe*

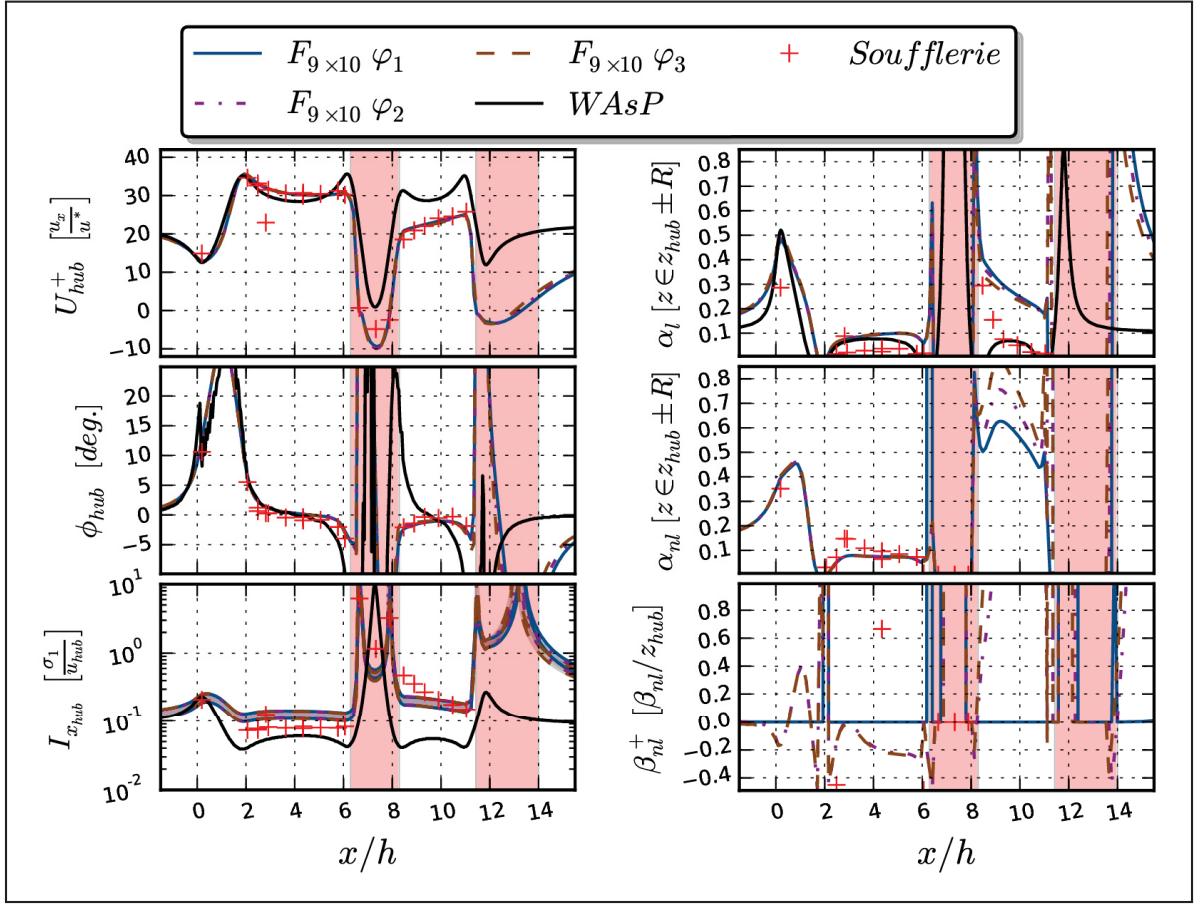


Figure A I-11 Profils horizontaux des données de soufflerie, simulation et des résultats de WAsP à hauteur de la nacelle, conditions frontière *Fixe*

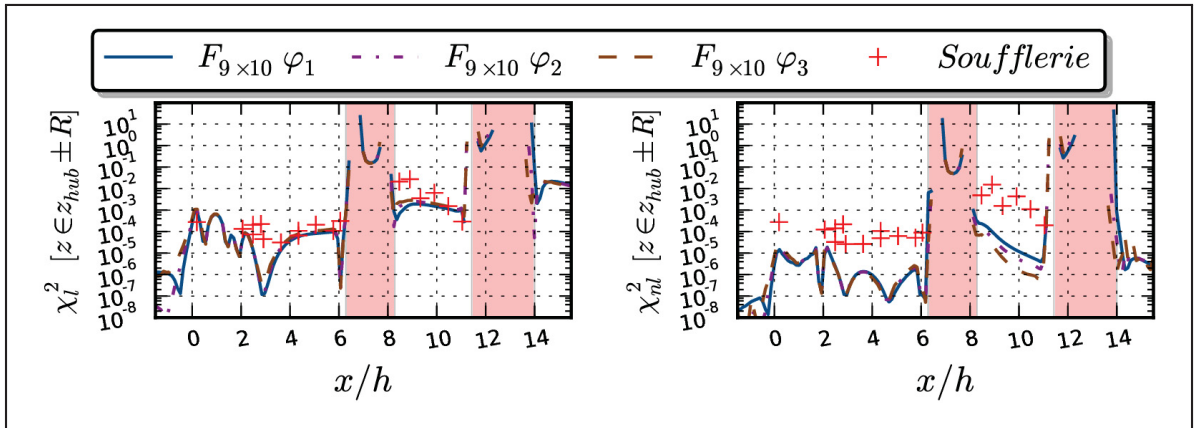


Figure A I-12 Valeur de $\chi^2(\alpha, \beta)$ de la méthode linéaire et non-linéaire pour les données de soufflerie et les simulations numériques, conditions frontière *Fixe*

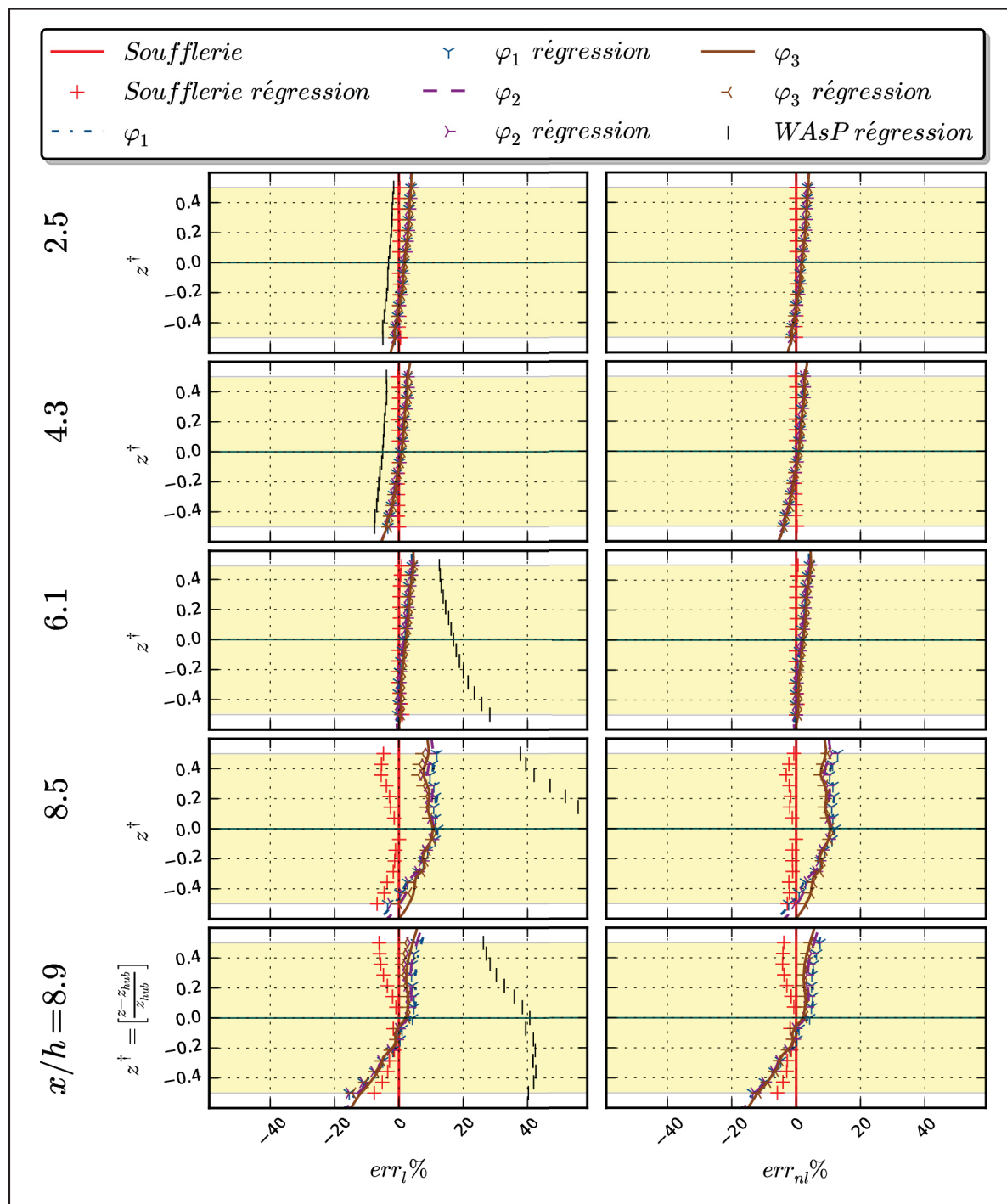


Figure A I-13 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des cas linéaire et non-linéaire, conditions frontière *Fixe*

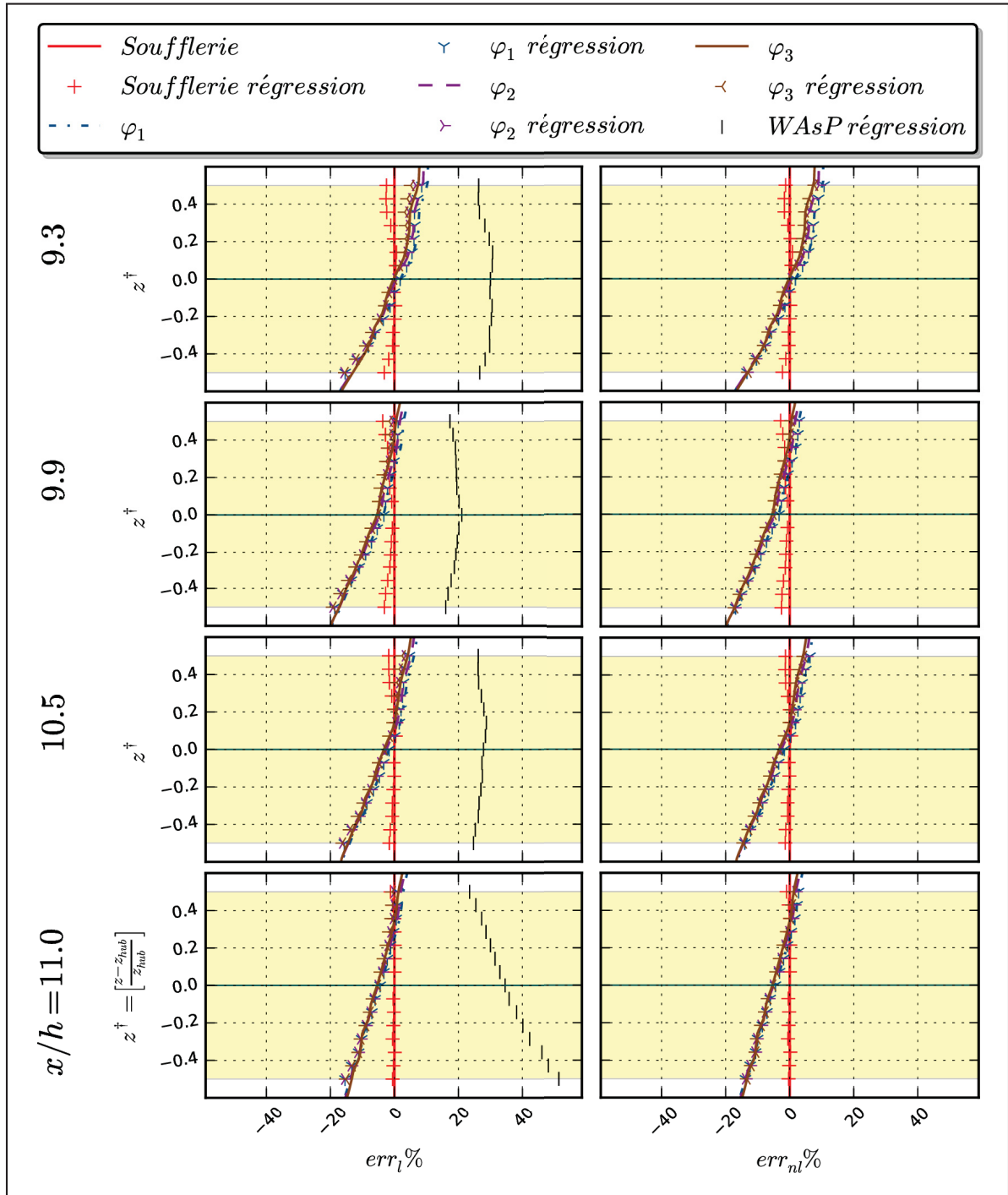


Figure A I-14 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des cas linéaire et non-linéaire, conditions frontière *Fixe*

