
Les Impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent :

Performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier

Biao WANG

2015.01.16

Résumé

Ce travail vise à modéliser la propagation du vent par des techniques de simulation de CFD dans des tissus urbains contrastés à l'échelle de quartier (450m*450m), afin d'évaluer les impacts de la morphologie urbaine sur le potentiel énergétique éolien.

Face aux problèmes environnementaux locaux et globaux, le développement des énergies renouvelables devient de plus en plus urgent à l'échelle mondiale. Notre objectif, est d'adapter la morphologie urbaine au développement du captage de l'énergie éolienne. Pour ce faire, deux questions fondamentales sont posées : Quels sont les impacts de la morphologie urbaine sur l'écoulement du vent dans la ville ? Comment évaluer le potentiel énergétique éolien de la ville ?

Nous partons d'une synthèse bibliographique sur les trois domaines de la morphologie urbaine, de la simulation CFD et du développement de l'énergie éolienne urbaine. Des indicateurs de morphologie urbaine sont ainsi proposés. Les méthodes de simulation CFD sur l'écoulement du vent autour de bâtiments sont présentés. Les avantages et les inconvénients des éoliennes urbaines sont discutés. Des nouvelles technologies et des méthodes d'intégration architecturale de petite éolienne sont ainsi présentées. Pour valider notre modèle, nous faisons une étude approfondie des paramètres du code ANSYS FLUENT avec la référence des données d'un benchmark issu d'expérimentations en soufflerie. Plusieurs méthodes de vérification avant et après la simulation sont proposées. Après validation de notre modèle, nous commençons les simulations des formes simples. Avec un bâtiment, deux bâtiments et trois bâtiments, les impacts de différents paramètres simples de configuration sont analysés. En raison de leur efficacité et de leur faisabilité, l'évaluation énergétique est principalement faite au-dessus des toits de bâtiments. Les effets de la concentration du vent au-dessus des toits sont ainsi évalués.

Nous simulons ensuite des modèles morphologiques plus complexes, par l'évaluation du potentiel éolien dans six quartiers qui sont typiques de forme urbaine mondiale et favorables pour exploiter l'énergie éolienne. Treize indicateurs morphologiques ayant potentiellement une influence sur l'écoulement du vent sont proposés. Des analyses de cohérence entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs d'évaluation de l'énergie éolienne au-dessus des toits sont faites. Ensuite, des prototypes de formes urbaines avec des modifications sont étudiés. L'influence de certaines modifications de ces prototypes sur le potentiel éolien est étudiée, et les prototypes les plus favorables pour l'exploitation de l'énergie éolienne sont proposés.

L'énergie éolienne dans un quartier réel à Pékin est ensuite évaluée. Des conditions locales (formes physiques, climat, aspects socioéconomiques) sont considérées pour évaluer la faisabilité du développement de l'énergie éolienne. L'emplacement et le choix des techniques d'éoliennes urbaines adaptées sont discutés.

Enfin, une méthode mathématique basée sur des paramètres morphologiques simples est présentée pour évaluer le potentiel éolien au-dessus des toits. L'indicateur de l'impact d'obstacle des bâtiments est défini. La cohérence entre les résultats de la méthode mathématique et ceux de la simulation CFD est enfin analysée.

Mots-clés

Morphologie urbaine, éolienne urbaine, potentiel éolien, modélisation CFD, modèle de quartier.

Impacts of Urban morphology on the wind: Wind power performance in the neighborhood scale

This work concentrates on wind flow simulation by CFD techniques in different urban fabrics at the neighborhood scale (450m*450m), in order to assess the impacts of urban morphology on wind energy potential.

Facing local and global environmental problems, the development of renewable energy is becoming increasingly urgent and important. Our goal is to adapt the urban morphology in the development of urban wind energy. To do this, two fundamental questions are aroused: What are the impacts of urban morphology on the wind flow in the city? How to evaluate the urban wind power?

We start with a summary of bibliography on three areas: urban morphology, CFD simulation and urban wind energy development. Some indicators of urban morphology are proposed. The methods of CFD simulation of wind flow around buildings are presented. The advantages and disadvantages of different urban wind turbines are discussed. Some new technologies and methods of architectural integration of small wind turbine are presented. To validate our model of air flow simulation, we start with a study of the numerical simulation parameters with the reference of a benchmark of wind tunnel experiments. Several methods of verification before and after the CFD simulation are presented. After validation of our model, we begin to simulate some simple forms. With one, two and three buildings, the impacts of different simple configuration parameters are analyzed. Considering the effectiveness and feasibility, wind energy assessment is mainly taken over the roofs of buildings. The combined effects of altitude and wind concentration above the roof, are evaluated.

We then simulate more complex morphological models, by assessing the wind potential in six neighborhoods that are worldwide typical urban forms and favorable for wind energy development. Morphological indicators that potentially affect the wind flow are proposed. Analysis of coherence are made between these indicators and the values of the coefficient of increase of wind speed and of the wind power indicator above the roof. Then, some prototypes of basic urban forms from real neighborhoods are studied. The influence of certain modifications of these prototypes on the wind energy potential is analyzed, and the most favorable conditions for the exploitation of wind power prototypes are recommended.

Then, wind energy in a real neighborhood in Beijing is evaluated. Local conditions (physical forms, climate, socio-economic aspects) are considered to assess the feasibility of developing wind energy. The location and the choice of techniques suitable urban wind turbines are discussed.

Finally, a mathematical method based on some simple morphological parameters is presented, in order to assess wind potential above the rooftops. The obstacle impact indicator of the buildings is defined. The coherence between the results of the simplified mathematical method and those of CFD simulation are analyzed.

Keywords

Urban morphology, urban wind turbine, wind energy, CFD modeling, neighborhood scale model.

SOMMAIRE

Résumé	2
Abstract	3
Nomenclature	7
Introduction	8
1. Problématique	8
2. Objet de la recherche	9
3. Méthodologie de recherche	9
4. Structure de thèse	10
Partie I : Approche théorique et synthèse bibliographique	12
1. Morphologie urbaine	13
1.1 Définition et contenu	13
1.1.1 Historique	13
1.1.2 Définition et objet d'étude	14
1.2 Classement de formes urbaines	15
1.3 Paramètres de forme urbaine	23
1.3.1 Trois catégories d'indicateurs	23
1.3.2 Choix des indicateurs	24
1.4. Environnement aéraulique et la morphologie urbaine	26
1.4.1 Aérodynamique urbain	26
1.4.2 Climat et forme urbaine	28
1.4.3 Ecoulement du vent autour de bâtiments	30
1.5 Conclusion	36
2. Modélisation du vent autour de bâtiments	37
2.1 Introduction : la simulation de l'écoulement du vent par les méthodes CFD	37
2.2 Processus de modélisation par les méthodes CFD	39
2.2.1 Méthodes de simulation numérique et modèles de turbulence	39
2.2.2 Problèmes de la loi de paroi	42
2.2.3 Vérification et validation de la simulation CFD	43
2.2.4 Lignes directrices pour adapter les simulations aux pratiques	45
2.3 Bibliographie sur résultats de la simulation CFD du vent autour de bâtiments	48
2.3.1 Points intéressants dans la bibliographie	48
2.3.2 Augmentation d'énergie éolienne par modifier les formes bâties	50
2.4 Conclusion	55
3. L'énergie éolienne en ville	57
3.1 L'énergie éolienne	57
3.1.1 Histoire du développement de l'énergie éolienne	57
3.1.2 Caractères généraux de l'énergie éolienne	59
3.2 L'éolienne urbaine	60
3.2.1 Types d'éolienne urbaine	60
3.2.2 Exemples d'éoliennes urbaines	61
3.2.3 Challenges de l'éolienne urbaine	64
3.3 Développement de l'énergie éolienne en ville pour le futur	68
3.3.1 Evaluation énergétique d'une éolienne	68
3.3.2 Recherche de l'implantation adaptée	74
3.3.3 Recherche de l'éolienne adaptée	77
3.3.4 Lignes directrices pour mettre en oeuvre l'éolienne urbaine	78
3.4 Conclusion	82
Partie II : Simulation et analyse	83
4. Méthode de validation et vérification	84
4.1 Validation du modèle paramétrique retenu	84
4.2 Vérification des simulations CFD	84

5. Simulation de modèles simplifiés de bâtiments	85
5.1 Indicateurs du potentiel éolien à l'échelle de bâtiment	85
5.1.1 Définitions des indicateurs	85
5.1.2 Indicateur équivalent	86
5.1.3 Evaluation de l'indicateur	87
5.2 Simulation d'un bâtiment isolé	88
5.2.1 Impact du plan sur le potentiel éolien	88
5.2.2 Impact de la longueur sur le potentiel éolien	90
5.2.3 Impact de la largeur sur le potentiel éolien	91
5.2.4 Impact de la toiture sur le potentiel éolien	92
5.2.5 Impact du coin sur le potentiel éolien	94
5.2.6 Impact de la présence d'une cour sur le potentiel éolien	96
5.2.7 Impact du passage du vent sur le potentiel éolien	97
5.2.8 Impact de l'angle d'incidence du vent sur le potentiel éolien	100
5.2.9 Impact de la forme sur les vents à l'arrière du bâtiment	101
5.3 Simulation de deux bâtiments	104
5.3.1 Potentiel éolien de deux bâtiments en ligne au vent	104
5.3.2 Potentiel éolien de deux bâtiments parallèles	106
5.3.3 Potentiel éolien de deux bâtiments décalés	110
5.3.4 Potentiel éolien de deux bâtiments perpendiculaires et symétriques	111
5.3.5 Potentiel éolien de deux bâtiments en coin symétrique avec des angles variés	112
5.4 Simulation de trois bâtiments décalés	114
5.5 Conclusion	116
6. Simulation de modèles complexes	120
6.1 Choix des indicateurs de forme urbaine pour évaluer le potentiel éolien	120
6.2 Impact des indicateurs sur le potentiel éolien	124
6.2.1. Impact de la porosité sur le vent	124
6.2.2 Impact de la densité sur le vent	127
6.3 Simulation préliminaire de six formes urbaines à l'échelle de quartier	130
6.3.1 Condition et exigences de simulation CFD pour les modèles de quartier	130
6.3.2 Description des indicateurs morphologiques des six quartiers réels	131
6.3.3 Résultats sur le rendement énergétique éolien des quartiers réels	134
6.3.4 Cohérence entre les paramètres morphologiques et les indicateurs énergétiques	140
6.4 Simulations des modèles d'unité de forme urbaine	143
6.4.1 Description des indicateurs morphologiques des modèles d'unité	143
6.4.2 Résultats sur le rendement énergétique éolien des modèles d'unité	146
6.5 Conclusion	151
7. Développement et application de l'énergie éolienne dans la ville	153
7.1 Simulation et analyse le potentiel éolien du quartiers de Jinsong	153
7.1.1 Etat de lieu du quartiers de Jinsong	153
7.1.2 Conditions de simulation	155
7.1.3 Description des paramètres morphologiques du modèle de Jinsong	157
7.1.4 Analyse des résultats	159
7.2 Proposition d'emplacement d'éolienne et évaluation énergétique en pratique	162
7.2.1 Choix d'éolienne adaptée et son emplacement	162
7.2.2 Evaluation énergétique et faisabilité économique	163
7.3 Méthode mathématique pour prévoir l'impact de morphologie urbaine sur le vent	165
7.3.1 Méthode mathématique pour évaluer l'impact d'obstacle au vent	165
7.3.2 Application et évaluation de la méthode mathématique	166
7.4 Conclusion	171
8. Conclusion générale	172
8.1 Résumé et conclusion	172
8.2 Evaluation de notre travail	175
8.3 Perspectives	175
Bibliographie	177
1. Livres, thèses et mémoires	177
2. Articles scientifiques	181

2.1 Les articles sur la morphologie urbaine et le climat du vent	181
2.2 Articles sur la modélisation CFD	184
2.3 Articles sur l'énergie éolienne en ville	187
3. Sites web	189
Annexe	190
Annexe 1. Sur la morphologie urbaine	190
Annexe 1.1 Notions voisines de morphologie urbaine	190
Annexe 1.2 Classement de formes urbaines	191
Annexe 1.3 Résumé des indicateurs de la morphologie urbaine	196
Annexe 1.4 Configurations typiques de bâtiments allemands	197
Annexe 2. Sur la modélisation CFD	198
Annexe 2.1 Modèles de turbulence de RANS	198
Annexe 2.2 Estimation de l'épaisseur de la première couche de maille	201
Annexe 3. Sur l'énergie éolienne urbaine	202
Annexe 3.1 Comparaison de trois sources d'énergie renouvelable	202
Annexe 3.2 Composants d'une éolienne	203
Annexe 3.3 Classement des éoliennes	204
Annexe 4. Sur la méthode de validation et vérification	209
Annexe 4.1 Processus d'établir les valeurs des paramètres CFD dans le modèle de validation	209
Annexe 4.2 Vérification des simulations CFD	213
Annexe 5. Sur la simulation des modèles simples	218
Annexe 5.1 Impact de la hauteur du bâtiment sur le vent à l'arrière	218
Annexe 5.2 Impacts morphologiques sur les vents au-dessus du toit d'une grande tour	220
Annexe 6. Sur la simulation des modèles de quartier	226
Annexe 6.1 Résultats sur C_v et M' pour les modèles de quartier et les modèles d'unité	226
Annexe 7. Sur l'application et l'évaluation d'un quartier réel	231
Annexe 7.1 Evaluation de l'impact de la simplification du modèle	231

C_v	[-]	Coefficient de l'augmentation de la vitesse Vitesse du vent
M	[m ⁵ /s ³]	Indicateur du potentiel éolien total de surface (valeur précise)
M'	[m ⁵ /s ³]	Indicateur du potentiel éolien total de surface (valeur moyenne par le code)
α	[-]	Exponent de la loi puissance, coefficient de cisaillement
D_e	[m ³ /s ³]	Indicateur de la densité d'énergie éolienne par unité de surface
θ	[°]	Angle d'incidence du vent
λ_a	[-]	Coefficient d'occupation des sols (COS)
λ_c	[-]	Ratio d'aspect
λ_f	[-]	Densité de surface frontale
λ_p	[%]	Coefficient d'emprise au sol (CES)
O_c	[%]	Occlusivité
σ_h	[m]	Ecart type de la hauteur des bâtiments
P_o	[%]	Porosité (absolue)
R_a	[m]	Rugosité absolue
R_r	[m]	Rugosité relative
S_θ	[%]	Sinuosité
u_h	[m/s]	Vitesse du vent de référence ou d'observation de météo à la hauteur h
u_0	[m/s]	Vitesse du vent dans le vent libre (sans obstacle, hauteur de mesure à définir)
u_z	[m/s]	Vitesse du vent théorique à la hauteur z
u^*	[m/s]	Vitesse de frottement
κ	[-]	Constant de Karman
V	[-]	Indicateur équivalent de C_v , représentant de l'impact d'obstacle dans l'écoulement
\overline{V}_b	[m ³]	Volume moyen de construction
H	[m]	Hauteur du bâtiment
\overline{H}	[m]	Hauteur moyenne des bâtiments
L	[m]	Longueur du bâtiment, taille de la maille du bâtiment (pour le maillage)
\overline{L}	[m]	Longueur moyenne des bâtiments
W	[m]	Largeur du bâtiment
\overline{W}	[m]	Largeur moyenne des bâtiments
d	[m]	Distance d'éviation de la ligne centrale
D	[m]	Distance entre deux bâtiments
I_o	[-]	Impact d'obstacle dans l'écoulement
R	[m]	Rayon du domaine de simulation CFD
N	[-]	Nombre de couches d'inflation pour le sol et les murs extérieurs de bâtiment
E_a	[]	Erreur absolue
E_r	[%]	Erreur relative
z	[m]	Hauteur d'évaluation à partir du sol
z_d	[m]	Hauteur du plan de déplacement dans un tissu urbain
z_0	[m]	Longueur de rugosité
Z	[m]	Altitude d'évaluation au-dessus du toit

1. Problématique

En écho à des situations internationales et locales, cette thèse aborde principalement les problématiques suivantes :

1) Le changement climatique

Dès la première révolution industrielle à la fin du XVIII^e siècle, la trace des activités humaines sur l'environnement de notre planète devient de plus en plus apparente. Le développement de la technologie industrielle a modifié les besoins et les consommations énergétiques. De nombreuses sources fossiles, notamment le pétrole et le charbon, sont exploitées et consommées avec des impacts très importants. Les problèmes environnementaux comme la pollution d'air, l'effet de serre, sont parmi les causes principales du changement climatique auquel nous sommes confrontés. L'influence de changement climatique est si importante que nous ne pouvons plus l'ignorer aujourd'hui. Par exemple, les observations par satellite montrent que la glace de l'Arctique maintenant diminue avec un taux de 13,3 % par décennie, par rapport à la moyenne entre 1981 et 2010¹. Vu les autres conséquences comme le changement du milieu biologique, la sécheresse et la désertification, des mesures immédiates sont indispensables.

Parallèlement, la population urbaine a dépassé la population rurale à l'échelle mondiale, avec un pourcentage prévu de 60 % en 2030². La demande d'énergie, notamment en énergie renouvelable, est connaît une croissance importante.

2) les inconvénients et les restrictions sur le développement des champs des éoliens

Aujourd'hui, on construit principalement des fermes éoliennes de grand puissance et d'efficacité élevée. Depuis le premier champ éolien créé en 1980³, la technologie s'est largement développée et un cadre législatif et tarifaire a été mis en place pour le développement⁴. Pour bien exploiter l'efficacité de production d'énergie éolienne, les champs sont souvent placés dans les zones rurales, sur les côtes ou en off-shore où l'on peut profiter au mieux d'espaces libres et ventés. Cependant, jusqu'à présent on n'a pas trouvé de moyen efficace pour stocker cette électricité, notamment sur le long terme. on a souvent les risques de surproduction importantes alors la demande énergétique dans ces zones-là sont assez faible. De plus, un grand problème des champs d'éoliennes est la perte de puissance durant le transport de longue distance. En outre, on assiste à l'heure actuelle au développement des « smart-grids », qui permettent de rendre compatibles, les variations importantes de la demande d'énergie locale, et des modèles de production poly-énergies moins centralisés. Dans ce contexte, il est temps de considérer la possibilité de développer des petites éoliennes en ville, dans des circuits courts proches de ses usagers. De plus, l'existence des grandes tours et des effets du vent effectués par les bâtiments offrent des conditions favorables pour installer des petites éoliennes.

¹ National Snow and Ice Data Center, http://nsidc.org/cryosphere/sotc/sea_ice.html

² Kayla Friedman, Alison Cooke. *City versus national energy use: implications for urban energy policy and strategies*. Procedia Engineering 21 (2011) 464-472.

³ Wind Energy Center Alumni and the Early Wind Industry. University of Massachusetts Amherst. 2010. Retrieved 24 April 2010. <http://www.umass.edu/windenergy/about.history.alumni.php>

⁴ T. FRIGNOUX et al, *Eoliennes en milieu urbain - Etat de l'art*. ARENE Ile-de-France, janvier 2006, p8.

2. Objet de la recherche

Cette thèse se focalise autour deux thématiques différentes : la morphologie urbaine et le vent (Fig. 01)¹. Notre travail se focalise sur leur interaction. L'objet est de rechercher les impacts de la morphologie urbaine sur le potentiel éolien dans la ville : étudier les meilleures formes urbaines et lieux pour exploiter l'énergie éolienne, proposer des recommandations pour le développement d'éoliennes adaptées et pour leur mise en œuvre en milieu urbain.

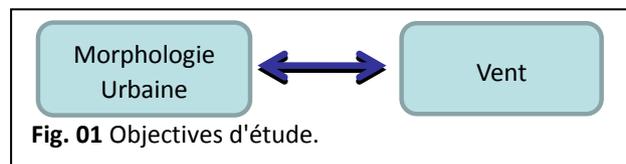


Fig. 01 Objectives d'étude.

Notre thèse, vise ainsi à répondre aux deux questions fondamentales suivantes :

- Quels sont les impacts de la morphologie urbaine sur l'écoulement du vent dans la ville ?
- Comment évaluer le potentiel énergétique éolien de la ville ?

3. Méthodologie de recherche

En premier lieu, notre travail a débuté par une étude bibliographique exhaustive qui a permis l'arrangement et l'intégration des informations, l'analyse et la comparaison à des exemples ou projets, et aussi l'étude et l'insertion des théories associées. Par la bibliographie, nous avons pu aussi accumuler un certain nombre de résultats et d'analyses d'expériences, qui travaillent sur des bases analogues à celles de notre étude et nous offrent des informations sur l'utilisation des logiciels et l'installation des éoliennes.

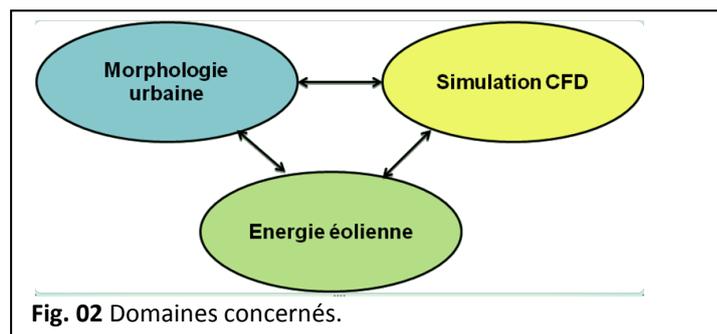


Fig. 02 Domaines concernés.

Parallèlement, la modélisation numérique, liée avec l'analyse théorique, est la seconde méthode de recherche principale utilisée dans cette thèse. Comme montrée dans la Fig. 02, la simulation CFD est permet de faire le lien entre la morphologie urbaine et l'énergie éolienne. La modélisation est prévue en deux étapes :

La première étape est associée au développement des modèles basés sur des formes simples (un ou deux bâtiments), qui donneront des bases de connaissance sur l'impact de la morphologie urbaine sur le vent en sur des comparaisons entre des paramètres variés ;

La seconde étape est basée sur l'analyse d'îlots réels dans les villes à l'échelle de quartier (environ 450 m*450 m) : grâce à la simulation de ceux-ci, on trouvera les caractéristiques des formes urbaines favorables pour développer l'énergie éolienne et déterminera les meilleurs endroits pour l'implantation des éoliennes.

D'ailleurs, pour les outils de simulation, nous allons utiliser principalement le logiciel FLUENT, qui a déjà intégré dans un plateau « Benchwork » du code Ansys, les fonctions comme la modélisation, le maillage, la configuration, le calcul et l'analyse des résultats. Cependant, d'autres logiciels comme Autocad, Photoshop, Excel et Matlab seront utilisés pour dessiner et analyser des données.

¹ Source : l'auteur. Toutes les figures suivantes sans marquées de sources viennent de l'auteur.

4. Structure de thèse

Cette thèse est structurée en deux parties. La première partie est centrée sur la synthèse bibliographique, qui occupe les trois premiers chapitres. La deuxième partie concerne la modélisation et l'évaluation de l'impact de la morphologie urbaine sur le potentiel éolien.

Le premier chapitre est centré autour de la morphologie urbaine. L'historique, la définition, et les différents modes de classification sont présentés. Des paramètres et indicateurs de forme urbaine sont analysés. Les formes de ses composantes, notamment les bâtiments et les rues, sont ainsi considérées. En outre, concernant la relation entre l'environnement aérodynamique et la morphologie urbaine, la théorie descriptive de l'écoulement du vent en milieu urbain est présentée. L'aérodynamique du bâtiment et les effets du vent sont également étudiés.

Le deuxième chapitre concerne les travaux sur la modélisation de l'environnement du vent. Différentes méthodes numériques CFD et modèles de turbulence sont présentés et comparés. La littérature sur les processus de validation ainsi que les lignes directrices pour adapter les simulations aux pratiques sont analysés, dans le contexte de la simulation CFD de l'écoulement du vent dans un environnement bâti. En outre, des résultats intéressants sur l'interaction entre le vent et les bâtiments, notamment pour l'étude de l'effet de concentration du vent dans le milieu bâti, sont présentés.

Le troisième chapitre présente l'utilisation de l'énergie éolienne et l'application des éoliennes en ville. Trois sections sont abordées : l'énergie éolienne, l'éolienne urbaine et les discussions sur le développement de l'énergie éolienne en ville dans le futur. Les challenges et les problèmes techniques et socio-économiques de l'application d'une éolienne urbaine sont présentés. L'évaluation de l'énergie éolienne est discutée. Des propositions d'implantations, des nouvelles technologies d'éolienne et des conceptions architecturales innovantes sont ainsi présentées.

Le quatrième chapitre concerne la validation et la vérification de notre modèle de simulations CFD. Un modèle de référence d'expérimentation en soufflerie sur l'étude de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment est utilisé pour notre validation. De nombreux essais sont exécutés pour trouver les meilleures valeurs des paramètres du code CFD. Dans la partie vérification, les approches comme l'étude de la cohérence du flux, de la sensibilité à la taille du domaine et du maillage sont présentées.

Le cinquième chapitre concerne la simulation de l'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés. Des indicateurs sont définis et évalués pour évaluer le potentiel éolien. Différentes formes de bâtiments isolés, différentes configurations à deux bâtiments et à trois bâtiments sont étudiées.

Le sixième chapitre présente la simulation des modèles complexes. Des indicateurs de forme urbaine ont été choisis et définis pour identifier une forme urbaine à l'échelle de quartier. Six modèles de quartiers réels choisis à l'échelle du monde sont simulés et analysés. Les performances du vent dans ces différents modèles sont discutées et comparées en cherchant à déterminer des relations avec les indicateurs de forme urbaine. En outre, des modèles d'unité avec des bâtiments simplifiés ou avec des modifications sont testés.

Le dernier chapitre présente la méthode d'évaluation détaillée de l'énergie éolienne dans un quartier réel. Les facteurs socio-économiques ainsi que les climats locaux, notamment la distribution du vent, sont considérés. Selon la distribution du vent local, l'effet de concentration du vent et le potentiel éolien au-dessus des toits sont évalués pour le quartier. Ensuite, des propositions sur des éoliennes adaptées au cas d'étude ainsi que les rendements énergétiques associés sont abordés. Un exemple de l'implantation des éoliennes sur le toit et l'évaluation de l'énergie éolienne dans différentes positions est présenté. En outre, une méthode mathématique basée sur des paramètres

morphologiques simples est présentée pour évaluer le potentiel éolien au-dessus des toits. L'indicateur de l'impact d'obstacle des bâtiments est choisi et défini. La cohérence entre les résultats de la méthode mathématique et ceux de la simulation CFD est enfin analysée.

Partie I : Approche théorique et synthèse bibliographique

Dans cette partie, les approches théoriques seront introduites sur les trois directions : morphologie urbaine, modélisation du vent et énergie éolienne. En même temps, les points de vue importants et les résultats intéressants pour notre sujet seront présentés comme une synthèse bibliographique. C'est sur la base de cette partie l'objet de recherche est orientée et les simulations numériques sont démarrées.

1. Morphologie urbaine

Dans ce chapitre, tout d'abord, on examine brièvement l'histoire du développement de la morphologie urbaine. On présente les contenus qu'elle se focalise. Ensuite, différents classements de forme urbaine sont présentés. Ils sont utilisés pour créer un classement complet général adapté à notre sujet de recherche. Des évaluations prévisionnelles sur les critères de classement sont données afin de trouver les formes urbaines typiques de recherche avant de faire les simulations MFN (*Mécanique des fluides numérique*, en anglais CFD : *Computational fluid dynamics*). Après cela, nous étudions les paramètres de forme urbaine et choisissons les indicateurs les mieux adaptés à notre recherche. Afin de mieux connaître le tissu urbain, les formes de ses composantes, notamment les bâtiments et les rues, sont considérées. En outre, la forme urbaine est discutée pour son rôle de construire le système organique de ville et la ville durable dans le futur.

Dans le chapitre de l'environnement aéraulique et de la morphologie urbaine, on présente d'abord la théorie d'écoulement du vent au milieu urbain et ensuite les recherches mettant en relation le climat (surtout l'aérodynamique) et la forme bâtie ou forme urbaine. L'aérodynamique du bâtiment est ensuite décrite, dans le but d'étudier les effets du vent et aboutit aux considérations pour améliorer l'environnement aéraulique urbain.

1.1 Définition et contenu

1.1.1 Historique

La recherche de la morphologie urbaine a commencée au début de XIX^e siècle. A cette époque, les cartes topographiques et les plans sont devenus une source significative d'information sur l'histoire des villes.

En 1832, Antoine Quatremère de Quincy a indiqué l'importance des plans des villes pour la compréhension de l'histoire des villes, et a trouvé des caractéristiques de forme et d'espace dans le processus d'évolution de ville (Gauthiez 2004). En 1899, le livre « *Über den Grundriss der Städte* » (sur la disposition de communes) par Otto Schlüter, signifie la naissance de la discipline de la morphologie urbaine en l'analysant dans le domaine de la géographie comme la géographie humaine et la morphologie du paysage culturel. Pourtant, la première fois que la notion la morphologie urbaine a été utilisée vient de John B. Leighly en 1928.

Après la Seconde Guerre mondiale, la recherche en morphologie urbaine distingue trois courants : 1) une approche d'analyse du plan de la ville autour de l'étude des modèles de parcelles de terrain développée par M.R.G. Conzen et suivie par Jeremy Whitehand en Angleterre, 2) une approche développée par Saverio Muratori en Italie sur « l'histoire opérationnelle » pour les villes et l'analyse des types de bâtiments au fil de l'histoire, 3) une approche qui suit les deux précédentes, développée en France à Versailles par Philippe Panerai, Jean CasteX et Jean-Charles Depaule, sur la relation dialectique entre la forme urbaine et le comportement social (Duan et Qiu 2009).

A partir de ces trois théories d'école il y a aussi nombreux chercheurs travaillant sur le sujet de la morphologie urbaine. Ernest Burgess, de l'école de Chicago, a utilisé une approche écologique en mettant l'accent sur la relation entre les organismes et leur environnement, qui a été développée comme une théorie concentrique-zonale (Burgess 1925). Christopher Alexander et Nikos Salingaros ont créé une nouvelle école de la morphologie urbaine fondée sur la morphogenèse et l'émergence des réseaux. Ils proposent que le développement urbain est un processus de calcul similaire à celui de la croissance des cellules dans un organisme et que le déroulement de ces processus produit le paysage urbain et ses typologies (Alexander 2004). K. Lynch a proposé des modèles standards de la forme urbaine : modèle de l'univers, modèle de la machine et modèle des organismes en évaluant les

indicateurs de performance comme la vitalité, la sensation, l'aptitude, l'accessibilité, le contrôle de gestion, l'efficacité et l'équité, etc. (Lynch 1981).

En 1996, le Séminaire International sur la Forme Urbaine (ISUF) a été créé et a intégré les trois courants principaux. Dès lors, les communications autour de la morphologie urbaine se sont largement développées ainsi que des réseaux filiaux comme réseau portugais et réseau chinois.

1.1.2 Définition et objet d'étude

La morphologie urbaine est l'étude des formes urbaines. La forme urbaine est alors définie comme une partie du territoire urbain, identifiée globalement, correspondant à une zone homogène du point de vue morphologique (Lynch 1999). Pour Rémy Allain, la morphologie urbaine est l'étude de la forme physique de la ville, de la constitution progressive de son tissu urbain et des rapports réciproques des éléments de ce tissu qui définissent des combinaisons particulières, des figures urbaines (Allain 2004).

En fait, elle se croise avec plusieurs termes proches : typologie urbaine, composition urbaine, syntaxe spatiale, structure urbaine, tissu urbain, forme urbaine, etc. (voir Annexe 1.1). La Fig. 1-1-1 montre trois niveaux d'étude sur un tissu urbain : voies, parcelles et bâtiment. En prenant en compte les différentes notions, la morphologie urbaine peut être considérée comme une méthode, basée sur la théorie de la typologie et de la morphologie, permettant d'étudier et d'analyser les espaces urbains et les formes physiques urbaines dans la cadre de l'urbanisme, en confrontant les problèmes comme l'étalement de la ville, l'évolution sociale et économique, le trafic et la consommation d'énergie, etc.

Les objectifs de recherche sur la morphologie urbaine, le premier est de permettre une "lecture" de la ville : « une technique analytique pour "lire" la ville en comprenant l'évolution de la forme urbaine en relation avec les changements sociaux, économiques et démographiques ». Un deuxième objectif est de proposer une vision normative (et contrôlable) de l'évolution de la ville, même s'il y a des critiques et des doutes sur cela (Merlin, 1988, pp. 48-49).

Pour la forme bâtie, sur laquelle la morphologie urbaine étudie, il y a deux déterminants d'influence : les forces physiques et les forces non-physiques. Le premier groupe se compose de facteurs comme la topographie, la géologie et le climat. Elles sont relativement plus faciles à définir et à évaluer leurs effets. Alors le dernier groupe se compose des forces comme la religion, la défense de territoire et les facteurs socio-économiques. Elles expliquent leurs relations avec la forme bâtie dans une échelle plus large que celle de forme physique (Fig. 1-1-2a) (Sharag-Eldin 1998, pp. 10-11).

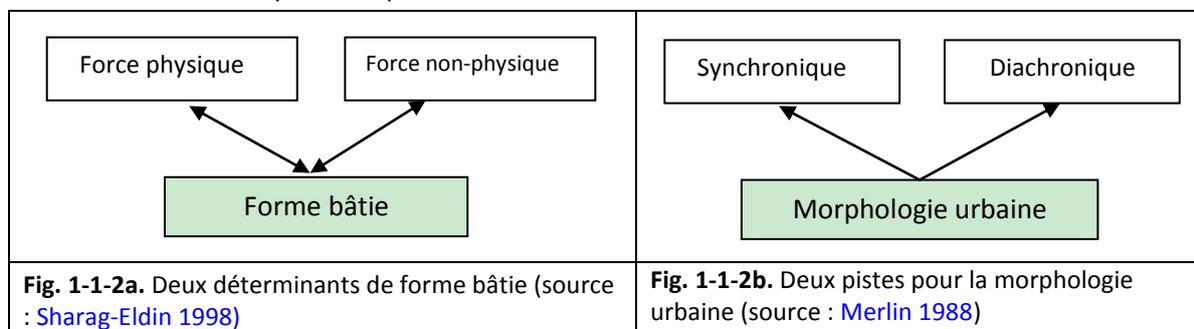
Cependant, Vittorio Gregotti considère que la morphologie ne concerne que les aspects matériels de l'architecture et du cadre physique, justement cette matérialité entraîne avec elle une lourde charge de mémoire collective, de symboles, d'histoire, de besoins du corps social inscrits dans les transformations du cadre physique (Merlin 1988, pp. 17). C'est-à-dire, il pense que la morphologie ne concerne pas directement les aspects socio-économiques mais ceux-ci s'expriment et exercent des influence sur les formes physiques.

De plus, par rapport à une échelle temporelle, il y a deux pistes de recherche sur la morphologie urbaine : synchronique et diachronique (Fig. 1-1-2b). La méthode synchronique s'intéresse à une morphologie urbaine descriptive, à des formes urbaines concrètes, comme un catalogue des



Fig. 1-1-1 Tissu du centre ancien de Caire (source : Panerai et al. 1999).

réalisations probantes de la ville en vue de construire un répertoire des modèles répétables. En revanche, la méthode diachronique, concernant des formes urbaines historiques, est liée à une théorie morphogénétique de l'occupation de l'espace qui indique les processus de formation – déformation – transformation des configurations urbanisées, privilégiant la dynamique de la mutation dans laquelle se manifeste la diversification des classifications spécifiques (Merlin 1988, pp. 17). Dans cette thèse, lorsqu'on étudie des formes urbaines existantes ou imaginées du futur, et des formes urbaines différentes au monde entier qui sont potentiellement favorables pour l'énergie éolienne, la méthode synchronique est utilisée.



La morphologie urbaine est une méthode couramment utilisée pour les problèmes d'aménagement : l'analyse de transport (Millot 2003, Hankey *et al.* 2010, Liu *et al.* 2011, Zahabia *et al.* 2012), l'environnement thermique ou climatique (Shashua-Bar *et al.* 2006, Zhao *et al.* 2011, Norte Pinto 2014), ou des situations sociales et économiques (Bardhan *et al.* 2011).

Dans cette thèse, la méthode de morphologie urbaine appliquée pour évaluer l'énergie éolienne dans la ville doit être bien modeste et holistique dans le cadre de l'urbanisme. C'est-à-dire, elle ne se concentre pas seulement sur les formes physiques des villes, qui ont l'impact principal d'écoulement du vent, mais elle respecte aussi les facteurs et conditions socio-économiques pour le développement de l'énergie éolienne.

1.2 Classement de formes urbaines

Dans la littérature il y a différentes méthodes pour classer les différentes formes urbaines, dont les critères sont variés : la configuration et la structure d'espace, les types de bâtiment, les évolutions au fil du temps, la densité de logements, les cultures et les régions, la position dans la ville ou l'usage des sols (voir les détails dans l'Annexe 1.2).

Lorsque cette thèse s'intéresse aux formes urbaines générales à l'échelle de quartier, une possibilité de classement peut être la combinaison des critères comme la position de ville (en sens géographique), la position de tissu urbain dans la ville, l'usage des sols en aménagement, afin de montrer des variantes principales en forme physique de nos villes présentes :

- 1) centre ville : noyau urbain ancien,
- 2) centre ville : habitat au fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle,
- 3) centre ville : zones publiques modernes,
- 4) centre ville : habitat collectif après la guerre,
- 5) centre ville : habitat collectif présents,
- 6) centre ville : habitat individuel dense (sans jardin),
- 7) centre ville : habitat pavillonnaire (avec jardin),
- 8) centre ville : habitat de bidonville,
- 9) centre ville : zones portuaires et rivières,
- 10) centre ville : grandes zones ouvertes,
- 11) périphérie : espaces de loisirs, commerciales,
- 12) périphérie : parc high-tech, cité universitaire,

- 13) périphérie : zones industrielles,
- 14) périphérie normale : faubourgs.

En raison de l'évolution au cours du temps et de la multi-fonctions de l'espace de ville, la forme urbaine réelle présente une grande variété dans la même catégorie et il y a aussi des espaces urbaines qui sont en train de se transformer et forment un mélange des différentes formes urbaines. Selon le classement de forme urbaine ci-dessus, 17 exemples de tissu urbain sont sélectionnés avec des descriptions de leurs caractéristiques de la morphologie urbaine (**Tableau 1-1**).

En considérant les nombreux types de forme urbaine pour les 14 catégories, qui amènent une grande difficulté pour tester toutes dans la simulation CFD, un processus de filtrage préliminaire est pris. Il s'agit des évaluations prévisionnelles de capacité de capter l'énergie éolienne pour chaque catégorie. Lorsque les types de formes sont présentés sans considération du contexte culturel et climatique, les évaluations de l'environnement aérodynamique et du potentiel d'énergie éolienne à partir de la forme physique manque sans doute d'exactitude et de précision. Des analyses intégrées des informations climatiques et socio-économiques locales seront faites sur un cas particulier dans le Chapitre 7. Avant d'analyser des cas complexes, seulement des facteurs de la forme physique (qui influencent directement l'écoulement du vent) sont abordés. A la base de connaissance de l'aérodynamique bâti, les caractéristiques de l'environnement aérodynamique sont estimées et prévues selon les descriptions des caractéristiques de la morphologie urbaine. Ensuite, pour évaluer la capacité d'énergie éolienne, les critères et les considérations suivants peuvent être pris :

- 1) la vitesse moyenne du vent. Il est sans doute le critère le plus important ;
- 2) la surface des zones potentiels. Est-elle assez grande ?
- 3) la faisabilité et la difficulté. A quel niveau est la difficulté d'installation des éoliennes ? Est-elle faisable du point de vue socio-économique ?
- 4) les impacts environnementaux. Lesquels ? A quel niveau ?

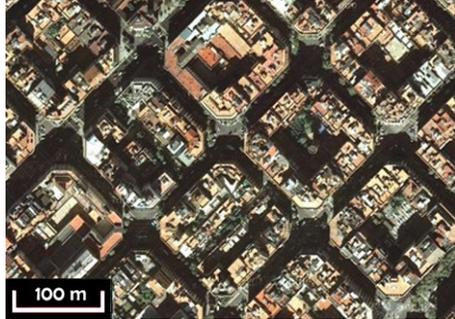
Après évaluer approximativement les potentiels d'énergie éolienne de différentes formes urbaines (**Tableau 1-1**), on peut conclure que :

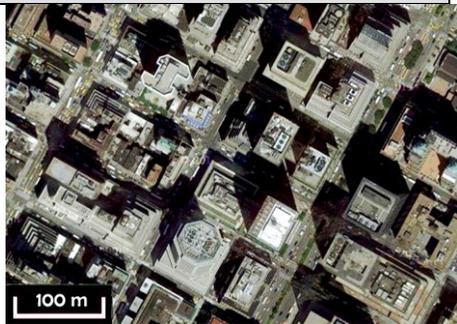
- lieux peu propices ou peu proposés : les centres villes de noyau ancien (habitat avant les guerres mondiales). Ici le tissu est compact et très rugueux, qui rend le vent souvent faible. De plus, les grands impacts d'environnement social (bruit, dérangement visuel, etc.) et la sécurité de construction (en vue de nombreux bâtiments anciens) empêchent l'installation d'une éolienne.
- lieux réservés : habitat individuel dense, habitat pavillonnaire, habitat de bidonville, grandes zones vertes et faubourgs. S'il y a du vent, les habitats individuels dans la ville ou en périphérie peuvent envisager d'installer une petite éolienne sur toit ou dans leurs jardins. Le rendement est souvent peu important à cause de la hauteur limitée de rotor. Les bidonvilles et les grandes zones ouvertes en centre ville peuvent être choisies pour installer une éolienne indépendante avec un mat assez élevé. Pour les grands espaces verts, l'impact visuel (paysage) est essentiel tandis que pour les bidonvilles c'est la volonté de gouvernement qui prends la décision.
- lieux proposés : zones publiques modernes, habitat collectif construit après la Seconde Guerre mondiale ou contemporain, zones portuaires et rivières dans la ville, espaces de loisirs, commerciaux, industriels et universitaire en périphérie. Les zones publiques modernes, souvent, bâties de grandes tours de bureaux, ont de grands avantages dues à la hauteur et à l'effet de concentration du vent. Les habitats collectifs ont des effets de concentration, alors que les espaces portuaires et rivières ont une rugosité faible et les périphéries ont un impact d'environnement moins important.

Sans considération de condition climatique et socio-économique, les types de formes avec un grand potentiel énergétique comme les zones publiques modernes et les habitats collectifs sont choisis et comparés dans les simulations et les évaluations qui suivent. En tout cas, toutes les formes potentielles pour capter l'énergie éolienne doivent être réévaluées dans leurs contextes.

Tableau 1.1

Classement des morphologies urbaines et faisabilité provisoire d'implanter des éoliennes

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (A la base de Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéraulique	Evaluation prévisionnelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : Noyau urbain ancien	Compacte, dense, petite taille, hauteur moyenne (12 ~ 15 m) et peu variée, grande rugosité, peu d'espaces libres étendus, les rues souvent étroites, non géométriques et sans ordre.	Stable relativement dessus des toits mais dessous beaucoup de turbulence et une vitesse très faible.	Peu adapté des éoliennes sauf aux grands espaces ouverts comme les places.	 <p>(Toulouse, France)</p>
Centre ville : Habitat au début du XX ^e siècle 01	Compacte, dense, hauteur moyenne (18 ~ 24 m), les rues rectilignes, structurées et plus grandes que dans le centre ville ancien, la trame géométrique, la trace de l'ère industrielle apparue.	Similaire à celle du noyau urbain ancien mais un peu plus de turbulence, vitesse du vent faible, les effets du vent apparus comme l'effet de canalisation.	Peu adapté des éoliennes sauf aux grands espaces ouverts, aux coins qui forment une bouche de rafale perpétuelle et le long des avenues.	 <p>(Paris, France)</p>
Centre ville : Habitat au début du XX ^e siècle 02	Compacte, hauteur moyenne (15~24 m), quartier divisé par des blocs octogonaux et à taille standard (130 ~ 140 m), chaque bloc entouré d'une grande cour, les rues toutes orthogonales, les avenues larges (20 m), les coins des rues arrondis.	Bonne ventilation, vent faible dans les cours, vent un peu élevé et moins de turbulence dans les avenues, les effets du vent apparus comme l'effet de coin et l'effet de canalisation.	Lieux potentiels pour installer des éoliennes sur les toits des bâtiments aux coins des rues.	 <p>(Barceone, Espagne)</p>

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (A la base de Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéraulique	Evaluation prévisionnelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : Zones publiques modernes 01	Souvent un quartier d'affaires (CBD), très compacte et dense, grande taille, beaucoup de tours (> 50 m), grande rugosité, peu d'espace libre étendu, formes plutôt taillées et ordonnées dans les petites lotissements, les rues moyennes, bien structurées et rectangulaires.	Instable, beaucoup de turbulence, vitesse du vent moyenne, les effets du vent fréquentés : l'effet de coin, l'effet de sillage, l'effet Venturi et l'effet de pyramide.	Lieux propices pour installer des éoliennes sur les toits ou proche des coins des tours, évaluation d'énergie éolienne obligatoire en raison de la grande influence du voisinage.	 (New York, Etats Unies)
Centre ville : Zones publiques modernes 02	Souvent des bureaux officiels ou publics, dense, grand bloc, hauteur assez grande (40 ~ 50 m), grandes avenues, formes taillées et ordonnées, grande rugosité, les rues bien ordonnées et géométriques.	Plutôt stable et périodique, peu de turbulence, vent fort saisonnier le long des avenues, vitesse du vent moyenne, les effets du vent fréquentés comme l'effet de sillage, l'effet Venturi et l'effet de canalisation.	Lieux propices pour installer des éoliennes sur les toits des tours avec respect l'impact visuel de façade, évaluation d'énergie éolienne obligatoire, des éoliennes le long des avenues aussi proposées.	 (Pékin, Chine)
Centre ville : Zones publiques modernes 03	Souvent un quartier d'affaires, dense, grande taille, beaucoup de tours, grands espaces libres, formes très variées, grande rugosité, les grandes rues, bien ordonnées et géométriques.	Instable, beaucoup de turbulence, intensité du vent aussi très variée. vitesse du vent un peu élevée, les effets du vent fréquentés comme l'effet de coin, l'effet de sillage, l'effet Venturi et l'effet de pyramide.	Lieux très propices pour installer des éoliennes sur les toits ou proche des coins des tours, évaluation d'énergie éolienne proposée, des éoliennes le long des avenues aussi proposées.	 (Shanghai, Chine)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (A la base de Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéralique	Evaluation prévisonelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : habitat collectif après la guerre	Souvent construit après la Seconde Guerre mondiale, dense mais dispersée, hauteur et taille grande ou moyenne, en forme de barres longues et de tours, grands espaces ouverts (vert et parking), les rues rectilignes, structure géométrique, la trace de l'ère industrielle très forte.	Peu stable, présence de turbulence, vitesse du vent élevée, les effets du vent fréquentés comme l'effet de coin, l'effet de sillage et l'effet Venturi.	Lieux très propices pour installer des éoliennes sur les toits ou proche des coins des tours, évaluation d'énergie éolienne obligatoire, des éoliennes indépendantes dans le passage des bâtiments aussi proposées.	 <p>(Toulouse, France)</p>
Centre ville : habitat collectif présentes	Souvent construit après les années 1970, dense mais dispersée, hauteur et taille grande ou moyenne (20 ~ 50 m), en forme de barres courtes et de tours, grands espaces vert, bien structurée, ordonnée et dessinée avec humanité, caractère distinctif.	Stable et périodique, une vitesse du vent moyenne et variée selon les endroits considérés.	Lieux pouvant être sélectionnés pour installer des éoliennes sur les toits ou des éoliennes indépendantes mais plus discrètement pour respecter l'environnement.	 <p>(Guangzhou, Chine)</p>
Centre ville : habitat individuel dense	Zone habitat généralement des riches ou de classe moyenne, compacte, dense, taille moyenne (200 ~ 600 m ²) et indépendante, hauteur moyenne (8 ~ 20 m), chaque maison de forme variée mais généralement ordonnées, grande rugosité, peu d'espaces libres étendus. les rues de taille moyennes et assez régulières.	Plutôt stable et périodique à grande échelle, moins de turbulence au-dessus des toits, une vitesse du vent moyenne.	Lieux pouvant être sélectionnés pour installer des éoliennes sur les toits des tours plus haut que les autres, évaluation d'énergie éolienne obligatoire des impacts environnementaux.	 <p>(Mumbai, Inde)</p>

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (A la base de Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéralique	Evaluation prévisonelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : habitat pavillonnaire	Peu de densité de population, dispersée, lotissements et bâtiments petits, bas (< 12 m), bien ordonnés et monotones, divisés géométriques mais souvent rectangulaires en raison économique, pas de grand espace ouvert, peu de rugosité.	Stable et périodique à grande échelle, peu de turbulence, vitesse du vent moyenne, un peu plus forte au-dessus des toits (> 15 m) qu'au centre ville noyau.	Peu rendable des éoliennes en raison de la hauteur d'installation et des impacts environnementaux importants.	 100 m (New York, Etats Unies)
Centre ville : habitat de bidonville	Très compacte et dense en plan, taille petite (< 300 m ²) et enchevêtrée, hauteur basse (2 ~ 8 m), forme et style monotone, les rues étroites et désordonnées, faible rugosité, presque sans espaces libres étendus.	Stable et périodique à grande échelle, peu de turbulence et une vitesse du vent très faible au niveau des piétons, vitesse élevée au-dessus des toits.	Lieux propices pour installer des éoliennes de taille médium ou grande qui peuvent offre l'énergie à une grande échelle, option pour le gouvernement et certaine développeurs.	 100 m (Mumbai, Inde)
Centre ville : zones portuaires et rivières	Dispersée, taille différente mais pas de grande hauteur (< 15 m), des bandes de verdure, des bâtiments temporaires ou de stockage (silos, cuves, entrepôts), formes peu ordonnées, faible rugosité.	Stable et périodique, turbulence moyenne, une vitesse du vent un peu plus grande qu'au centre ville.	Lieux très propices pour installer des éoliennes indépendantes ou intégrées avec l'architecture, évaluation proposée des impacts environnementaux.	 100 m (Lyon, France)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (A la base de Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéralique	Evaluation prévisonelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : grandes zones vertes	Souvent des colline, des montagnes, des rivières ou lacs dans la ville, des parcs, des jardins publics, peu de bâtiments ou des bâtiments de taille petite, grand espace ouvert, faible rugosité.	Stable et périodique, une vitesse du vent élevée et variée selon les endroits considérés.	Lieux très propices pour installer des éoliennes indépendantes, évaluation obligatoire des impacts environnementaux (paysage).	 <p>100 m</p> <p>(New York, Etats Unies)</p>
Périphérie : espaces de loisirs, commerciales	Souvent des grands espaces ouverts (verdure, court de tennis, piscines, parkings, grandes routes rapides), peu de bâtiments (stades, supermarché, entrepôt).	Généralement stable et périodique dans un grand espace ouvert, une vitesse plus élevée qu'au centre ville, peu de turbulence.	Lieux très propices pour installer des éoliennes indépendantes ou intégrées avec l'architecture, peu de contraintes.	 <p>100 m</p> <p>(Toulouse, France)</p>
Périphérie : parc high-tech, cité universitaire	Construite dans les années 1980-90, peu dense, grands espaces ouverts (verdure, place ou sport), bien planifiée et structurée, caractère distinctif, les bâtiments de taille assez grande (30 ~ 100 m), la hauteur moyenne (10 ~ 20 m), le style à la mode.	Stable et périodique, une vitesse du vent moyenne en zone périurbaine, les effets du vent apparus comme l'effet de coin et l'effet Venturi selon les endroits et le temps, une ambiance du vent assez agréable grâce à beaucoup d'arbres.	Lieux très propices pour installer des éoliennes indépendantes ou intégrées avec l'architecture, une option favorable et adaptée à la nature du parc scientifique et éducatif (écologique, technologie innovante).	 <p>100 m</p> <p>(Pékin, Chine)</p>

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (A la base de Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéroulique	Evaluation prévisonelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Périphérie : zones industrielles	Grande taille des bâtiments et grands espaces ouverts moins d'ordre (verdure, place ou parkings), des constructions temporaires et entrepôts, à proximité des échangeurs sur les autoroutes et voies rapides, peu dense, basse hauteur (4 ~ 12 m), style monotone.	Peu stable, une certaine turbulence, une vitesse du vent élevée, une ambiance du vent peu agréable.	Lieux très propices pour installer des éoliennes intégrées avec l'architecture, des éoliennes économiques et pratiques proposées, peu de contraintes..	 <p>(Toulouse, France)</p>
Périphérie normale : faubourgs	S'agissant de toutes les formes linéaires d'urbanisation le long d'une voie de communication importante, peu dense, déséquilibrée en développement d'espace, les bâtiments en taille petits et basse, style monotone, faible rugosité.	Stable et périodique en générale, une vitesse du vent moyenne en zone périurbaine, une ambiance du vent agréable.	Lieux propices pour installer des éoliennes sur les toits des bâtiments les plus hauts ou des éoliennes indépendantes dans les jardins privés ou dans les champs à côté de l'habitat, évaluation d'énergie éolienne proposée.	 <p>(Toulouse, France)</p>

1.3 Paramètres de forme urbaine

Au sujet des indicateurs de forme urbaine, « *Ils doivent avoir une consistance physique, une consistance morphologique, ils doivent être mesurables, lisibles et permettant d'effectuer des comparaisons.* » (Adolphe 2001)

1.3.1 Trois catégories d'indicateurs

Pour trouver les indicateurs de morphologie urbaine en anticipant les différents phénomènes climatiques et environnementaux, Benzerzour (2004) les a analysé et classé en trois catégories :

- *les indicateurs de l'interaction du physique et du construit : caractériser dans le cadre bâti ce qui influe sur les phénomènes physiques.*

D'une part, pour les indicateurs « morpho-physiques », Groleau *et al.* (1995)⁶ ont travaillé sur les propriétés solaires des tissus urbains : la hauteur moyenne des bâtiments, la densité moyenne, le niveau d'homogénéité (forte ou faible), la directionnalité des rues, l'exposition moyenne des façades, la largeur moyenne des rues, le prospect moyen des rues, et la typologie de l'espace ouvert ; Ait-Ameur (2002)⁷ ont travaillé sur les effets microclimatiques à une échelle du tissu urbain (*la densité du bâti*, le pourcentage de minéralisation, le taux de percement horizontal d'un tissu urbain et sa rugosité) et à une échelle de l'espace urbain (le prospect équivalent d'un espace, la longueur équivalente, les facteurs d'obstruction minérale, le facteur d'ombre portée, la fraction de masque, la densité minérale, la densité végétale, le taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace, le taux de vitrage de la façade et l'albédo des surfaces) ; Adolphe (2001) a travaillé sur les variations « microscopiques » d'un fragment urbain : densité, rugosité (absolue et relative), sinuosité, porosité, compacité, continuité, occlusivité, admittance solaire et minéralisation.

D'autre part, pour les indicateurs « physico-morphologiques » : du physique au construit, deux tentatives ont visé : Bottema (1997) a fait des études sur la modélisation de la rugosité de la surface urbaine avec des informations simples : les distances séparant les différents bâtiments et les surfaces des fronts bâtis composées des façades de bâtiments ; Oke et Grimmond (1999) ont travaillé sur les aspects aérodynamiques de la forme urbaine avec trois indicateurs : la fraction de surface du toit par la surface du plan de l'élément, la fraction de surface de la paroi au vent par la surface du plan et la fraction de hauteur de bâtiment par la profondeur du dégagement, à partir de les quatre descripteurs : la surface de l'élément bâti, la surface totale du plan, la surface de la façade frontale, la largeur de la rue et la hauteur moyenne de la rue ainsi que les dimensions et l'élément de rugosité.

- *les indicateurs « morpho - physico - sensibles » : viser à caractériser ce qui est ressenti par les usagers des espaces urbains et la caractérisation de l'interaction du physique et du bâti ne constitue pas une finalité en soi.*

Celui-ci vise à l'analyse de « l'effet » en six domaines : *l'acoustique physique et appliquée, l'architecture et l'urbanisme, la sociologie et la culture du quotidien, l'esthétique musicale, la psychologie et la physiologie de la perception, et les expressions scripturaires et médiatiques.* En raison de sa opérabilité limitée et l'objet éloigné de notre recherche, nous le détaillons pas ici.

- *les indicateurs morphologiques graphiques : viser tout d'abord à décrire la forme urbaine de telle sorte à en communiquer les performances qualitatives (ensoleillement, vue du ciel, etc.).*

⁶ GROLEAU, D. et MARENNE, Ch. (1995). Environmental specificities of the urban built forms, Rebuild-Rebuilding the European city. Integration of Renewable Energies in Established Urban Structures, Corfoue, 29-30 Jul.

⁷ AIT-AMEUR, K. (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du micro climat dans les espaces publics : validation d'un système d'indicateurs « morpho-climatiques » et d'un indicateur de confort , thèse de doctorat, sciences pur l'ingénieur, université de Nantes, Nantes, p288.

Les indicateurs définis sont : le rapport de masse (basée sur une sorte de cartographie de l'ouverture au ciel de l'espace urbain) ; les profondeurs de vue ; régularité de la ligne de ciel ; anisotropie de l'espace (défini par la compacité, l'étalement et excentricité de l'espace). Et l'auteur critique que l'insuffisance de ces indicateurs graphiques en raison de leurs applications limitées au site qu'ils mesurent. (Benzerzour 2004, pp. 235-245)

En plus, l'auteur propose principalement « l'indice d'ouverture directionnelle du vide urbain », *puisque plus l'ouverture est importante plus le point ou l'espace analysé est perméable aux paramètres de l'environnement climatique*. Il a plusieurs avantages : simple, facile à opérer, adapter à plusieurs échelles, représentation graphique qui permet de caractériser un ensemble urbain ou de comparer des ensembles urbains complexes et multiple possibilités d'application (le vent, le soleil, la lumière, pollution sonore ou atmosphérique, etc.) (Benzerzour 2004, pp. 282-283). Pourtant, sa limite d'analyser sur des points rend les prévisions de l'impact de l'environnement dans un district ou un quartier peu disponibles. En comparaison avec lui, les indicateurs comme porosité et occlusivité sont plus adaptés à nos sujets.

1.3.2 Choix des indicateurs

Grosso (1998) a donné des relations entre les paramètres de l'environnement et ceux de la forme, e.g. la forme et la disposition de bâtiment qui induisent différents motifs d'ombrage et la circulation du vent. Steemers (2002) a présenté la caractérisation de forme urbaine qui influence le micro-climat et la consommation d'énergie dans le projet PRECis. Ici le secteur lié de l'environnement aéroulque est présenté dans le **Tableau 1-2**.

Tableau 1-2

Des paramètres correspondants entre l'environnement aéroulque et la forme urbaine (selon Steemers 2002)

Paramètres de l'environnement (du vent)	Paramètres de la forme urbaine
Porosité du vent	Longueur, profondeur, sens de rue ou d'espace
Orientement du vent	Sens de rue ou d'espace
Coefficient de traînée et de tension	Silhouette de ville au sens du vent
Dispersion de pollution	(voir ceux de porosité et de orientation du vent)
Vitesse moyenne proche de terre	(Rien spéciale)
Turbulence	Coin, arrêt, espace entre bâtiments, rugosité de façade, végétation
Ventilation générée par chaleur	Orientation, ratio H/W

Edussuriya *et al.* (2011) a adopté vingt paramètres de morphologie urbaine pour analyser les situations de pollution dans vingt quartiers (200 m × 200 m) en cinq arrondissements de Hong Kong. Qui nous intéresse c'est la liste des paramètres de morphologie urbaine qui est assez détaillée et résumée sur une énorme littérature (**Annexe 1.3**). Ici on donne un groupement clair sur différentes variables dans différents domaines. Parmi les nombreuses variables que six sont utilisées pour adapter son sujet de recherche et sa échelle de quartier : ratio d'aspect complet occlusivité, hauteur de rugosité, hauteur de déplacement de plan zéro, nombre de bâtiments et déviation régulière de la hauteur.

Cionco et Ellefsen (1998) a donné une méthode de créer la base des données de morphologie urbaine avec une haute résolution (40 m - 400 m) pour la simulation numérique du flux dans la ville (échelle de 2 km × 2 km à 20 km × 20 km). Ils donnent une liste de propriétés physiques identifiées pour chaque hectare, dont les intéressants pour nous : type de zone de terrain urbain, densité de construction, hauteur du bâtiment, orientation du bâtiment, pente du toit, réflectivité du toit, surface imperméable, réflectivité de la surface du terre, pourcentage du terrain ombragé (par les arbres). Ici on prend l'attention de l'usage des sols pour analyser les fragments de ville, et celui-ci a une considération économique et sociale qui sera dans notre liste des indicateurs morphologiques urbains. D'ailleurs, l'indicateur « pourcentage du terrain ombragé » (par les arbres) peut être

favorable pour nous car l'influence des arbres la ventilation de ville ne peut pas être ignorée, pourtant rarement les simulations ni numériques ni soufflerie la considèrent.

Comme l'article de Colaninno *et al.* (2011), on ne choisit que des paramètres pratiqués et utiles pour son cas. Pour notre recherche dans le cadre de simulation du vent dans la ville, notamment sur les hauteurs assez importantes où l'énergie éolienne est généralement riche, la classification de forme urbaine est plutôt concentrée sur la forme physique et les interaction entre les éléments et le vent. Donc, à partir les nombreux variables et indicateurs de morphologie urbaine on peut réduire ceux qui sont adaptés à notre sujet. En effet comme les objets de simulation sont variés pour les quatre étapes de recherche, les indicateurs d'évaluation sont différents (Tablea 1-3).

Tableau 1-3

Les indicateurs de la morphologie bâtie et urbaine proposés pour la thèse

Etapes de travaux	Echelle	Attributs de la morphologie	Indicateurs
Modèle simple	Bâtiment, îlot	<ul style="list-style-type: none"> • Forme bâtie ; • Forme de toiture ; • Forme de cour ; • Configuration des bâtiments. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plan, coin et taille (hauteur, longueur et largeur) de bâtiment ; • Type de toiture et sa angle d'inclinaison ; • Plan et taille de cour ; • Séparation, angle de position, plan de bâtiment.
Modèle idéal	Quartier	<ul style="list-style-type: none"> • Forme bâtie ; • Forme de cour ; • Forme de rue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densité, porosité, rugosité, densité de surface frontale.
Modèle de quartier typique	Quartier	<ul style="list-style-type: none"> • Forme de rue ; • Facteurs de développement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur moyenne des bâtiments, longueur et largeur moyenne des rues, volume moyen de construction, complète ratio d'aspect ; • Coefficient d' emprise au sol (CES), coefficient d'occupation des sols (COS) ; • Porosité, rugosité, occlusivité, densité de surface frontale.
Modèle de quartier réel	Quartier, ville	<ul style="list-style-type: none"> • Facteurs de développement ; • Aménagement urbain. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur moyenne des bâtiments, longueur et largeur moyenne des rues, volume moyen de construction, complète ratio d'aspect ; • CES, COS, densité de la végétation, nature d'utilisation des terres ; • Porosité, rugosité, occlusivité, densité de surface frontale.

1.4. Environnement aéraulique et la morphologie urbaine

De nombreux théories scientifiques s'intéressent aux problèmes de l'écoulement du vent dans la ville : *pollution de l'air, ventilation naturelle de bâtiment, pluie sur les bâtiments, transfert de chaleur par convection, érosion éolienne, énergie éolienne, condition de l'écoulement à niveau de piéton, etc.* (Blocken *et al.* 2012, pp. 16). Dans cette partie, nous allons centrer notre approche sur la relation entre l'écoulement du vent et la configuration des bâtiments : e.g. les différents zones de vent autour d'un bâtiment, les différents effets du vent autour d'un ou plusieurs bâtiments, les différents formes urbaines proposées pour les différents types de climat.

1.4.1 Aérodynamique urbain

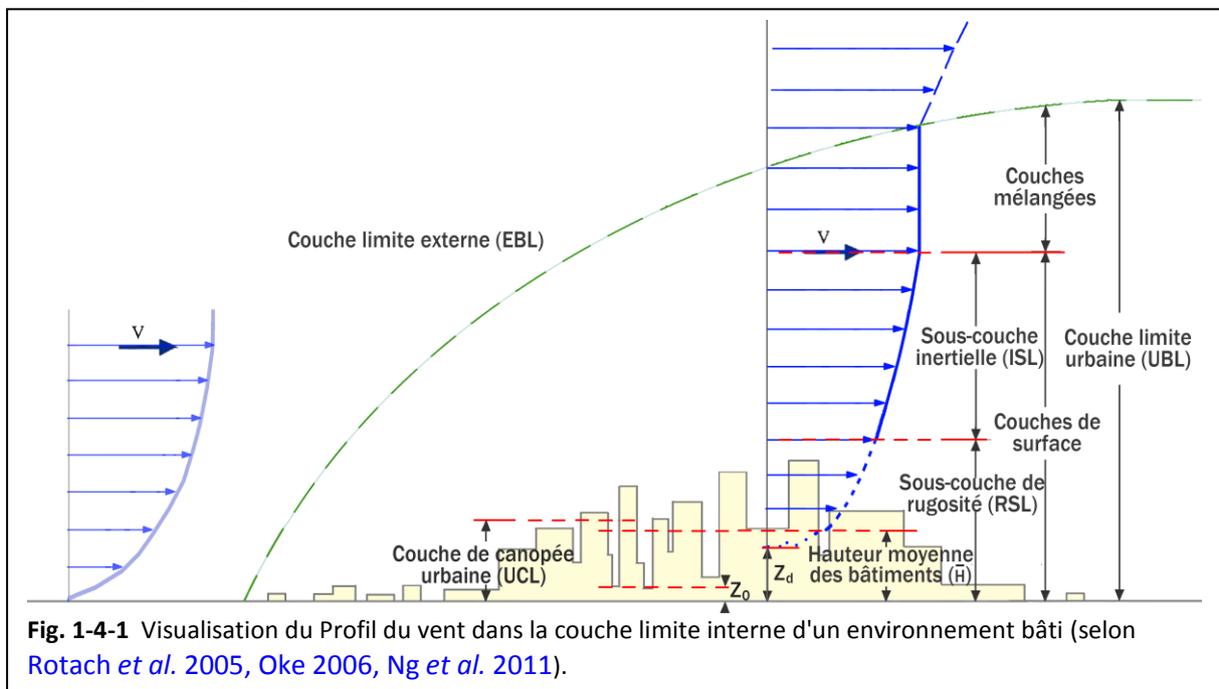
Pour les données d'entrée du vent dans la couche limite atmosphérique, il existe deux méthodes classiques pour définir la vitesse moyenne du vent u_z à la hauteur z : la loi logarithmique et la loi puissance.

(1) Loi logarithmique

$$u_z = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \dots\dots\dots \text{Equation 1-1}$$

où u^* est la vitesse de frottement, κ est le constant de Karman, normalement $\kappa = 0,4$, z_0 est la longueur de rugosité, et z_d est la hauteur du plan de déplacement, i.e. la hauteur au-dessus du sol à laquelle la vitesse du vent est nulle à cause d'obstacles à l'écoulement, tels que des arbres ou des bâtiments. Il est important d'incorporer cette hauteur dans la prédiction du profil de vitesse du vent dans les sites rugueux comme les villes, car z_d est souvent très élevée, par exemple $2/3 \bar{H}$ (Sanderland *et al.* 2013). Un autre document (Lawson 2001) a indiqué que la hauteur du plan de vitesse nulle a environ 1,5 à 2 m en dessous de la hauteur moyenne des obstructions (Yuan et Ng 2012).

La Fig. 1-4-1 nous présente que le profil vertical de vitesse du vent dans un contexte urbain selon cette loi logarithmique.



Comme une couche limite atmosphérique (CLA), la couche limite urbaine (Urban Boundary Layer, UBL ; appelé ainsi la couche limite interne, Internal Boundary Layer, IBL) est la partie de l'atmosphère qui est en interaction directe avec la surface de la Terre et correspond à la surface de forçage, avec une échelle de temps d'environ une heure ou moins. Il est, sans doute en grande partie déterminé par un processus d'advection (Rotach *et al.* 2005).