3 Grandeur soufflerie avec un maillage de base 9×10 et conditions frontière *Shear*

Tableau A I-3 Valeurs de l'ordre local de précision, p , et du pourcentage de convergence oscillatoire, %, du GCI avec les conditions frontière de *Shear* au sommet du cas V en grandeur soufflerie pour la maillage de base 9×10

x/h	Var	p			%	Var	p			%
		min	moy	max			min	moy	max	
2.5	U	0.01	0.28	2.8	0.0	ϕ	0.04	2.22	6.9	5.6
4.3		0.00	0.23	0.9	0.0		0.06	2.57	12.0	5.6
6.1		0.00	0.88	4.3	0.0		0.10	1.89	6.4	11.1
6.7		0.01	1.08	6.6	2.8		0.10	2.59	6.7	11.1
7.3		0.00	1.15	2.9	2.8		0.28	1.58	13.0	5.6
7.9		0.00	0.59	2.0	0.0		0.59	1.45	4.4	0.0
8.5		0.01	0.60	3.6	2.8		0.21	0.98	2.3	0.0
8.9		0.01	0.72	5.5	2.8		0.33	1.02	1.7	0.0
9.3		0.03	0.86	8.6	0.0		0.24	1.18	1.9	0.0
9.9		0.03	0.32	1.1	0.0		0.25	3.03	13.1	25.0
10.5		0.00	0.28	0.8	0.0		0.00	1.13	7.7	5.6
11.0		0.00	0.50	3.8	2.9		0.07	1.04	7.5	2.9
2.5	k	0.12	2.54	17.1	16.7	$\overline{u'w'}$	0.06	1.55	5.9	13.9
4.3		0.13	1.52	4.8	2.8		0.08	1.41	7.9	2.8
6.1		0.01	1.32	7.7	5.6		0.60	1.89	5.7	2.8
6.7		0.03	2.57	13.9	11.1		0.12	2.18	8.9	11.1
7.3		0.09	2.21	9.9	25.0		0.09	1.89	11.5	2.8
7.9		0.13	3.13	19.1	11.1		0.01	1.72	14.3	2.8
8.5		0.01	1.88	12.7	11.1		0.01	1.67	13.3	8.3
8.9		0.03	1.56	5.4	8.3		0.01	1.10	9.0	11.1
9.3		0.03	1.83	8.9	8.3		0.01	1.11	9.7	5.6
9.9		0.02	1.41	6.1	8.3		0.01	1.15	8.8	0.0
10.5		0.01	1.53	10.1	2.8		0.02	1.00	9.1	2.8
11.0		0.04	1.46	8.7	8.6		0.06	1.16	6.0	11.4

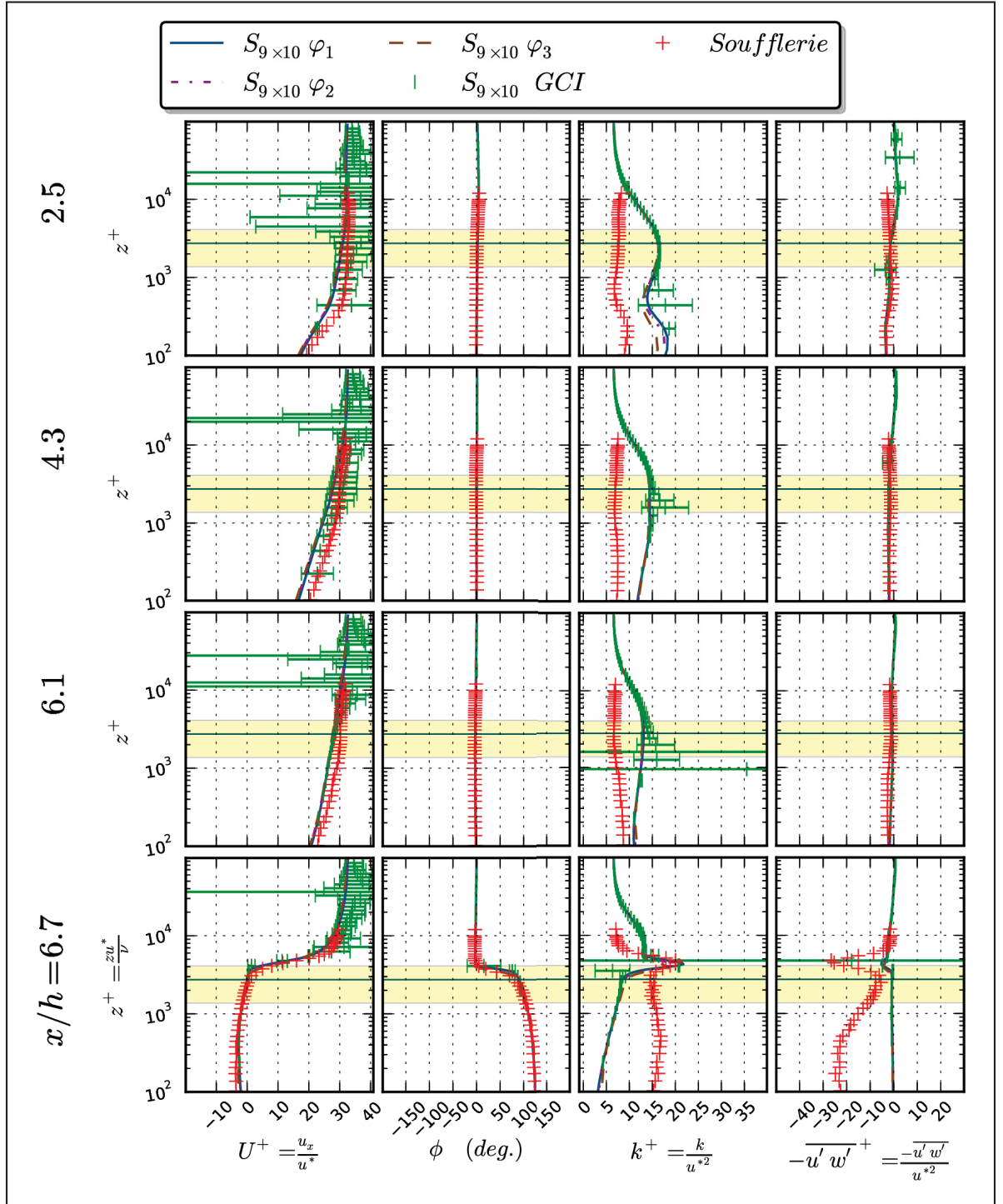


Figure A I-15 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $2.5 \leq x/h \leq 6.7$, conditions frontière de *Shear*

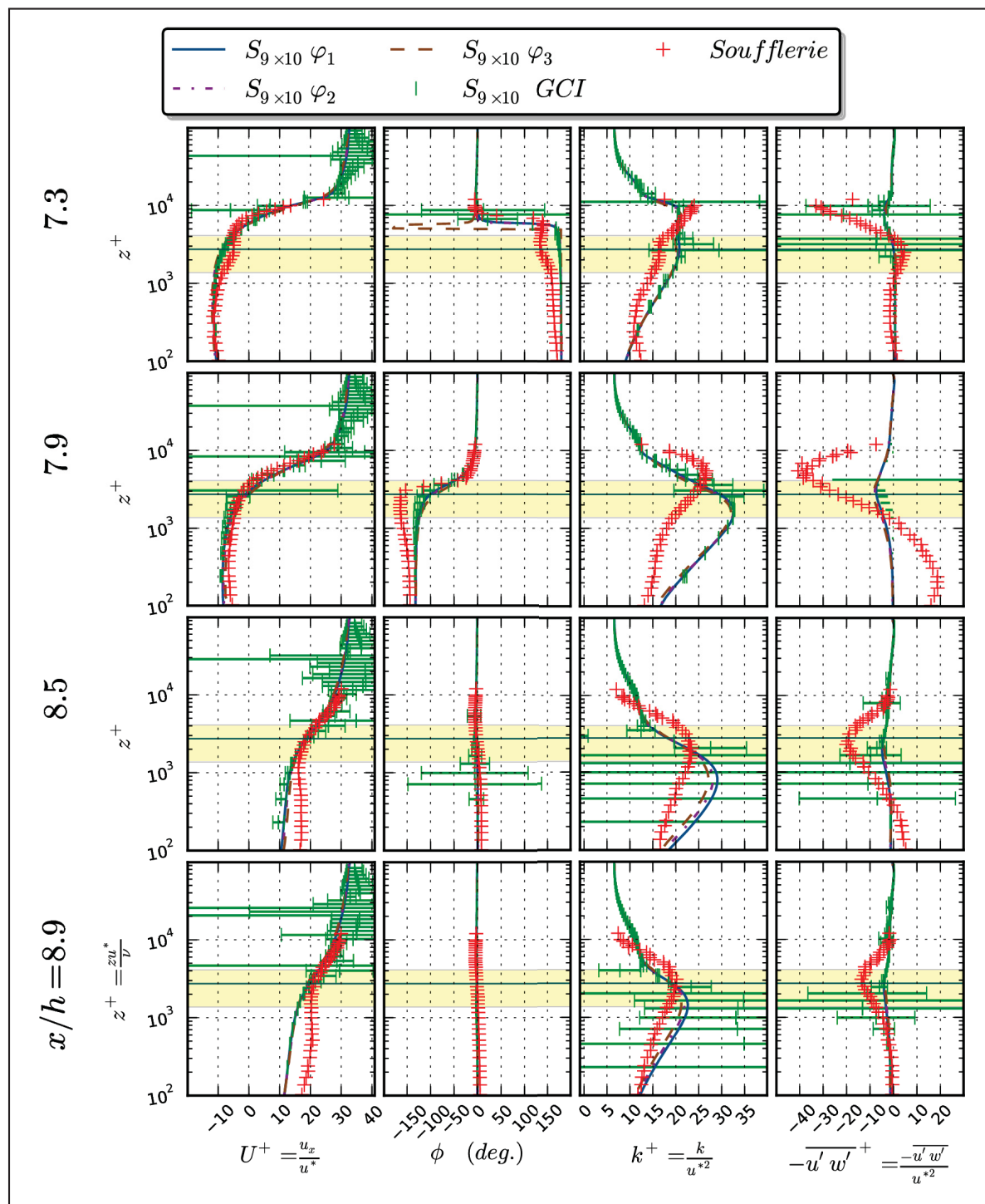


Figure A I-16 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $7.3 \leq x/h \leq 8.9$, conditions frontière de *Shear*