La sous-couche inertielle (Inertial Sublayer, ISL), correspond à la limite d'utilisation de l'**Equation 1-1**, à l'intérieur de laquelle, les flux turbulents sont à peu près constants, et pour la stratification et la distribution des vitesses moyennes restent uniformes (Plate 1995).

La sous-couche de rugosité (Roughness Sublayer, RSL), est la zone d'écoulement au voisinage immédiat des éléments urbains, où le flux dépend localement des arrangements des obstacles particuliers et a une structure assez complexe (Raupach 1980). Verticalement, la RSL s'étend depuis le sol jusqu'à un niveau auquel l'homogénéité de l'écoulement horizontal est atteinte. Cela se produit de 2 à 5 fois la hauteur moyenne des obstacles (Raupach et al. 1991, Sanderland et al. 2013).

La couche de canopée urbaine (Urban Canopy Layer, UCL) est l'épaisseur où les échanges verticaux de mouvement, de chaleur et de l'humidité se produit. Elle est approximativement équivalente à celle de la hauteur moyenne des principaux éléments de rugosité (Oke 2006).

Le profil logarithmique (**Equation 1-1**) effectuée bien dans la sous-couche inertielle mais reste moins viable dans la sous-couche de rugosité (Sanderland et al. 2013). Tandis que sous la hauteur moyenne des bâtiments \bar{H} , aucun profil de la vitesse du vent n'est disponible (Lawson 2001).

Pour calculer la longueur de rugosité de terrain, Lettau (1969) a proposé une équation simple : $z_0 = 0,5\bar{H}\lambda_f$ où λ_f est la densité de surface frontale. Elle offre des erreurs de moins de 25 % par rapport aux résultats de mesure en soufflerie de modèle 'boisseau' de Kutzbach (1961), mais reste applicable pour les contextes de petite rugosité (λ_a ou λ_f inférieur à 20-30 %). Basé sur deux expérimentations en soufflerie (avec matrice carrée et matrice décalée), MacDonald et al. (1998) ont déterminé des modèles mathématiques efficaces pour calculer z_0 et z_d de terrain de tous les niveaux de densité. Mais les variants supplémentaires introduit rend ce modèle difficile à utiliser. Pour simplifier le calcul et le rendre plus opérationnel, Grimmond et Oke (1999) ont introduit une hypothèse des relations entre la hauteur moyenne des bâtiments \bar{H} et z_0 et z_d : $z_0 = f_0\bar{H}$, et $z_d = f_d\bar{H}$. Les valeurs de référence correspondant à des propriétés aérodynamiques de ville sont proposées dans le **Tableau 1-4**. Plus précisément, sur la base de nombreuses mesures en soufflerie, ESDU 82026 (1982) a proposé une équation pour calculer la hauteur du plan de déplacement : $z_d = \bar{H} - 4.3z_0(1 - \lambda_a)$, si la densité du terrain (CES) $0,2 \leq \lambda_a < 0,8$.

Tableau 1-4

Propriétés aérodynamiques des zones homogènes dans les zones urbaines (source : Grimmond et Oke 1999)

forme de la surface urbaine	\bar{H} (m)	z_d (m)	z_0 (m)	f_d	f_0
Faible densité -- flux isolé Maisons individuelles à 1-2 étages, jardins. Maisons mixtes et petits commerces. Entrepôt, industrie légère, quelques arbres.	5 - 8	2 - 4	0,3 - 0,8	0,35 - 0,50	0,06 - 0,10
Moyenne densité -- flux d'interférence du sillage Grandes maisons et peu espacés, jumelées et en rangée, à 2-3 étages, grands arbres. Blocs de moins de cinq étages d'appartements avec un environnement ouvert. maisons mélangées avec des magasins, industrie légère, églises, écoles.	7 - 14	3.5 - 8	0,7 - 1.5	0,55 - 0,7	0,08 - 0,16
Haute densité -- écoulement turbulent Résidences peu espacés, rangées de moins de six étages, bâtiments de blocs, grandes installations (usine, universitaires, etc), centre-ville.	11 - 20	7 - 15	0,8 - 1.5	0,60 - 0,85	0,07 - 0,12
Grandes tours ⁸ -- flux chaotique ou mixte Noyau urbain ou nœuds de banlieue avec tours dans un environnement urbain dense. Complexes institutionnels majeurs.	> 20	> 12	> 2.0	0,50 - 0,70	0,10 - 0,20

Kastner-Klein et Rotach (2004) ont développé un modèle de profil vertical de vitesse du vent dans la sous-couche de rugosité plus validé et précise que l'**Equation 1-1** :

⁸ Il n'y a presque pas de valeurs mesurées dans cette classe ; par conséquent, les valeurs ont peu de soutien.

$$u_z = \frac{u^*}{0,6\kappa} \left\{ 1 - 0,6 \ln(0,12) - \exp \left[0,6 - 0,072 \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \right] \right\}$$

Pourtant, comme la vitesse de fraction u^* est souvent obtenue par mesure sur le terrain, la loi logarithmique rend complexe la prédiction de profil vertical du vent.

(2) Loi puissance

$$u_z = u_h \left(\frac{z}{h} \right)^\alpha \dots\dots\dots \text{Equation 1-2}$$

où u_h est la vitesse de référence ou d'observation de météo à la hauteur h , et α est un coefficient, dit coefficient de cisaillement. En fait, celui-ci dépend essentiellement de la rugosité du sol (couverture du sol). Pour la ville dense, une valeur typique de α varie entre 0,25 et 0,4.

En raison de sa simplicité, la loi puissance est choisie par nombreuses réglementations pour évaluer la charge de structure d'architecture (Chine : GB50009-2012, Etats-Unis : ASCE7-10, Japon : AIJ2004). D'après GB50009-2012, dans une ville moyenne ou petite (groupe C, où il y a des bâtiments denses avec la hauteur moyenne des bâtiments alentour dans un rayon de 2 km : $18\text{m} > \bar{H} > 9\text{m}$), le coefficient $\alpha = 0,22$ et la hauteur de la couche limite $Z_g = 450$ m ; et au centre d'une grande ville (groupe D, où il y a des grandes tours et des bâtiments denses avec $\bar{H} \geq 18$ m), $\alpha = 0,3$ et $Z_g = 550$ m. En même temps, comme le déplacement du plan zéro dans le profil logarithmique, une hauteur similaire H_i au-dessous de laquelle la loi puissance n'est plus valide est définie. Pour une ville moyenne ou petite : $H_i = 15$ m et pour une grande ville : $H_i = 20$ m.

Précisément, à travers des travaux sur le potentiel éolien, l'établissement de l'atlas marocain a proposé un modèle pour décider le coefficient α par rapport au vent de référence (vitesse U_h et sa hauteur h) et la rugosité de terrain (z_0) :

$$\alpha = \frac{x - 0,0881 \ln(U_h)}{1 - 0,0881 \ln(h/10)} \dots\dots\dots \text{Equation 1-3}$$

où $x = 0,37$ si $0,05 \text{ m} < z_0 < 0,5 \text{ m}$ et $x = 0,48$ si $0,5 \text{ m} < z_0 < 4 \text{ m}$ (Knidiri *et al.* 1986, Nfaoui *et al.* 1998, Kasbadji Merzouk 2006). Donc, avec la rugosité de terrain z_0 trouvée par le Tableau 1-4, une estimation assez précise du profil de puissance du vent peut être obtenue.

En outre, le profil vertical de l'intensité de la turbulence peut être simplifié comme le suivant :

$$I_z = I_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \dots\dots\dots \text{Equation 1-4}$$

où I_{10} est l'intensité de la turbulence nominale à 10 m. Pour une ville moyenne ou petite $I_{10} = 0,23$, et pour une grande ville $I_{10} = 0,39$ (GB50009-2012).

En conclusion, les deux lois pour définir le profil de vitesse du vent sont valides par les résultats de mesure in situ, pour les cas d'une hauteur entre 20 m et 100 m à partir du sol. Pour une hauteur plus de 100 m et dans la couche limite urbaine, la loi puissance donne une prédiction plus correcte de la vitesse moyenne du vent (Cook 1985). Pourtant, pour différents régions ou villes, les rugosités sont variées et difficiles à préciser. Aujourd'hui, on utilise encore souvent les valeurs empiriques. En considérant la hauteur d'espace étudié dans notre modèles où les bâtiments peuvent atteindre plus de 100 m, la loi puissance est choisie pour évaluer la profil de vitesse du vent.

1.4.2 Climat et forme urbaine

Pour bien analyser les relations entre les climats et la forme urbaine on peut les classer en trois groupes correspondant aux quatre échelles spatiales définies par T.R.Oke⁹ : échelle macroscopique, échelle mésoscopique, échelle local et échelle microscopique.

⁹ OKE, T.R. (1987). Boundary layer climates. London et New York : Methun, Second edition (first edition 1978), pp3.

A l'échelle macroscopique et mésoscopique ($d > 10 \text{ km}$), on travaille plutôt sur la météorologie : e.g., la turbulence atmosphérique dans les villes (Weber et al, 2010), et la dispersion d'air en périphérie qui a une influence importante sur la couche limite urbaine (Sun et al. 2012).

A l'échelle locale ($0,1 \text{ km} < d < 5-10 \text{ km}$) équivalente à une ville, on s'intéresse plutôt à l'évaluation de la condition thermique, à la consommation d'énergie, ou à la diffusion du polluant dans la ville. Par exemple, Golany (1996) a donné des règles empiriques d'aménagement urbain pour six types de climats différents, et a indiqué l'importance du rôle de la morphologie urbaine sur la performance climatique, notamment la performance thermique. On peut tirer la partie décrivant les types de climats et les formes urbaines proposées (Annexe 1.4). De même, Cailleux (1965) a indiqué que l'énergie éolienne est exploitable principalement au voisinage immédiat de la mer et sur les sommets des montagnes, dans les pays tempérés ou froids ou à la fois chauds et secs. Tandis que les plaines sont moins favorables, et les régions équatoriales humides encore moins, sauf des exceptions locales. Donc, nous pouvons dire que la majorité des régions peut être venteuse sauf la région de climat « chaud - humide ». D'ailleurs, Golany (1996) a aussi indiqué des relations simples entre le vent et la morphologie urbaine. Par exemple, pour l'orientation de rue, les rues droites et parallèles « accompagnent » le mouvement de l'air dans la ville ; au contraire les rues perpendiculaires les unes aux autres peuvent réduire tempête de sable et abaisser la vitesse du vent.

Ratti et al. (2005) a utilisé un modèle numérique DEMs (Digital Elevation Models, modèle numérique d'altitude) et la méthode de LT modèle (Lighting & Thermal, Eclairage et Thermique), en analysant trois îlots de différentes villes et a démontré la relation entre la forme urbaine et la consommation d'énergie. La méthode de comparaison entre les fragments d'une ville (ou des villes différentes) à l'échelle appropriée nous intéresse. Selon la comparaison entre des bâtiments rectangulaires et des formes aérodynamiques, Huang et Pham (2012) ont montré que les conditions thermiques et de ventilation à l'échelle du quartier peuvent être améliorées en adaptant l'orientation des bâtiments et en profitant de l'effet de Venturi et de canalisation du vent. Tang et Wang (2007) ont analysé les différentes situations de bruit et de pollution causées par le transport des véhicules, avec un modèle de quatre zones (évalué à partir de paramètres de forme urbaine, e.g. hauteur de bâtiment, largeur des rues) sur la péninsule de Macao. Ng et al. (2011) ont utilisé la méthode de cartes FAD (Densité de surface frontale, λ_f) avec SIG (Système d'information géographique) sur la ville de Hong Kong pour montrer les relations entre la morphologie urbaine et la situation de ventilation de ville. Ils ont montré l'importance de la perméabilité du vent au niveau de la couche de base de bâtiments pour améliorer la ventilation des grandes villes avec de nombreuses grandes tours. Ils ont également donné des propositions de disposition des bâtiments favorables pour la ventilation au niveau des piétons.

A l'échelle microscopique ($10^{-2} \text{ m} < d < 10^3 \text{ m}$), on se concentre ici sur l'analyse de l'écoulement du vent autour d'un ou de plusieurs bâtiments. Par exemple, Hang et al. (2010) ont analysé les conditions du vent autour de longues rues avec des hauts immeubles des deux côtés, avec soufflerie et par l'analyse CFD. Ils ont démontré que, pour les longues rues à l'échelle du quartier ($50W < L < 80W$)¹⁰, l'effet de ventilation de la rue avec des hauts immeubles bilatéraux, est plus important que celle avec des immeubles bas. En effet le même résultat avec des rues réelles ($8W < L < 34W$) est obtenu (Kitous et al. 2012). Gao et al. (2012) a analysé les situations de ventilation d'un ensemble de bâtiments au campus de Université de Reading, par une méthode de mesure sur site et statistique. En comparant les deux facteurs les plus importants : le facteur de la disposition des bâtiments et celui de la météorologie, ils ont montré des effets variés sur la vitesse du vent aux six points observés. Kitous et al. (2012) ont évalué les données du vent en mesure sur site dans une ville au sud

¹⁰ W : largeur de la rue ; L : longueur de la rue.

de l'Algérie, en climat chaud et sec, et a analysé les impacts de la longueur et de la symétrie des rues sur l'effet de canalisation du vent.

Même si aucun des documents mentionnés ci-dessus travaillent sur la production d'énergie éolienne, les études qu'ils font sur le sujet de la forme urbaine et de l'environnement du vent, peuvent être intéressantes pour notre recherche, par exemple, sur la considération de type de climat, les relations entre le vent et la morphologie urbaine, l'échelle adaptée, l'impacts de bâtiments sur la ventilation, etc.

1.4.3 Écoulement du vent autour de bâtiments

1.4.3.1 Description physique de l'écoulement du vent autour de bâtiments

La recherche sur l'aérodynamique de bâtiment est essentielle pour le confort et la ventilation dans l'environnement bâti. A cause de la complexité de turbulence, en aérodynamique urbaine, l'écoulement autour de bâtiments reste complexe à évaluer. Par contre, grâce à la simplicité de la géométrie et au développement de la technique CFD, de plus en plus de résultats intéressants ont été produit au cours des dernières décennies.

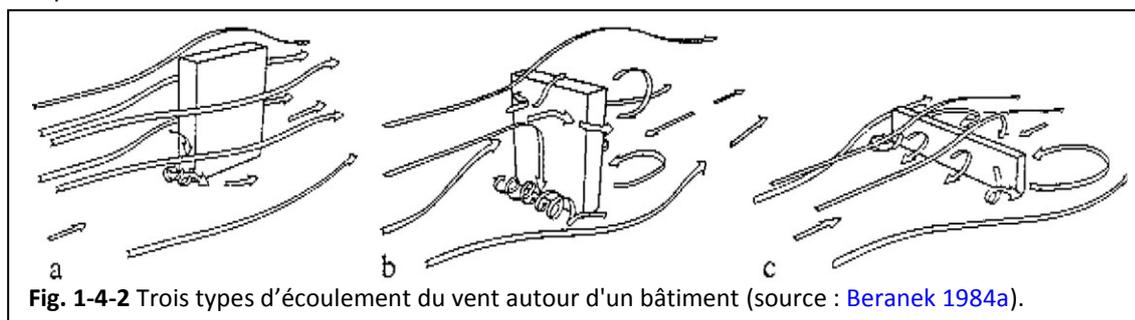
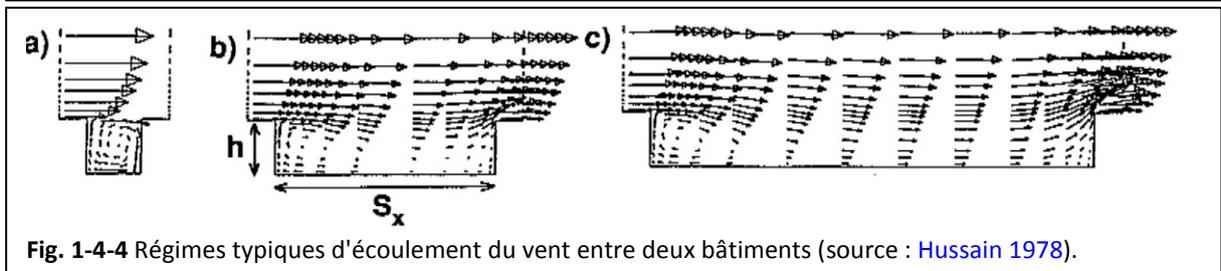
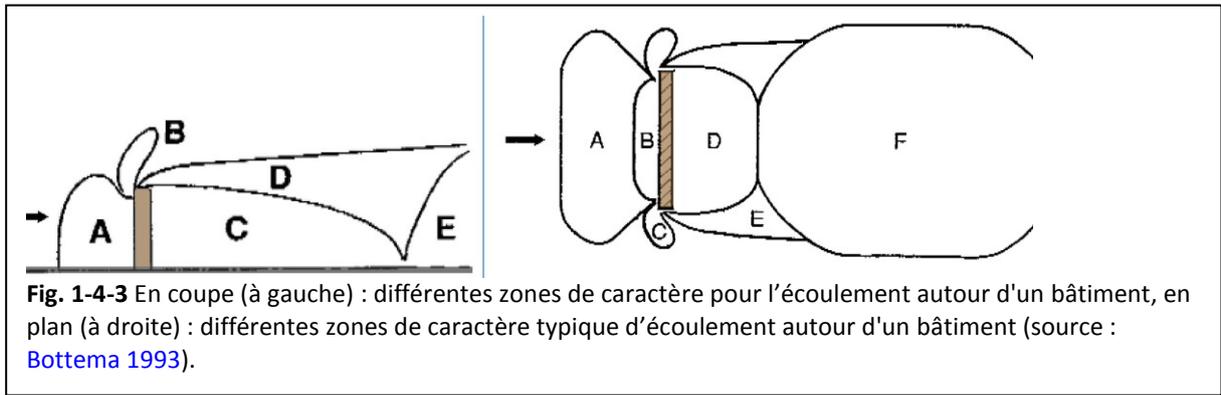


Fig. 1-4-2 Trois types d'écoulement du vent autour d'un bâtiment (source : Beranek 1984a).

Beranek (1984a) nous montre les trois types principaux d'écoulement du vent autour d'un bâtiment et leurs propres caractéristiques (Fig. 1-4-2). On voit que dans le cas où l'entrée du vent est parallèle de la longueur du bâtiment (type a), il y a peu de turbulence ; dans le cas où le bâtiment est bas et en face du vent (type c), les turbulences sont nombreuses mais plutôt en 2D et restent en basse ; mais quand le bâtiment est haut face au vent (type b), les turbulences sont nombreuses et accompagnées d'un fort tourbillon frontal (Bottema 1993, pp. 26-27).

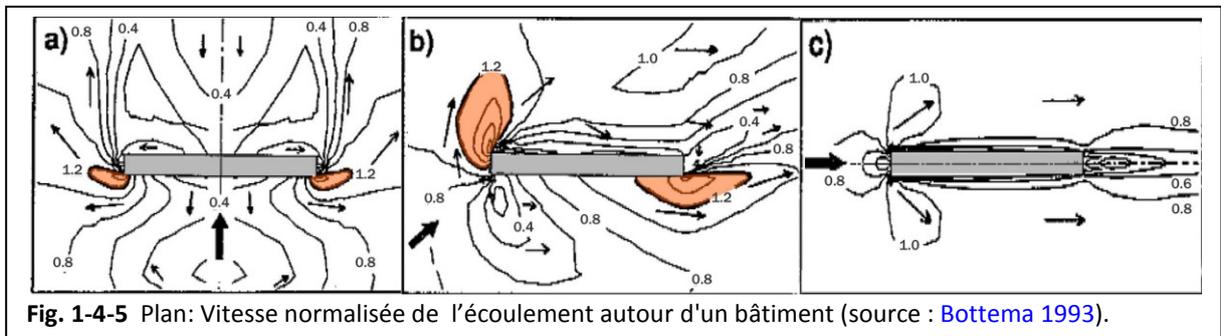
En effet les zones de flux autour du bâtiment sont variées. Bottema (1993) nous montre les zones typiques autour d'un bâtiment en barre (Fig. 1-4-3). Dans la figure on voit que le flux de coin (région B dans la coupe et région C en plan) peut être caractérisé par une vitesse élevée et un tourbillon réduit. D'ailleurs, étant donné que les particules de fluide ne peuvent pas suivre le brusque changement de direction, le flux se sépare de la surface en coin en amont. Et l'endroit de la séparation est fixe pour les coins aigus mais non pour les coins arrondis (Bottema 1993, pp. 23-24). Flux de coin d'une grande tour est souvent considéré comme un élément très important pour l'environnement urbain (Bottema 1993, pp. 83).

Hussain (1978) fait apparaître les trois régimes typiques d'écoulement entre deux bâtiments indiqués par sa simulation de flux en 2D (Fig. 1-4-4). Dans le cas du flux résistant (régime a, ratio de l'écartement S_x par la hauteur moyenne des bâtiments h égale ou moins que 1), un tourbillon stable est formé et bien séparé du flux au-dessus des bâtiments. Lorsque le ratio S_x/h augmente à 4 comme dans le cas du flux d'interaction (cas b), le tourbillon commence à être divisé, et le sillage du bâtiment en amont et la zone de recirculation autour du bâtiment en aval commencent à être séparés. Quand le ratio $S_x/h > 8$, on arrive au cas du flux isolé (cas c), où l'écoulement se comporte plus ou moins comme celui entre des bâtiments isolés. En outre, il conclure que les rues courtes avec $S_x/h < 4$ sont les plus agréables pour le confort aéraulique (Bottema 1993, pp. 180).



Pour l'effet thermique sur la ventilation, l'expérimentation fait par Yang (2004, pp. 210) indique que l'effet thermique ne compte que 2 % de contribution à la vitesse moyenne de ventilation. Et les mesures faites par Nakamura et Oke (1988) et DePaul et Sheih (1986) suggèrent que pour les vents à vitesse faible ($U_{local} < 1.5\sim 2$ m/s) le flux thermique entraîné peut devenir dominant (Bottema 1993, pp. 28). Autrement dit, pour des vents de vitesse moyenne ou grande, e.g. 5.0 m/s, l'influence de l'effet thermique sera faible. Pour cette raison, dans notre simulation future, afin de simplifier les conditions initiales, nous ne considérons pas l'effet thermique.

Quelques exemples de simulation. La Fig. 1-4-5 nous montre des résultats de vitesse normalisée d'un écoulement autour un bâtiment (largeur * longueur * hauteur = 15 m*150 m*50 m) avec une rugosité $z_0 = 0,03$ m. On peut voir que la surface de flux de coin sous le vent oblique (45°) est plus grande, et sa puissance est plus forte que sous le vent normal (0°) ou parallèle (90°).



En outre, on définit un paramètre R comme le rayon de flux de coin où $U/U_0 > 1,2$ (en orange dans la Fig. 1-4-5, $U/U_{H_0} > 0,66$ pour les géométries complexes urbains)¹¹ pour au moins une orientation du vent. La Fig. 1-4-6 (A) nous donne les différents R en fonction de la largeur des bâtiments W et leur hauteur H. Les résultats d'expérience nous montrent que R est environ $1,4H$ pour le cas $W > H$ et peut atteindre $2,3W$ quand $H > W$. En plus, R est assez sensible au ratio U/U_0 : une variation de 10 % de U/U_0 introduit une variation d'environ 35 % de R, et encore d'avantage si U/U_0 est proche de sa valeur maximale (Bottema 1993, pp. 87).

¹¹ U est la vitesse moyenne du vent autour des bâtiments à la hauteur de piéton (1.75 m).

U_0 est la vitesse du vent donné à la hauteur $z = 10$ m.

$U_{0, loc}$ est U_0 en absence de bâtiment.

U_{H_0} est la vitesse du vent donné à la hauteur de bâtiment H.

De plus, les vitesses maximales en zone de flux de coin d'une même forme de bâtiment sont comparées entre plusieurs études : $U/U_{Ho(max)} = 0,95$ par Lawson et Penwarden (1975) en soufflerie, $U/U_{Ho(max)} = 0,99 \pm 0,10$ par J.A. Leene (1991) en soufflerie et $U/U_{Ho(max)} = 1,1$ par Bottema (1993) en CFD. La Fig. 1-4-6 (B) nous montre que pour un flux normal (0°) U/U_{H0} augmente jusqu'à 0,9 lorsque $W/H > 2$. Tandis que pour un flux oblique (45°) le ratio U/U_{H0} est généralement 20 % plus grand que celui d'un flux normal et atteint son maximum 1,12, lorsque $W/H = 5$. En plus, il conclut que les influences de L/W et de H/z_0 sont généralement moins importantes pour définir U/U_{H0} .

Pour connaître les interactions entre les bâtiments, Bottema (1993) a proposé une expérience avec plusieurs arrangements caractéristiques de bâtiments (Fig. 1-4-7). Les caractéristiques ont été discutées et deux effets du vent les plus importants, l'abri mutuel et le court-circuit pression, ont été analysés. Pour le cas de deux bâtiments décalés, il trouve que $U > 0,9 \cdot U_{H0}$ apparaît sur la plus grande surface du passage en flux oblique (-45°), et que son U est environ 20 % plus importante que dans le cas de bâtiment isolé. Dans le cas d'un flux normal (0°), U est à peu près égale à $0,75U_{H0}$ et correspond à 30 % de plus que dans le cas d'un bâtiment isolé. Et ici on trouve que l'indicateur U/U_{H0} est plus approprié que U/U_0 (Bottema 1993, pp. 96-101).

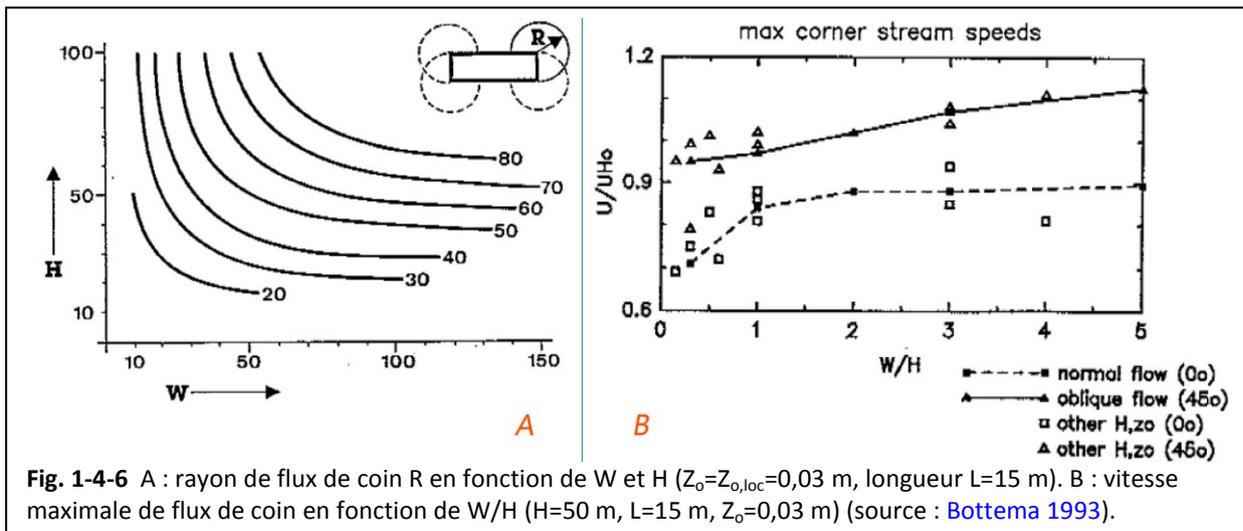


Fig. 1-4-6 A : rayon de flux de coin R en fonction de W et H ($Z_0=Z_{0,loc}=0,03$ m, longueur $L=15$ m). B : vitesse maximale de flux de coin en fonction de W/H ($H=50$ m, $L=15$ m, $Z_0=0,03$ m) (source : Bottema 1993).

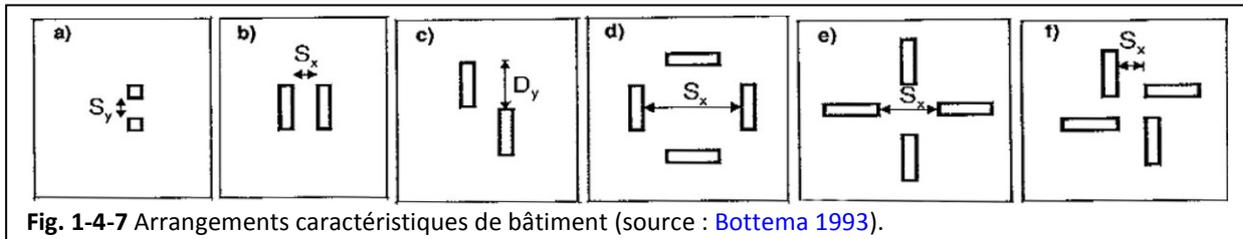


Fig. 1-4-7 Arrangements caractéristiques de bâtiment (source : Bottema 1993).

La thèse de Bottema (1993) s'intéresse au confort aéraulique au niveau des piétons. Les discussions sur des zones plus élevées ou sur les toits sont ignorées. Cependant, les résultats empiriques sur l'aérodynamique et les moyens d'analyser les configurations de bâtiments sont intéressants pour les architectes pour mieux insérer les connaissances sur le vent dans une planification urbaine. A travers les études sur les relations entre l'environnement aéraulique et les bâtiments, on peut tirer un premier ensemble de connaissances sur l'écoulement du vent autour de bâtiments (e.g. les résultats empiriques ou d'expériences des autres chercheurs) avant de faire une simulation CFD. On peut aussi les considérer comme des références de comparaison après des simulations CFD.

1.4.3.2 Types d'effet du vent autour de bâtiments

Les effets du vent dans un environnement bâti sont beaucoup discutés (Chatelet *et al.* 1998, Adolphe *et al.* 2002, Guyot A. 2010). Nous résumons dans le Tableau 1-5 tous les effets

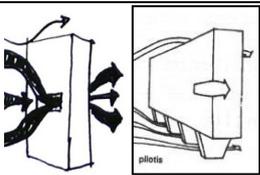
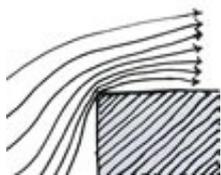
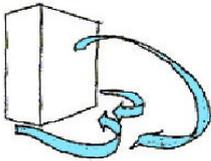
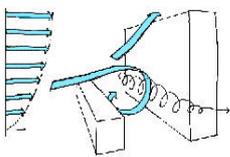
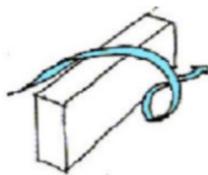
aérodynamiques et aussi rajoutons une colonne sur l'évaluation prévisionnelle du potentiel éolien.

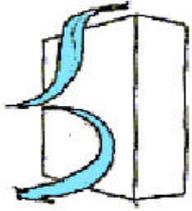
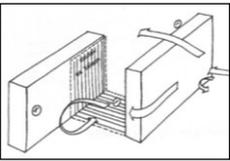
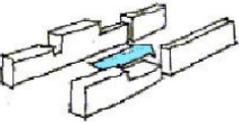
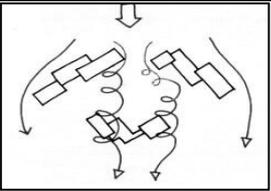
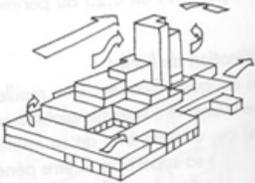
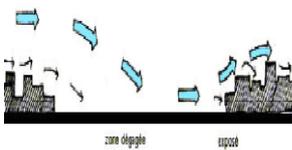
Les critères d'évaluation correspondent à :

- 1) l'amplitude de l'effet. Il est sans doute le critère le plus important ;
- 2) la difficulté. e.g. difficulté d'installation des éoliennes ;
- 3) la valeur raisonnable. e.g. il ne faut pas sacrifier trop d'espace architectural pour une éolienne, comme parfois les trous en façade ;
- 4) la faisabilité. e.g. lorsqu'on profite des effets pour capter l'énergie éolienne les inconvénients pour les piétons ou les risques pour les bâtiments peuvent-ils être évités ?

Tableau 1-5

Effets typiques du vent autour de bâtiments (selon [Chatelet et al. 1998](#), [Adolphe et al. 2002](#), [Guyot A. 2010](#))

	Effet aérodynamique et légende	Description	Evaluation de l'effet	Intérêt sur potentiel éolien
1	<p>Effet de trous</p> 	Phénomène d'écoulement dans les trous frontaux ou les passages sous immeuble.	Les valeurs de la survitesse évoluent entre 1,2 et 1,5 pour une hauteur construite variant de 20 à 50 m.	Oui
2	<p>Effet de coin</p> 	Phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment.	La vitesse peut augmenter de 1,2 à plus de 2 fois son état initial pour des bâtiments de quelques niveaux à des tours de grande hauteur (30 étages plus).	Oui
3	<p>Effet de sillage et de rouleau aval</p> 	Phénomène de tourbillonnement au dos de construction lorsqu'une circulation fluide l'avance.	Le phénomène est proportionnel à la surface du bâtiment qui s'oppose à l'écoulement principal du vent. vitesse faible au centre.	Non
4	<p>Effet Wise / Effet de rouleau tourbillonnaire aux pieds des immeubles</p> 	Phénomène de tourbillonnement à composante verticale au pied de la face au vent de la construction lorsqu'une circulation fluide traverse un ensemble de bâtiments de tailles différentes et implantés parallèlement.	Lorsque l'ensemble se situe entre 10 et 30 m le coefficient prend la valeur 1,5. Pour un ensemble entre 15 et 90 m la valeur est de 1,8.	Non
5	<p>Effet de barre</p> 	Phénomène de déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre sous un vent incident à 45° ; lorsqu'une barre isolée est face au vent ou parallèle au vent ou dans le cas d'une série de barres alignées d'un espacement peu important.	Aggravation de la survitesse de l'ordre de 1,4 sur une distance d'environ 2 fois la hauteur construite.	Non

	Effet aérodynamique et légende	Description	Evaluation de l'effet	Intérêt sur potentiel éolien
6	Effet de tourbillon amont	Phénomène de mouvement d'air tourbillonnaire, à composante verticale, plongeant sur la façade directement exposée au vent.	Peu sensible pour les constructions basses, importante pour les constructions plus de 5 étages. (accélération de 1,5 fois dans le cas d'un immeuble de 20 étages)	Non
				
7	Effet Venturi	Phénomène de collecteur formé avec une vitesse augmentée par des constructions dessinant un angle ouvert au vent, et les côtés de ce passage sont des zones de dépression qui donnent un effet d'aspiration.	L'espacement critique de 2 à 3 fois la hauteur des constructions (hauteur moyenne de 45 m) formant le venturi entraîne une valeur d'environ 1,6.	Oui
				
8	Effet de liaison	Phénomène d'écoulement entre des zones de pressions différentes entre immeubles. Il est formé par une disposition décalée de deux constructions créant un couloir de liaison.	La valeur de la survitesse évolue entre 1,2 et 1,6 pour des constructions entre 12 et 35 m de hauteur. Entre 2 tours de 100 m de haut la valeur du coefficient peut atteindre 1,8.	Non
				
9	Effet de canalisation	Phénomène d'écoulement tout au long d'une rue ou un couloir à ciel ouvert. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique qu'elle transmet sur toute sa longueur.	Le phénomène est entretenu pour un espacement de 2 fois la hauteur moyenne de la rue (qui doit être supérieure ou égale à 6 m), et les deux parois doivent posséder une porosité inférieure à 5 %.	Oui
				
10	Effet de maille ou de cour	Phénomène d'écoulement provoqué par une juxtaposition de bâtiments qui forment une alvéole ou une poche.	Lorsque la maille a une ouverture de 3 fois la hauteur moyenne de 10 m, elle est exposée quelque soit l'incidence du vent.	Non
				
11	Effet de pyramide	Phénomène d'écoulement provoqué par un groupement de constructions à décrochement et à caractère pyramidal.	Les survitesses sont faibles et les turbulences assez élevées.	Non
				
12	Effet d'agora	Espace ouvert dégagé soumis à l'exposition directe du vent.	Pour un espace dégagé de plus de 100 m les effets de l'environnement proche ne se font plus sentir. les lieux de type place sont dépendant des accès rues et autres éléments de convergence du vent.	Non
				

1.4.3.3 Propositions pour un bon environnement aéraulique

Un bon environnement aéraulique devrait être ressenti confortable, et être « sûr ». Bottema (1993) nous a expliqué la différence entre le vent confortable et le vent sûr. En fait, on ne peut donner que la vitesse sûre maximale pour les piétons. On trouve que l'équilibre et la trace de marche seront affectés quand la vitesse du vent est supérieur à 15 m/s. Cela peut être dangereux pour les personnes âgées. Les vitesses des rafales de plus de 20 m/s peuvent aussi être dangereuses pour les jeunes (Hunt *et al.* 1976).

Pourtant, différents que les indicateurs de sécurité, les indicateurs de confort ne peuvent pas être convertis directement par les effets du vent. C'est parce que les sentiments mal à l'aise se varient beaucoup d'une personne à l'autre et d'une rafale à l'autre. L'enquête dans la rue par Jackson (1978) a montré que 57 % des gens sont « insatisfaits » si $U_0 > 6$ m/s¹² (Bottema 1993, pp. 66). Dans la mémoire de Zhang D.F. (2011, pp. 70), l'auteur a appliqué la critère de confort du vent pour les piétons (2 m à partir du sol) avec un seuil de vitesse de 6 m/s, en analysant l'énergie éolienne autour de bâtiments.

D'ailleurs, en vue de l'application de connaissances de l'aérodynamique bâti et urbaine pour les architectes et urbanistes, Bottema (1993) a donné des règles de base sur le confort d'environnement du vent, notamment au niveau des piétons :

- Une longueur maximale de rue de 8-19 la hauteur de construction (selon le terrain environnant) est acceptable pour toutes les activités humaines. Les routes à l'extérieur en périphérie urbaine exigent de nouvelles mesures de réduction du vent.

- Si la dispersion des polluants de l'air est une mission importante, la longueur de la rue (et la largeur de rue de préférence ainsi) devrait être plus que 4 fois la hauteur de construction.

- Les activités avec des longs séjours ne devraient pas être situées à proximité des bâtiments de grande hauteur.

- L'entrée du bâtiment et les allées piétonnières doivent être situées aux longs côtés des bâtiments, et certainement pas être près des coins des bâtiments, ni dans l'interstice entre les constructions.

- L'environnement aéraulique peut être amélioré par des coins arrondis, des arbres, et des extensions en forme de podium.

- Les Immeubles de grande hauteur décalés (le plan comme ) doivent être évités en raison de la pression à court circuit.

- Les vents au niveau des piétons dépendent de nombreux paramètres. L'importance des paramètres est, dans l'ordre décroissant : la hauteur du bâtiment H , l'angle de flux d'approche θ ou la largeur du bâtiment W , la rugosité locale du sol $z_{o,loc}$, et la longueur du bâtiment L ou la rugosité de flux d'entrée z_o (Bottema 1993, pp. 193-196).

Pour nous, même si l'objectif n'est pas le confort ni la sécurité du vent au niveau des piétons, les indicateurs sont utiles comme une référence lorsque nous évaluons le vent à une hauteur importante. En plus, ces règles de conception de planification sur l'environnement aéraulique doivent être respectées dans le cadre de l'urbanisme.

¹² U_0 est la vitesse du vent donné à la hauteur $z = 10$ m.

1.5 Conclusion

La recherche sur la morphologie urbaine a débuté par des études sur les plans des communes et des villes en début de XIX^{ème} siècle en Europe. Après la Seconde Guerre mondiale trois courants principaux ont abordés sur ce sujet. Différentes théories et méthodes sont apparues autour de la morphologie urbaine, notamment dans le cadre de ISUF créé depuis 1996.

La morphologie urbaine concerne l'étude des formes urbaines. Basée sur la théorie de typologie et morphologie, elle étudie et analyse les espaces urbains et les formes physiques urbaines dans le cadre de l'urbanisme. En relation avec le temps, deux méthodes de recherche ont marqué la morphologie urbaine : la méthode synchronique et la méthode diachronique. Actuellement, elle est utilisée souvent pour les problèmes d'aménagement, comme l'analyse de transport, l'évaluation de l'environnement thermique et climatique, ou des situations sociales et économiques en évolution historique ou prévisionnelle.

Il existe différents critères pour classer les formes urbaines. Dans le cadre de notre travail, les critères d'analyse de la morphologie urbaine correspondent à une combinaison des sites dans la ville, la nature de l'utilisation du sol en aménagement, et des différentes formes de villes archétypales. Dans ce sens là, 17 exemples dans 14 types de tissus urbain sont proposés. Leurs caractéristiques morphologiques, caractéristiques de l'environnement aéralique et les évaluations prévisionnelles sur l'installation des éoliennes sont discutées.

Pour les paramètres de forme urbaine, trois catégories a été identifiées. Celle sur l'interaction du physique et du construit (appelé indicateurs « morpho-physiques ») est intéressante pour notre sujet. Plusieurs travaux nous présentent leurs différents indicateurs de la morphologie urbaine. En vue d'une simulation numérique d'écoulement du vent dans l'environnement bâti, notamment à une altitude assez élevée, ce qui nous intéresse c'est la forme physique et les interactions entre les bâtiments et le vent. Ainsi les différents indicateurs de la morphologie bâtie et urbaine sont choisis et adaptés aux quatre étapes de modélisations (voir [Tablea 1-3](#)).

En suite, dans la section de l'environnement aéralique et la morphologie urbaine, nous avons présenté la théorie d'écoulement du vent en milieu urbain. Deux lois pour définir le profil de vitesse du vent sont comparées et la loi puissance est choisie pour notre future simulation. Des différentes recherches dans le domaine croisé entre le climat (surtout l'environnement aéralique) et la forme bâtie ou urbaine sont résumées. Leurs résultats et expériences nous serviront comme des références utiles sur, e.g., la prise en compte du climat, les relations entre le vent et la morphologie urbaine, l'échelle adaptée, les impacts de bâtiments sur la ventilation, etc. Pour mieux connaître la performance d'écoulement du vent autour de bâtiments, des exemples de simulation dans la littérature et ses résultats d'analyse sont présentés. De plus, des effets du vent dans l'environnement bâti sont listés et analysés en terme de développement du potentiel éolien. Ils sont très importants pour choisir des formes et configurations de bâtiments les plus prometteuses avant de commencer la simulation. La sécurité et le confort du vent sont enfin discutés, et des règles pour les architectes et urbanistes pour mieux construire l'environnement aéralique sont présentés. Ceux-ci doivent être respectés dans le cadre d'urbanisme lorsqu'on profite l'énergie éolienne dans la ville.

En somme, ce chapitre nous permet de répondre des questions suivantes :

- 1) Qu'est ce que la morphologie urbaine ? (Chapitre 1.1)
- 2) Comment peut-on classer les différentes formes urbaines ? (Chapitre 1.2)
- 3) Quels sont les paramètres importants de la morphologie urbaine ? Lesquels nous intéressent ? (Chapitre 1.3)
- 4) Comment le vent s'écoule dans la ville et autour de bâtiments ? (Chapitre 1.4)

2. Modélisation du vent autour de bâtiments

Dans ce chapitre nous allons considérer les travaux sur la modélisation de l'environnement du vent. Tout d'abord, nous commencerons par une brève introduction sur la simulation CFD puis nous présenterons les méthodes numériques CFD, et enfin les modèles de turbulence les plus utilisés seront expliqués et comparés. Comme notre choix s'est resté sur des modèles de RANS, le problème de loi de paroi sera exposé. Ensuite, les processus de validation ainsi que les lignes directrices pour adapter les simulations aux pratiques seront résumés, dans le contexte particulier de la simulation CFD de l'écoulement dans un environnement bâti. Enfin, des applications intéressantes sur des sujets proches de notre travail seront montrés et discutés. Enfin, la bibliographie sur la simulation CFD de l'écoulement du vent dans un environnement bâti sera résumée. Des résultats intéressants sur l'interaction entre le vent et les bâtiments, notamment pour l'étude de l'effet de concentration du vent dans le milieu bâti, seront sélectionnés.

2.1 Introduction : la simulation de l'écoulement du vent par les méthodes CFD

La simulation CFD (computational fluid dynamics) est une méthode numérique largement utilisée pour modéliser des problèmes de mécanique des fluides. Généralement, la mesure sur le terrain (à pleine échelle), l'expérimentation en soufflerie (à échelle réduite) et la simulation avec les codes CFD sont les trois méthodes principales pour l'évaluation du vent dans un environnement bâti. D'autres méthodes d'expérimentation de l'érosion par l'eau ou le sable peuvent être représentées par des simulations simples mais souvent moins fiables qu'en soufflerie, donc déconseillées pour la validation de simulation CFD. Le [Tableau 2-1](#) résume les comparaisons entre les trois méthodes principales pour l'évaluation du vent ([Sharag-Eldin 1998](#), [Bonneaud 2004](#), [Leitl 2000](#), [Blocken et al. 2012](#)).

Comme la simulation CFD utilise des systèmes d'équations différentielles non-linéaires et partielles, et qu'aucune preuve mathématique ne permet de garantir leur stabilité, l'exactitude et la convergence des résultats ([Bonneaud 2004](#)), la validation et la vérification sont indispensables avant d'utiliser les résultats de la simulation. Souvent l'expérimentation en soufflerie est considérée comme la méthode la plus pratique et fiable de validation des résultats de CFD, même si elle présente aussi des difficultés et des risques. Dans notre cas, envisageant l'absence d'accéder à l'expérimentation en soufflerie, notre principale méthode de simulation sera la méthode CFD. Comme le processus de validation de cette simulation est très important, nous allons discuter dans la suite des moyens pratiques pour la mise en œuvre.

Il y a plusieurs codes CFD qui peuvent être utilisés pour simuler l'écoulement du vent autour de bâtiments : Phoenics, Ecotect, Airpak, CFX, FLUENT, Flow3D, ENVI-met, etc.. ANSYS (FLUENT), qui est utilisé pour notre simulations, est un éditeur de logiciels y compris le logiciel de géométrie, le logiciel de maillage, le solveur (FLUENT) et le module de post-traitement. Des géométries complexes sont modélisées dans logiciel AutoCAD et puis importées dans ANSYS (FLUENT) géométrie. Comme un des logiciels commerciaux les plus utilisés dans les domaines nombreux de mécanique des fluides, FLUENT nous offre des contrôles de paramètres détaillés sur les conditions initiales (e.g. UDF, fonction définie par l'utilisateur), les choix des modèles de turbulence, les représentations et des différentes sorties des résultats de calcul.

Tableau 2-1

Atouts et limites des trois outils d'évaluation d'écoulement du vent

Outils d'évaluation	Atouts	Limites
Mesure sur le terrain	<ul style="list-style-type: none"> • Une grande confiance dans les résultats ; • Utilisé pour la validation des autres méthodes comme l'essai en soufflerie ou la simulation CFD. 	<ul style="list-style-type: none"> • En conception, les mesures sur le terrain sont généralement plus coûteuses que les simulations ; • Les paramètres mesurés sont limités, pour des études généralisées ; • Il est souvent difficile de maintenir des conditions stables tout au long des tests.
Essai en soufflerie	<ul style="list-style-type: none"> • Représentation géométrique fine du bâtiment étudié et de son environnement ; • Adaptée aux études paramétriques réalisables sur des maquettes dans une veine aéraulique de soufflerie ; • Adaptée aux mesures des pressions sur les façades ; • Adaptée aux mesures des vitesses d'air et/ou débits à l'intérieur du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simplification et abstraction de réalité physique ; • Effets sur le nombre de Reynolds (effet de taille de la maquette réduite); • Pas de prise en compte des phénomènes thermiques ; • Intrusion des mesures sur la maquette; • Souvent très cher ; • Incompatible potentielle entre la maquette de petite échelle et la réalité ; • Pas de représentation de l'écoulement du champ mais accès uniquement à des mesures ponctuelles ; • Réservée à des experts.
Code CFD	<ul style="list-style-type: none"> • Très adaptés aux études paramétriques, notamment tout ce qui concerne la modélisation des volumes construits ; • Représentation d'une image entière de l'écoulement ; • Simulation à grande échelle ; • Adaptés aux études d'écoulement du vent à très petite échelle ; • Possibilité de prise en compte des phénomènes d'origine thermique ; • Calcul des écoulements intérieurs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Représentation géométrique plus succincte pour un résultat proche de celui obtenue en soufflerie ; • Calculs longs si la géometrie est complexe ; • Grande puissance de calcul de l'ordinateur nécessaire ; • Réservés à des experts ; • Difficulté de définir les conditions aux limites qui peuvent avoir des effets importants sur la résolution du modèle ; • Difficulté de valider les résultats de la simulation.

2.2 Processus de modélisation par les méthodes CFD

2.2.1 Méthodes de simulation numérique et modèles de turbulence

La modélisation CFD peut résoudre des problèmes comme les flux de circulation, les transferts de chaleur ou la transition de particules. Pour tous les écoulements, il faut faire appel à la fois aux trois lois de conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement. Pour l'écoulement du vent dans l'environnement de bâtiment, on considère généralement l'air comme un fluide "Newtonien" (dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire), et incompressible (la masse volumique ne change pas avec la température). De plus, comme le phénomène de transfert de chaleur peut être négligé, de l'équation du bilan d'énergie. Donc, deux groupes d'équations restent.

- L'équation de continuité ou bilan de la masse :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Equation 2-1})$$

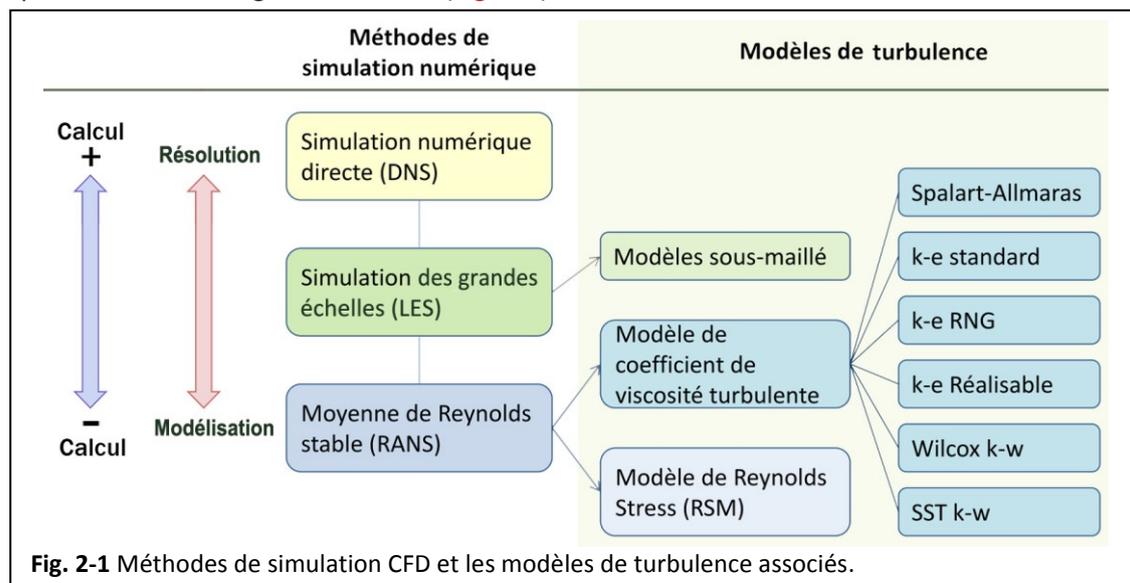
- Les équations du bilan de quantité de mouvement (dites équations de Navier-Stokes) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (\text{Equation 2-2})$$

où u_i désigne la composante du vecteur de la vitesse instantanées du flux dans la direction de x_i ($i = 1, 2, 3$, qui représentent respectivement les coordonnées X, Y, Z), t représente le temps, p désigne la pression du fluide, μ désigne la viscosité dynamique du fluide, ρ désigne la masse volumique du fluide, et f_i désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide.

Il existe plusieurs méthodes pour la simulation de la turbulence dans les codes de CFD. Il est très important de choisir un modèle adaptatif, car, souvent, à partir de données d'entrées identiques, en utilisant différents modèles de turbulence on peut obtenir des résultats très différents (Laporte, 2008).

En résumé il existe deux types de modèles : la Simulation numérique directe, et la simulation indirecte (avec modèle de turbulence). Pour la simulation indirecte, on utilise principalement les modèles RANS stables (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations), ou le modèle LES (Large Eddy Simulation). Un arbre de classement des méthodes de simulation CFD et leurs modèles de turbulence sont présentés dans la figure ci-dessous (Fig. 2-1). Les détails sont donnés dans le contexte suivant.



a) Simulation numérique directe (DNS : *Direct Numerical Simulation*)

Cette méthode permet de résoudre toutes les équations de Navier-Stokes sans un modèle de turbulence. C'est-à-dire, le calcul doit résoudre toutes les échelles spatiales et temporelles de l'écoulement, en présentant toutes les structures tourbillonnaires potentiellement. Sans doute elle a

une grande avantage sur le contrôle de simulation de la turbulence, mais elle a besoins une grandes puissance de calcul et normalement adaptée des cas avec une nombre modeste de Reynolds (car le nombre de point de maillage N doit satisfaire : $N^3 \geq Re^{2.25}$). Pour l'écoulement du vent autour les bâtiments, les nombres de Reynolds sont souvent très élevé ($Re > 10^5$), donc cette méthode ne convient pas à nos recherche en ce moment.

b) Simulation des grandes échelles (LES)

Situé entre les méthodes DNS et RANS (présenté après), la méthode LES résout directement les grands tourbillons, et modélise les petits. Les principes de ce modèle sont résumé comme suit :

- La quantité de mouvement, la masse, l'énergie sont transportés essentiellement par de grands tourbillons ;
- Les grands tourbillons sont plus dépendants des problèmes. Ils sont d'abord dictés par la géométrie et les couches limites de l'écoulement ;
- Petits tourbillons sont moins dépendants de la géométrie, ont tendance à être plus isotrope, et sont par conséquent plus universelle.
- Les chances de trouver un modèle de turbulence universel est beaucoup plus élevé pour les petits tourbillons.

Lors de l'utilisation des LES, la quantité de mouvement et la continuité en 3D en fonction du temps sont résolus. Généralement, ce modèle est très adapté à l'écoulement de sillage, et reste avantageux pour des flux transitoires, des flux séparés, des flux autour ou derrière un obstacle, qui ne peuvent pas être simulés par les modèles RANS stable (Davidson et Nielsen 1996). Ce modèle a besoin des mailles sensiblement plus fines que celles utilisées pour les calculs RANS. En outre, comme il est conçu pour résoudre les fluctuations instables dans le flux, il doit être exécuté pour des temps suffisamment longs afin d'obtenir des statistiques stables de l'écoulement modélisé. Le modèle LES est donc normalement adapté aux ordres de grandeur plus élevés que celui des calculs RANS en termes de mémoire vive (RAM) et de temps CPU (Fluent 6.3, 2006).

D'ailleurs, un modèle de RANS instable (URANS) peut être mentionné : il peut résoudre les solutions transitoires comme le LES, mais avec beaucoup moins de calcul que celui-ci. En effet, il ne résout pas la turbulence (tandis que le LES résout la turbulence à grande échelle), mais seulement les structures de flux moyens instables. Il peut être une bonne alternative quand l'instabilité du flux est prévisible. Néanmoins, très peu d'applications de ce modèle sont proposées aujourd'hui (Blocken et al. 2011, Salim et al. 2011).

c) Moyenne de Reynolds stable (RANS)

Sur la base des équations de Navier-Stokes (Equation 2-2), Osborne Reynolds a proposé une décomposition où la quantité instantanée est décomposé en ses quantités moyennes dans le temps et ses quantités fluctuantes. Ces équations peuvent être utilisés avec des approximations basées sur la connaissance des propriétés de la turbulence de l'écoulement, pour donner des solutions en moyenne temporelle des problèmes de la turbulence. Pour un fluide newtonien stationnaire et incompressible, ces équations peuvent être écrites :

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (\text{Equation 2-3})$$

où \bar{u}_i représente la i ème ($i = 1, 2, 3$) composante de la vitesses moyenne aux coordonnées X, Y, Z, alors qu' u'_i représente la terme de fluctuation de la vitesse, qui est défini par $u_i = \bar{u}_i + u'_i$,

\bar{p} désigne la pression moyenne des perturbations et δ_{ij} représente le symbole de Kronecker qui est égal à 1 si $i = j$, ou à 0 si $i \neq j$.

Pour modéliser le tenseur de Reynolds qui apparait dans les équations ($-\overline{\rho u'_i u'_j}$), on peut utiliser divers modèles de turbulence, soit le modèle RSM (Reynolds Stress Model), soit le modèle de coefficient de viscosité turbulente (qui contient les modèles comme modèle Spalart-Allmaras, modèle $k - \varepsilon$ et modèle $k - \omega$) (voir détails des modèles dans l'Annexe 2.1).

Même si les différents modèles RANS se développent et proposent des améliorations sur la base du modèle $k - \epsilon$ Standard, la limitation principale de ces modèles reste : leur incapacité à modéliser les caractéristiques intrinsèquement transitoires du champ d'écoulement tels que la séparation et le recyclage en aval des bords au vent et la formation de tourbillons dans le sillage (Blocken *et al.* 2011).

Même s'il n'existe aucune proposition de meilleur choix annoncée pour les modèles de turbulence (Blocken *et al.* 2012), des comparaisons entre les différents modèles dans certains cas particuliers sont fait. Par exemple, Salim *et al.* (2011) ont trouvé que le modèle LES produite de meilleurs résultats que les modèles RANS et URANS (Moyenne de Reynolds instable), sur le prédiction de l'écoulement du vent et la répartition des polluants. Blocken *et al.* (2011) ont trouvé que le modèle RANS régulière est assez fidèle, et peut produire des résultat précis (10-20 %) dans les zones du vent de grande vitesse.

Les caractéristiques des différents méthodes CFD et les types de flux correspondants sont résumés dans le **Tableau 2-2**.

Tableau 2-2

Résumé des caractéristiques des méthodes CFD et des flux correspondants

Méthodes et modèles	Caractéristiques principales	Flux recommandés
Simulation numérique directe (DNS)	Il résout toutes les échelles spatiales et temporelles de l'écoulement. Il est très précis mais demande beaucoup de puissance de l'ordinateur.	Avec un nombre de Reynolds faible.
Simulation de grand eddy (LES)	Il résout les grands tourbillons et simule les petits. Il est précis mais demande un maillage assez fin et une bonne puissance de l'ordinateur.	Écoulement de sillage, flux transitoires, flux séparés, flux autour ou derrière un obstacle.
Modèle de Reynolds Stress (RS M)	Il simule tous types de tourbillons. Il donne des prévisions plus précises des flux complexes que les modèles à une ou deux équations.	Flux anisotropes des contraintes de Reynolds : flux cycloniques, flux très tourbillonnants dans les chambres de combustion, passages d'écoulement rotatif, et écoulements secondaires induits par le stress dans les conduits.
RANS, $k - \epsilon$ standard	Il est robuste, économique, simple et précis raisonnable. La mise en œuvre de la fonction de la paroi est nécessaire.	Une large gamme d'écoulements turbulent mais pas de tourbillon, ni flux tournant, ni flux avec une forte séparation, ni flux très tendus.
RANS, $k - \epsilon$ RNG	Il est basé sur le modèle $k - \epsilon$ standard mais il améliore les résultats lors de courbure aérodynamique élevée et de taux de déformation important.	Flux transitoires et flux séparés, vortex effusif, transfert de chaleur et masse proches de la paroi.
RANS, $k - \epsilon$ réalisable	Il est basé sur le modèle $k - \epsilon$ standard mais il améliore les résultats sur certaines contraintes mathématiques sur la Reynolds stress.	Jets plans et ronds, couches limites sous fortes gradients de pression négatif, rotations, recirculations, courbures aérodynamiques élevées.
RANS, Wilcox $k - \omega$	Il est économique, simple et raisonnablement précis.	Flux le long des parois et flux de cisaillement libre.
RANS, SST $k - \omega$	Il utilise le modèle Wilcox $k - \omega$ dans les parties intérieures de la couche limite, mais adopte le comportement du modèle $k - \epsilon$ dans les autres couches et dans le flux libre.	Flux le long des parois, flux de cisaillement libre et notamment flux de séparation.

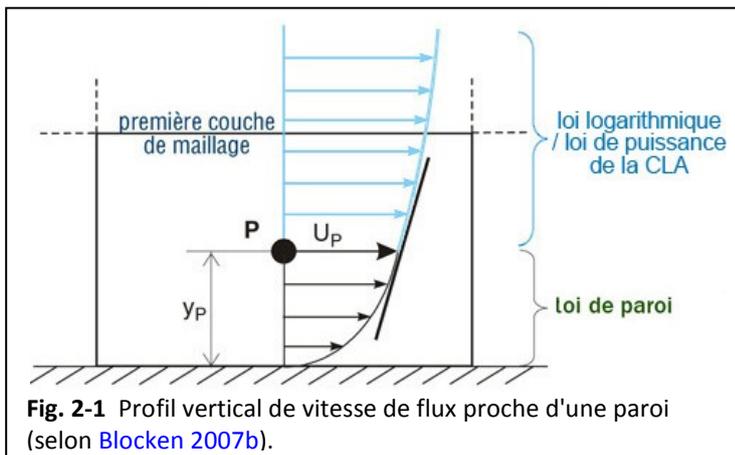
En considérant les différentes caractéristiques des méthodes CFD, les conditions de l'écoulement du vent dans notre recherche (grand nombre de Reynolds, grande échelle), la capacité de calcul de l'ordinateur ainsi que le niveau de compréhension dans le domaine d'aérodynamique sur l'équilibre entre l'efficacité et précision de résultats, nous choisirons donc dans la suite les modèles $k - \varepsilon$.

2.2.2 Problèmes de la loi de paroi

Lors qu'il n'y a pas de terme de correction de paroi dans les équations différentielles pour les modèles $k - \varepsilon$, comme dans le modèle de Reynolds Stress, ces modèles sont validés pour les flux de grand nombre de Reynolds (comme le vent naturel autour de bâtiments) et ont besoin de modèles à proximité des parois (<20 % de la hauteur des flux) pour donner les informations initiales aux équations de Navier-Stokes, au premiers points à proximité des parois. Un modèle empirique (Schlichting et Gersten 2000, pp. 522-524) utilisé est la loi logarithmique de la paroi qui peut s'exprimer comme :

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C^+ \quad \text{Equation 2-4}$$

avec $y^+ = \frac{y_p \rho U^*}{\mu}$, $U^+ = \frac{U}{U^*}$ où y_p est la distance contre la paroi, U_p est la vitesse du flux, μ est la viscosité turbulente, ρ désigne la masse volumique du fluide, U^* la vitesse de frottement, et C^+ est un constant. Un profil vertical de vitesse de flux à proximité de paroi est donnée dans la Fig. 2-1.



Selon la nature du flux, la valeur de y^+ varie dans une certaine gamme, qui va permettre de déterminer les limites de la distance y_p . Ensuite l'épaisseur de la première couche de maille près de la paroi, qui est très importante pour simuler correctement la vitesse de flux proche de paroi, peut être calculée. Pour l'écoulement du vent dans une ville dense, l'estimation de cette épaisseur de couche est donné dans l'Annexe 2.2. Par contre, la détermination de la fonction du paroi dans le code pose un certain nombre de problèmes, lorsque quatre exigences doivent être satisfaites dans la simulation CFD de la partie basse de la couche limite atmosphérique (CLA) (Richards et Hoxey 1993, Franke et al. 2004, Fluent Inc. 2005, Blocken et al. 2007b) :

- 1) Une résolution du maillage suffisamment élevée dans la direction verticale à proximité du sol du domaine de calcul (e.g. la hauteur de la première cellule < 1 m) ;
- 2) Un écoulement homogène horizontalement de la CLA dans la région en amont et en aval de ce domaine de calcul ;
- 3) Une distance y_p du point P du centre de la cellule de paroi adjacente à la paroi (fond de domaine) qui est plus grande que la profondeur de rugosité physique k_s du terrain ($y_p > k_s$) ;
- 4) La connaissance de la relation entre k_s et la z_0 (la longueur de rugosité aérodynamique).

Les exigences 1) et 3) doivent être satisfaites pour la partie centrale de domaine de calcul (dans la direction du vent), mais toutes ces exigences pour l'entrée et la sortie de domaine. Généralement il n'est pas possible de satisfaire toutes les quatre simultanément. Par exemple, si on applique la loi

de paroi logarithmique, l'exigence 4) va induire un $k_s \approx 30z_0$, ce qui pour une ville moyenne dense dont $z_0 = 1m$ donc un k_s d'environ $30m$. On ne peut donc pas satisfaire à la fois les exigences 1) et 3) si $y_p > k_s > 30m$, où il n'y a alors aucune de précision du maillage proche du sol. En plus, l'application de la loi de paroi peut donner lieu à une hétérogénéité horizontale des profils de la vitesse moyenne du vent et de la turbulence (Blocken *et al.* 2007a).

Face à ce contenu, Blocken *et al.* (2007b) ont proposé des mesures de redressement, parmi eux qui apparaissent faisables et pratiques pour nous :

1) Une modélisation explicite des éléments de rugosité. Celui-ci modélise explicitement la rugosité en amont et en aval dans le domaine de calcul, sous forme de blocs rectangulaires pour tenter de reproduire intégralement les effets de rugosité réels sur le flux. Pourtant, ceci induit une augmentation de la durée du calcul itératif.

2) Une minimisation de la longueur en amont du domaine. Il faut réduire, autant que possible, la longueur en amont du domaine de calcul pour permettre de limiter le développement des gradients de flux (Blocken *et al.* 2006). Pourtant, la longueur minimum en amont doit être toujours fournie (5H comme proposée par les lignes directrices).

3) La génération de profils de la CLA. Il faut effectuer d'abord une simulation dans un domaine de calcul vide (assez long, généralement $L > 10\ 000\ m$) avec des paramètres identiques à la simulation d'objectif, avec une haute résolution du maillage et avec $k_s < y_p$. Les profils d'équilibre de la vitesse moyenne du vent à la sortie du domaine seront obtenus et alors ils pourront être appliqués à l'entrée comme des profils modifiés. Dans tous les cas, les profils obtenus doivent rester réalistes et représentatifs de la situation à simuler.

En conclusion, en considérant les problèmes de la loi de paroi dans le code, les tailles de géométries d'étude (domaine 700-1000 m, bâtiment 3-200 m), et l'équilibre entre les facteurs de précision et le nombre de mailles, nous adoptons dans la suite les valeurs suivantes : l'épaisseur de la première couche de maille proche du sol (terrain) $D_{\text{ter}} = 0,3 \sim 0,5\ m$, et l'épaisseur de la première couche proche des murs de bâtiment $D_{\text{bât}} = 0,08 \sim 0,1\ m$. D'ailleurs, des analyses d'erreur avec des mesures de redressement seront considérées dans la suite.

2.2.3 Vérification et validation de la simulation CFD

Comme présenté en introduction de la modélisation CFD, le processus de validation est indispensable à la simulation numérique. Ce processus contient une partie de validation et une partie de vérification. Selon l'Institut American d'Aéronautique et Astronautique (AIAA, 1998), la validation est un processus consistant à déterminer dans quelle mesure un modèle reste une représentation précise du monde réel du point de vue de l'utilisation prévue du modèle. Tandis que la vérification est un processus consistant à déterminer que le modèle de description conceptuelle représente avec précision la pertinence des résultats du modèle. C'est-à-dire, la validation interroge l'évaluation de la pertinence des résultats de calcul par rapport à la réalité physique (entre le monde réel et le monde virtuel), alors que la vérification s'intéresse à l'exactitude d'une solution de calcul par rapport au modèle utilisé (entre les conditions initiales et les sorties) (Laporte 2008).