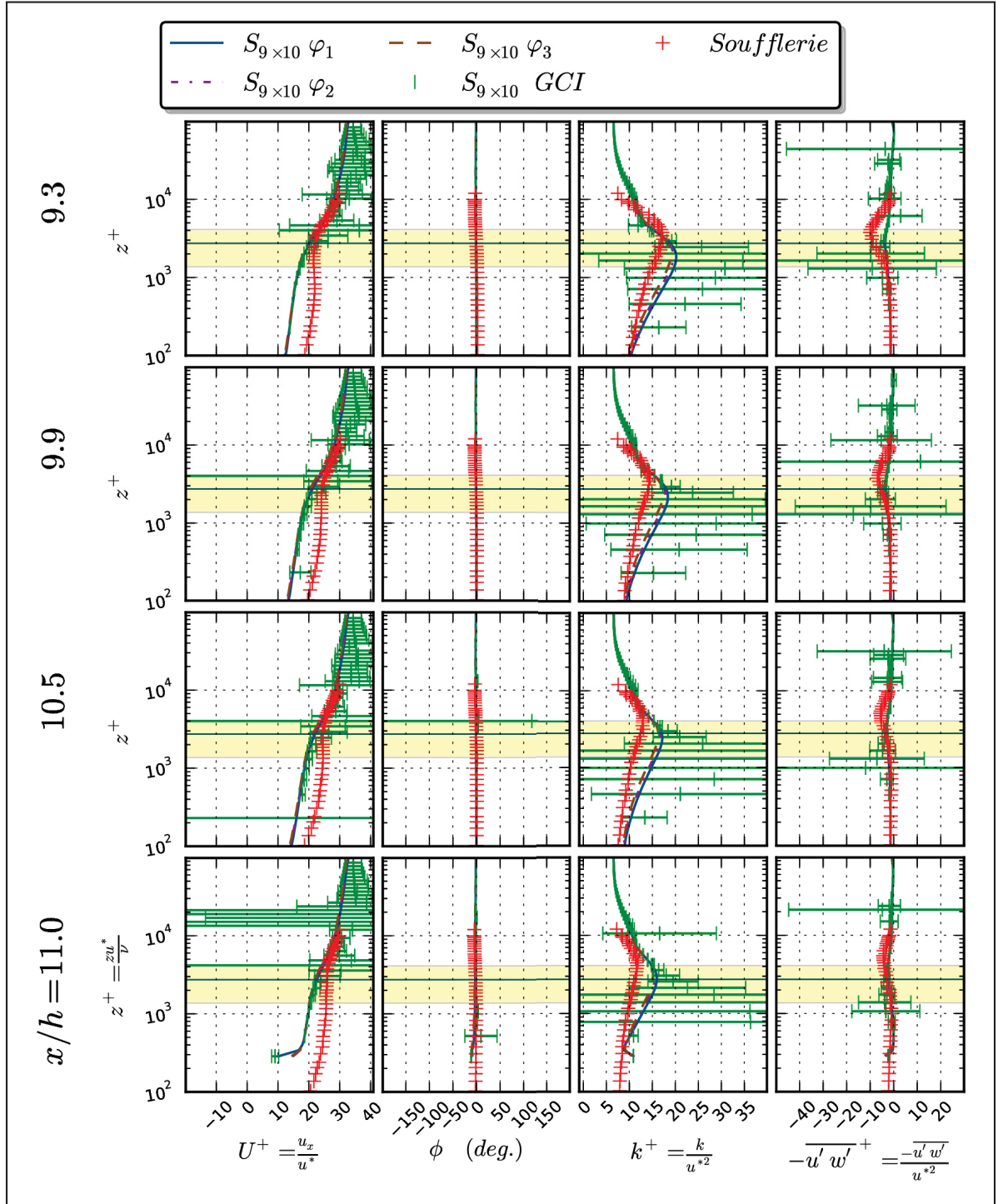


Figure A I-17 Profils verticaux des données de soufflerie et simulation pour les positions $9.3 \leq x/h \leq 11.0$, conditions frontière de *Shear*

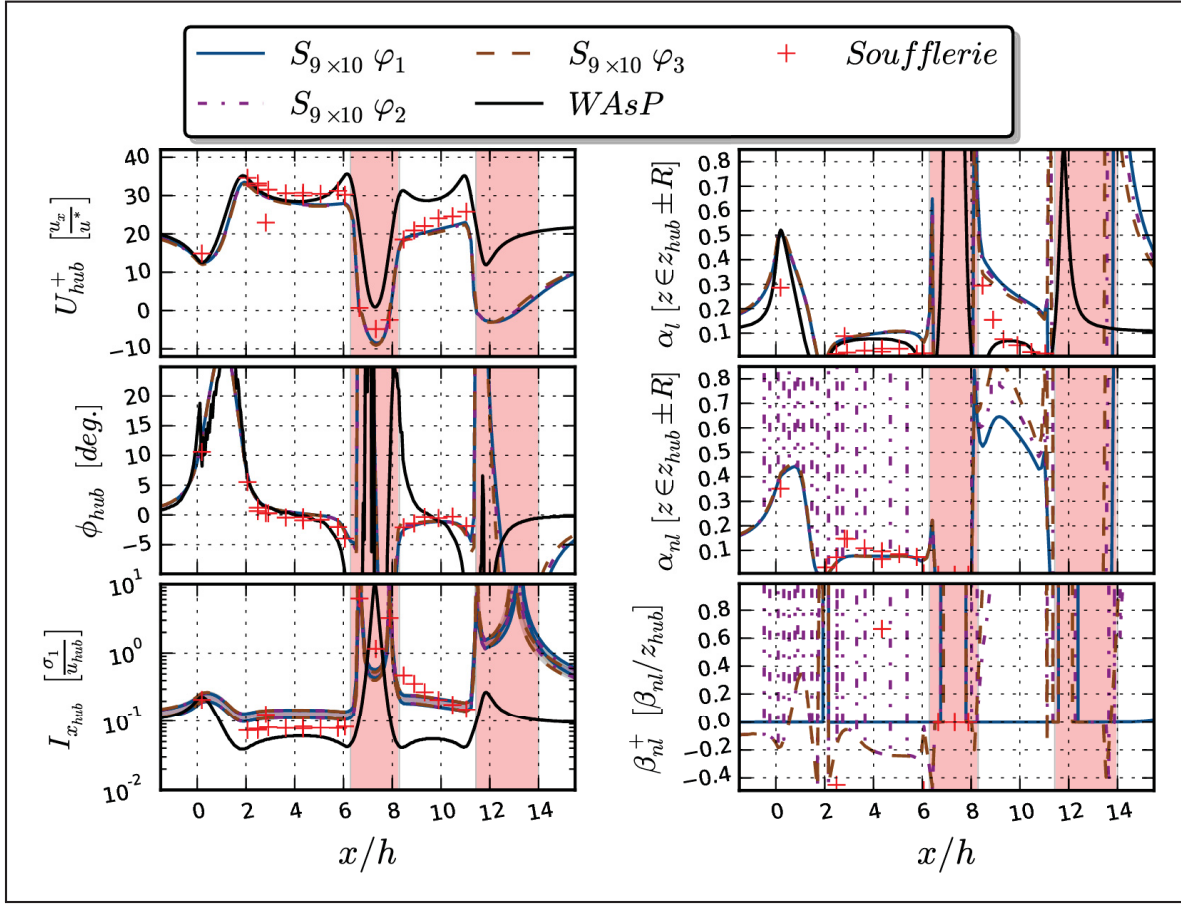


Figure A I-18 Profils horizontaux des données de soufflerie, simulation et des résultats de WAsP à hauteur de la nacelle, conditions frontière de *Shear*

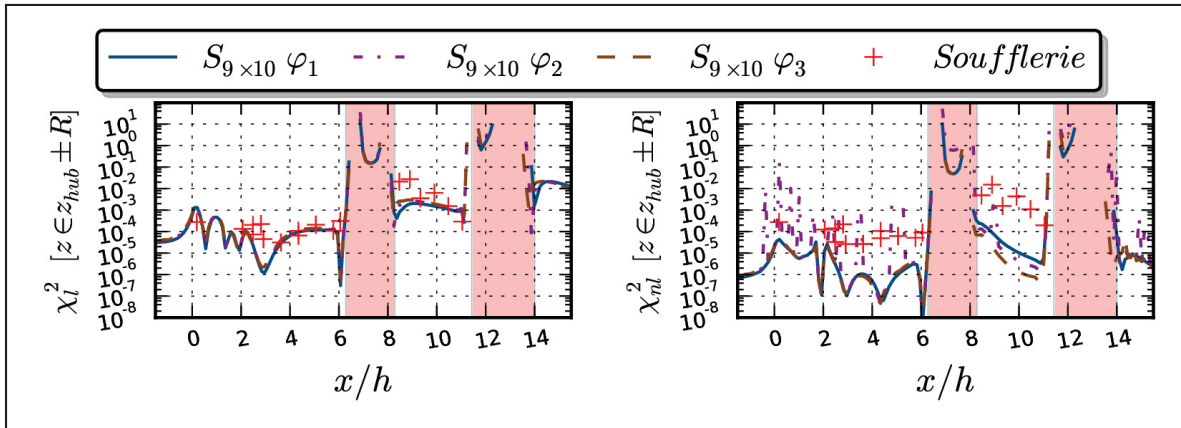


Figure A I-19 Valeur de $\chi^2(\alpha, \beta)$ de la méthode linéaire et non-linéaire pour les données de soufflerie et les simulations numériques, conditions frontière de *Shear*

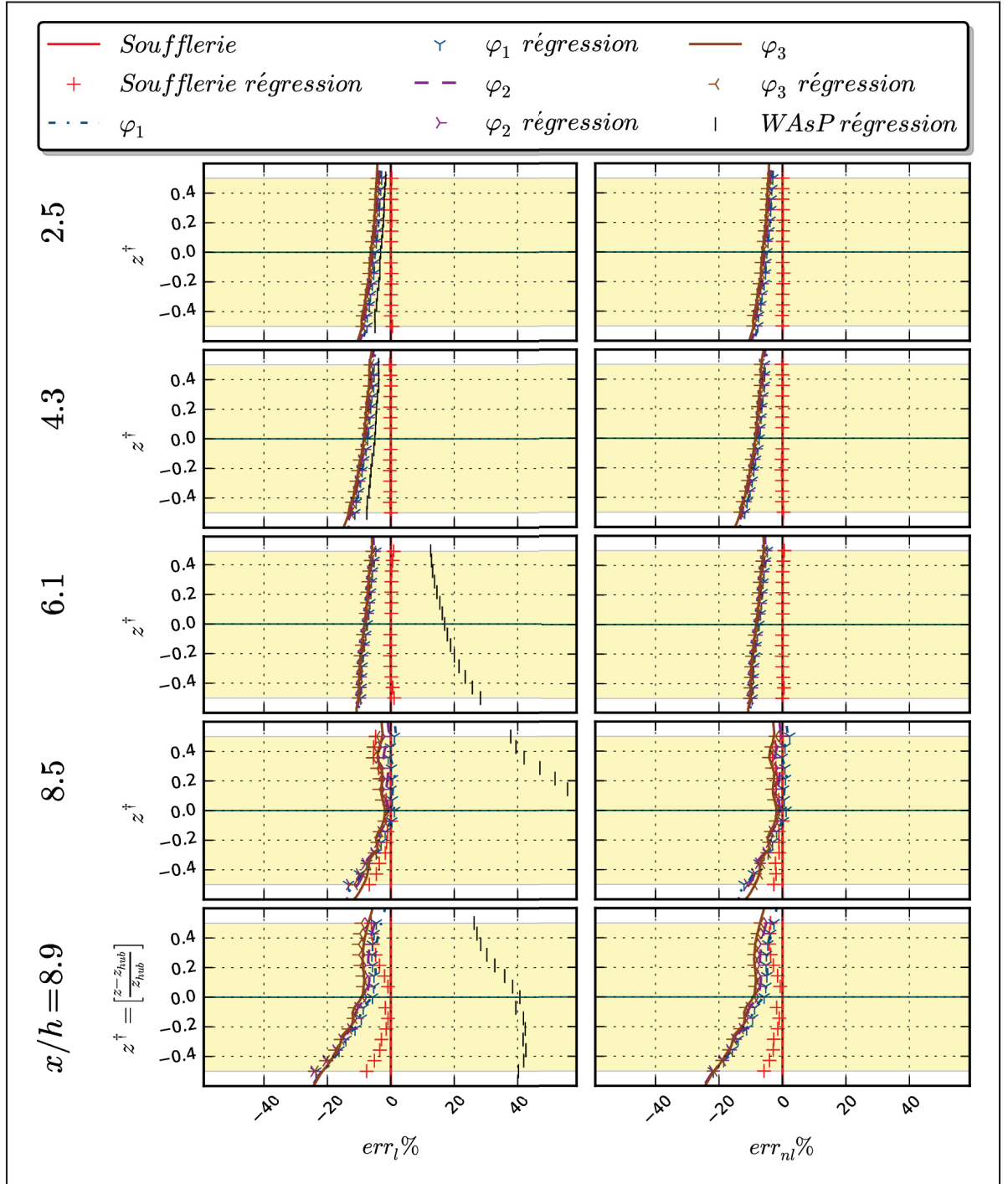


Figure A I-20 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des cas linéaire et non-linéaire, conditions frontière de *Shear*

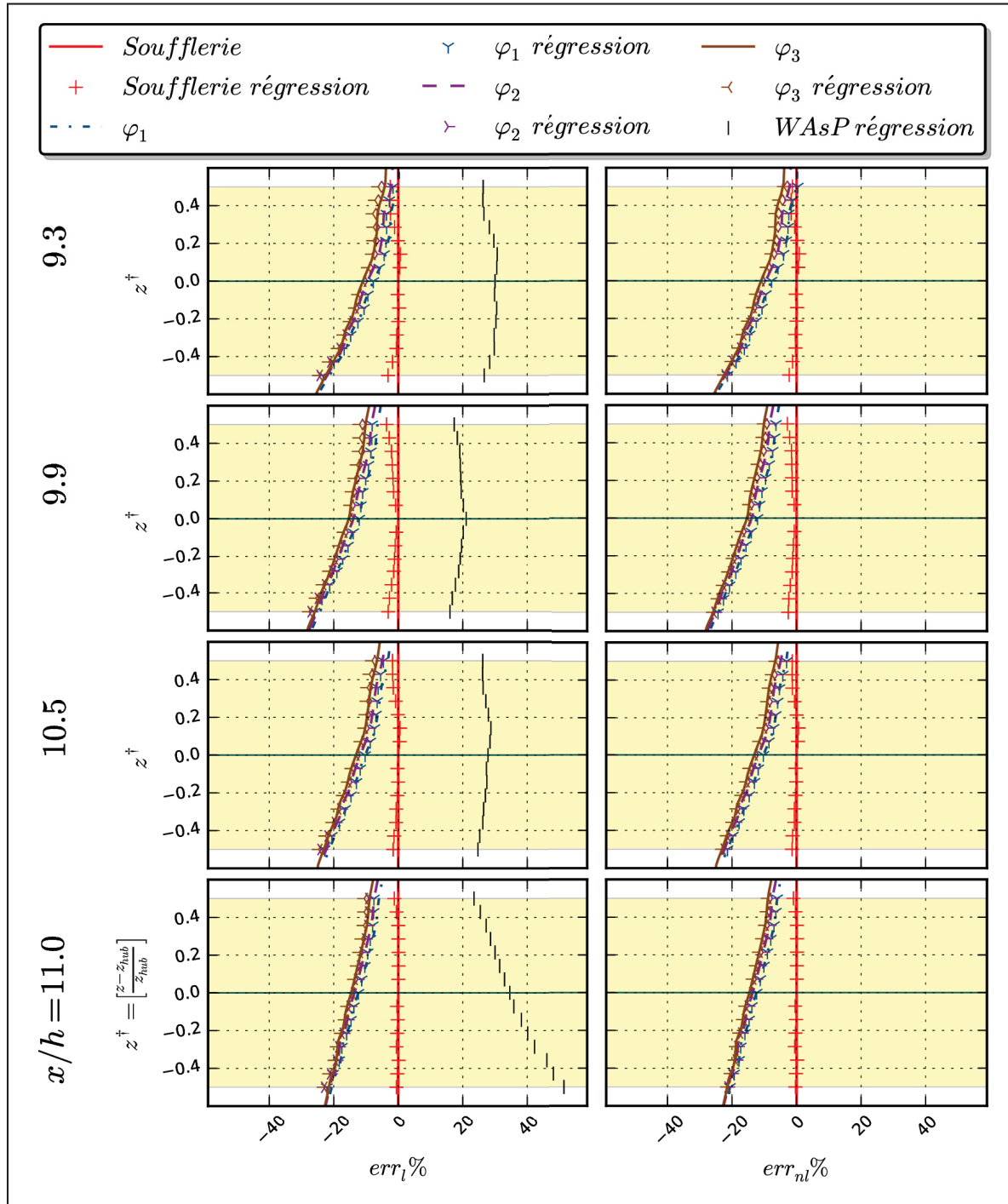


Figure A I-21 Comparaison entre les profils simulés et mesurés en soufflerie avec leurs approximations par la loi de puissance pour des cas linéaire et non-linéaire, conditions frontière de *Shear*

ANNEXE II

PROCÉDURE D'OBTENTION DE HAUTEUR DE SOL

Dans OpenFOAM il n'y a pas d'utilitaire permettant avec une position x, y d'obtenir la hauteur z d'une condition frontière. Il faut programmer une fonction qui accomplira cette tâche.

1 Hauteur et gradient de la surface

Pour obtenir la hauteur du sol, le centre de face appartenant au sol le plus près du point x, y est trouvé. La hauteur, z_p , du centre de face le plus près, et le vecteur de surface normale à ce point, $\vec{n}$, sont utilisés pour évaluer la hauteur exacte à la position déterminée. Ceci est fait en utilisant la notion de gradient et de fonction. En effet, la surface du sol peut être définie de manière générale comme une fonction $f(x, y, z) = 0$. Le gradient de cette fonction donne un vecteur perpendiculaire à la surface $f(x, y, z) = 0$.

$$\vec{n} = \nabla f(x, y, z) \quad (\text{A II-1})$$

Cependant, la fonction $f(x, y, z) = 0$ peut être facilement réécrite, avec une constante c et une fonction $g(x, y)$, sachant que cette fonction f peut être explicitée en z :

$$z = g(x, y) \quad (\text{A II-2})$$

$$f(x, y, z) = cz - cg(x, y) = 0$$

et

$$\vec{n} = \nabla f(x, y, z) = c \left[-\frac{\partial g(x, y)}{\partial x}, -\frac{\partial g(x, y)}{\partial y}, 1 \right] \quad (\text{A II-3})$$

De l'Eq. A II-3, il est noté que les dérivées en x et y de z sont liées au vecteur normal et Δz .

Ainsi la constante c et les dérivées s'écrivent :

$$\begin{aligned}\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} &= \frac{-n_x}{n_z} \\ \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} &= \frac{-n_y}{n_z} \\ c &= n_z\end{aligned}\tag{A II-4}$$

La nouvelle hauteur z est trouvée avec ces dérivées, la hauteur du centre de face le plus près, z_p et la distance entre le point x, y et le centre de face, $\Delta x, \Delta y$.

$$z = z_p + \Delta z = z_p + \Delta x \frac{-n_x}{n_z} + \Delta y \frac{-n_y}{n_z}\tag{A II-5}$$

Le vecteur normal, $\vec{n}$, est obtenu en utilisant la fonction membre `faceNormals` de la classe `polyPatch`, qui sera discutée brièvement dans la section suivante.

ANNEXE III

MÉTHODE ITÉRATIVE POUR LOCALISER LES EXTREMUMS

Afin de trouver le minimum de la fonction $\chi^2(\alpha, \beta)$, Eq. 2.17, un algorithme à directions de descente est utilisé. Le gradient indique la direction de la plus grande pente et indique la direction pour monter au sommet de la fonction. Le long de la droite tangente au gradient d'une position donnée la valeur du gradient de la fonction change ainsi en un point sur la droite le gradient est perpendiculaire à celle-ci. Suivant ce chemin en forme d'escalier, il est possible d'arriver aux extremums de la fonction. Les gradients le long de la droite sont évalués par une série de Taylor. Celle-ci peut être décrite de façon tensorielle Jasak (1996, p. 78). Ainsi, localement tout champ tensoriel $\phi(\vec{x})$ peut être évalué par l'approximation de Taylor comme suit.

$$\phi(\vec{x}) = \phi(\vec{x}_0) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{n!} \nabla^n \phi(\vec{x}_0) \otimes^n \{\vec{x} - \vec{x}_0\}^n \quad (\text{A III-1})$$

Pour trouver les paramètres qui définissent le minimum de la fonction $\chi^2(\alpha, \beta)$, le gradient est évalué en un point d'origine, $\vec{\alpha}_0$, puis évalué le long du vecteur de direction quelconque $\vec{d}_0$. En particulier, cette direction peut être celle de gradient au point $\vec{\alpha}_0$. Le point, $\vec{\alpha}_1$, où le vecteur de direction, $\vec{d}_0$, et l'approximation du gradient, $\vec{g}_1$, sont perpendiculaires, est trouvé. Avec la série de Taylor, Eq. A III-1, le champ de gradient de $\chi^2(\alpha, \beta)$ est évaluée en utilisant une approximation du premier ordre :

$$\nabla \chi^2(\vec{\alpha}) = \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) + \nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \otimes \{\vec{\alpha} - \vec{\alpha}_0\} \quad (\text{A III-2})$$

Le point $\vec{\alpha}_1$ où $\nabla \chi^2(\vec{\alpha}_1) \cdot \vec{d}_0 = 0$ est défini :

$$\vec{\alpha}_1 = \vec{\alpha}_0 + c_o \vec{d}_0 \quad (\text{A III-3})$$

Avec le produit scalaire entre le vecteur de direction, $\vec{d}_0$, et l'Eq. A III-2 en utilisant $\vec{\alpha} = \vec{\alpha}_1$, Eq. A III-3, l'équation à résoudre est obtenue :

$$\begin{aligned} \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_1) \cdot \vec{d}_0 &= 0 & (\text{A III-4}) \\ \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \cdot \vec{d}_0 + \nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \otimes \left\{ c_o \vec{d}_0 \right\} \cdot \vec{d}_0 &= 0 \\ \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \cdot \vec{d}_0 + c_o \nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \otimes^2 \left\{ \vec{d}_0 \otimes \vec{d}_0 \right\} &= 0 \end{aligned}$$

La valeur de c_o est évaluée à partir de l'Eq. A III-4 :

$$c_o = \frac{-\nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \cdot \vec{d}_0}{\nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \otimes^2 \left\{ \vec{d}_0 \right\}^2} \quad (\text{A III-5})$$

La valeur de c_o pour une direction générale peut être positive ou négative en fonction de l'orientation de $\vec{d}_0$ et du produit scalaire entre ce dernier et le gradient. De plus, dans ce cas général le produit tensoriel $\vec{d}_0 \otimes \vec{d}_0$ est symétrique et strictement positif cependant, la symétrie du tenseur Hessien, $\mathbf{H} = \nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha})$, ne garantit pas que la double contraction soit positive. La dérivée seconde dans la direction du vecteur $\vec{d}_0$ est obtenue par la double contraction du tenseur Hessien avec le produit tensoriel du vecteur unitaire de la direction choisie, $\hat{d}_0$, et s'écrit, $\nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \otimes^2 \left\{ \hat{d}_0 \right\}^2$. L'algorithme pointe alors dans la direction de l'extremum le plus près. Ceci est convenable pour autant que la fonction ne possède pas d'extremum local qui nuirait à la recherche du minimum global. Toutefois, une opération supplémentaire sur le tenseur Hessien pour évaluer si la position actuelle est dans la région d'un potentiel d'un extremum, d'un minimum ou d'un point de selle serait un ajout susceptible d'améliorer l'algorithme. En utilisant comme direction le gradient au point $\vec{\alpha}_0$ l'équation devient :

$$\begin{aligned} \vec{d}_0 &= \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) & (\text{A III-6}) \\ c_o &= \frac{-\nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \cdot \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0)}{\nabla \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \otimes^2 \left\{ \nabla \chi^2(\vec{\alpha}_0) \right\}^2} \end{aligned}$$

Dans ce cas, la valeur de c_0 est toujours de signe opposé à la dérivée seconde dans la direction du gradient. La fonction à minimiser et ses dérivées s'écrivent :

$$\begin{aligned}\chi^2(\alpha, \beta) &= \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{V(z_i)}{V(z_r)} \right) - \alpha \ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right]^2 \\ \frac{\partial \chi^2(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{V(z_i)}{V(z_r)} \right) - \alpha \ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right] \left[-\ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right] \\ \frac{\partial \chi^2(\alpha, \beta)}{\partial \beta} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{V(z_i)}{V(z_r)} \right) - \alpha \ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right] \left[\frac{-\alpha}{z_i + \beta} + \frac{\alpha}{z_r + \beta} \right]\end{aligned}\tag{A III-7}$$

Le tenseur Hessien, $\mathbf{H}$, s'obtient avec les dérivées secondes. En vertu des lois sur les dérivées partielles, ce tenseur est symétrique et est pleinement défini avec les dérivées secondes suivantes.

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \chi^2(\alpha, \beta)}{\partial \alpha^2} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right]^2 \\ \frac{\partial^2 \chi^2(\alpha, \beta)}{\partial \alpha \partial \beta} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{V(z_i)}{V(z_r)} \right) - 2\alpha \ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right] \left[\frac{-1}{z_i + \beta} + \frac{1}{z_r + \beta} \right] \\ \frac{\partial^2 \chi^2(\alpha, \beta)}{\partial \beta^2} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[\frac{-\alpha}{z_i + \beta} + \frac{\alpha}{z_r + \beta} \right]^2 + \\ &\quad 2 \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{V(z_i)}{V(z_r)} \right) - \alpha \ln \left(\frac{z_i + \beta}{z_r + \beta} \right) \right] \left[\frac{\alpha}{(z_i + \beta)^2} + \frac{-\alpha}{(z_r + \beta)^2} \right]\end{aligned}\tag{A III-8}$$

Le calcul du gradient et du tenseur Hessien ont des points communs qui permettent de regrouper des calculs. Il est cependant à remarquer que la sommation d'élément au carré n'est pas égal au carré de la sommation et les équations décrivant les valeurs, le gradient et le tenseur Hessien, voir Eqs. (A III-7 et A III-8), doivent être réécrits à cette fin. Avec les dérivées connues, il est possible de définir l'Algorithme 1.