Pour la validation de la simulation CFD pour l'écoulement du vent autour de bâtiments, soit on mesure le vent sur le terrain des bâtiments d'étude (in situ) (Yang 2004, Gao *et al.* 2012), soit on la mesure en soufflerie avec des maquettes réduites (Tominaga *et al.* 2008, Reiter 2008, Ramponi *et Blocken* 2012). En raison de la longue durée pour collectionner les données et des facteurs complexes en terrain réel, la méthode de mesure sur site est très limitée. L'expérimentation en soufflerie est par conséquent devenue la méthode principale. Généralement, les conditions initiales ainsi que l'objet d'étude en soufflerie et en CFD doivent être exactement les mêmes afin de mieux comparer les résultats. En effet, des écarts existent toujours. Pour l'écoulement du vent autour de

bâtiments, on trouve que dans les régions de grande vitesse les écarts (en moyen) peuvent être d'au moins 10 % à 20 % mais dans les régions de petite vitesse, ils peuvent devenir très grands (500 % ou plus) (Blocken *et al.* 2011). Les écarts reviennent de plusieurs sources. Deux sources principales ont été mis en avant (Coleman & Stern 1997, Franke *et al.* 2007, Laporte 2008, Blocken *et al.* 2012) :

1) Les erreurs et incertitudes dans la modélisation de la physique : la simplification de la complexité physique (niveau de détail sur la représentation), l'utilisation de données expérimentales antérieures, les conditions aux limites géométriques, les conditions aux limites physiques, et l'initialisation ;

2) Les erreurs et incertitudes numériques : la programmation informatique (e.g. des équations « approximatives » pour décrire l'écoulement), les approximations du calcul, le type et la résolution du maillage, la discrétisation spatiale et temporelle, et la convergence itérative.

Chaque facteur mentionné ici peut induire de nombreuses erreurs ou incertitudes et doit être considéré attentivement. Par exemple, l'influence de la végétation sur le vent, qui est souvent ignorée dans les simulation d'écoulement urbain. On trouve que la vitesse du vent en arrière d'un brise-vent des arbres (ou / et arbustes) sont réduites (de 15 % à 68 %) en fonction de la densité ou la perméabilité (Melbourne 1987). L'enquête par White R.F. (1954) a conclu que le type de végétation, et son éloignement des espaces ouverts influencent grandement la circulation de l'air à l'intérieur des structures abritées (Sharag-Eldin 1998). Certains chercheurs ont montré que les arbres comme un mur de porosité de 50 % (Baskaran *et al.* 1996). Pour nous, même si l'effet des végétations n'est pas grand pour les régions de grande vitesse qui nous intéresse (souvent situés à une altitude élevée), la mise en compte de la végétation dans l'analyse locale de forme urbaine est utile et rend les résultats plus précis et corrects.

D'ailleurs, comme mentionné dans le [Tableau 2-1](#), l'expérimentation en soufflerie coûte chère si on exige une bonne qualité, et cette application en soufflerie est souvent réservée aux grandes universités ou entreprises en aérodynamique. C'est pourquoi les données détenues sont précieuses et rarement publiées comme les benchmark par un propriétaire. Même si quelque ensembles de données sur l'écoulement au niveau des piétons (soit pour le confort, soit pour la pollution de l'air) peuvent être trouvés en ligne ou des anciens documents en papier, les données sur l'écoulement à grande altitude autour de bâtiments sont très rares. Comme nous n'avons pas d'accès à l'expérimentation en soufflerie, la validation reste un grand obstacle pour notre recherche. Heureusement, un benchmark a été trouvé en ligne avec des données du vent sur une coupe verticale de bâtiment par l'Institut d'Architecture de Japon. Le processus de validation de paramètres de simulation en utilisant le benchmark sera présenté dans le chapitre 4. Par contre, en raison de manque de validation directe en soufflerie, les méthodes indirectes comme l'étude de paramètres de code, l'analyse de la cohérence du champ, l'analyse de la sensibilité de maillage sont essentielles pour nous assurer de résultats solides et raisonnables.

1) Etude de paramètres de code

De nos jours, il y a plusieurs codes commerciaux (ou pédagogiques) existants et la majorité sont validés comme des codes fiables par des nombreuses expérimentations. La validation du code est la première condition pour lancer un calcul, mais elle n'assure pas de bons résultats (Roache 1997). Une raison est à la complexité de paramètres de code et ses grands impacts sur les résultats. Donc une étude attentive des paramètres de code est très importante avant le démarrage d'une « vraie » simulation.

Généralement, les paramètres liés au code CFD contiennent trois parties : la géométrie, le maillage et le calcul de la dynamique fluide. Pour la géométrie, par exemple, il y a la taille du domaine de calcul (longueur, largeur, hauteur) et la position de l'objet d'étude (distances en amont, en aval, de côté), qui sont évalués avec les facteurs comme la taille de l'objet d'étude, les caractéristiques de l'écoulement, l'application de la loi de paroi, les règles et expériences de

développement de la turbulence, et la capacité de calcul de l'ordinateur. Pour les deux autres parties, les paramètres seront beaucoup plus nombreux et complexes à analyser. Différents paramètres, notamment ceux qui sont les plus utilisés et les plus importants, sont choisis. Un Benchmark des données d'une expérimentation en soufflerie est utilisé comme référence pour la simulation numérique avec des conditions initiales presque identiques qu'en soufflerie. Après de nombreuses tests et comparaisons, leurs impacts sur le vent et les meilleures valeurs peuvent être obtenues, selon un équilibre entre le niveau des écarts et la demande de puissance de calcul.

2) Analyse de l'homogénéité horizontale du champ

L'homogénéité horizontale d'écoulement dans le domaine de calcul est essentielle pour assurer l'application du profil du vent initial et la convergence d'utilisation d'un modèle de turbulence de RANS. Il y a souvent de grands décalages entre le profil du vent à l'entrée et celui étudié à l'endroit où le bâtiment d'étude se trouve. Blocken *et al.* (2007a) ont proposé une analyse de l'homogénéité horizontale du champ vide (sans les constructions d'étude) avant de procéder à la simulation d'objectif. Si les deux profils varient trop (e.g. 20 % pour les grandes vitesses), il faut modifier le maillage ou le profil du vent.

3) Analyse de la sensibilité de maillage

Le maillage joue un rôle décisif pour la simulation de CFD, car les calculs itératifs de l'espace se posent à la fois sur la structure globale et sur chaque cellule du maillage. Pour assurer la stabilité des résultats non-influencés par le maillage, une analyse de la sensibilité avec au moins trois maillages doit être mise en œuvre (Casey et Wintergerste 2000, Franke *et al.* 2004, 2007, Tominaga *et al.* 2008). Parmi les différents maillages avec différents degrés de finesse, nous choisissons un équilibre entre la précision et la demande de calcul (van Hooff *et al.* 2011, Blocken *et al.* 2012, Lu et Sun 2014). Outre le degré de finesse, les différents autres paramètres comme les méthodes de maillage, le raffinement du maillage dans certaines régions, doivent aussi être considérés.

En outre, Roache (1997) a analysé différentes approches pour l'estimation des erreurs et la quantification de l'incertitude dans la simulation CFD, e.g., la simplicité algébrique des estimateurs locaux contre la complexité des équations aux dérivées partielles supplémentaires formulations ou les solutions précises d'ordre supérieur, le post-traitement contre la modification du code. Parmi eux, il trouve que les études systématiques de convergence du maillage restent l'approche la plus commune, la plus simple et sans doute constitue la technologie la plus fiable pour la quantification de l'incertitude numérique.

En résumé, de nombreux facteurs pèsent sur les impacts de la simulation CFD. Les erreurs et incertitudes peuvent être très importantes lors du changement d'un paramètre. Les processus de validation et de vérification sont indisponibles alors que les codes CFD sont déjà bien développés et validés. Alors qu'on manque de validation directe avec l'expérimentation en soufflerie, plusieurs approches de validation et évaluation sont disponibles dans le cadre de notre travail. D'ailleurs, selon Benzerzour (2004), en faisant des études sur plusieurs formes urbaines, nous pouvons éliminer certaines grandes erreurs (accidentelles) en comparant les résultats de différents maillages avec des conditions initiales identiques.

2.2.4 Lignes directrices pour adapter les simulations aux pratiques

En raison des nombreux facteurs provenant de l'environnement physique et numérique, l'évaluation de la performance de la simulation CFD sur l'écoulement autour des bâtiments est très difficile (Blocken et Caltieri 2012). Plusieurs études ont tenté d'établir des lignes directrices pour orienter les pratiques dans ce domaine. À partir de la bibliographie exploitée, les conclusions suivantes peuvent être remarquées :

1) Sur la géométrie physique

- La représentation de l'environnement réel. La géométrie doit contenir tous les bâtiments et les obstacles qui ont un effet significatif (Blocken *et al.* 2012). On peut représenter le bâtiment (avec la hauteur H) si sa distance à partir de la région d'intérêt est inférieure à $6H$ (Frank *et al.* 2007).
- Le domaine de calcul. Il doit être suffisamment grand pour éviter l'accélération artificielle de l'écoulement. La distance en amont (entre l'entrée et le bâtiment) $D_a > 4\sim 5H$ où H est la hauteur du bâtiment, la distance en aval (entre le bâtiment et le fond de domaine à la direction du vent) $D_b > 10\sim 15H$. La distance latérale $D_c > 4\sim 6H$. La hauteur de domaine $H_a > 3\sim 6H$. Pour l'écoulement autour de bâtiments bas où les flux sont principalement au-dessus du toit, H_a est proposé comme $6H$, alors que pour l'écoulement autour d'une tour où les flux passent plutôt sur les deux côtés, la hauteur du domaine peut être égale à $3H$. D'ailleurs, le taux de blocage de l'écoulement par la zone de construction (rapport entre la surface frontale des bâtiments au premier rang et la surface de la coupe verticale du domaine) doit être inférieure à 3-5 % (Frank *et al.* 2007, Zhang 2011).
- Une forme circulaire est choisie pour le domaine de calcul pour représenter différentes directions d'incidence du vent sans changement de géométrie. En plus, afin de réduire le nombre de mailles et de maintenir le moins de biais dans les mailles, le domaine de calcul est proposé d'être construit en hémisphère (Beller 2011).

2) Sur le maillage

- La résolution du maillage doit être basée sur une analyse de sensibilité ou convergence du maillage sur au moins trois maillages différents (Blocken *et al.* 2012). Plus précisément, la résolution du maillage minimale doit être de 10 cellules par racine cubique du volume de la construction et de 10 cellules par une construction séparation (Frank *et al.* 2007).
- Le maillage est de préférence composée des cellules hexaédriques ou prismatiques à proximité des frontières solides, avec des faces de cellules perpendiculaires à la frontière. La structure hexaédrique est meilleure que la tétraédrique, car elle introduit moins d'erreur de troncature et présente une meilleure convergence itérative (Hirsch *et al.* 2002).
- Proche des parois les mailles doivent être perpendiculaires à la paroi (Casey *et Wintergerste* 2000, Menter *et al.* 2002). Par conséquent, si un maillage tétraédrique doit être utilisé, les cellules prismatiques doivent être utilisés à proximité de la paroi (Fothergill *et al.* 2002).

3) Sur la méthode de solution

- La méthode des équations RANS stable, notamment le modèle $k - \epsilon$, est la plus utilisée, très efficace et correspondant à une représentation adéquate de la réalité de la soufflerie (Frank *et al.* 2004). Il est assez précis (10 à 20 %) dans les zones du vent de grande vitesse (Blocken *et al.* 2011).
- Les problématiques de modèle de turbulence : des études montrent qu'il n'y a pas de meilleur choix absolu pour les modèles de turbulence (Franke *et al.* 2007), tandis que d'autres conseillent l'utilisation de modèles $k-\epsilon$ révisés et de modèles de stress différenciés à la place du modèle de $k-\epsilon$ Standard qui est souvent utilisé (Franke *et al.* 2004, Tominaga *et al.* 2008).
- Pour l'advection, les schémas de discrétisation du premier ordre ne doivent pas être utilisés en raison de la grande quantité de diffusion numérique associée (Blocken *et al.* 2012). Ils peuvent et doivent être utilisés pour les itérations initiales, mais des approximations d'ordre supérieur sont recommandés pour la solution finale. Cependant, la discrétisation d'un ordre supérieur amène à des exigences plus fortes sur la qualité de maillage (Frank *et al.* 2007).

4) Sur les conditions initiales

- Un profil de la vitesse du vent adapté à l'environnement urbain modélisé (Reiter 2008).
- Un sol lisse ainsi les surfaces lisses de bâtiment (correspondant à une hauteur rugosité de zéro) sont proposés, afin de pouvoir affiner le maillage le long de ces parois (Reiter 2008).

- Une initialisation avec un champ d'écoulement qui est proche de la solution finale permettra de réduire les temps de calcul nécessaires pour parvenir à des solutions stationnaires (Frank *et al.* 2007).
- Les conditions de couche limite (l'entrée, la rugosité du sol) doivent être cohérentes, et les conditions de couche limite supérieure doivent se correspondre et ne pas produire trop de gradients involontaires d'écoulement (Blocken *et al.* 2012).
- Un traitement proche de la paroi est pris en charge à l'aide des fonctions de paroi. Les fonctions standard développées par Launder et Spalding (1974) sont les plus utilisées (Blocken *et al.* 2012).

5) Sur la convergence itérative

- Si ces variables de résidu sont constantes ou oscillent autour d'une valeur constante, alors la solution peut être considérée comme convergente. Une réduction des résidus d'au moins quatre ordres (0,0001) de grandeur est recommandée. Ce sont les valeurs de couche limite influencent principalement la solution de modèle, alors que l'impact des données initiales reste faible (Frank *et al.* 2007).
- La convergence itérative doit être surveillée et ne devrait pas être arrêtée sans l'assurance que les autres itérations ne donneront pas des changements substantiels dans les variables de flux d'intérêts (Blocken *et al.* 2012).

6) Sur la vérification

- Il faut vérifier l'hypothèse d'une couche limite d'équilibre correspondant à l'écoulement d'approche prescrite en effectuant une simulation dans un domaine vide avec les mêmes conditions aux limites et le même maillage (Frank *et al.* 2004).

En somme, les lignes directrices pour orienter les pratiques de simulation CFD sont utiles et instructives pour les débutants ainsi que comme référence d'études. Dans tous le cas, ils se réfèrent à des situations idéales qui pourraient ne pas être rencontrées dans toutes les simulations en raison du manque de ressources ou de l'échec des stratégies. Il faut cependant toujours essayer d'estimer les erreurs et les incertitudes dans les résultats (Frank *et al.* 2007).

2.3 Bibliographie sur résultats de la simulation CFD du vent autour de bâtiments

2.3.1 Points intéressants dans la bibliographie

Plusieurs résultats sont trouvés intéressants dans la littérature sur la simulation CFD du vent autour de bâtiments. En raison du nombre limité de recherches dans ce domaine et des orientations variées d'études particulières, les résultats sont un peu variés.

1) Influence de la forme d'obstacle

- Influence de la configuration

Le vent peut être davantage modifié quand il y a plus de surfaces d'obstacles qui ne sont pas parallèles au vent. Mais le taux de changement du vent ne semble pas en relation linéaire avec le taux de modification de configuration, et la valeur maximale de changement de vent ne correspond pas à l'extremum du modification de configuration. Selon leurs capacités d'influencer le vent, les modifications asymétriques et morphologiques semblent dans l'ordre (de la plus forte à la plus faible) : rotation, déplacement dans la direction du vent, déplacement dans le côté intérieur de la frontière, déplacement dans dans le côté extérieur de la frontière (Yang 2011a).

- Influence de la hauteur

Dans l'expérience de deux groupes de deux bâtiments identiques (70 m et 140 m de haut), la hauteur a une influence faible sur l'augmentation de la vitesse du vent dans le passage entre les bâtiments. Mais elle a une forte influence sur la position de zone de grande vitesse dans le passage. Pour les toitures plates de différentes hauteurs les configurations de l'écoulement du vent sont semblables. Le bâtiment avec une hauteur plus élevée a une couche d'écoulements turbulents plus épaisse sur le toit (Lu et Ip 2009, pp. 458).

- Influence de la toiture

Les résultats montrent que la forme de la toiture a une influence importante sur la configuration de l'écoulement du vent et aussi sur la turbulence (Lu et Ip 2009, pp. 460). En considérant la forme de la toiture, il indique que la vitesse maximale peut être trouvée pour la toiture avec une pente de 8 degrés (Balduzzi et al. 2012a, pp. 173).

- Influence de la distance entre les bâtiments

Le raccourcissement de la distance entre la grande tour d'étude et les bâtiments alentour peut augmenter la vitesse du vent autour de cette tour. En plus, la configuration pour obtenir une vitesse maximale est une fonction du ratio h/H (h est la hauteur de bâtiment en amont et H est la hauteur du bâtiment en construction) et de la distance D entre les deux. Autrement dit, si la distance D est fixée, le ratio h/H est constant pour assurer la même vitesse maximale (Balduzzi et al. 2012a, pp. 167-168). Généralement on trouve que plus la distance entre les bâtiments est petite une plus grande vitesse du vent entre eux peut être touchée. Pourtant en réalité on doit prendre en même temps les considérations comme celle du règlement de la construction, les problèmes sonores, la taille de l'éolienne, le confort ou la sécurité de l'environnement aéraulique pour les piétons, ou l'épaisseur de la couche d'écoulements turbulents (Lu et Ip 2009, pp. 455, Zhang 2010, pp. 62).

- Influence de la direction du vent

Baskaran et al. (1996) ont trouvé que les vitesses sont élevées entre les bâtiments pour un vent oblique en comparaison avec un vent normal. Ils ont aussi trouvé que la circulation formée sur le côté en aval sous un vent normal n'a pas eu lieu sous un vent oblique. Selon la rose des vents locaux, le dommage suivi de sillage d'une tour peut être compensé considérablement (Beller 2011, pp. 62).

2) Effet de concentration du vent

- L'effet de la concentration du vent provoqué par les bâtiments et une hauteur importante du bâtiment pourraient augmenter la densité de l'énergie éolienne de 3 à 8 fois dans les conditions de simulation données (Lu et Ip 2009, pp. 460). En plus, Lu et Sun (2014) ont trouvé que à 4 m sur le toit

d'une tour le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent C_v (voir l'Equation 3-6) peut atteindre de 1,3 à 5,4 (Lu et Sun 2014, pp. 350). Pourtant, il y a des chercheurs qui se sont méfiés de l'importance des effets du vent. Beller (2011) trouve que l'effet d'augmentation de la vitesse du vent est absent de la plupart des bâtiments au sein d'un commun urbain mis en place, sauf autour d'obstacles du premier rang au vent ou d'immeubles plus élevés que la hauteur moyenne des bâtiments alentour. En plus, pour l'effet de Venturi du vent dans le passage¹³, alors que de nombreux articles disent qu'il est évident (Stathopoulos *et al.* 1992, Bottema 1993, To et Lam 1995) et que le coefficient C_v peut atteindre 1,4 (Baskaran et Kashef 1995). Pourtant, Blocken *et al.* (2007a) a trouvé que cet effet est plutôt faible, une augmentation maximale de vitesse de 8 % peut être trouvée au niveau piéton dans le passage. Alors que la vitesse au niveau du haut dans le passage est plus faible que le vent de référence.

- Généralement, l'effet de concentration de bâtiments de grandes tailles est meilleur que celui de petits bâtiments. En même temps, Il augmente avec la hauteur et la longueur des façades alors que la largeur a peu d'influence. En outre, la forme aérodynamique est préférée pour l'effet de concentration (Zhang 2010, pp. 61-62).

- L'écoulement entrant dans une rue de type canyon est accéléré de façon semblable à l'écoulement à travers une buse (l'effet de canalisation), tandis que l'effet d'accélération diminue le long de la gorge (Beller 2011, pp.60-61).

- Les zones de vitesse maximale du vent sont trouvées autour les toits qui ont plutôt une pente de 30° à 40°. Toutefois pour les toits d'une pente moins de 25°, il n'y pas des effets d'augmentation de vitesse (Balduzzi *et al.* 2012a, pp. 168).

3) Sillage et turbulence

- L'influence d'un obstacle peut être trouvée jusqu'à une distance de 4 à 12 fois sa hauteur. Plus les bâtiments sont courts et profonds, moins la distance d'éloignement à respecter entre eux doit être grande (Fig. 2-2) (Bonneaud 2004, pp. 91).

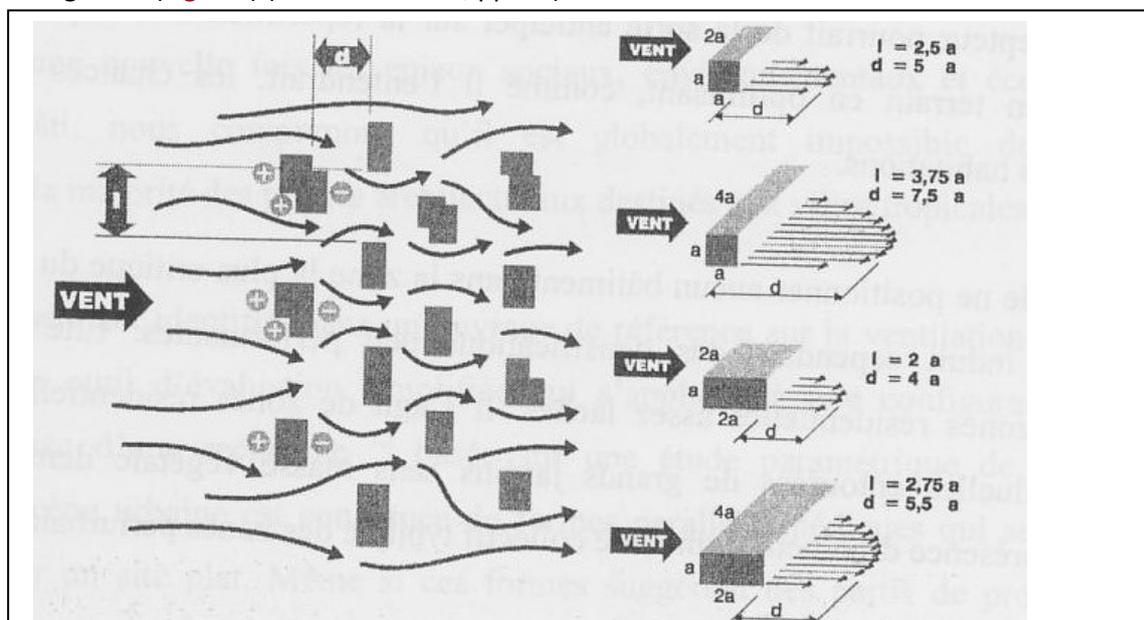


Fig. 2-2 Exemple de l'impact du vent sur des aménagements en quinconce (source : Bonneaud 2004).

- Les nombres de Reynolds sont indépendants sur les modèles d'écoulement autour de bâtiments. Cela signifie que malgré la variation des vitesses de vent les modèles d'écoulement sont maintenus ;

- L'énergie cinétique de turbulence la plus importante apparaît dans des zones où les gradients de pression sont élevés, comme par exemple au bord du toit ;

¹³ description dans le Tableau 1-5, Chapitre 1.4.3.

- Les bâtiments dans le sillage d'un bâtiment élevé et les bâtiments en-dessous de la hauteur moyenne sont confrontés à une turbulence accrue et à une vitesse du vent réduite ;
- Le sillage d'une tour évoque la réduction de vitesse du vent en aval à des hauteurs même plus grandes que celle de la tour (Beller 2011, pp.60-61).

En résumé, l'écoulement du vent est fortement influencé par la forme des obstacles comme la taille, la pente de toiture, la largeur de passage et la configuration entre eux. Il y a des effets de concentration de bâtiments sur le vent, mais il faut bien évaluer et analyser pour définir les endroits influencés. Les zones de grandes vitesses se présentent souvent aux coins de première rang de bâtiments au vent et autour d'immeubles plus élevés que la hauteur moyenne des bâtiments dans la ville. Généralement, dans une ville, ce sont les tours, au bord des leurs angles à une hauteur importante et sur leurs toits, qui sont favorables d'implanter des éoliennes.

2.3.2 Augmentation d'énergie éolienne par modifier les formes bâties

La recherche du développement de l'énergie éolienne dans un environnement bâti a commencé depuis les années 1990, et a reçu de plus en plus d'intérêt grâce à l'application de la méthode de CFD et aux consciences de public de plus en plus élevées sur l'environnement et l'énergie renouvelable. Le Chapitre 3 va détailler le développement de l'énergie éolienne. Ici on va juste présenter des résultats de recherche dans la littérature où la méthode de simulation CFD est utilisée pour exploiter l'énergie éolienne.

Typiquement, trois catégories d'éoliennes peuvent être résumées selon leurs différentes positions autour de bâtiments (Fig. 2-3) : à côté ou sur le toit d'un bâtiment (type A), dans un conduit à travers le bâtiment (type B) et entre des bâtiments (type C) (Mertens 2006).

1) Développement d'énergie éolienne à côté ou sur le toit d'un bâtiment

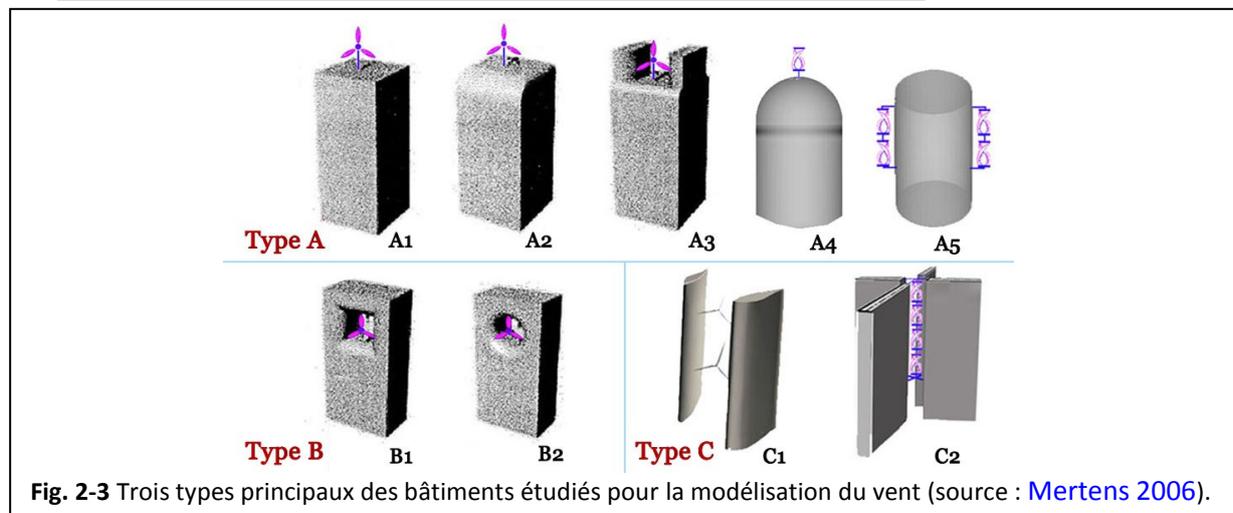


Fig. 2-3 Trois types principaux des bâtiments étudiés pour la modélisation du vent (source : Mertens 2006).

Tableau 2-3

Productions globales d'énergie éolienne des différentes types de bâtiments en référence de la production par une éolienne indépendante de même hauteur (Source : Stankovic et al. 2009).

Type de bâtiment (voir Fig. 2-3)	Type de vent			
	Uniforme	Légèrement unidirectionnel	Fortement unidirectionnel	Bidirectionnel
A1	1,12	1,12	1,12	1,12
A2	1,15	1,15	1,15	1,16
A3	1,03	1,07	1,1	1,16
B1	1,24	1,27	1,31	1,38
B2	1,35	1,39	1,43	1,51

Stankovic et al. (2009) ont comparé les différentes capacités d'effet de concentration du vent pour des types d'éoliennes sur le toit et dans un conduit avec différents vents d'entrée : A1) sur le

toit avec un bord tout droit, A2) sur le toit avec un bord rond, A3) sur le toit entre le passage aérodynamique, B1) un conduit de coupe carrée à travers le bâtiment, B2) un conduit de coupe ronde à travers le bâtiment (Tableau 2-3). Généralement, on voit que le groupe de B est plus efficace que le groupe A. Dans le groupe A, A2 est le meilleur et dans le groupe B, B2 est préféré.

Mertens (2006) a trouvé des résultats sur autre environnement bâti où les éoliennes peuvent être installées : proche d'un bâtiment, dans un conduit à travers un bâtiment, dans un passage de diffuseur aérodynamique entre deux bâtiments et parmi quatre bâtiments (Tableau 2-4). On voit que pour tous les deux types de rugosité du sol, en prairie $z_0 = 0,03$ et dans la ville $z_0 = 1$ m, tous les endroits proches d'un bâtiment ont un ratio de concentrateur¹⁴ $CR \geq 1$. Par contre, les passages de diffuseur sont peu efficace à augmenter le vent et l'éolienne dans un conduit à travers le bâtiment peut être pire qu'une éolienne toute seule. Le vent au-dessus du toit d'une demi-sphère est beaucoup grand que au-dessus du toit tranchant, mais l'espace sur la demi-sphère est limité qu'il ne permet d'installer qu'une éolienne dessus alors que le toit tranchant peut accueillir plusieurs éoliennes à la ligne centrale. D'ailleurs, les éoliennes à proximité de bâtiments sont limitées en taille à environ 10 à 20 % de la taille du bâtiment caractéristique, en raison de ses performance et de son efficacité (Mertens 2006, pp. 144).

Tableau 2-4

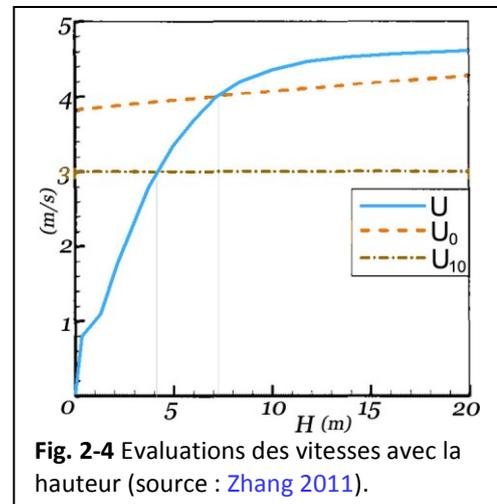
Comparaison des ratios de concentrateur pour éoliennes dans différents environnements bâtis avec un vent omnidirectionnel à 20 m avec une vitesse potentielle $U_p = 4,5$ m / s (source : Mertens 2006, pp. 143)

Rugosité du sol z_0	Eolienne seule (Réf.)	Proche d'un bâtiment			Conduit à travers un bât. 3D (2D)	Diffuseur entre deux bât. 2D	Diffuseur parmi quatre bât. 3D (2D)
		Sur le toit tranchant, centre ligne	Sur le toit d'une demi-sphère	A côté d'un cylindre			
0,03 m	1	1,7	2,8	1,7	0,7 (0,9)	1,0	1,0 (1,3)
1 m	1	2,0	4,0	3,0	0,7 (0,9)	1,1	1,0 (1,4)

Y. Zhang (2011) a expliquée l'avantage de l'installation d'éolienne sur un toit (Fig. 2-4) : quand la hauteur du rotor de l'éolienne $H > 5$ m, la vitesse du vent capté au centre du toit U est plus grande que la vitesse moyenne annuelle U_{10} (mesuré à 10 m dans un terrain ouvert comme prairie), et quand $H > 7$ m, la vitesse du vent capté est devenue même plus grande que la vitesse moyenne à la même hauteur U_0 (en amont dans le vent libre) (Zhang 2011, pp. 17).

D.F. Zhang (2010) a fait des tests sur quatre types de configurations, notamment des concentrateurs du vent en forme de mur sur le toit (Fig. 2-5). Les résultats d'expérience montrent que :

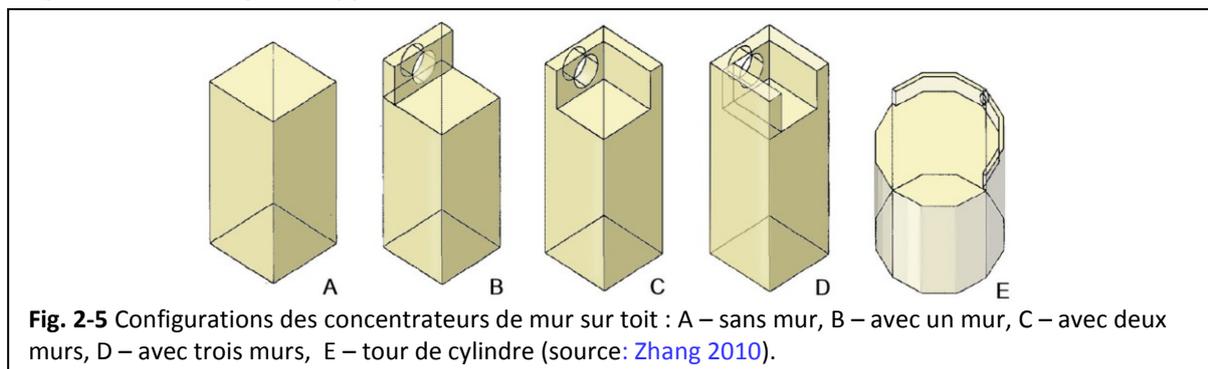
- Le concentrateur du mur sur le toit d'une tour de cylindre (type E) a l'effet de concentration du vent, mais en raison du mur lisse de cylindre qui ne peut pas bloquer le vent comme un barrage du vent, la vitesse du vent dans le concentrateur est faible, et la pression du vent sur une surface est grande ;
- Le concentrateur de trois murs (type D) a un effet de concentration un peu meilleur que celui du concentrateur d'un mur (type B), mais le coût est plus élevé et la pression du vent sur une surface est grande, donc le concentrateur d'un mur est proposé ;
- Le concentrateur du deux murs (type C) peut concentrer le vent, mais l'effet de concentration est



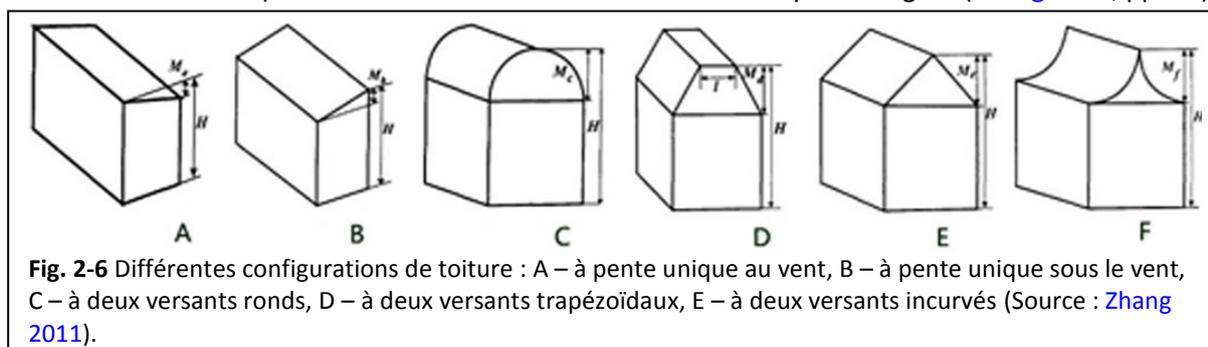
¹⁴ Le rapport du rendement énergétique généré par une éolienne dans un environnement bâti et celui d'une éolienne toute seule à la même hauteur : $CR = (U/U_0)^3$.

affaibli par la structure asymétrique ;

- Le concentrateur d'un mur (type B) est proposé en raison de sa simplicité et de son efficacité. Pour la position du mur de concentration, le meilleur est le mur exposé au vent, puis l'endroit un peu biaisé (Zhang 2010, pp. 61-62).