Données : $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}), \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha})$

Résultat : $\vec{\alpha}$ tel que $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \cdot \nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \leq \epsilon^2$

$n \leftarrow 0;$

$\vec{g}_0 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha});$

$\mathbf{H} \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha});$

répéter

$$\left| \begin{array}{l} c_0 \leftarrow \frac{-\vec{g}_0 \cdot \vec{g}_0}{\mathbf{H} \otimes^2 \{\vec{g}_0\}^2}; \\ \vec{\alpha} \leftarrow \vec{\alpha} + c_0 \vec{g}_0; \\ \vec{g}_0 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha}); \\ \mathbf{H} \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha}); \\ n \leftarrow n + 1; \end{array} \right.$$

jusqu'à $\vec{g}_0 \cdot \vec{g}_0 < \epsilon^2$ ou $n \geq N;$

Algorithme 1: Recherche à directions de descentes maximum

Dans le but de tester l'algorithme de recherche du minimum quadratique plusieurs profils de vents ont été définis avec l'Eq. A III-9, une formulation équivalente de la loi de puissance décalée, Eq. 2.16. Les constante de référence décalée sont posée arbitrairement à $c_1 = 6 \text{ m/s}$ et $c_2 = 80 \text{ m}$. Plusieurs tests avec différentes valeurs de α et β ont été faits.

$$\frac{V(z)}{c_1} = \left(\frac{z + \beta}{c_2} \right)^\alpha \quad (\text{A III-9})$$

En variant le paramètre β , de l'Eq. A III-9 il peut être remarqué que ce dernier décale en hauteur le profil de la loi de puissance. En fait l'Eq. 2.16, formulation équivalente de la loi de puissance décalée, n'est pas pratique dans un cas comme celui-ci pour définir un profil de vents puisque sa formulation est récursive.

La discussion qui suit démontre l'équivalence des deux formulations :

Avec l'Eq. A III-9 il est possible d'en ressortir certaines égalités. Une d'entre elles est :

$$V(z) = c_1 \left(\frac{z + \beta}{c_2} \right)^\alpha \quad (\text{A III-10})$$

De cette dernière, il peut être déterminé que :

$$V(c_2) = c_1 \left(\frac{c_2 + \beta}{c_2} \right)^\alpha \quad (\text{A III-11})$$

En divisant l'Eq. A III-10 par l'Eq. A III-11 :

$$\frac{V(z)}{V(c_2)} = \left(\frac{z + \beta}{c_2 + \beta} \right)^\alpha \quad (\text{A III-12})$$

Lorsque la constante c_2 est posée à la valeur de la hauteur de référence z_r l'Eq. 2.16 est retrouvée, ce qu'il fallait démontrer.

Un exemple de fonction $\chi^2(\alpha, \beta)$ sur lequel est testé les algorithmes est montré à la Fig. A III-1. La Fig. A III-1 est obtenue en imposant un profil de vents selon la loi de puissance décalée Eq. A III-9 avec $\alpha = 0.3$ et $\beta = -10$. À partir d'une liste de 17 positions à la hauteur, z_i , des pales de l'éolienne une liste de vitesse, $V(z_i)$, est déduite entre les hauteurs de 40 mètres et 120 mètres. La hauteur de la nacelle, z_{hub} , est donc à 80 mètres. C'est à partir de cette liste de vitesse et de position que le travail de recherche de minimum commence. Les paramètres α , β , c_1 , et c_2 , de l'Eq. A III-9, servant à définir le profil de vents sont intentionnellement oubliés. Seul les deux listes sont gardées. Une hauteur de référence égale à la hauteur de la

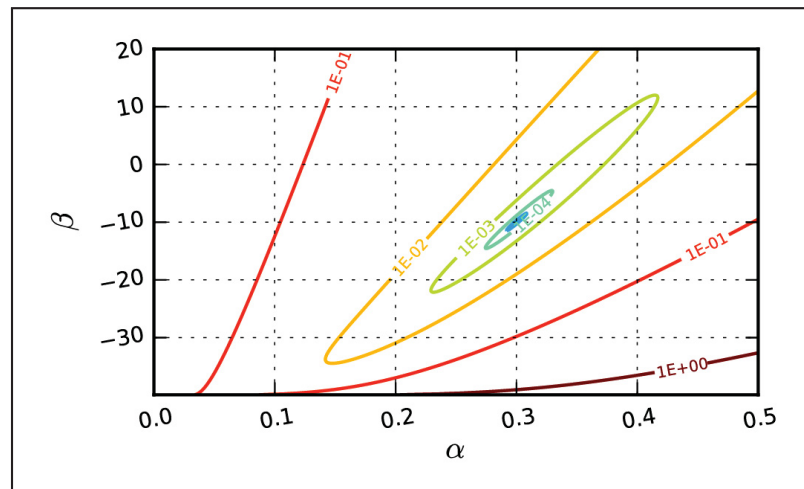


Figure A III-1 Exemple d'ajustement de loi de puissance aux profils du vent avec $\alpha = 0.3$ et $\beta = -10$ m avec $z_{hub} = 80$ m

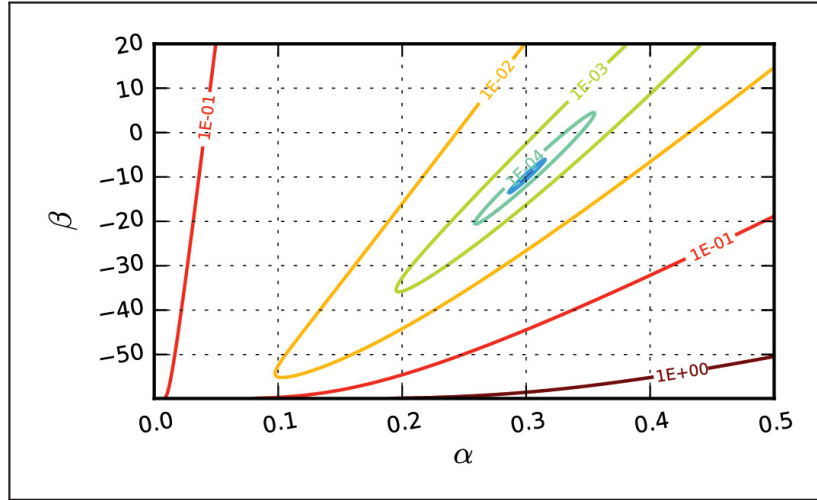


Figure A III-2 Exemple d'ajustement de loi de puissance
aux profils du vent avec $\alpha = 0.3$ et $\beta = -10$ m avec
 $z_{hub} = 100$ m

nacelle est définie et la vitesse à la hauteur de référence, $V(z_r)$, est trouvée à partir des listes de 17 vitesses et hauteurs. Avec ces deux valeurs ainsi que ces listes, l'erreur quadratique et ses dérivées sont évaluées. La Fig. A III-2 est obtenue de la même manière à l'exception que les 17 points de l'éolienne sont définis entre la hauteur de 60 mètres et 140 mètres apportant une hauteur de nacelle plus haute de 100 mètres. Dans le but de ne pas surcharger cette annexe, tout les autres test présentés sont fait avec les paramètres c_1 et c_2 définis plus haut, de plus, les liste de hauteurs, z_i , sont, comme pour la Fig. A III-1, définis entre les hauteurs de 40 mètres et 120 mètres.

L'Algorithme 1 permet de trouver le minimum de la fonction $\chi^2(\alpha, \beta)$. Comme le montre la Fig. A III-9, la recherche à direction de descente maximum, Algorithme 1, est dans ce cas particulièrement inefficace. Le chemin en escalier emprunté par l'Algorithme 1 est ce qui le rend inefficace. Il peut être remarqué que la direction de descente appropriée n'est pas la direction du gradient local, mais la direction décrite par le point deux itérations plus tard. C'est pourquoi un algorithme amélioré doit être développé.

Deux options s'offrent, utiliser la direction précédente pour évaluer une direction optimale qui sera appliquée en retard, ou calculer la direction optimale courante en chaque point. La

deuxième option demande plus de calcul à chaque itération, mais peut permettre une efficacité supérieure. Le désavantage de ces méthodes de recherche d'un extremum est leur instabilité. Puisque l'équation à minimiser implique des logarithmes et des logarithmes au carré l'approximation par série de Taylor est susceptible de ne pas bien approximer la fonction à minimiser. Pour cette raison l'Algorithme 4 est introduit. Ce dernier est une version limitée de l'Algorithme 3. La Fig. A III-3 montre le schéma du calcul des directions pour les trois nouveaux algorithmes.

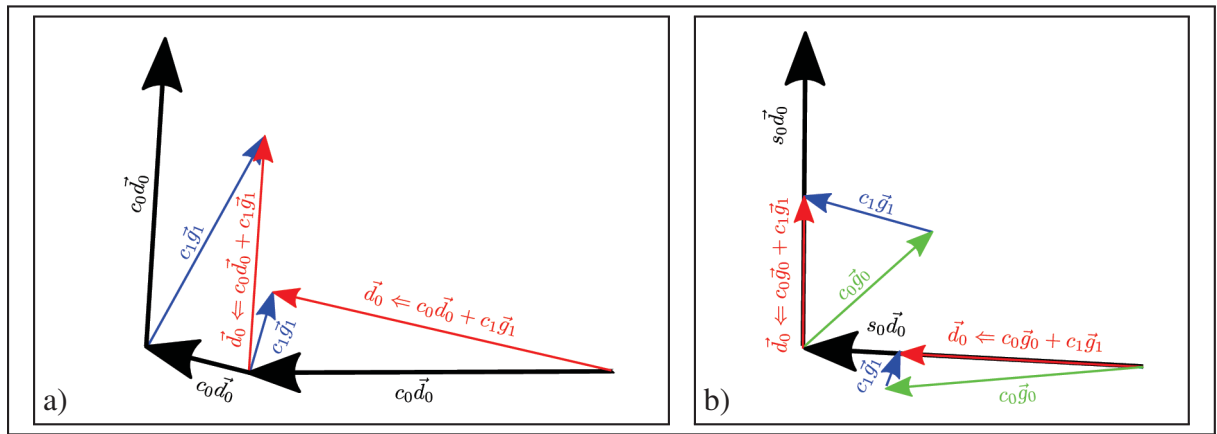


Figure A III-3 Représentation des vecteurs de recherche du minimum des deux algorithmes optimisés : a) Algorithme 2 et b) les Algorithmes (3 et 4)

Les résultats de chaque algorithme sont résumés dans les Tableaux (A III-1 à A III-5) pour les différents cas tests. Dû au retard sur la direction optimale de descente, c'est-à-dire que la direction optimale de descente est utilisée le pas de temps suivant, l'Algorithme 2 suit un chemin en spirale Figs. (A III-6 et A III-7). Cette spirale crée une inefficacité dans la recherche du minimum. Cette inefficacité peut être en partie levée en modifiant l'algorithme. L'Algorithme 3 ne fait pas disparaître complètement l'effet de spirale de l'Algorithme 2, mais l'atténue beaucoup, voir Figs. (A III-5 à A III-8). Des instabilités peuvent apparaître, dans quelques cas l'algorithme cherche un maximum au lieu d'un minimum à un certain point de son parcours. L'Algorithme 4 répond à ce problème en forçant la recherche de minimum. La robustesse de l'Algorithme 4 est supérieure aux Algorithmes 2 et 3 sur les fonctions à minimiser.

Données : $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}), \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha})$

Résultat : $\vec{\alpha}$ tel que $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \cdot \nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \leq \epsilon^2$

$n \leftarrow 0;$

$\vec{g}_1 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha});$

$\mathbf{H} \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha});$

$\vec{d}_0 \leftarrow \vec{g}_1;$

répéter

$$c_0 \leftarrow \frac{-\vec{g}_1 \cdot \vec{d}_0}{\mathbf{H} \otimes^2 \{\vec{d}_0\}^2};$$

$$\vec{\alpha} \leftarrow \vec{\alpha} + c_0 \vec{d}_0;$$

$$\vec{g}_1 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha});$$

$$\mathbf{H} \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha});$$

$$c_1 \leftarrow \frac{-\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1}{\mathbf{H} \otimes^2 \{\vec{g}_1\}^2};$$

$$\vec{d}_0 \leftarrow c_0 \vec{d}_0 + c_1 \vec{g}_1;$$

$$n \leftarrow n + 1;$$

jusqu'à $\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1 < \epsilon^2$ ou $n \geq N$;

Algorithme 2: Recherche à directions retardées de descentes optimisées

Données : $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}), \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha})$

Résultat : $\vec{\alpha}$ tel que $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \cdot \nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \leq \epsilon^2$

$n \leftarrow 0;$

répéter

$$\vec{g}_0 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha});$$

$$\mathbf{H}_0 \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha});$$

$$c_0 \leftarrow \frac{-\vec{g}_0 \cdot \vec{g}_0}{\mathbf{H}_0 \otimes^2 \{\vec{g}_0\}^2};$$

$$\vec{g}_1 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha} + c_0 \vec{g}_0);$$

$$\mathbf{H}_1 \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha} + c_0 \vec{g}_0);$$

$$c_1 \leftarrow \frac{-\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1}{\mathbf{H}_1 \otimes^2 \{\vec{g}_1\}^2};$$

$$\vec{d}_0 \leftarrow c_0 \vec{g}_0 + c_1 \vec{g}_1;$$

$$s_0 \leftarrow \frac{-\vec{g}_0 \cdot \vec{d}_0}{\mathbf{H}_0 \otimes^2 \{\vec{d}_0\}^2};$$

$$\vec{d}_0 \leftarrow c_0 \vec{d}_0 + c_1 \vec{g}_1;$$

$$\vec{\alpha} \leftarrow \vec{\alpha} + s_0 \vec{d}_0;$$

$$n \leftarrow n + 1;$$

jusqu'à $\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1 < \epsilon^2$ ou $n \geq N$;

Algorithme 3: Recherche à directions de descentes optimisées

Données : $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}), \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha})$

Résultat : $\vec{\alpha}$ tel que $\nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \cdot \nabla\chi^2(\vec{\alpha}) \leq \epsilon^2$

$n \leftarrow 0, cMin \leftarrow -10^{-5};$

répéter

$\vec{g}_0 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha});$

$\mathbf{H}_0 \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha});$

$c_0 \leftarrow \min \left[\frac{-\vec{g}_0 \cdot \vec{g}_0}{\mathbf{H}_0 \otimes^2 \{\vec{g}_0\}^2}, cMin \right];$

$\vec{g}_1 \leftarrow \nabla\chi^2(\vec{\alpha} + c_0\vec{g}_0);$

$\mathbf{H}_1 \leftarrow \nabla\nabla\chi^2(\vec{\alpha} + c_0\vec{g}_0);$

$c_1 \leftarrow \min \left[\frac{-\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1}{\mathbf{H}_1 \otimes^2 \{\vec{g}_1\}^2}, cMin \right];$

$\vec{d}_0 \leftarrow -c_0\vec{g}_0 - c_1\vec{g}_1;$

$s_0 \leftarrow \min \left[\frac{-\vec{g}_0 \cdot \vec{d}_0}{\mathbf{H}_0 \otimes^2 \{\vec{d}_0\}^2}, cMin \right];$

$f \leftarrow$ liste de valeurs entre -1 et s_0 et entre -0.5 et -10000 ;

$\chi_{Tmp} \leftarrow \chi^2(\vec{\alpha} - \vec{d}_0);$

pour chaque facteurs f faire

$\chi_f \leftarrow \chi^2(\vec{\alpha} + f\vec{d}_0);$

si $\chi_{Tmp} > \chi_f$ **alors**

$f_{min} \leftarrow f;$

$\chi_{Tmp} \leftarrow \chi_f;$

$Trouvé \leftarrow$ vrais;

si $Trouvé$ **alors**

$\vec{\alpha} \leftarrow \vec{\alpha} + f_{min}\vec{d}_0;$

sinon

$\vec{\alpha} \leftarrow \vec{\alpha} + c_0\vec{g}_0;$

$n \leftarrow n + 1;$

jusqu'à $\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1 < \epsilon^2$ ou $n \geq N$;

Algorithme 4: Recherche à directions de descentes optimisées limité

Tableau A III-1 Résultats des Algorithmes (1, 2, 3 et 4), Figs. (A III-4 à A III-9)

Algorithme	n	$\vec{\alpha} = [\alpha, \beta]$	χ^2
1	1530	[0.2999997116, 9.9999242610]	$3.952202e - 15$
2	65	[0.3000000216, 10.0000056684]	$2.118887e - 17$
3	4	[0.3000800644, 10.0051738270]	$5.249475e - 09$
4	7	[0.3000000088, 10.0000020012]	$4.707392e - 18$

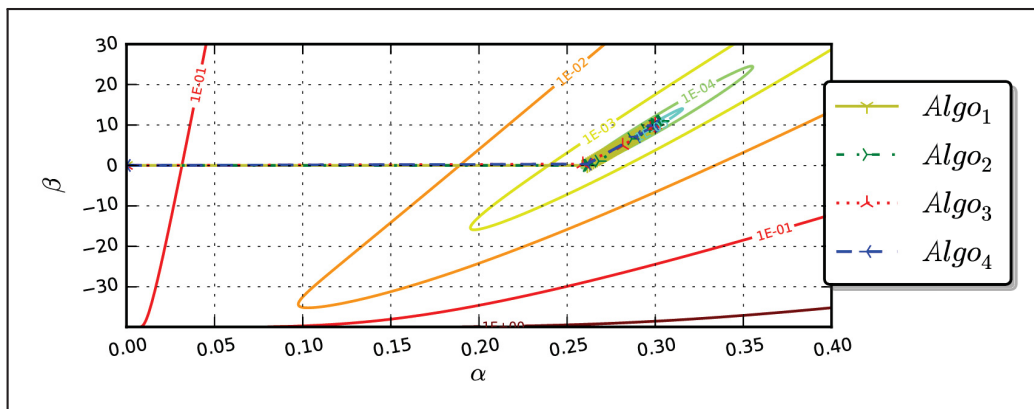


Figure A III-4 Exemple de l'obtention du minimum quadratique avec les différents algorithmes, le minimum de χ^2 est à $\vec{\alpha} = [0.3, 10]$

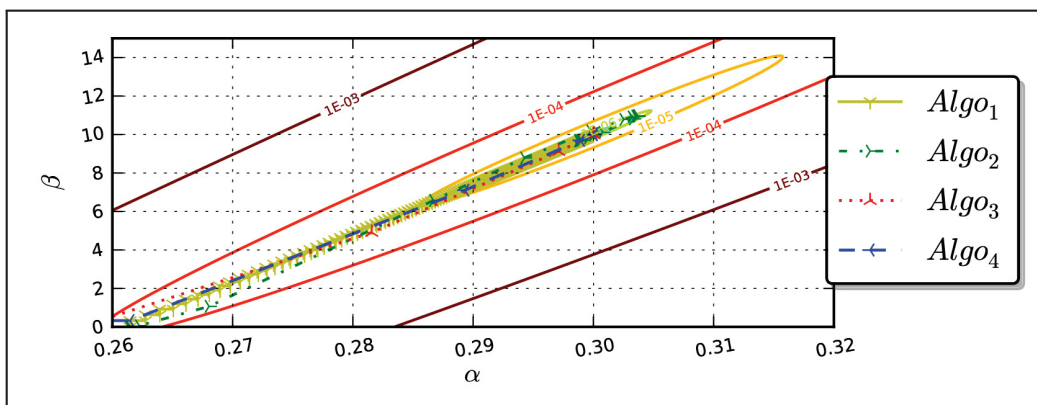


Figure A III-5 Agrandissement de Fig. A III-4

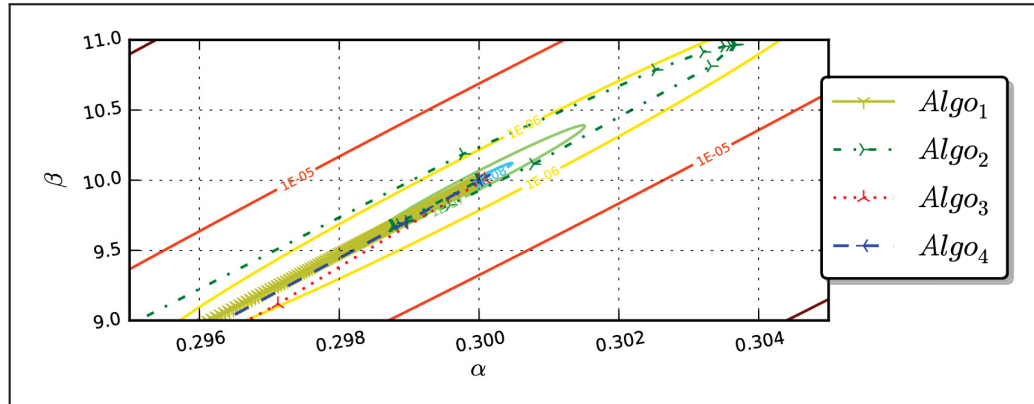


Figure A III-6 Agrandissement de Fig. A III-5

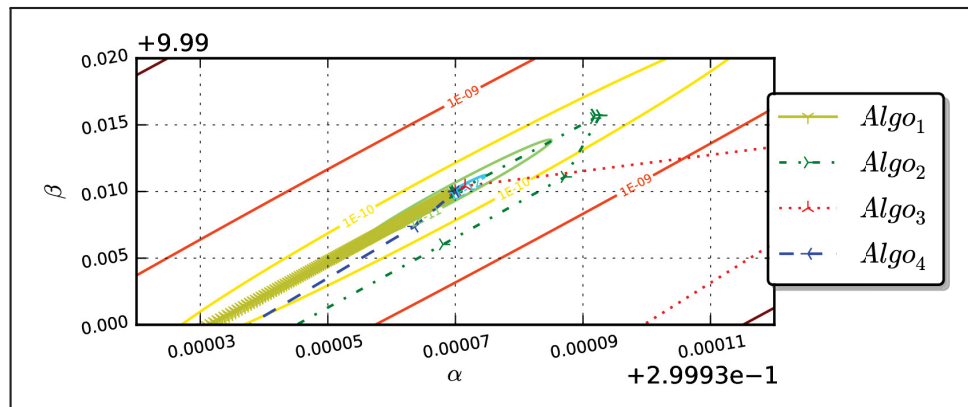


Figure A III-7 Agrandissement de Fig. A III-6

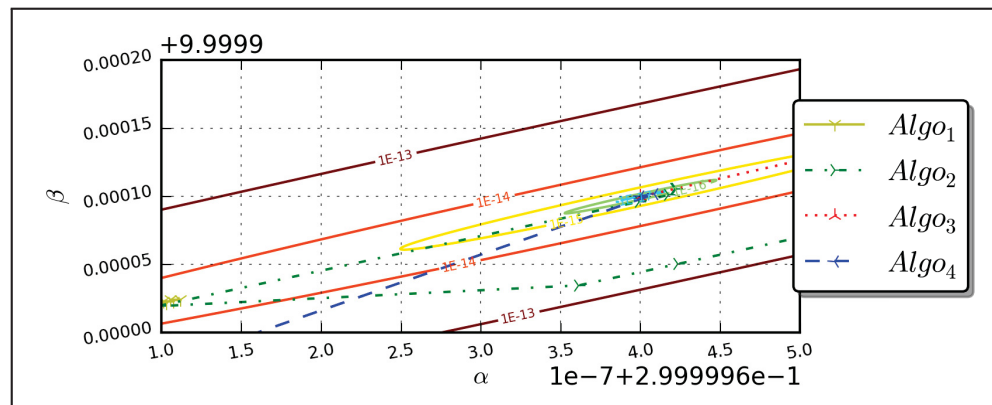


Figure A III-8 Agrandissement de Fig. A III-7

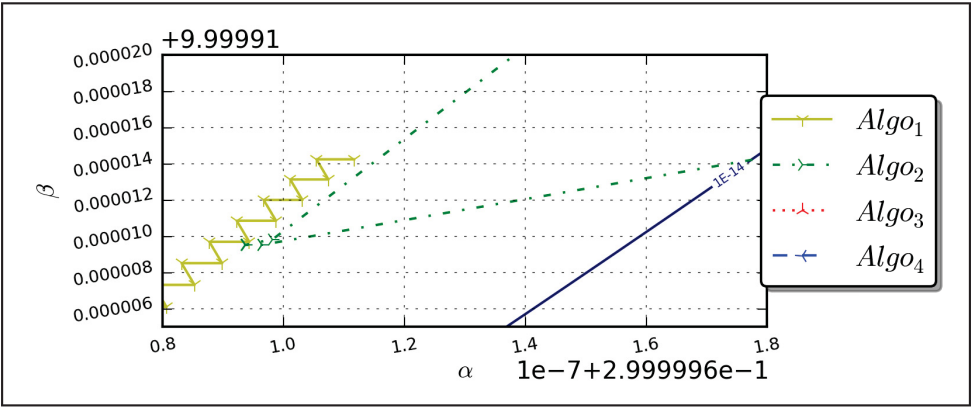


Figure A III-9 Agrandissement de Fig. A III-7 sur l’Algorithme 1

Tableau A III-2 Résultats des Algorithmes (1, 2, 3 et 4), Fig. A III-10

Algorithme	n	$\vec{\alpha} = [\alpha, \beta]$	χ^2	convergé
1	426	$[0.2999999355, -10.0000118749]$	$6.738179e - 16$	oui
2	21	$[1137.8508855, 244044.1731108]$	$1.420991e - 02$	non
3	4	$[-6.175039428, -1409.31729216]$	$1.561457e - 02$	non
4	8	$[0.2999999999, -10.0000001049]$	$6.576772e - 19$	oui