Y. Zhang (2011) a analysée les rendements d'énergie éolienne de différentes formes de toiture (Fig. 2-6). Les résultats montrent que parmi les six types de toiture seulement la toiture à deux versants ronds (type C) et à deux versants trapézoïdaux (type D) ont une augmentation de vitesse supérieure à celle de la toiture plate (tandis que les autres sont inférieures). Pourtant, ces deux types de toiture sont limités à ne poser qu'un seul rang d'éoliennes (correspondant au caractère de l'écoulement du vent) donc il vaut mieux des bâtiments avec une petite largeur (Zhang 2011, pp. 65).



D'ailleurs, le concentrateur d'un mur sur le toit est discuté (Zhang 2011, pp. 68-74). Les résultats montrent que pour le vent projeté d'un angle inférieur à 90° à le conduit de concentration, le coefficient C_v est toujours > 1 ¹⁵. Elle a aussi proposé une forme d'échelle pour poser un deuxième rang d'éoliennes en considérant l'utilisation d'un espace compact sur le toit et l'équilibre de charge sur la structure de bâtiment. De plus, le conduit dans le mur (pour installer l'éolienne) doit être de forme profilée, et doit correspondre à un vent dominant avec peu de changement de direction.

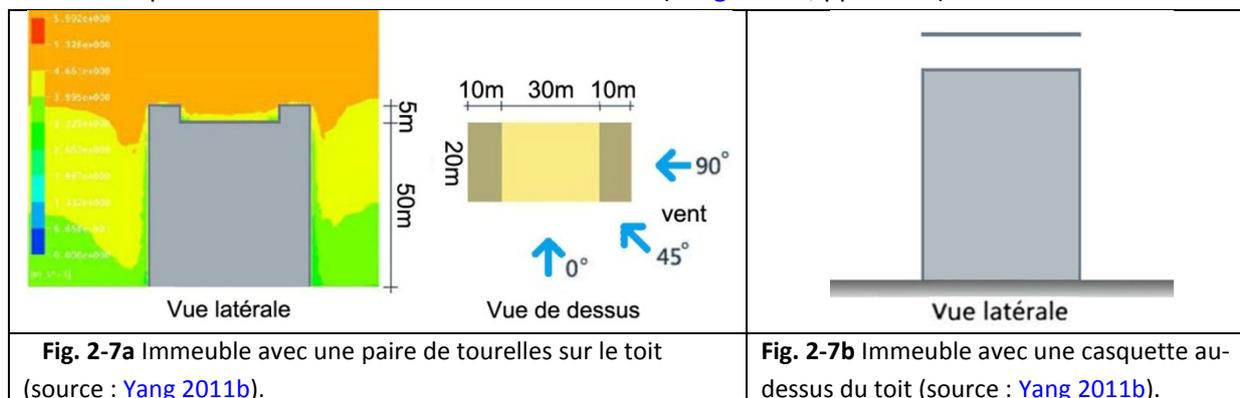
Pour l'emplacement de l'éolienne sur le toit, elle a supposé que le vent dominant est perpendiculaire à la longueur du bâtiment analysé, si la largeur du bâtiment $W < 8D$ (diamètre du rotor)¹⁶. Pour éviter la couche de turbulence sur le toit, les éoliennes posées au bord en amont de la toiture doit être supérieure à 5 m, et les éoliennes posées au milieu de la toiture doit être supérieure à 10 m. Si $W \geq 8D$, on peut poser plusieurs rangs en forme d'échelle correspondant à l'épaisseur augmentée progressivement de la couche de turbulence sur le toit (Zhang 2011, pp. 34).

R. Yang (2011b) a continué la recherche sur l'énergie éolienne au-dessus du toit mais avec deux autres méthodes pratiques pour améliorer l'effet du vent : ajout d'une paire de tourelles et ajout d'une casquette. Les résultats montrent que, avec l'ajout d'une paire de tourelles (longueur* largeur * hauteur = 10m*20m*5m) pour un immeuble de 50m*20m*50m, la puissance de l'énergie éolienne

¹⁵ Dans sa mémoire l'auteur définit le coefficient comme $C_v = (U/U_0) - 1$. Pour unifier la définition de cet indicateur dans la thèse, nous appliquons $C_v = (U/U_0)$ avec des valeurs équivalentes.

¹⁶ Généralement la distance entre deux rangs des éoliennes HWAT doit être plus que 8 fois le diamètre du rotor pour éviter l'influence de trainée importante de l'éolienne en amont sur celle en aval.

est élevée de 10 % comparée à celle d'un même immeuble sans les tourelles (Fig. 2-7a). Pour préciser l'impact de la taille, elle trouve que l'influence de la hauteur de tourelle est petite et que la meilleure hauteur est de 10 % de la hauteur de l'immeuble. En même temps, la meilleure largeur de tourelle est de 20 % de la largeur de l'immeuble. En outre, pour le cas présent, le meilleur angle d'incidence est de 45° pour une concentration maximale du vent (Yang 2011b, pp. 32-42).



Pour la casquette au-dessus du toit (Fig. 2-7b), les résultats confirment pleinement ses avantages pour optimiser la capture du vent : son augmentation de la puissance de l'énergie éolienne est environ le double de celle de l'immeuble sans la casquette. En effet, quelle que soit la hauteur de position de la casquette, et quelle que soit l'orientation du vent projeté, l'avantage de cet ajout existe toujours (augmentation de la vitesse du vent, fourniture des abris pour l'équipement, etc.). En outre, une hauteur de position de 2 m est proposée pour cette couche de casquette au-dessus du toit (Yang 2011b, pp. 43-64).

2) Développement de l'énergie éolienne dans un conduit à travers un bâtiment

Pour la position d'un conduit à travers un bâtiment, D.F. Zhang (2010) a trouvé que le passage du vent sur le toit est beaucoup plus élevé que celui posé au milieu de façade. Il éprouve que l'effet de conduit est beaucoup fort que l'effet de barrage. Plus précisément, avec l'augmentation de la hauteur du conduit sur le toit, la vitesse du vent dans le conduit augmente au début et diminue après, en raison des effets combinés de la couche limite et de la concentration de bâtiment (Zhang 2010, pp. 101). En outre, le choix de la longueur du conduit est important. Avec sa augmentation la vitesse maximale dans le passage augmente au début et diminue après (Zhang 2010, pp. 107).

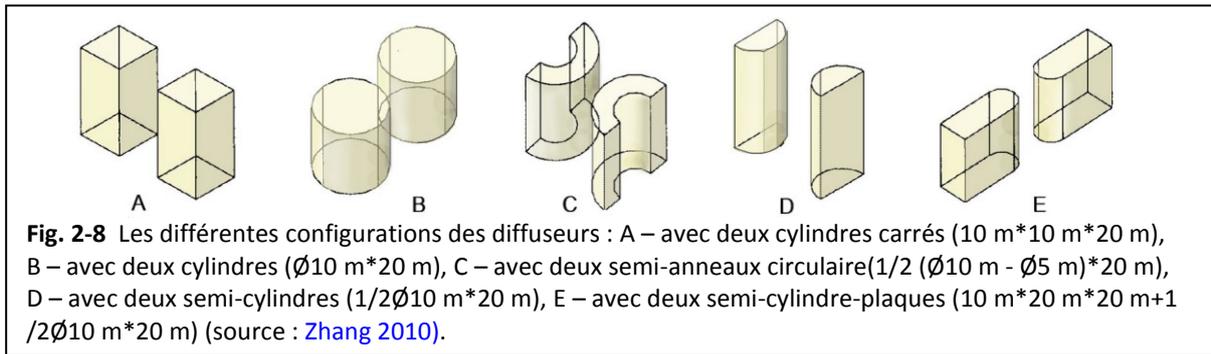
Les résultats de Stankovic *et al.* (2009) montrent que le groupe de conduits à travers un bâtiment est plus productif d'énergie éolienne que les modèles de toiture en formes variées. En plus, le conduit à coupe ronde est plus productif que celui à coupe carrée (voir Tableau 2-3). Par contre, les résultats de Mertens (2006) montrent que l'efficacité de concentration du vent de conduit à travers un bâtiment est la plus petite comparée avec les autres deux types de concentrateur (voir Tableau 2-4). Pourtant, les régions proche d'un bâtiment sont beaucoup plus productives. De même, D.F. Zhang (2010) trouve aussi que, au lieu de creuser des trous à travers le bâtiment, qui est souvent complexe et problématique, l'installation des éoliennes dans les trous sur les concentrateurs de mur sur le toit est beaucoup plus simple et efficace.

3) Développement de l'énergie éolienne dans les passages du vent entre des bâtiments

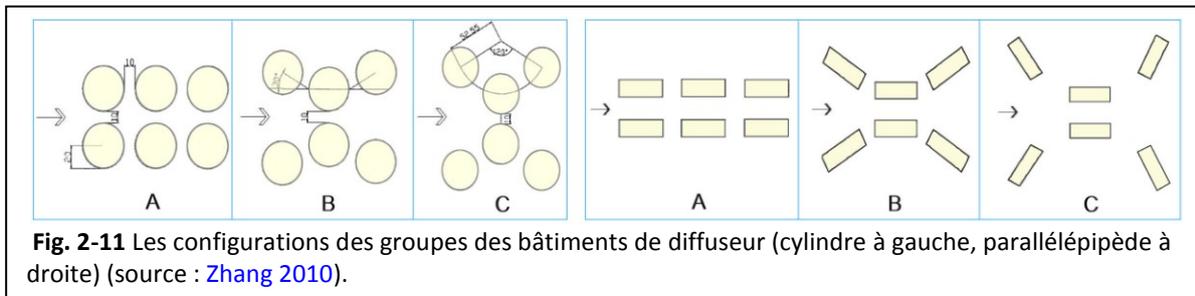
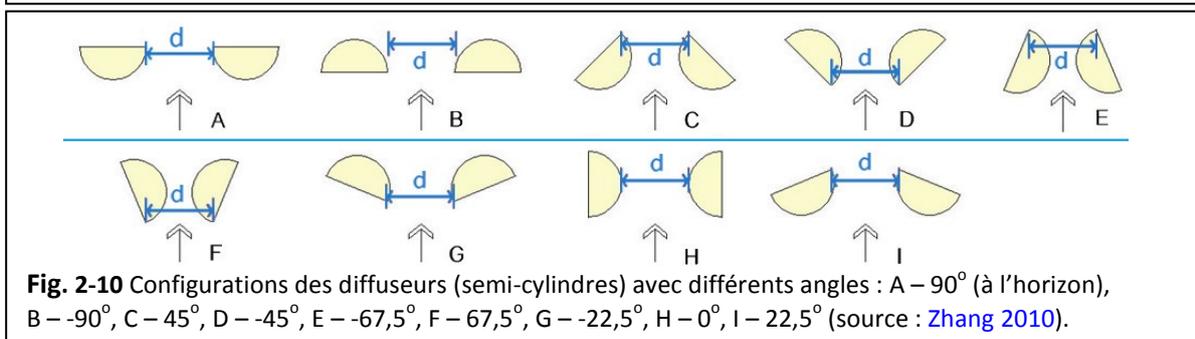
Il y a deux sous-catégories qui profitent de la combinaison de l'effet de plusieurs bâtiments : éolienne entre des bâtiment de profil aérodynamique (type C1 dans le Fig. 2-4) et de profil rigide (profil normal, type C2).

Zhang (2010) a analysé les effets des concentrations de différentes configurations de diffuseurs (Fig. 2-8). Les résultats montrent que le diffuseur avec deux semi-cylindre-plaques (type E) est le meilleur, puis celui avec deux semi-cylindres (type D), celui avec deux semi-anneaux circulaire (type C) et celui avec deux cylindres (type B). Le diffuseur avec deux cylindres carrés (type A) est le pire (Zhang 2010, pp. 71-73). Pourtant, il y a des comparaisons qui ont peu de sens. Par exemple, la

comparaison entre le type E et les autres est douteux, lorsque la longueur de sa plaque (la partie de barre) est deux fois plus grande que les autres, et l'influence de la longueur de bâtiment est souvent très importante sur l'écoulement du vent à deux côtés du bâtiment.



Et puis, il a aussi analysé les influences de différents angles de configuration de diffuseur. Pour les deux cylindres carrés l'ordre croissant de la puissance de l'effet de concentration est : $A < B < C < D$ (Fig. 2-9), tandis que pour les deux semi-cylindres c'est : $A < B < C < D < E < F < G < H < I$ (Fig. 2-10) (Zhang 2010, pp. 75-78). Le côté problématique de ces résultats, notamment sur les configurations de deux semi-cylindres (modèle C, D, E, F, G, I dans la Fig. 2-10), c'est le changement de largeur de passage, qui rend les comparaisons parmi des modèles peu fiables. Par contre, les configurations de deux cylindres carrés sont bien choisie comme la référence, parce que les résultats des deux groupes indiquent clairement que l'effet principal de concentration du vent vient des deux murs incurvés dans le passage de diffuseur au lieu de la partie de plaque. Pour évaluer l'impact de l'orientation et la longueur des deux murs de la partie de plaque, il faut faire davantage de testes avec une gamme plus fine de changement des angles entre eux et plus de variantes de la longueur des murs.



Pour les configurations de groupes des bâtiments, D.F. Zhang (2010) a testé deux rangées de tours cylindriques et de tours parallélépipédiques avec différents angles de position (Fig. 2-11). Pour les deux cas, l'ordre croissant de la puissance de l'effet de concentration du vent est : $A < B < C$. En plus,

le cas de rangé de tours cylindriques est généralement meilleur sur l'effet de concentration que celui de tours parallélépipédiques (Zhang 2010, pp. 80-85).

Pour le type de passage entre deux bâtiments, les résultats montrent que la position de profondeur de 5 m a le plus grand coefficient d'augmentation de la vitesse C_v à la ligne centrale de moitié hauteur de ce passage, en testant différentes largeurs de passages (10 à 40 m). En évaluant l'influence de la longueur de la façade du bâtiment au vent, elle trouve que quand $L = 40$ m (alors que la largeur est 20 m et la hauteur est 30 m) le C_v atteint une valeur maximale de 1,38 (Zhang 2011, pp. 56).

2.4 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur la simulation CFD de l'écoulement dans un environnement bâti.

Tout d'abord, une brève introduction de simulation CFD est présentée. Elle est comparée avec les deux autres méthodes, mesures sur terrain et expérimentation en soufflerie, avec leurs avantages ainsi que leurs limites. La méthode de simulation CFD a une application de plus en plus grande et efficace de nos jours mais elle rencontre toujours des risques viennent de nombreux facteurs d'influence et a besoin d'être validée et d'être vérifiée. Suite aux explications et aux comparaisons entre les méthodes numériques de CFD et les modèles de turbulence les plus utilisés dans notre domaine, les modèles de RANS sont retenus pour notre études, en raison d'un équilibre entre leur efficacité, leur précision et la capacité de calcul requise. En plus, les problèmes de la loi de paroi, qui est utilisée pour les modèles vers l'écoulement d'un grand nombre de Reynolds, sont particulièrement exposés et discutés. Par conséquent, un compromis sur la détermination de l'épaisseur de la première couche de maillage doit être fait mais dans une limite raisonnable.

En outre, les facteurs d'influence sur la simulation CFD sont résumés, et des processus pratiques de validation et de vérification pour notre domaine sont soulignés. Ensuite, des lignes directrices sur l'utilisation pratique sont données. Compte tenu du manque de validation directe par l'expérimentation en soufflerie, les processus d'évaluation et les lignes directrices sont très importants pour nous.

Ensuite, dans la bibliographie on voit que les modèles de recherche sont plutôt génériques, de configurations géométriques. Il y a des cas réels et complexes mais l'évaluation des paramètres de code CFD et leur validation sont toujours difficiles à confronter. Les documents sur la simulation du vent dans un environnement bâti nous enrichissent de la connaissance sur les méthodes de CFD, sur les problèmes aérodynamiques ou sur le choix des paramètres de code. Parmi eux, les recherches sur l'énergie éolienne dans l'environnement bâti sont particulièrement précieuses pour nous, e.g. ceux qui sur les indicateurs d'évaluer l'énergie éolienne et l'effet de concentration du vent. Des résultats intéressantes dans la bibliographie sur l'interaction entre le vent et les bâtiments sont ensuite présentés. Différents sujets sont abordés : la forme de l'obstacle, l'effet du vent, les mesures pour concentrer le vent, le sillage et la turbulence.

Enfin, les études sur l'effet de concentration du vent autour de bâtiments sont spécialement discutés. Les régions proches d'un bâtiment, soit sur le toit, soit à côté, sont trouvés comme les endroits les plus efficaces et pratiques pour exploiter l'énergie éolienne. Pour installer une éolienne sur le toit, des modifications de la toiture sont proposées. Une toiture en forme de demi-sphère est plus efficace pour concentrer le vent sur toit, comparée avec les autres formes de toiture. Une toiture à deux versants ronds et une toiture à deux versants trapézoïdaux peuvent être aussi de bon choix. Des concentrateurs du mur sur le toit avec conduit pour les éoliennes, des tourelles qui forment le passage du vent sur le toit, ou une casquette dessus le toit, sont parmi des options favorables et pratiques pour concentrer le vent et en tirer bénéfice. Pour les concentrateurs du mur sur toit, un mur au bord ou un peu biaisé est préférable. Pour ajouter une paire de tourelles, une

hauteur de 10 % de la hauteur de bâtiment est proposée. De plus, l'application d'un conduit à travers un bâtiment en façade est peu proposée, du moins il faut le poser assez haut ou sur le toit. L'écoulement dans le passage entre des bâtiments est compliqué et les règles en commun dans les cas de recherche sont moins claires.

Dans tous les cas, les résultats présentés sur la simulation CFD du vent autour de bâtiments sont intéressants. Ils serviront comme des références pour nos simulations futures en analysant l'énergie éolienne avec des modèles simples.

3. L'énergie éolienne en ville

Dans ce chapitre, nous présentons l'énergie éolienne et l'application des éoliennes en ville. Trois sections ont abordés : l'énergie éolienne, l'éolienne urbaine et les discussions sur le développement de l'énergie éolienne en ville dans le futur.

Au début, une brève introduction sur le développement de l'énergie éolienne et ses caractéristiques ouvrira ce chapitre. Ensuite, à propos de l'éolienne urbaine, ses composantes, ses différents types et des exemples installées seront présentés. Les challenges et les problèmes techniques et socio-économiques de cette application seront abordés. Ensuite, les termes techniques liés à la physique et à la mécanique de l'éolienne seront présentés. L'évaluation de l'énergie éolienne est ensuite discutée avec des indications sur la distribution du vent, le rendement énergétique, et des indicateurs d'évaluation de l'énergie éolienne produite. Des propositions d'implantations, des nouvelles technologies d'éolienne et des conceptions architecturales innovantes seront présentés. Enfin, suite à un résumé de littérature dans ce domaine, des lignes directrices pour développer l'énergie éolienne urbaine dans l'avenir seront proposées.

3.1 L'énergie éolienne

Le vent est un phénomène naturel, globalement provoqué par un réchauffement inégale de la planète par le rayonnement solaire, et par la rotation de la planète. Sur Terre, la puissance totale de l'énergie éolienne est estimée comme 2.74×10^9 MW, dont seulement 2×10^7 MW pourrait être exploitée, ce qui représente quand même 10 fois la puissance d'énergie exploitable de l'eau sur Terre (Zhang 2010). Comme un type des énergies renouvelables, l'énergie éolienne a été connue et utilisée depuis longtemps et sa technologie est bien développée aujourd'hui.

3.1.1 Histoire du développement de l'énergie éolienne

Il y a longtemps que l'homme a commencé à comprendre l'utilisation de l'énergie éolienne.

Vers 5000 ans avant notre ère, la navigation à voile est apparue (Lhomme 2001). Des fouilles archéologiques vers 4000 av. J.-C. ont montré que nos ancêtres ont utilisés la ventilation naturelle dans les bâtiments (Moffett *et al.* 2008). Au premier siècle, la roue éolienne de l'ingénieur grec Héron d'Alexandrie est le plus ancien exemple connu en utilisant une roue entraînée par le vent pour pouvoir jouer de l'orgue¹⁷. Vers 700 - 900, on trouve l'utilisation en Perse de roues rudimentaires à axe vertical à énergie éolienne servant à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain¹⁸. Au XI^e siècle en Europe, les premières éoliennes sont construites et utilisées pour pomper l'eau et moudre le blé. Ces moulins à vent sont composés de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal. Ils se sont bien développés à l'instar du moteur électrique en Europe, pendant des siècles avant la révolution industrielle. Construit en pierre de pays au XVII^e siècle, le moulin de Cugarel à Castelnaudary (Fig. 3-1-1) est un des derniers exemples de moulins fariniers et a fonctionné jusqu'en 1921¹⁹.



Fig. 3-1-1 Moulin à vent à Castelnaudary .

En 1887, l'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, a construit la première éolienne, qui a une hauteur de 17 mètres, est composée de 144 pales en cèdre et a une

¹⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power

¹⁸ http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne

¹⁹ <http://www.castelnaudary-tourisme.com/html/1-15203-Le-moulin-de-Cugarel.php>

puissance de 12 kW²⁰. Un autre source montre que le premier moulin à vent pour la production d'électricité est construit par le professeur James Blyth du Collège Anderson à Glasgow en Ecosse dans la même année²¹. En 1890, la première éolienne dite «industrielle» permettant de générer de l'électricité est mise au point par le Danois Poul La Cour. En 1920, le français Georges J.M. Darrieus a développé le concept de l'éolienne Darrieus qui a un rotor à axe vertical. Avec la demande croissante d'énergie et le développement technologique de grande éolienne, le premier parc éolien en mer du Danemark d'une puissance totale de 5 MW est construit en 1971.

Suite au premier choc pétrolier de 1973, le prix des énergies fossiles augmente brutalement et on commence la recherche sur les énergies renouvelables. Plusieurs impulsions et encouragements politiques, comme l'obligation de rachat d'électricité à un tarif concurrentiel par EDF (Electricité de France), redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne. Le **Tableau 3-1** montre clairement les étapes de développement d'éolienne dans différents pays et la croissance mondiale. On voit que dans les dernières dizaines d'année, la puissance éolienne cumulée dans le monde a connu une croissance moyenne de 24 % chaque année. Comparée avec les autres énergies renouvelables comme le photovoltaïque ou l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne est marquée par une puissance et une croissance très importantes dans les dernières années (**Fig. 3-1-2**²²).

Tableau 3.1

Puissance éolienne cumulée dans le monde (en MW)

Fin d'année	France*	Allemagne	États-Unis	Chine	Inde	Japon	Monde	Croissance en %
2000	61	6 097	2 568	302	1 150	150	17 684	4 234
2005	756	18 390	9 150	1 250	4 400	1 100	59 467	11 978
2006	1736	20 579	11 600	2 594	6 270	1 400	74 390	14 923
2007	2 456	22 194	16 820	6 000	8 000	1 530	93 908	15 918
2008	3 486	23 826	25 240	12 100	9 600	1 880	121 003	27 095
2009	4 574	25 703	35 100	25 800	10 900	2 100	158 920	37 917
2010	5 660	27 191	40 298	44 733	13 065	2 334	197 731	38 811
2011	6 792	29 075	46 919	62 364	16 084	2 536	237 891	40 160
2012	7 513	31 424	60 007	75 324	18 421	2 614	283 400	45 509
2013	8143	34 633	61 091	91 424	20 150	2 661	318 576	35 176

Source : Euroobserver'ER 2000-2014 (Europe), AWEA 2014 (Etat-Unis), GWEC2013 (autres pays).

* La part des Départements d'outre-mer est incluse pour la France.

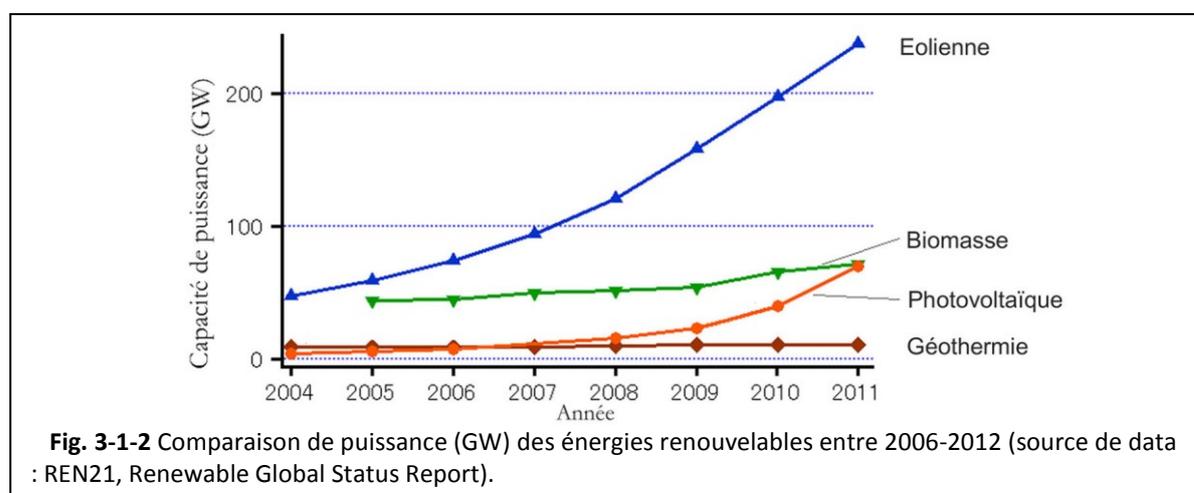


Fig. 3-1-2 Comparaison de puissance (GW) des énergies renouvelables entre 2006-2012 (source de data : REN21, Renewable Global Status Report).

²⁰ http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne

²¹ <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>

²² <http://en.wikipedia.org/wiki/File:GlobalREPowerCapacity-exHydro-Eng.png>

Pour l'énergie des petites éoliennes, correspondant à une puissance unitaire inférieure à 50 KW, le marché général connaît aussi une croissance importante : à la fin de l'année 2012 il y a 806 000 petites éoliennes installées dans le monde, soit 10 % de plus que l'année précédente. Pourtant, sauf la Chine (qui prend 39 % de la capacité mondiale), les Etat-Unis (31 %) et le Royaume-Uni (9,4 %), les autres pays (tous sont moins de 3 %) ont des puissances installées très faible dans ce domaine. Cela montre que le marché de la petite éolienne est encore en émergence. En plus, lorsque la capacité cumulée des petites éoliennes dans le monde a augmenté 18 % entre 2011 et 2012, la capacité moyenne d'une petite éolienne installée est aussi élevée à 0,84 kW en 2012, soit 9 % de plus qu'en 2011. En fait, la capacité moyenne d'une unité pour chaque pays est très variée : 0,5 kW en Chine, 1,4 kW aux Etat-Unis, et 3,7 kW en Angleterre (New Energy Huseum 2014).

3.1.2 Caractères généraux de l'énergie éolienne

Sur le choix du moyen de développement de l'énergie éolienne, des arguments pour la production centralisée ou pour la production décentralisée sont remarqués (Tableau 3-2). On voit que la méthode de production centralisée est favorable pour les grandes agglomérations compactes alors que la méthode de production décentralisée est plutôt favorable dans les petites villes ou les villes dispersées. Il est aussi indiqué que, ce sont les structures décentralisées qui fournissent une capacité pour la planification intégrée d'énergie renouvelable, en permettant d'offrir des espaces pour le développement des énergies renouvelables dans les zones adaptées au niveau local (Peker 2005, pp. 219). La production centralisée correspond à un parc de grandes éoliennes, et la production décentralisée correspond plutôt à des éoliennes dispersées et notamment des petites ou des micro-éoliennes.

Tableau 3-2

Comparaison entre la production centralisée et décentralisée d'énergie (selon Wikipedia ²³)

	Production centralisée	Production décentralisée
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> --Haute efficacité de génération lorsque le lieu sélectionné est plus productif. --Offre stable et massive d'électricité avec une certaine fréquence et tension. --Bas coûts d'organisation et de réparation. --Moins de nuisance pour la vie humaine. --Moins de coûts pour utiliser des technologies innovantes lorsqu'il existe des critères sur l'impact de la construction. 	<ul style="list-style-type: none"> --Possibilité d'alimenter en électricité des sites de consommation très éloignés du réseau existant, et dont les consommations ne justifient pas des installations de production de forte puissance. --Valorisation de sources d'énergie primaire fatale (solaire, éolien) ou dérivée (chaleur produite à d'autres fins). --Autonomie partielle du système local en cas d'incident majeur sur le réseau.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> --Perte d'énergie au cours du transport. --Grand gaspillage de capacité d'électricité lorsque l'offre est plus grande que la demande, à cause des moyens peu satisfaisants de stockage d'électricité. --Haut seuil d'installation (investissement). --Grand impact sur l'environnement local. 	<ul style="list-style-type: none"> --Participation faible ou nulle au réglage de la fréquence et de la tension du réseau électrique. --Faible capacité à participer à la reconstitution du réseau, risque d'îlotage non maîtrisé. --Pour certaines, forte intermittence, faible prévisibilité et commandabilité faible ou nulle.

Trois systèmes principaux d'énergie renouvelable sont présentés et comparés par Peker (2005, pp. 87-89) (Annexe 3.1). La section « énergie éolienne » correspond principalement aux grandes éoliennes. Pourtant, de nombreux avantages en faveur du système de l'énergie éolienne sont marqués : une technologie simple, un coût compétitif sur un terrain venté et un marché de plus en plus développé. De même, il indique l'intérêt de l'éolienne à petite et moyenne échelles.

²³ [http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_décentralisée_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_décentralisée_(énergie))

3.2 L'éolienne urbaine

3.2.1 Types d'éolienne urbaine

L'éolienne urbaine est définie comme une éolienne située en milieu urbain et pourrait être installée sur ou autour d'un bâtiment (WINEUR 2007). Généralement, une éolienne est composée de quatre parties principales : le rotor, la nacelle, le mât et l'équipement de service, comme le contrôleur de réseau (Annexe 3.2).

Selon la puissance de générateur, on peut définir quatre types d'éolienne : grande éolienne (> 500 kW), éolienne moyenne (50 à 500 kW), petite éolienne (1,5 à 50 kW) et micro-éolienne (<1,5 kW) (RenewableUK 2012)²⁴. Les éoliennes en ville sont plutôt des petites ou micro-éoliennes, mais parfois des éoliennes moyennes peuvent être adaptées dans les zones industrielles ou les zones moins denses. La surface de balayage du rotor d'une éolienne urbaine est souvent inférieure à 5 m², puisque c'est la taille convenable pour l'intégration dans l'espace urbain, et aussi la taille financièrement acceptée par la plupart des entreprises ou des familles (Beller 2011).

En outre, on peut aussi classer les éoliennes selon son axe de rotation : éolienne à axe horizontal (HAWT) et éolienne à axe vertical (VAWT). L'HAWT se subdivise encore selon le nombre de pales : éolienne monopale, éolienne bipale, éolienne tripale et éolienne multi-pales. C'est l'éolienne tripale qui est devenue le type le plus courant. L'VAWT se subdivise également selon deux catégories principales : le type Darrieus et le type Savonius. Le type Darrieus, inventé en 1931, avec les pales fines, repose sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif, un effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion. Il rencontre normalement des difficultés sur la protection contre l'orage et sur l'auto-démarrage. Alors que le type Savonius, inventé en 1924, avec les pales plutôt de large surface, repose sur la force de traînée, la force de poussée du vent. Il est sensible au démarrage à petite vitesse, mais normalement il a un rendement énergétique faible.

L'HAWT est le plus fréquent aujourd'hui et a été beaucoup plus développé que la VAWT. Par contre, on a progressivement trouvé des avantages au type VAWT, notamment pour développer l'énergie éolienne dans la ville. Le Tableau 3-3 propose une comparaison entre les deux types pour mieux comprendre leurs avantages et inconvénients.

Tableau 3-3

Comparaison entre l'HAWT et la VAWT (source : IT Power 2005, Stankovic *et al.* 2009, Beller 2009,²⁵)

	Éolienne à axe horizontal (HAWT)	Éolienne à axe vertical (VAWT)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> --Plus d'expérience et de données collectées. --Technologies plus développées. -- Un coefficient de puissance plus élevé. --Coût de fabrication réduit grâce à une production de masse et des matériaux en quantité réduite par rapport à la surface ballayée. 	<ul style="list-style-type: none"> --Peu encombrante. --Peu bruyante²⁶. --Démarré à des faibles vitesses de vent. --Couple élevé au démarrage. --Pas de contraintes sur la direction du vent. --Plus stable et plus fiable. --Plus compacte (l'espace entre des VAWTs)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> --Faible rendement en milieu urbain à cause des turbulences. --Plus bruyante. --Dépendance à la direction du vent d'entrée. 	<ul style="list-style-type: none"> --Faible rendement général. --Couple sinusoïdal non constant. --Problème d'auto-démarrage pour le type Darrieus.