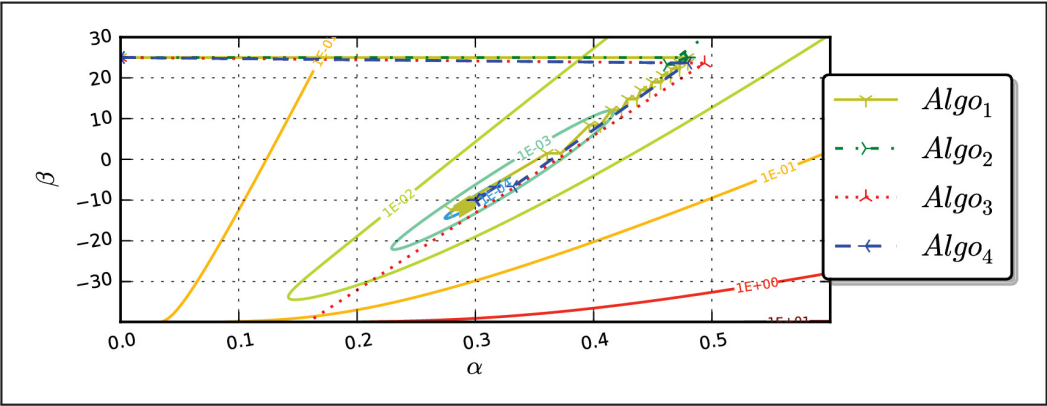


Figure A III-10 Exemple de l’obtention du minimum quadratique avec les différents algorithmes avec une autre valeur initial, le minimum de χ^2 est à $\vec{\alpha} = [0.3, -10]$

Tableau A III-3 Résultats de l'Algorithme 4 pour différentes valeurs initiales, Fig. A III-11

$\vec{\alpha}_{init}$	n	$\vec{\alpha} = [\alpha, \beta]$	χ^2
$[0, 0]$	20	$[0.20, 50.0]$	$1.06872e - 20$
$[-0.4, 99]$	18	$[0.20, 50.0]$	$3.49631e - 24$
$[-0.4, -39]$	17	$[0.20, 50.0]$	$3.09688e - 24$
$[0.4, -39]$	17	$[0.20, 50.0]$	$4.54411e - 22$
$[0.4, 99]$	28	$[0.20, 50.0]$	$3.94301e - 21$

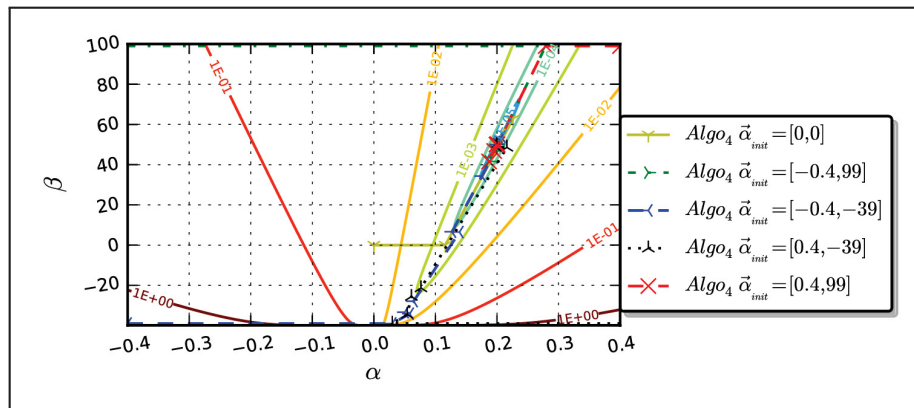


Figure A III-11 Exemple de l'obtention du minimum quadratique avec l'Algorithme 4 implémenté en C++ pour différentes valeurs initiales, le minimum de χ^2 est à $\vec{\alpha} = [0.2, 50]$

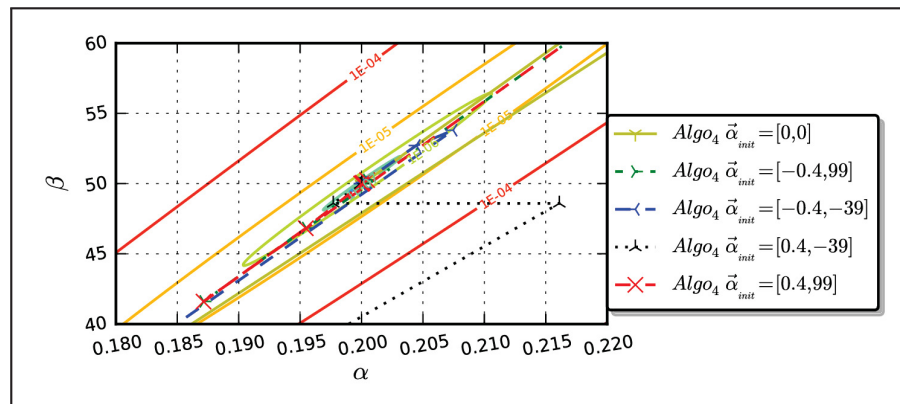


Figure A III-12 Agrandissement de Fig. A III-11

Tableau A III-4 Résultats de l'Algorithme 4 pour différentes valeurs initiales, Fig. A III-13

$\vec{\alpha}_{init}$	n	$\vec{\alpha} = [\alpha, \beta]$	χ^2
$[0, 0]$	20	$[0.20, -25.0]$	$1.08354e - 23$
$[-0.4, 99]$	26	$[0.20, -25.0]$	$1.07344e - 23$
$[-0.4, -39]$	15	$[0.20, -25.0]$	$1.07401e - 23$
$[0.4, -39]$	17	$[0.20, -25.0]$	$1.07187e - 23$
$[0.4, 99]$	15	$[0.20, -25.0]$	$1.09785e - 23$

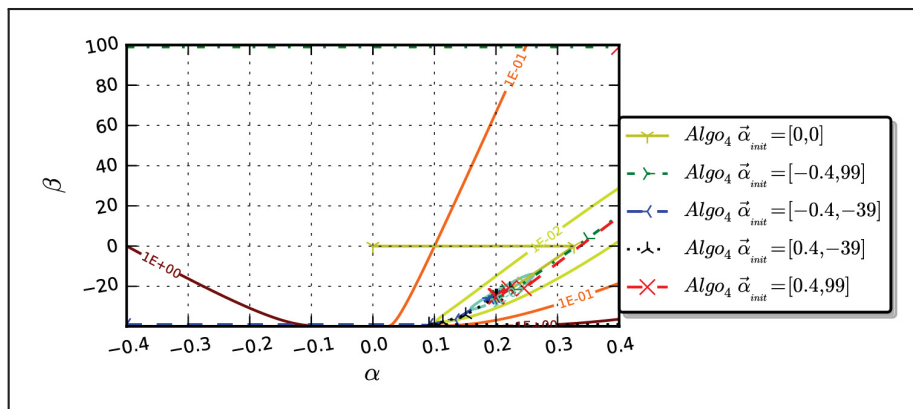


Figure A III-13 Exemple de l'obtention du minimum quadratique avec l'Algorithme 4 implémenté en C++ pour différentes valeurs initiales, le minimum de χ^2 est à $\vec{\alpha} = [0.2, -25]$

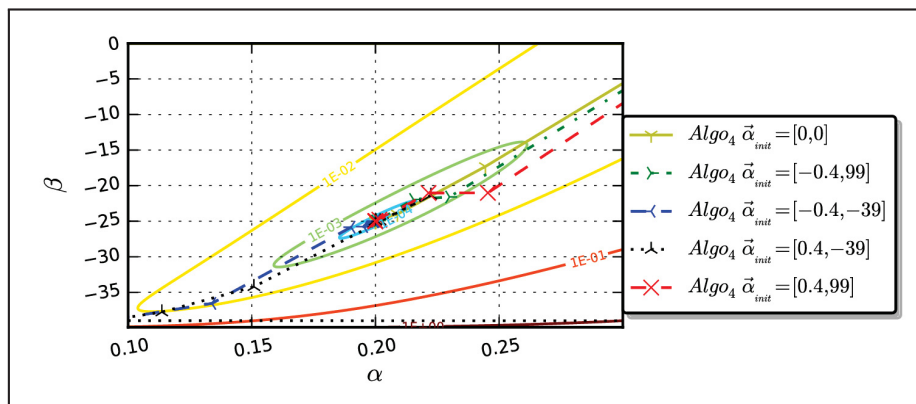


Figure A III-14 Agrandissement de Fig. A III-13

Tableau A III-5 Résultats de l'Algorithme 4 pour différentes valeurs initiales, Fig. A III-15

$\vec{\alpha}_{init}$	n	$\vec{\alpha} = [\alpha, \beta]$	χ^2
$[0, 0]$	21	$[-0.200012, 1000.060]$	$2.85239e - 16$
$[-0.4, 99]$	58	$[-0.199994, 999.968]$	$6.90822e - 17$
$[-0.4, -39]$	43	$[-0.200000, 1000.000]$	$1.27432e - 23$
$[0.4, -39]$	92	$[-0.200016, 1000.090]$	$5.20240e - 16$
$[0.4, 99]$	18	$[-0.200000, 1000.000]$	$1.96578e - 20$

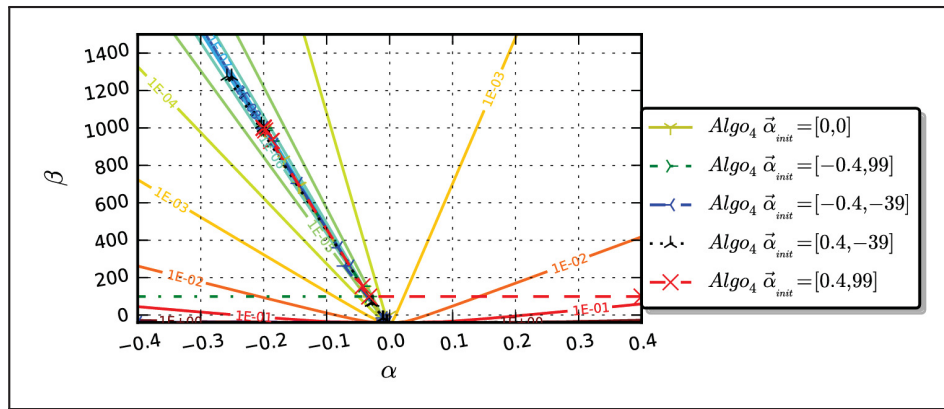


Figure A III-15 Exemple de l'obtention du minimum quadratique avec l'Algorithme 4 implémenté en C++ pour différentes valeurs initiales, le minimum de χ^2 est à $\vec{\alpha} = [-0.2, 1000]$

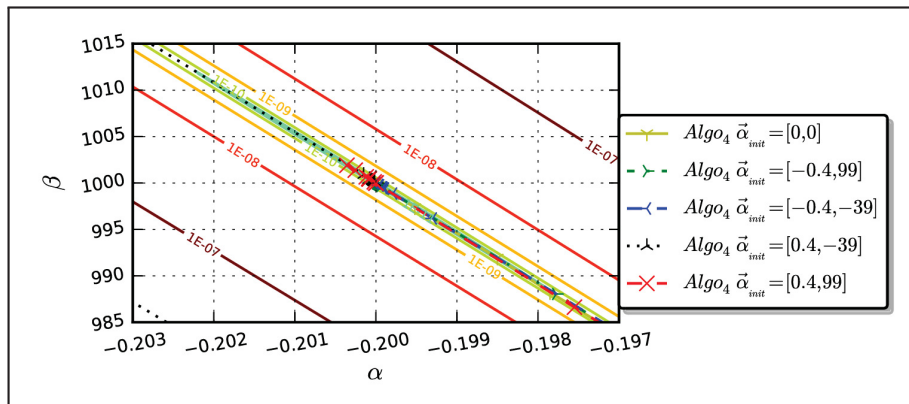


Figure A III-16 Agrandissement de Fig. A III-15

ANNEXE IV

VALIDATION DE L'OUTIL DE POST-TRAITEMENT

L'outil de post-traitement a été testé avec diverses solutions imposées par un utilitaire de pré-traitement. Dans cette section deux aspects seront présentés, la procédure de recherche de cellules et de face ainsi qu'une possibilité d'analyse plus détaillée pour une position d'éolienne.

1 Performance de la procédure de recherche implémentée

Deux tests ont été effectués pour valider le gain en vitesse des méthodes de recherche de faces et de cellules développées. Le tableau A IV-1 montre le gain en vitesse entre le processus d'interpolation et de calcul en utilisant la méthode développée de `findNearestCell` et la méthode par défaut utilisée par OpenFOAM. Dans ce cas, 21 points définissent l'éolienne et 25 positions d'éolienne sont évaluées, dans le processus l'interpolation utilisée pour la vitesse et l'énergie cinétique turbulente. Ces deux tests ont été effectués sur un petit maillage de 125000 cellules avec 50 cellules dans chaque direction en utilisant un processeur Turion d'AMD.