En plus, deux types d'éoliennes peuvent être définies selon la position de l'installation : l'éolienne terrestre (onshore wind turbine) et l'éolienne en mer (offshore wind turbine). La majorité

²⁴ Différents pays ont une définition différente sur la limite de puissance d'une petite éolienne, mais la majorité sont d'accord de la limite de 100 kW comme défini par IEC 61400-2.

²⁵ http://www.newenergywatch.com/2006/11/vawt_versus_haw.html

²⁶ parce qu'elle ne produit pas le bruit conique et souvent fonctionne en petit ratio Tip-speed

des éoliennes sont de type terrestre mais l'éolienne en mer a un grand potentiel et en train de connaître une croissance importante grâce au développement de sa technologie. En outre, selon la direction relative du vent, les éoliennes peuvent être subdivisées en éolienne face au vent et éolienne sous le vent. La plupart des éoliennes profitent de l'énergie éolienne face au vent, alors que très peu de HAWT captent le vent de dos, car ceci génère beaucoup de turbulence. D'ailleurs, selon la relation avec le bâtiment, les éoliennes peuvent être séparées en trois catégories : éolienne indépendante (qui a un mât et qui est éloignée des bâtiments), éolienne posée sur le toit d'un bâtiment existant, et éolienne intégrée à l'architecture (une partie de l'architecture, dès l'étape de conception).

Pour mieux comprendre les différences entre les éoliennes selon ces différents types, un tableau des éoliennes, notamment celles adaptées aux milieux bâtis, est proposé ([Tableau 3-4](#)). A partir de ces informations limitées, principalement ce que les fournisseurs d'éolienne expriment, on peut donner des conseils simples et provisoires sur la mise en place d'une éolienne en milieu urbain ([Annexe 3.3](#)).

3.2.2 Exemples d'éoliennes urbaines

La majorité des éoliennes urbaines sont indépendantes ou installées sur ou à côté d'une architecture existante. Il y a aussi des éoliennes intégrées à l'architecture comme partie organique de la construction. Des exemples d'éoliennes urbaines existantes et imaginables seront présentés.

3.2.2.1 Eoliennes urbaines indépendantes

Les éoliennes urbaines indépendantes se trouvent souvent le long des avenues, les voies rapides, dans un espace ouvert, sur le sommet d'une colline, à côté d'une tour, etc..

Les éoliennes le long des voies sont installées sur les espaces ouverts au-dessus des véhicules, pour profiter à la fois des effets de concentration du vent par la circulation et de la tolérance par rapport au bruit des éoliennes lorsqu'il est plus faible que celui d'une voiture. Des fonctions complémentaires peuvent être intégrées comme panneau solaire, réverbère. La [Fig. 3-1-3a](#) montre un exemple d'éoliennes de type Savonius intégrée à un réverbère avec panneau photovoltaïque.

Des éoliennes indépendantes sont également installées à côté des grands immeubles, où elles peuvent profiter l'effet de coin autour les bâtiments. La [Fig. 3-1-3b](#) montre un exemple d'éoliennes à axe horizontal avec des carénages qui renforcent l'effet de concentration du vent, à côté des grandes tours et au bord de la rivière Rijnhaven à Rotterdam.

Des éoliennes indépendantes peuvent aussi placées dans les espaces ouverts comme une place, une pelouse ouverte, des terrains sportifs, etc. Le vent dans un espace ouvert est souvent plus fort que dans les rues étroites en ville, et les impacts environnementaux (bruit, vue) sont moins perçus. La [Fig. 3-1-3c](#) montre un exemple d'éoliennes à axe horizontal classiques dans le parc de La Vilette à Paris. En outre, au plus de générer de l'électricité, des éoliennes urbaines sont installées pour décorer la ville comme des œuvres d'art. Jason Bruges Studio ont fait à Southbank Centre, Londres des micro-éoliennes qui tournent et allument des petites lumières LED installées dans le gouvernail ([Fig. 3-1-3d](#)²⁷). Plus intéressantes, des éoliennes de Quietrevolution ont des pales installées des LED colorées et offrent des effets plaisants dans la nuit, lorsque l'intensité de couleurs change avec l'intensité du vent ([Fig. 3-1-3e](#)) ([MoS et al. 2006](#)).

²⁷ <http://www.jasonbruges.com/projects/uk-projects/wind-to-light>

<p>Fig. 3-1-3a Réverbères intégrés avec une éolienne de type Savonius au Japon (photo : P. Friis).</p>	<p>Fig. 3-1-3b Eoliennes à axe horizontal à Rijnhaven, Rotterdam.</p>	<p>Fig. 3-1-3c Eoliennes à axe horizontal dans le parc de La Villette, Paris.</p>
<p>Fig. 3-1-3d Le projet «Wind to Light» par Jason Bruges Studio, Southbank Centre, Londres (source : Beller 2012).</p>	<p>Fig. 3-1-3e Eoliennes Quietrevolution Windlight (source : MoS <i>et al.</i> 2006).</p>	

3.2.2.2 Eolienne installée sur ou autour d'une architecture

De nombreuses éoliennes urbaines sont installées sur les toits. La première éolienne en toiture (Trimble Windmill), installée en 1981, possède deux rotors de face et d'arrière et génère l'électricité par le contre rotation des deux moitiés du générateur²⁸. Sur le toit du Musée de la Science à Boston aux États-Unis, on a installé plusieurs types des éoliennes en 2003, et a étudié leurs performances et leurs impacts pendant 3 ans. La Fig. 3-1-4a montre des éoliennes AeroVironment (AVX400) qui sont spécialement conçues pour les bords de parapet de toit. En fait, elles ont un axe descendant qui permet de mieux profiter de l'écoulement au bord de la toiture (MoS *et al.* 2006). L'exemple de NGUp Windwall, avec plusieurs VAWTs Darrieus positionnées à axe horizontal sur le toit, sera intéressant pour l'environnement urbain par sa compacité d'espace et son esthétique (Fig. 3-1-4b). En plus, une éolienne notamment VAWT peut être installée à côté d'un coin de tour pour profiter l'effet du coin du vent. L'immeuble Kinetica à Londres, réalisé en 2011, est équipé de VAWTs de type Darrieus hélicoïdal au coin arrondi (Fig. 3-1-4c) (Degross *et al.* 2013).

²⁸ http://www.earthtoys.com/emagazine.php?issue_number=07.04.01&article=contra



3.2.2.3 Eolienne intégrée à une architecture

L'intégration d'éoliennes à une architecture nécessite une analyse de l'implantation des éoliennes dès l'étape de la conception architecturale. Dans ce cas-là, les profils aérodynamiques du bâtiment, les impacts environnementaux, le choix du type d'éolienne adaptée et les simulations numériques ou expérimentales sont considérés ensemble pour avoir une meilleure intégration et un meilleur rendement énergétique.

Le projet européen WEB²⁹ (Wind Energy for the Built environment) ([Campbell et al. 2001](#), [Campbell et Stankovic 2001](#)) entre 1998-2001 a développé un modèle architectural et aérodynamique intégré avec une éolienne en comparant la modélisation numérique et des mesures in situ, qui a abouti au prototype de technologie Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne Urbaine (UWECS : Urban Wind Energy Conversion Systems) ([Fig. 3-1-5a](#)). Dans ce modèle, on a considéré simultanément les effets d'accélération du vent et la forme aérodynamique du bâtiment. En même temps, les mesures in situ ont été effectuées et comparées avec les résultats des simulations CFD. En fait, ce travail a analysé les différences de productivité entre l'éolienne isolée et celle du modèle UWECS, ainsi les différences entre les performances des VAWTs et des HAWTs. Sur cette analyse, elle propose une conception architecturale assez détaillée. Même si elle n'a pas été réalisée, elle a forcément influencé les immeubles construits intégrant des éoliennes, comme la tour de Bahrain World Trade Center (Manama, Bahrein, réalisé en 2008) ([Fig. 3-1-5b](#)³⁰) ou la Tour de la Rivière des Perles (Guangzhou, Chine, réalisée en 2011) ([Fig. 3-1-5c](#)³¹). Toutes les deux ont utilisé l'effet de concentration du vent généré par le corps de bâtiment.

Les toits sont aussi souvent considérés pour installer une éolienne en profitant ainsi de leurs hauteur. L'immeuble COR à Miami, réalisé en 2009, intègre des éoliennes dans la façade étendue sur le toit ([Fig. 3-1-5d](#)³²). La tour Strata SE1 construite en 2010 à Londres intègre trois HAWTs sur son toit. Chaque éolienne a 9 m de diamètre et produit 19 kW. Elle compose de cinq pales et peut produire 50 MWh d'électricité chaque année ([Zhang 2010](#)) ([Fig. 3-1-5e](#)³³). La tour de Shanghai en cours de construction (sera réalisée en début 2015), est conçue pour recevoir 270 VAWTs sur son toit (entre 565 m et 578 m) pour une puissance de 135 kW ([Fig. 3-1-5f](#))³⁴.

²⁹ Il est sous le Programme Sans Energie Nucléaire (JOULE III) pour la Commission Européenne.

³⁰ <http://mosticonicskyscrapers.blogspot.fr/2012/08/13-bahrain-world-trade-center-manama.html>

³¹ <http://www.51abcd.com/forum/dispbbs.asp?boardid=5&id=1719&authorid=4865&page=0&star=138>

³² <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=59311813>

³³ http://bermondseymum.blogspot.fr/2010_05_01_archive.html

³⁴ http://www.shanghaiatower.com.cn/enversion/show_news.asp?c_id=211

<p>Fig. 3-1-5a Prototype UWECS (source : Campbell et Stankovic 2001).</p>	<p>Fig. 3-1-5b Bahrain World Trade Center (source : blogspot.fr).</p>	<p>Fig. 3-1-5c Tour de la Rivière des Perles (source : 51abcd.com).</p>
<p>Fig. 3-1-5d Immeuble COR à Miami (source : skyscrapercity.com)</p>	<p>Fig. 3-1-5e Tour de Strata SE1 à Londres (source : blogspot.fr)</p>	<p>Fig. 3-1-5f Tour Shanghai (source : shanghaitower.com.cn).</p>

3.2.3 Challenges de l'éolienne urbaine

Les passions et les motivations du public sur les éoliennes urbaines sont élevées. Néanmoins, il y a de nombreux challenges et problèmes qui ralentissent leur installation et leur réalisation. Généralement, les problèmes viennent de plusieurs domaines : la technique, l'environnement, l'économie et la société. Les challenges sont plutôt liés aux normes et réglementations.

3.2.3.1 Aspects techniques de l'éolienne urbaine

Les éoliennes urbaines rencontrent de nombreux problèmes techniques. Principalement, il y a la fiabilité du vent et donc le rendement, la vibration, le bruit et l'effet stroboscopique.

1) Le rendement

En ville, les vents sont souvent ralentis et turbulents par la grande rugosité du substrat. Pour retrouver une même densité de l'énergie éolienne à une hauteur de 10 m en rase campagne, il faut se placer à 45 m en banlieue, et à 72 m en ville ([AFPPE 2013](#)). Selon plusieurs études, la vitesse annuelle moyenne à 10 m à partir du sol dans un espace ouvert (rural) se situe entre 2,8 et 7,8 m/s, alors que celle dans un espace urbain à la même hauteur est entre 2,3 et 5,2 m/s. La turbulence est supposée réduire de 15 % l'énergie dans un espace ouvert rural et de 50 % dans un espace ouvert urbain. Une éolienne HAWT de 600 W peut produire 250 à 1500 kWh d'énergie en milieu rural, mais 50 à 250 kWh en milieu urbain ([Allen et al. 2008](#), [Moriarty 2009](#), pp. 20). Donc le vent faible et la turbulence rendent peu d'énergie, ce qui est le plus grand problème de l'éolienne urbaine. On trouve ainsi que le coefficient de rendement d'une grande éolienne classique est d'environ 30 %, alors que celui d'une micro-éolienne se situe entre 2 % et 6,4 % ([Zeng 2011](#), pp. 48).

En outre, il faut se garder d'utiliser des données de mesures comme la base de données NOABL, qui souvent prédisent les résultats sur une rugosité de campagne et ne seront pas correctes pour un site en ville (Shaw 2008, Energy Saving Trust 2009, Ferrigno 2010). Pour éviter ce problème, il faut une étude précise sur site même. Une longue période (minimum 2 ans) de données de mesures est nécessaire.

2) La vibration

La vibration des éoliennes installées sur un bâtiment est très importante pour la sécurité de la structure. Pourtant, il y a très peu d'évaluation indépendante et donc l'incertitude est grande au regard des procédures de planification et de sécurité (WINEUR 2006).

Pour éviter ce problème, il faut une modélisation de la structure, ainsi que des mesures d'adaptation.

3) L'effet stroboscopique

L'effet stroboscopique lié aux ombres portées par les pales, aussi appelé « flicker », est une nuisance de voisinage. Ce phénomène est plutôt fréquent sous les latitudes plus septentrionales où la hauteur moyenne du soleil est plus élevée, et les zones situées à l'ouest et à l'est des éoliennes, lors du lever ou du coucher du soleil (Grignoux *et al.* 2006, pp. 20).

Pour éviter ce problème, on doit considérer les influences suivantes : la position du soleil selon le jour et l'heure, l'existence d'un temps ensoleillé, les caractéristiques de la façade concernée, l'orientation du rotor et son angle relatif par rapport à l'habitation concernée, la présence de vent, la présence de masques (e.g. la végétation). Les matériaux sombres et non-réfléchissants sont recherchés dans ce contexte.

4) Le bruit

Une éolienne produit un bruit mécanique et un bruit aérodynamique.

Le bruit mécanique provient surtout des engrenages en mouvement dans le multiplicateur situé dans la nacelle. Le bruit aérodynamique provient de la circulation et du ralentissement du vent le long des pales produisant un bruit de souffle caractéristique. Le bruit des pales peut être réduit par une attention particulière en conception et par la fabrication des lames, alors que le bruit du générateur peut être minimisée grâce à son isolation et l'amélioration mécanique de la nacelle (WINEUR 2005). Quand le niveau sonore d'une éolienne se stabilise lorsque le vent atteint une certaine vitesse, c'est ce qu'on appelle le bruit de fond. Au-delà, le bruit du vent augmente encore et vient couvrir celui de la machine à cause de l'effet de masque (ADEME 2004). De plus, on trouve que le bruit à large bande est plus dégoûtant que celui à bande étroite (Dutton *et al.* 2005).

Pour éviter ce problème, à part des améliorations de la conception mécanique et des pales de l'éolienne, il faut choisir des endroits moins sensibles, augmenter la séparation, poser des écrans entre l'éolienne et l'habitant, et concevoir des carénages.

5) La casse des pales

Même si la probabilité de casse des pales n'est qu'un phénomène marginal pour les grandes éoliennes à axe horizontal en milieu agricole (0,1 % sur 15 ans), la grande densité en ville augmente le risque de manière importante. Cependant, le problème de sécurité lié à l'éjection de pale est fortement réduit dans le cas d'éoliennes à axe vertical, par comparaison avec l'éolienne à axe horizontal (Grignoux *et al.* 2006, pp. 41-53).

3.2.3.2 Aspects socio-économiques de l'éolienne urbaine

Les problèmes socio-économiques liés à l'éolienne urbaine concernent principalement : l'impact visuel, les coûts, la perception du public, les contraintes administratives et l'intégration dans les réseaux d'électricité.

1) Les coûts

Les coûts d'une éolienne contiennent les dépenses : des éolienne et ses accessoires, de la mesure et de l'évaluation du potentiel (très coûteux en temps et en argent), administratives (permis de construire, enquête publique), de l'installation, de l'entretien, du raccordement au réseau ou de la batterie. L'investissement initial par kW d'une éolienne urbaine varie d'un cas à l'autre : entre 2400 et 9100 €/kW, mais il est généralement beaucoup plus élevé que celui d'une grande éolienne qui atteint environ 1000 €/kW (Cace *et al.* 2007). De même, la Fig. 3-1-6 montre que le coût d'énergie de petite éolienne tout au long de la vie (LCOE : Levelized Cost of Energy) est le plus élevé parmi plusieurs systèmes énergétiques, et représente même deux fois plus que celui de l'énergie photovoltaïque (Zeng 2011, pp. 29-30). Du côté de la dépense environnementale, les résultats (en Nouvelle Zélande) indiquent que l'émission de gaz à effet de serre tout au long de vie (Life Cycle Analysis Greenhouse Gas Emission) de la petite éolienne peut varier entre 130 et 220 g CO₂ eq/kWh (carbon emission equivalent per kilowatt-hour), contre 8 à 30 g CO₂ eq/kWh de l'énergie éolienne générale. Celle-ci est toute fois beaucoup moins élevée que celles des énergies fossiles (e.g. charbon : 800 à 1300 g, gaz : 400 à 800 g) (Mithraratne 2009).

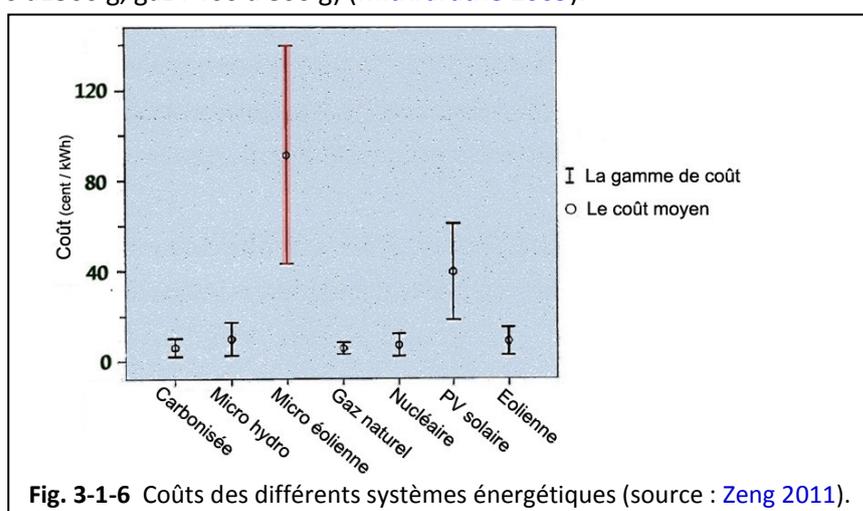


Fig. 3-1-6 Coûts des différents systèmes énergétiques (source : Zeng 2011).

Dans le cas de la France, pour l'éolienne de petite ou moyenne puissance, quelle que soit sa configuration (raccordée ou non, à plus ou moins de 12 m), le coût de revient du kWh produit est largement plus élevé que le coût d'achat ou évité (Grignoux *et al.* 2006, pp. 60).

Pour résoudre ce problème, il faut d'une part attendre l'épanouissement du marché de la petite éolienne pour baisser le prix unitaire, et d'autre part augmenter le rendement énergétique par un bon choix de la technologie et du site d'implantation.

2) L'impact visuel

L'évaluation esthétique est souvent subjective et personnelle. Une enquête a montré que la majorité (67 %) de personnes interrogées se sentent indifférents à l'aspect visuel des turbines et que 28 % sont positives (IT Power 2005). Néanmoins, il existe des règles générales pour rendre les éoliennes urbaines plus acceptables visuellement : tailles de l'éolienne adaptée à celle du bâtiment, discrétion (position, couleur), profil aérodynamique, etc..

3) La perception du public

Pour analyser la perception du public sur l'éolienne urbaine, le projet WINEUR³⁵ a entrepris plusieurs enquêtes. L'étude en Angleterre a montré qu'une part importante (42 %) des installations sont associées à des établissements éducatifs, 37 % à des centres d'environnement et 21 % à des autorités locales. De plus, la plupart des propriétaires d'éoliennes (78 %) sont satisfaits de leurs éoliennes et veulent en installer à nouveau. Généralement les avis sur le quartier et chez les voisins

³⁵ Il est sous le programme ALTENER de l'Agence Exécutive pour la Compétitivité et l'Innovation (EACI) pour la Commission Européenne. Vu le site officiel : <http://www.urbanwind.net/wineur.html>

sont positifs (54 %), alors que 39 % sont indifférents et que le niveau de soutien est devenu plus élevé après l'installation qu'avant (IT Power 2005). En France, 65 % des architectes connaissent les éoliennes urbaines, cependant ils ne sont que 35 % à en avoir vu. De plus, tous les architectes et les organismes publics interrogés ont porté un avis favorable sur les éoliennes urbaines (WINEUR 2007).

3.2.3.3 Aspects administratifs et juridiques de l'éolienne urbaine

1) Les contraintes administratives et juridiques

On voit que l'éolienne urbaine est encore dans une étape d'émergence du marché mondial (New Energy Huseum 2014). Les normes et la réglementation ne sont pas encore établies ou précisées. Cela amène souvent à des incertitudes et ralentit le processus de contrôle administratif. De plus, l'éolienne urbaine n'a reçu pas plus de soutien de la politique que la grande éolienne, qui par contre est plus développée, et génère moins de contraintes.

En France, on contrôle principalement les nuisances sonores et la hauteur de l'éolienne (le mât). Le bruit des éoliennes ne peut dépasser le niveau environnant initial de plus de 5 dB le jour (de 7 h à 22 h), et de plus de 3 dB la nuit³⁶. Pour l'urbanisme, si la hauteur de l'éolienne se situe entre 12 m et 50 m, il faut un permis de construire et une étude d'impact ; si la hauteur est supérieur à 50 m, il faut en plus une enquête publique. Selon l'enquête du projet WINEUR, l'obtention du permis pour les éoliennes urbaines est complexe. Il prend beaucoup de temps et est différent dans chaque municipalité et pour chaque autorité locale. De plus, il n'existe pas de lignes directives pour l'intégration d'une éolienne dans l'architecture ou sur la structure de l'éolienne (WINEUR 2005).

2) le raccordement d'éoliennes aux réseaux

A cause des petites capacités de puissance électrique de l'éolienne urbaine, du système peu développé et non-standardisé, l'agence de distribution de l'électricité ne portent pas grande volonté d'intégrer les petites éoliennes au réseau.

Même si des lois sont sorties pour en favoriser le développement comme l'obligation d'achat par EDF en France, la part de l'éolienne est très limitée et les procédures de raccordement (notamment pour ceux de plus de 2,5 MW) sont très lourdes, longues et coûteuses (Grignoux *et al.* 2006).

Dans ce contexte, nous espérons que les procédures d'accompagnement de l'éolienne urbaine (certification, évaluation du potentiel et de la production, installation, entretien, recyclage de matériaux) seront établis et que les gouvernements feront plus d'efforts pour encourager la recherche et le développement de jeunes entreprises spécialisées sur les petite éoliennes³⁷.

En somme, l'éolienne urbaine est encore dans un stade d'émergence. De nombreux challenges sont associés aux éoliennes urbaines. Sa technologie est moins développée et sa efficacité est moins intéressante que ceux des grandes éoliennes classiques. Peu de normes ou de standards ont été établis pour assurer la qualité technique de l'éolienne urbaine et surtout l'éolienne VAWT. Sur le plan socio-économique, la perception du public est positive et courageuse. Son application est plutôt liée à l'éducation, à la recherche et à la présentation d'une image associée à l'écologie. Les coûts d'investissement sont encore trop élevés en temps et en argent. Les coûts indirects tels que les études de faisabilité, les études structurelles et les enquêtes sur le terrain ont un impact importante sur les coûts du projet. Les impacts liés au bruit, à la vibration et au clignotement existent mais sont contrôlés. Sur le plan administratif et juridique, les évaluations au cas par cas (sans l'aide de norme et standard) rendent les procédures très longues et découragent les propriétaires. L'urbanisme, les lois sur les nuisances sonores et la difficulté de raccorder au réseau font obstacles à l'installaton de l'éolienne urbaine. Des iéoliennes sont souvent placées trop bas, où le vent est faible et turbulent,

³⁶ Circulaire interministérielle du 27 février 1996

³⁷ Nous avons vu plusieurs entreprises de petite éolienne en échec, e.g. WindTronics.

pour éviter une demande de permis de construire ou un contrôle administratif. En attendant l'établissement de standards ou de normes, ainsi l'épanouissement du marché de l'éolienne urbaine, nous avons besoins d'efforts et de communication entre les maîtres d'ouvrage publics, les fournisseurs, les fabricants, les instituts de recherche, les entreprises, les architectes, les urbanistes, les propriétaires et le grand public.

3.3 Développement de l'énergie éolienne en ville pour le futur

Avec le développement de la technologie et la croissance de la conscience environnementale du public ainsi du gouvernement, l'énergie éolienne devrait jouer un rôle important dans la ville du futur, malgré de nombreux challenges et problèmes à confronter aujourd'hui. Le projet européen « WINEUR » a trouvé des motivations pour installer des éoliennes urbaines :

- l'économies de CO₂,
- la production d'électricité verte,
- l'empêchement de pertes d'énergie sur le réseau des grandes centrales électriques aux consommateurs,
- des individus qui deviennent producteurs d'énergie et sont donc plus conscients de l'efficacité énergétique,
- la sauvegarde des ressources en combustibles fossiles,
- une image visible « verte » pour encourager l'environnement durable,
- l'économie sur les coûts de l'énergie,
- l'indépendance vis à vis des sociétés de services publics d'énergie,
- le développement du produit d'exportation (WINEUR 2007).

3.3.1 Evaluation énergétique d'une éolienne

3.3.1.1 Termes techniques pour l'évaluation énergétique d'une éolienne

Sur le plan technique, quelques termes essentiels sont nécessaires à connaître sur la physique et la mécanique qui influencent le rendement énergétique d'une éolienne.

1) Puissance d'une éolienne et efficacité de conversion énergétique

La puissance d'une éolienne P est calculée par l'équation :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (\text{Equation 3-1})$$

où C_p est le coefficient de puissance, ρ est la masse volumique de l'air, A est la surface de balayage de l'éolienne, et U est la vitesse du vent qui passe à côté des pales.

Généralement, en raison de façon de capter le vent, la limite du coefficient de puissance est marquée : $C_{p,max} = 16/27 \approx 0,5926$, appelé la limite de Betz. Pourtant, dans les conditions où le vent passant à côté des pales est réutilisé, ou une carénage qui a un effet de concentration est utilisée, la valeur maximale du coefficient peut dépasser la limite de Betz. En fait, mis à part les contraintes physiques pour captater l'énergie éolienne (façon de capter le vent, profil de pale, angle d'incidence, etc.), il y a d'autres pertes d'énergie qui réduisent le coefficient. Il s'agit de pertes mécaniques et électroniques dans le processus de transition. La puissance globale d'une éolienne peut être calculée par :

$$P_g = \frac{1}{2} C_g \rho A V^3 = \frac{1}{2} (\eta_a \eta_b \eta_c \eta_d \eta_e \eta_f \eta_g) \rho A U^3 \quad (\text{Equation 3-2})$$

où η_a représente l'efficacité de l'hélice : $0,2 < \eta_a < 0,85$,

η_b représente l'efficacité du multiplicateur / réducteur : $0,7 < \eta_b < 0,98$,

η_c représente l'efficacité de l'alternateur : $0,80 < \eta_c < 0,98$,

η_d représente l'efficacité du transformateur : $0,85 < \eta_d < 0,98$,

η_e représente l'efficacité du redresseur : $0,9 < \eta_e < 0,98$,

η_f représente l'efficacité de la batterie : $0,7 < \eta_f < 0,8$,

η_g représente l'efficacité de transfert de lignes : $0,9 < \eta_g < 0,99$ (Manwell *et al.* 2002).

Généralement, une éolienne HAWT tripale bien développée produit une conversion énergétique maximale de l'ordre de 0,5 alors qu'une HAWT bipale ou multipales a une conversion moins efficace. Pour une VAWT de type Savonius, le coefficient de puissance maximale peut arriver jusqu'à 0,3. Pour une éolienne VAWT de type Darrieus, il peut arriver à 0,4 (Hladik *et al.* 2011). En tout cas, l'efficacité de HAWT est normalement 40 % plus élevée que celle de VAWT³⁸. Pourtant, les nouvelles technologies de VAWT permettent une grande amélioration. Selon les études du Centre de recherche et de développement d'Aérodynamique de la Chine, le coefficient de puissance réelle mesuré de HAWT est environ 0,23 à 0,29, alors que celui de VAWT peut atteindre 0,40 (R. Yang 2011b, pp. 63).

La surface de balayage de l'éolienne est calculée par : $A = \pi R^2$ pour une HAWT, où R est le rayon du rotor. Pour une VAWT $A = 2RL$ où R est le rayon du rotor et L est la hauteur de pale (voir Fig. 3-3-1). La vitesse du vent est la vitesse instantanée, souvent utilisée dans les données de météo (mesure toutes les 6s, 1 min ou 10 min selon les stations). En réalité, pour simplifier l'estimation globale énergétique d'une éolienne, des modèles de distribution de vent sont appliqués.

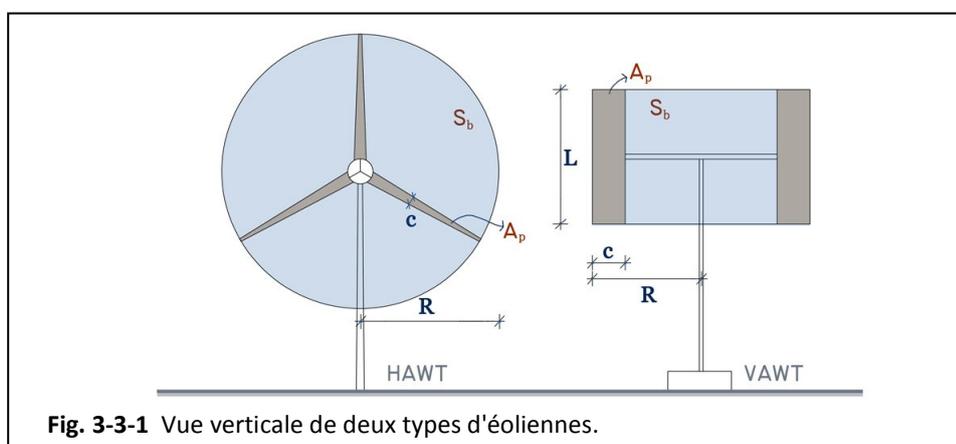


Fig. 3-3-1 Vue verticale de deux types d'éoliennes.

2) Vitesse spécifique de rapidité (tip-speed ratio, TSR)

La vitesse spécifique de rapidité notée TSR est le rapport entre la vitesse de l'extrémité de la pale et la vitesse du vent :

$$TSR = \frac{v}{U} = \frac{\omega R}{U} \quad (\text{Equation 3-3})$$

où v est la vitesse de mouvement de l'extrémité de la pale, U est la vitesse du vent qui passe au travers des pales et R est la longueur de la pale ou rayon de la turbine. Normalement, les machines sont classées en fonction de ce paramètre : une éolienne est lente si $TSR < 3$ et une éolienne est rapide si $TSR > 3$. Par exemple, une éolienne bipale peut avoir un égal à 20, alors qu'une éolienne moyenne classique (tripale) a une TSR entre 6 et 7.³⁹

En fait, une valeur faible de TSR correspond à un rotor avec une grande utilisation des matières et un faible rendement énergétique. Alors qu'une valeur élevée de TSR conduit à une augmentation d'émission du bruit. Comme l'émission de bruit est proportionnelle à $(TSR)^5$ (Burton *et al.* 2001), le bruit augmente rapidement avec TSR à des niveaux inacceptables. Donc, une vitesse spécifique de rapidité $TSR \approx 3$ peut être une bonne valeur de référence pour une éolienne urbaine (Mertens 2006, pp. 144).

³⁸ http://www.newenergywatch.com/2006/11/vawt_versus_haw.html

³⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design

3) Solidité du rotor

La solidité du rotor δ est une grandeur représentant le taux de blocage (occupation) des pales d'une éolienne sur le vent. Elle est définie comme le rapport de la somme de la surface des pales à coupe normale de la direction du vent S_p à la surface pleine balayée du rotor S_b .

$$\text{Pour HAWT : } \delta = \frac{S_p}{S_b} = \frac{nA_p}{S_b} = \frac{n c R}{\pi R^2} = \frac{n c}{\pi R} \quad (\text{Equation 3-4a})$$

$$\text{Pour VAWT : } \delta = \frac{S_p}{S_b} = \frac{nA_p}{S_b} = \frac{n c L}{2 R L} = \frac{n c}{2 R} \quad (\text{Equation 3-4b})$$

où A_p est la surface d'une pale à coupe normale de la direction du vent, n est le nombre de pales de l'éolienne, R est le rayon de la surface balayée, c est la corde (distance mesurée du bord d'attaque au bord de fuite) moyenne ou la largeur moyenne de la pale, selon le type d'éolienne (Fig. 3-3-1).

En testant d'une éolienne à axe vertical (H-type Darrieu) dans la simulation CFD et en soufflerie, M.H. Mohamed (2013) a montré que l'augmentation de la solidité va améliorer la capacité d'auto-démarrage de ce type d'éolienne. De plus, grâce à une solidité élevée, une valeur faible de TSR peut être arrivée qui donc rend possible un maximum du coefficient C_p (Mohamed 2013, pp. 503).

4) Facteur de capacité

Le facteur de capacité d'une éolienne sur un site correspond à sa production annuelle divisée par la production théorique maximale de cette éolienne fonctionnant à pleine puissance à plein temps (soit 8 760 heures dans une année). Par exemple, pour une éolienne de 5 kW produisant 12 000 kWh en un an, le facteur de capacité est égal à $12000/(8760 \times 5) = 27,4 \%$. Généralement, le facteur de capacité d'une éolienne se trouve entre 25 % et 30 %⁴⁰.

Pour une puissance nominale fixée, le facteur de capacité est décidé principalement en fonction de l'efficacité de conversion d'énergie d'éolienne et de la distribution du potentiel éolien sur un site.

3.3.1.2 Distribution du vent : approche statistique

En raison de la rugosité du substrat, des changements de position du soleil, du mouvement de la Terre ainsi que des activités humaines, la distribution du vent est très variée selon les endroits et les temps. Les différentes couches atmosphériques proche de la terre et le profil vertical de vitesse du vent sont expliqués dans le Chapitre 1.6.1. Ici, nous présentons la distribution temporelle et la distribution spatiale du vent.