Tableau A IV-1 Comparaison de vitesse entre les deux méthodes de recherche de cellule

Méthode par défaut d'OpenFOAM	1.43 sec
Méthode proposée	0.06 sec

Le tableau A IV-2 montre le gain en vitesse sur le processus d'interpolation et de calcul en utilisant la méthode proposée `findNearestFace` et la méthode simple d'itération sur tout le domaine, inspirée du `findNearestCell` par défaut. Dans ce cas, 2500 points définissent les bases d'éoliennes à trouver dans un maillage de surface de 2500 faces.

Tableau A IV-2 Comparaison de vitesse entre les deux méthodes de recherche de face

Méthode inspirée de la recherche par défaut d'OpenFOAM	1.58 sec
Méthode proposée	0.01 sec

2 Analyse détaillée à une position d'éolienne

Un test d'analyse détaillée pour la vitesse du vent à différentes positions sur une pale en rotation a été effectué comme validation des classes et outils implémentés dans le cadre de ce travail et pour illustrer une possibilité d'analyse plus détaillée. La Fig. A IV-1 montre une représentation du maillage utilisé et du profil de vitesse imposé pour ce cas test.

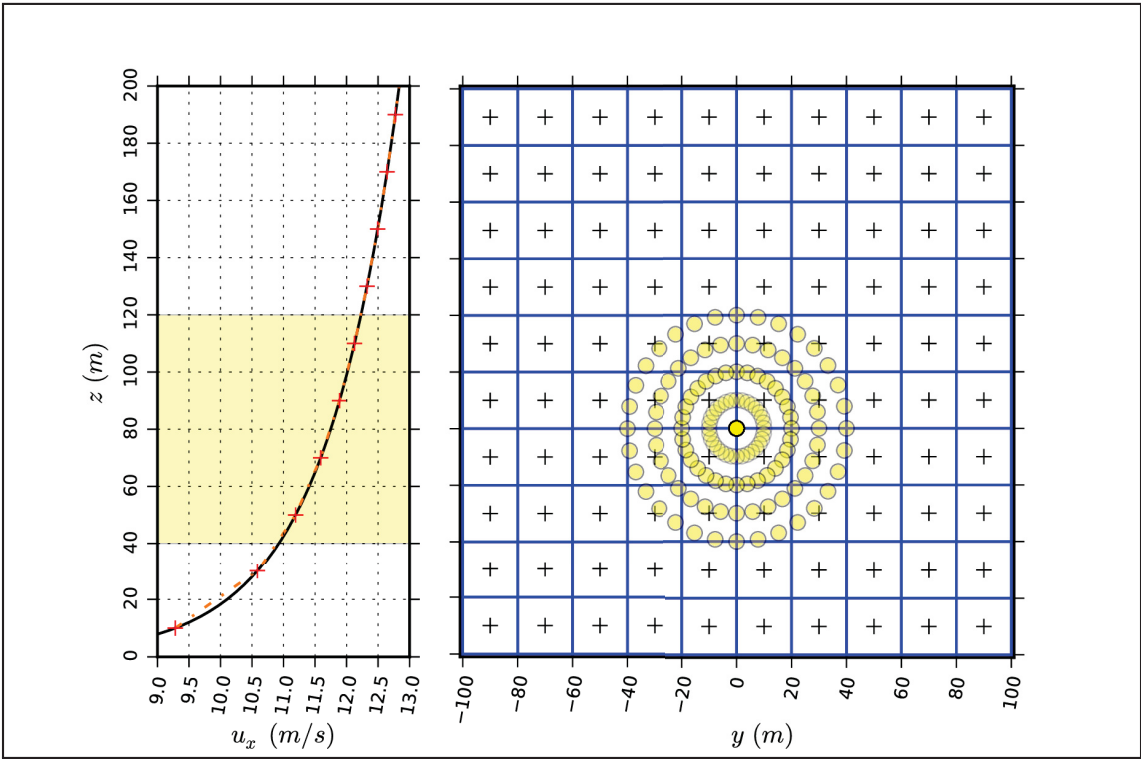


Figure A IV-1 Profil de vent logarithmique imposé avec la représentation du maillage et domaine initialisé pour le test d'analyse détaillée

Le profil logarithmique de vitesse u_x avec les paramètres $u^* = 0.475 \text{ m/s}$, $z_0 = 0.004 \text{ m}$ et $\kappa = 0.4$ a été imposé à chaque centre des cellules représenté par un signe plus. Le profil de vitesse théorique est représenté par la ligne noire. Une série de signes plus rouge montrent les valeurs au centre de cellules et la ligne pointillée orange indique les valeurs approximées par régression linéaire entre les centres de cellules. La Fig. A IV-2 montre les résultats de vitesse u_x de l'outil de post-traitement en les comparant à la solution théorique, Th , pour diverses positions sur une pale en rotation. Les lignes pointillées, cp , sont obtenues avec l'outil de post-traitement, en utilisant le schéma d'interpolation de OpenFOAM `cellPoint`, qui effectue une régression linéaire, alors que les marqueurs, c , sont obtenus en utilisant le schéma d'interpolation `cell`, qui retourne la valeur au centre de la cellule qui entoure la position où l'on veut obtenir la valeur. Il est notable que l'interpolation linéaire évalue à la baisse les vitesses entre deux centres de cellules, alors que le schéma `cell` donne de mauvais résultats en raison de la taille du maillage utilisé. Il est donc plus approprié d'utiliser le schéma d'interpolation `cellPoint`. Ce type d'analyse détaillée est intéressant pour évaluer la force exercée sur un élément de pale et son chargement cyclique et pourrait être utilisé en terrain complexe.

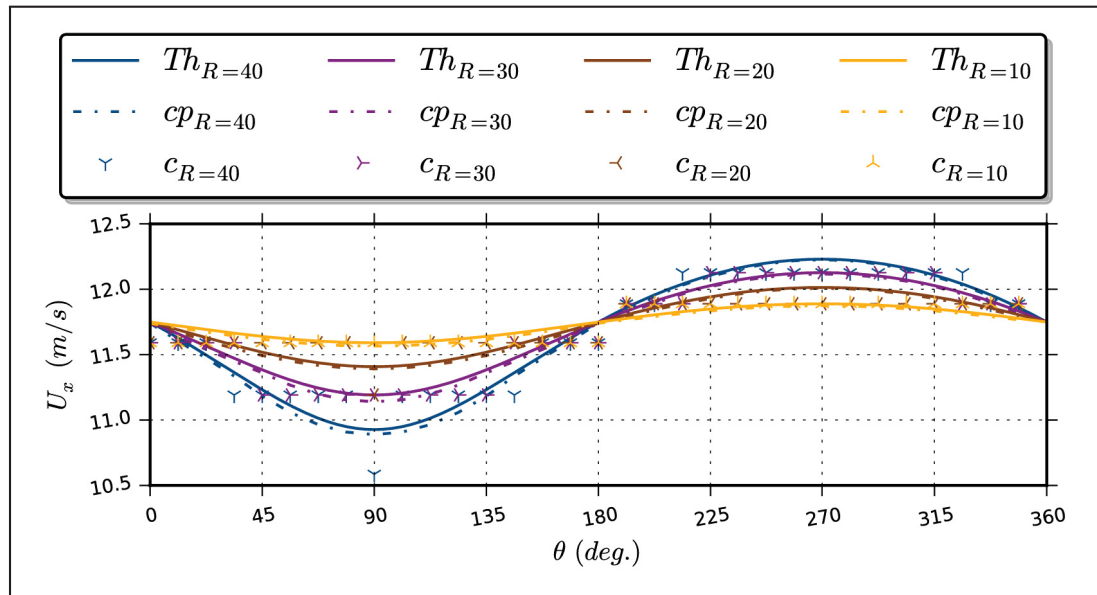


Figure A IV-2 Résultats du test d'analyse détaillée pour la vitesse u_x aux positions 10 m, 20 m, 30 m et 40 m sur la pale lors d'une rotation complète

BIBLIOGRAPHIE

- Aris, R., 1962. *Vectors, Tensors, and the Basic Equations of Fluid Mechanics*. Dover Publications, Inc.
- Blocken, B., Ted Stathopoulos, et Jan Carmeliet. 2007. « CFD simulation of the atmospheric boundary layer : wall function problems ». *Atmospheric Environment*, vol. 41, n° 2, p. 238.
- Boudreault, L.-É., L. Dufresne, et C. Masson. 2011. « Numerical modeling of flow separation in neutral atmospheric boundary layer using the $k - \omega$ SST turbulence model ».
- Brodeur, P. et Christian Masson. 08 2008. « Numerical Site Calibration Over Complex Terrain ». *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 130, n° 3, p. 031020-12.
- Fresiger, J., 2001. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin :.
- Gu, S. et Li Ji. 2010. « Study on Optimization of Wind Farm Micro-Layout ». In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. p. 1.
- Hargreaves, D. et N Wright. 2007. « On the use of the $k - \epsilon$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, n° 5, p. 355.
- Henriksen, L. C. 2009. « Wind Energy Literature Survey No. 14 ». *Wind Energy*, vol. 12, n° 7, p. 712.
- IEC 61400-1. 2005. *Wind turbine – Part 1 : Design requirements*, éd. Third.
- IEC 61400-12-1. 2005. *Wind turbines – Part 12-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, éd. First.
- Ishmail B. Celik, U. G, P. J. R. C. 2008. « Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications ». *Journal of Fluids Engineering*, vol. 130, n° 7, p. 078001.
- J. Mann, S. O, B. J. H. F. 2002. *Wasp engineering 2000*. Technical report. Risø-R-1356.
- Jasak, H. 1996. « Error analysis and estimation in the Finite Volume method with applications to fluid flows ». PhD thesis, Imperial College, University of London.
- Jiménez, A. 2009. « Influence of topography and wakes on wind turbulence. Measurements and interpretation of results ».
- Jiménez Álvaro, Á. 2010. « Communication privée avec Ángel Jiménez Álvaro ».
- L.H. Khurshudyan, W. S. et I.V. Nekrasov. 1981. « Flow and dispersion of pollutants over two-dimensional hills. ». *US EPA Report N.EPA-600/4-81-067*.

- Lovelock, D. et Hanno Rund, 1975,1989. *Tensors Differential Forms, and Variational Principles*,. Dover Publications, Inc.
- Menter, F. R. 1994. « Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications ». *AIAA journal*, vol. 32, n° 8, p. 1598-1605.
- Mortensen, N, A. B. et I. Antoniou. 2006. « Improving WAsP predictions in (too) complex terrain. ».
- Mortensen, N. et E.L. Petersen. 1998. « Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modeling in complex terrain ».
- O'Sullivan, J. P., R. A. Archer, et R. G. J. Flay. 2011a. « Consistent boundary conditions for flows within the atmospheric boundary layer ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 99, n° 1, p. 65.
- O'Sullivan, J., R.A. Archer, et R.G.J. Flay. 2011b. « Consistent boundary conditions for flows within the atmospheric boundary layer ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 99, n° 1, p. 65.
- Palma, J., F.A. Castro, L.F. Ribeiro, A.H. Rodrigues, et A.P. Pinto. 2008. « Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micro-siting in complex terrain ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, n° 12, p. 2308.
- Pelletier, F. 2010. « Communication privée avec Francis Pelletier ».
- Pieter, W., 2000. *Principles of computational fluid dynamics*, volume 29 of *Springer Series in Computational Mathematics*. Springer.
- Prospathopoulos, J. et Spyros G. Voutsinas. 2006. « Implementation Issues in 3D Wind Flow Predictions Over Complex Terrain ». *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 128, n° 4, p. 539-553.
- Richards, P. et R.P. Hoxey. 1993. « Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k - \epsilon$ turbulence model. ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- Røkenes, K. 2009. « Investigation of terrain effects with respect to wind farm siting ». PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Røkenes, K. et P.-A. Krogstad. 2009. « Wind tunnel simulation of terrain effects on wind farm siting ». *Wind Energy*, vol. 12, n° 4, p. 391-410.
- S. E. Norris, P. J. R. May 2010. « Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited ».
- Sibuet Watters, C. 2010. « Communication privée avec Christophe Sibuet Watters ».
- Solacity Inc. 2009. « Wind Turbine Site Selection ». <{<http://www.solacity.com/SiteSelection.htm>}>.

- Sumner, J. et Christian Masson. 2011. « $k - \epsilon$ simulations of the neutral atmospheric boundary layer : analysis and correction of discretization errors on practical grids ». *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, p. n/a.
- WAsP 10 Help. *Facility and On-line Documentation*. <{www.wasp.dk/Support/~media/Risoe_dk/WAsP/Support/Literature/Documentation/CHM/Wasp10.ashx}>.
- Wilcox, D. C., 1993. *Turbulence modeling for CFD - Wilcox D.C.* 5354 Palm Drive, La Cañada, California 91011 : DCW Industries, Inc.
- Yang, Y., Ming Gu, Suqin Chen, et Xinyang Jin. 2009. « New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 97, n° 2, p. 88.