1) Distribution temporelle du vent

Pour évaluer précisément le potentiel éolien d'un lieu, il faut une longue période de mesures pour établir un comportement moyen du vent. La littérature reprend souvent le chiffre de 10 ans de mesures et au minimum de 2 à 3 ans. Pourtant, une longue période de mesures n'est pas toujours disponible. Donc, on fait une hypothèse sur la manière dont les vitesses sont distribuées dans le temps. La fonction de distribution de Weibull est la fonction la plus courante pour estimer la distribution du vent :

$$f(x, k, c) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-(x/c)^k} \quad (\text{Equation 3-5})$$

où k est le facteur de forme et c est le facteur d'échelle. Le facteur de forme définit la forme de la distribution et dépend principalement de la régularité du régime du vent. Le facteur d'échelle est une mesure de la vitesse moyenne du vent. Lors que les deux paramètres sont fixés, la distribution est établie. Un exemple de données de météo sur la distribution du potentiel éolien en Maine-et-Loire correspond à une fonction de Weibull (Fig. 3-3-2). Un cas particulier où le facteur de forme $k = 2$, correspond à la fonction de distribution de Rayleigh qui est plus simple mais plutôt applicable dans les climats tempérés (Pallabazzer (2003)).

⁴⁰ http://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique

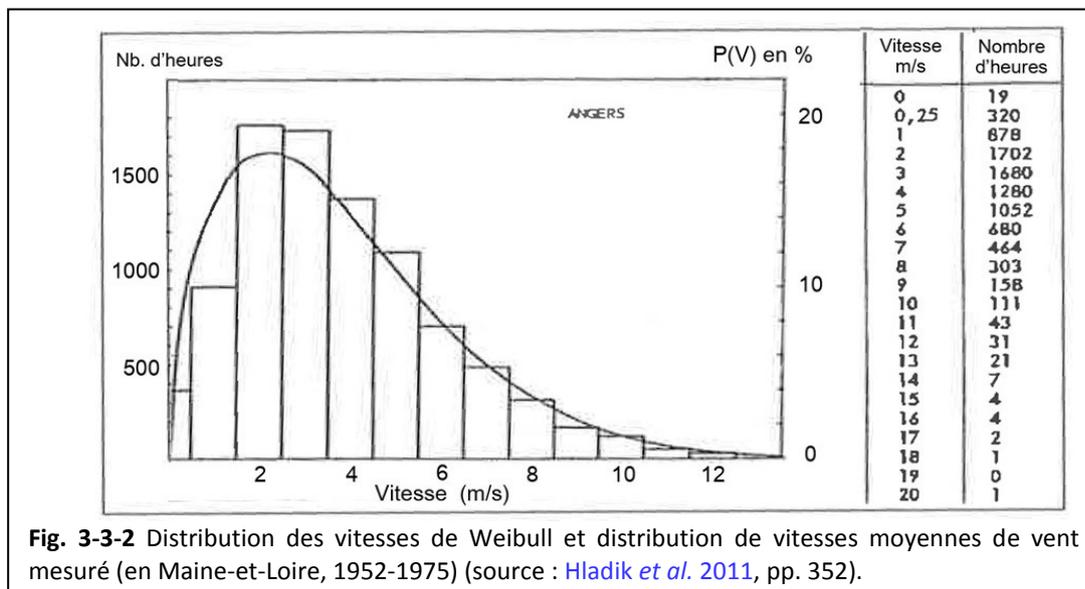


Fig. 3-3-2 Distribution des vitesses de Weibull et distribution de vitesses moyennes de vent mesuré (en Maine-et-Loire, 1952-1975) (source : Hladik et al. 2011, pp. 352).

En général, une distribution du potentiel éolien au cours d'une période au lieu d'une vitesse moyenne globale du vent, est nécessaire pour évaluer correctement l'énergie éolienne de cette période. Car la puissance est une fonction du cube de la vitesse du vent, l'application une vitesse moyenne globale peut introduire une grande erreur. En fait, il faut calculer l'énergie éolienne de chaque sous-période séparément. La fonction de distribution de Weibull, qui permet de synthétiser les propriétés importantes du vent, est souvent utilisée pour évaluer l'énergie du vent si les données de météo sont lacunaires⁴¹.

D'ailleurs, Pallabazzer (1995) a défini deux paramètres pour optimiser l'implantation d'une éolienne : l'efficacité du site, qui est le ratio entre l'énergie produite et le maximum d'énergie disponible, et le seuil de vitesse de l'éolienne. En analysant les cas dans plusieurs sites de deux régions différentes, il a trouvé que le seuil de vitesse doit correspondre à la vitesse nominale et au cube de la vitesse moyenne du vent sur le site. En même temps, il indique que l'utilisation des modèles Weibull et Rayleigh n'est pas tout à fait fiable pour évaluer la production d'énergie des éoliennes. C'est parce qu'il n'existe aucune corrélation claire entre le maximum d'efficacité du site, le seuil optimum du vent et les facteurs du modèle Weibull (Pallabazzer 1995, pp. 58).

En outre, Pallabazzer (2003) indique aussi que le facteur de forme de distribution Weibull (k) est très variable non seulement d'un site à l'autre, mais aussi dans le même site selon les saisons, ainsi de la direction du vent et des années. La gamme de variation de k sur un site donné peut être très large et non négligeable (Pallabazzer 2003, pp. 1332). Selon lui, l'application du modèle de Rayleigh doit être vérifiée car le paramètre k varie dans le temps et d'un lieu à l'autre.

2) Distribution spatiale du vent

Il s'agit de la rose des vents qui est un schéma rond indiquant la fréquence des vents selon leurs directions. La Fig. 3-3-3 montre la rose des vents à Toulouse du mois octobre 2011. La fréquence moyenne par direction tous les 20° est donnée. On peut voir que les vents dominants au mois d'octobre sont de nord-ouest et de sud-est. La fréquence correspondant à différentes gammes de vitesse est ainsi donnée.

En donnant les directions, les grandeurs de vitesse et les fréquences moyennes du vent, la rose des vents est très importante pour évaluer le potentiel éolien. Pour définir l'implantation d'une éolienne, il faut analyser l'influence des obstacles en amont du vent avec les vents dominants indiqués. Les données de mesures sur une période assez longue, souvent plus de 2 ans, sont nécessaires pour synthétiser une rose des vent globale.

⁴¹ <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>

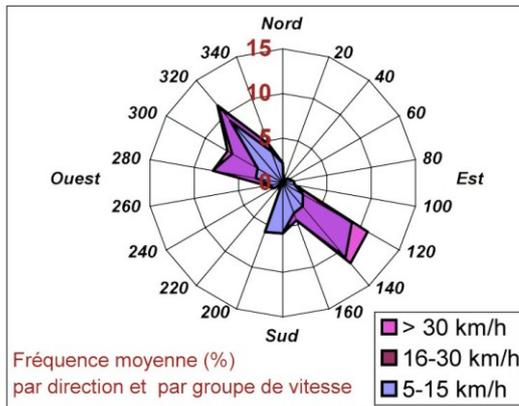


Fig. 3-3-3 Rose des vents à Toulouse (source : Météo France).

3.3.1.3 Courbe caractéristique de puissance et rendement instantané

Selon la distribution du vent pendant une période donnée, l'éolienne touche une puissance d'énergie différente au fil du temps. Donc on peut utiliser une courbe caractéristique pour obtenir la puissance électrique en fonction de la vitesse du vent. Généralement, ces courbes sont données par les fabricants d'éoliennes. Même si la courbe caractéristique peut être certifiée par un laboratoire et définie dans des conditions d'essai standard, elle ne garantit pas la performance réelle de l'éolienne, en raison de la simplification du modèle de distribution du vent.

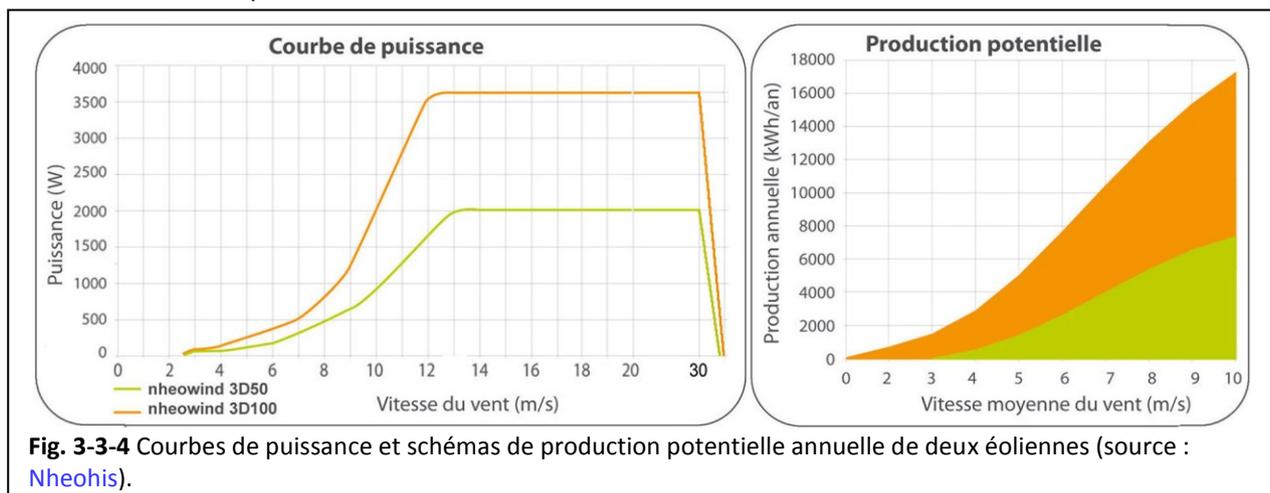


Fig. 3-3-4 Courbes de puissance et schémas de production potentielle annuelle de deux éoliennes (source : Nheohis).

La Fig. 3-3-4 montre un exemple de courbe de puissance de deux éoliennes de Nheohis⁴². Selon la distribution du vent annuelle, le schéma de la production potentielle annuelle correspondante peut être dessiné. Dans le schéma de la courbe de puissance, on peut voir que la vitesse minimale exploitable⁴³ pour les deux types d'éolienne est de 2,5 m/s, la vitesse maximale⁴⁴ pour les deux éoliennes est de même 30 m/s et la puissance nominale⁴⁵ pour l'éolienne *nheowind 3D100* est de 3600 W à partir de 12 m/s et pour l'éolienne *nheowind 3D50* est de 2000 W à partir de 13 m/s.

Généralement, on pense que diminuer la vitesse minimale de démarrage peut apporter une efficacité améliorée de l'éolienne, en fait il ne donne pas grand avantage et doit prévoir un coût supplémentaire pour améliorer cette efficacité (Ferrigno 2010, pp. 75).

⁴² <http://www.nheolis.com/index.php?lang=fr>

⁴³ « Cut-in speed » en anglais, qui s'agit de la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à débiter une puissance utile. Ce-ci doit être distingué avec la vitesse de démarrage, « start-up speed » en anglais, à laquelle l'éolienne commence à tourner mais ne fabrique pas d'électricité.

⁴⁴ « Cut-out speed » en anglais, qui s'agit de la vitesse maximale acceptable par l'éolienne où elle sera arrêtée pour protection.

⁴⁵ « Rated power » en anglais, qui est souvent égale à la puissance électrique maximale qu'une éolienne peut extraire.

3.3.1.4 Indicateurs d'évaluation de l'énergie éolienne d'un site

Y. Zhang (2011) a donné huit indicateurs pour évaluer le potentiel éolien d'un site pour installer une éolienne.

- 1) Le coefficient de l'augmentation de la vitesse :

$$C_v = \frac{U}{U_0} \quad (\text{Equation 3-6})$$

où U est la vitesse du vent réelle d'un point et U_0 est la vitesse d'une même hauteur du point dans un vent libre (dans un champ sans bâtiment). U_0 peut être calculée directement avec l'Equation 1-2. C_v est utilisé pour évaluer l'effet de concentration du vent.

- 2) L'angle d'incidence du vent θ_1 dans la zone où il y a l'effet de concentration du vent ($C_v > 1$).
- 3) L'intensité de turbulence I , qui vaut mieux moins de 25 % pour les champs d'éoliennes.
- 4) L'épaisseur de turbulence δ du sol couvert par des bâtiments. Pour éviter l'influence de la turbulence forte, il faut que la hauteur du rotor $h \geq \delta + R$ (R est le rayon du rotor) pour les HAWTs et $h \geq \delta$ pour les VAWTs.
- 5) La vitesse réelle U au point de l'installation.
- 6) L'angle d'incidence du vent (θ_2) de la zone du vent efficace qu'on peut capter. Lorsque la zone où $C_v > 1$ n'est pas forcément accessible pour une éolienne, l'angle θ_2 est souvent inférieur à l'angle θ_1 .
- 7) L'angle d'inclinaison du vent γ , défini par $\cos \gamma = U_x/U$ (U_x est la composante horizontale de la vitesse réelle U).
- 8) La vitesse réelle à la hauteur des piétons (1,5 à 2 m) U_p , qui permet d'évaluer le confort de l'environnement aérodynamique autour de bâtiments (Zhang 2011, pp. 28-30).

Mertens (2006) a proposé le ratio de concentration (CR) pour évaluer l'énergie éolienne. Il est le rapport de l'énergie produite par une éolienne dans un environnement bâti et celle d'une éolienne isolée à la même hauteur dans le vent libre. En fait, cet indicateur est la combinaison de deux propriétés de concentration : l'accélération de vitesse du vent (comme C_v mentionné ci-dessus) et l'efficacité de capture par rapport avec l'angle d'incidence du vent (comme θ_2 mentionné ci-dessus).

Sur la base de la connaissance de l'énergie éolienne dans le vent et des caractéristiques des éoliennes, nous appliquons les indicateurs suivants, en considérant à la fois l'efficacité et la difficulté, pour évaluer l'adaptabilité d'installation d'une éolienne sur un site donné :

- 1) La surface des zones A_i de différentes gammes de vitesses correspondantes du vent U_i , sur une surface de capture accessible pour une éolienne. La vitesse du vent doit être plus grande que la vitesse minimale exploitable de l'éolienne. Quand les surfaces utiles sont définies, le nombre d'éoliennes et leur implantation peuvent être trouvés. On peut ensuite déduire l'énergie éolienne exploitable.

- 2) L'angle d'incidence du vent dominant, qui se trouve dans la rose des vents. En fait, l'angle θ_1 et l'angle θ_2 sont pour évaluer l'effet de concentration du vent ($U > U_0$) et pour comparer l'efficacité entre deux sites mais pas pour évaluer l'énergie exploitable d'un site, car le vent réel dont $U < U_0$ peut être assez fort pour fabriquer l'électricité.

- 3) Intensité de turbulence I , qui influence la performance de l'éolienne, notamment de HAWT. Même si l'éolienne VAWT peut fonctionner dans le vent turbulent et que parfois un certain niveau de turbulence peut augmenter le rendement énergétique (Durrani et Qin 2011, Dabiri 2011), une forte turbulence entraîne forcément des risques comme la sécurité de la turbine et l'efficacité de la conversion d'énergie.

- 4) Indicateurs de la morphologie de terrain qui contiennent la rugosité, la porosité, la densité, la hauteur moyenne de bâtiments, etc.

3.3.2 Recherche de l'implantation adaptée

L'échec d'une éolienne urbaine vient souvent d'une implantation inappropriée (Grignoux *et al.* 2006). Une bonne implantation avec des vents forts et peu de turbulence est essentielle. Des résultats de recherche dans la littérature sur les endroits proposés pour installer une éolienne et des conceptions architecturales qui favorisent la production de l'énergie éolienne sont présentés ci-dessous.

Le projet WEB (Stankovic *et al.* 2001) a proposé des endroits ouverts en ville pour installer les éoliennes : a). proximité de viaduc, b). proximité de chemin de fer, c). au milieu d'un fleuve ou d'une rivière et d). dans un port (Fig. 3-3-5). Beller (2011) dans sa thèse a aussi donné des idées pour intégrer les éoliennes dans la ville, notamment les petites VAWTs : a). sur l'abribus ou l'abri-vélo, b). au milieu de fleuve ou rivière et c,d). intégrée avec la structure d'un pont (Fig. 3-3-6). Pour intégrer l'éolienne dans une architecture, l'architecte américain Michael Jantzen a fait plusieurs conceptions innovantes. Parmi elles, la passerelle en soufflerie (qui peut être posée en traversant un boulevard ou un fleuve) peut générer de l'électricité quand le vent fait tourner ses rouleaux et parmi les cinq rouleaux, trois entre eux tournent à une direction et les deux autres à l'inverse (pour générer plus d'électricité et que la structure soit plus stable) (Fig. 3-3-7⁴⁶). Il a également conçu un toit de piscine ouverte ombragée avec des éoliennes qui peuvent aussi générer de l'électricité (Fig. 3-3-8⁴⁷),

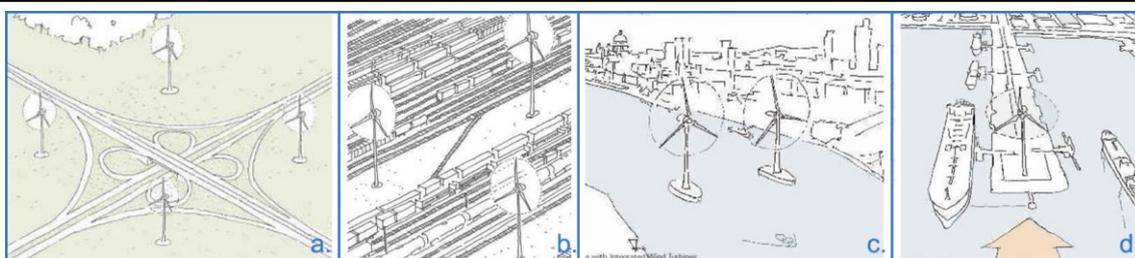


Fig. 3-3-5 Endroits dans la ville proposés pour disposer des éoliennes (source : Stankovic *et al.* 2001).

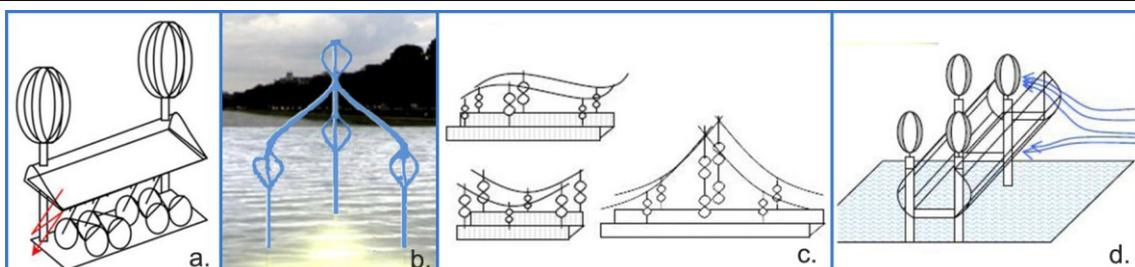


Fig. 3-3-6 Conception des emplacements d'éoliennes urbaines (source : Beller 2011).



Fig. 3-3-7 Passerelle en soufflerie
(source : michaeljantzen.com).



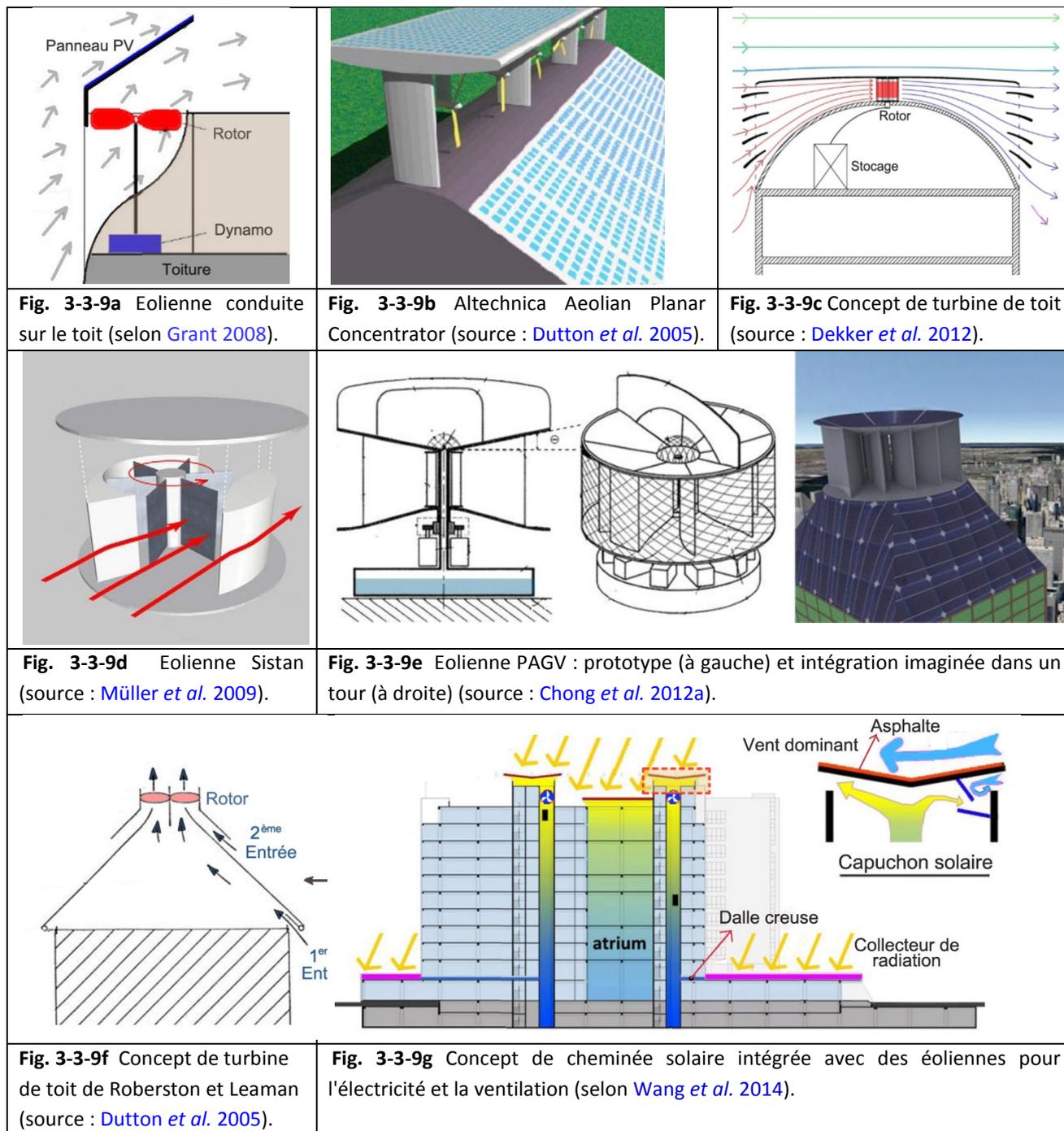
Fig. 3-3-8 Toiture ombragée avec des éoliennes
(source : michaeljantzen.com).

Techniquement, Grant *et al.* (2008) a discuté la praticabilité et les avantages d'installer une éolienne carénée sur les toits de bâtiments existants. Le coefficient global de production d'éolienne guidée a été calculé par un modèle mathématique et peut atteindre 0,7. En fait il est deux fois plus

⁴⁶ <http://www.michaeljantzen.com>

⁴⁷ <http://www.michaeljantzen.com>

grand que de celui d'une éolienne conventionnelle. Ce type d'éolienne a aussi l'avantages d'éviter l'influence de la turbulence et moins d'impacts visuels, mais ses exigences doivent être satisfaites. En fait, elle nécessite une petite taille, diamètre de 1 m par exemple, et adapter à la direction du vent d'entrée ($\pm 45^\circ$ est préféré). Une éolienne carénée intégrée au bord de la toiture d'une tour est montrée dans la Fig. 3-3-9a (Grant *et al.* 2008).

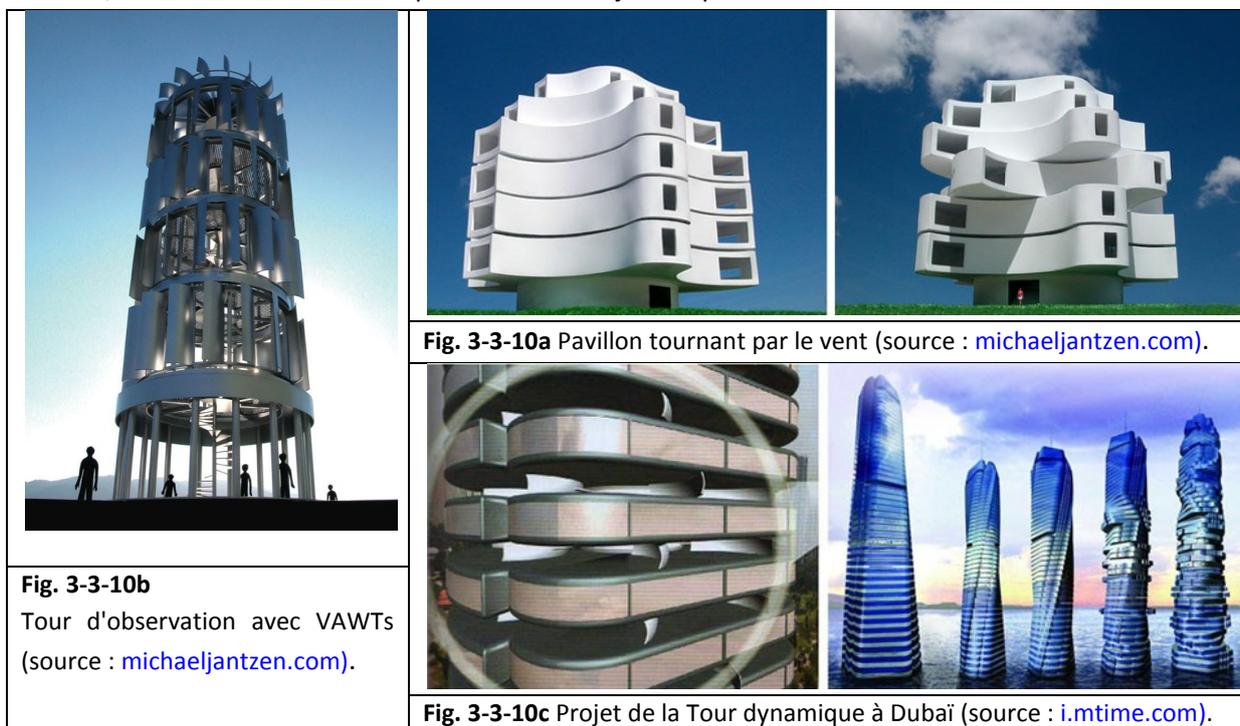


Pareillement, Altechnica Aeolian Planar Concentrator intègre les panneaux solaires et les éoliennes sur le toit. En fait, la pente de la toiture et les taille de plaque du faite dessus les éoliennes sont bien conçus afin d'avoir l'effet de conduit du vent (Fig. 3-3-9b) (Dutton *et al.* 2005). On propose une éolienne plus discrète intégrée au faite d'une coupole en forme de dôme avec une double toiture et des volets autour (Fig. 3-3-9c) (Dekker *et al.* 2012). En fait, comparé avec les autre géométries, le coupole de forme de dôme accumule le plus grand effet du vent en son sommet (Mertens 2006, Zhang 2011). Une éolienne moderne de type Sistan sur le toit a été développée et simulée dans l'intégration d'une tour en ville (Fig. 3-3-9d). Les résultats de mesures montrent que le coefficient de conversion d'énergie peut atteindre 42 % alors que le maximum théorique est environ

48 à 61 % (Müller *et al.* 2009). Chong *et al.* (2012a) ont aussi développé un nouveau type de VAWT intégrée à une tour qui s'appelle PAGV (power – augmentation – guide – vane) (Fig. 3-3-9e) mais elle a été assemblée avec deux autres technologies écologiques : panneaux photovoltaïques et collecte d'eau de pluie. La vitesse de rotation de l'éolienne à l'intérieur est 73,2 % plus élevée que celle d'une même VAWT de type H-rotor isolée dans un vent de 3 m/s (Chong *et al.* 2012a, Chong *et al.* 2012b).

En outre, visant à intégrer une éolienne indépendante au changement fréquent et à les mauvaises conditions du vent en ville (faible, turbulent, non stable), le concept de cheminée solaire est introduit pour installer une éolienne à l'intérieur de l'architecture. La turbine de toit de Roberston et Leaman est innovante et bénéficie de deux sources d'entrée du vent : le vent naturel circulé le long de la surface du toit en pente et le vent aspiré ascendant par l'effet de serre (Fig. 3-3-9f) (Dutton *et al.* 2005, pp. 34-55). De plus, l'idée de cheminée solaire avec éolienne intégrée à un grand immeuble est proposée par Wang *et al.* (2014). Dans ce cas là, les éoliennes sont installées dans les puits tubulaires et les cages d'ascenseur. Elles fabriquent l'électricité et aident en même temps à la ventilation naturelle dans le bâtiment (Fig. 3-3-9g).

D'ailleurs, des architectures toutes entières sont conçues comme des éoliennes. La conception de pavillon tournant par le vent (Wind shaped pavilion) est donnée par Michael Jantzen : les habitants des différents étages avec des balcons concaves dans le pavillon peuvent changer l'orientation de leurs appartements grâce à la force du vent naturel et la rotation peut générer l'électricité pour les besoins le soir (Fig. 3-3-10a⁴⁸). En outre, cette architecte a proposé également une tour des VAWTs qui peut être installée dans un parc pour l'observation de visiteurs (Fig. 3-3-10b⁴⁹). Ressemblante, la Tour dynamique prévue à Dubaï (Fig. 3-3-10c⁵⁰) par l'architecte italien David Fisher peut elle aussi tourner à 360° à chaque étage, mais par la force des turbines cachés sous chaque appartement. Elle est considérée comme le premier gratte-ciel vraiment dynamique du monde, mais sa construction n'a pas encore vu le jour depuis 2008.



⁴⁸ <http://www.michaeljantzen.com>

⁴⁹ <http://www.michaeljantzen.com>

⁵⁰ <http://i.mtime.com/funpage/blog/1260146/>

3.3.3 Recherche de l'éolienne adaptée

Pour répondre à plusieurs challenges concernant l'application d'éoliennes urbaines comme le problème du bruit, de la sécurité, de l'efficacité du rendement ainsi que de l'esthétique, la recherche de la technologie de l'éolienne urbaine est essentielle. Même si nous ne faisons pas la conception du rotor ni celle du système de conversion, les résultats des chercheurs dans ce domaine seront utiles pour aider à bien choisir les éoliennes adaptées à la ville. Des exemples d'éolienne commerciale sont déjà présentés dans le **Tableau 3-5**. Ci-dessous des nouvelles technologies d'éolienne en cours de recherche seront présentées.

M. Moriarty (2009) a analysé l'impact de l'environnement et de la viabilité d'implantation d'une petite éolienne en ville qui s'appelle Aeroelastic Energy Harvester (AEH) avec la méthode d'analyse du cycle de vie. Il a étudié l'environnement aéraulique de la ville de Pittsburgh et la faisabilité d'utiliser AEH dans cette ville. En fait, très différente d'une HAWT ou d'une VAWT, AEH est une technologie dont l'électricité provient d'une bande de métal fine et flexible qui vibre entre deux aimants dans le vent par un phénomène de battement aéroélastique. Puisqu'elle doit être plus efficace en région turbulent, il est proposé qu'elle doive bien profiter des tourbillons. Pourtant, jusqu'à présent cette technologie est loin d'être mûre pour le marché, car le coût qu'elle dépense sur la fabrication est beaucoup plus élevée que le rendement qu'elle est supposée d'obtenir (Moriarty 2009). Le premier prototype commercial de AEH s'appelle Windbelt et appartient à l'entreprise Humdinger mais pas encore mis sur le marché (Fig. 3-3-11). Ressemblante, une autre idée innovante proposée par l'Université de Cornell, est un arbre de l'AEH qui s'appelle « piezo-tree » où chaque feuille est une petite éolienne, (Fig. 3-3-12⁵¹).

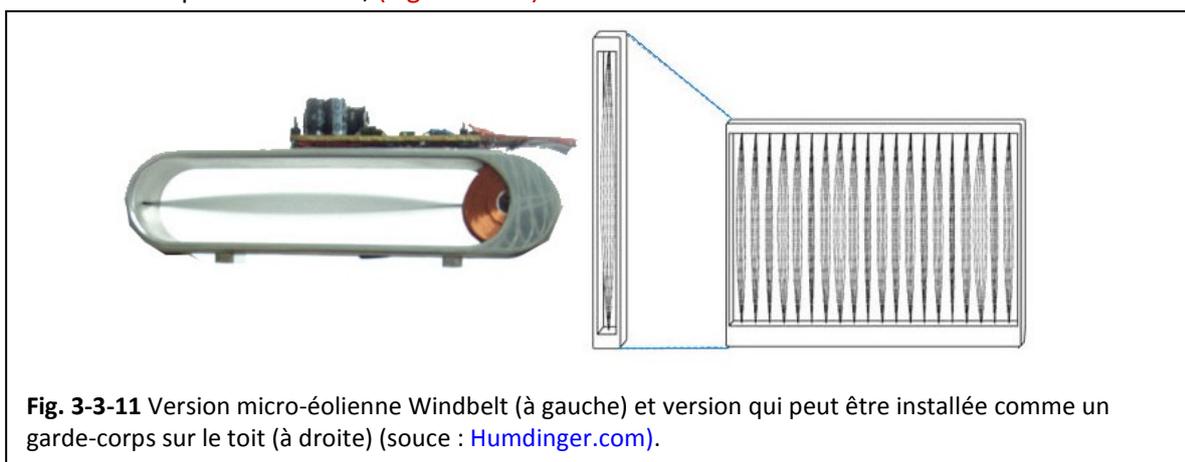


Fig. 3-3-11 Version micro-éolienne Windbelt (à gauche) et version qui peut être installée comme un garde-corps sur le toit (à droite) (source : Humdinger.com).

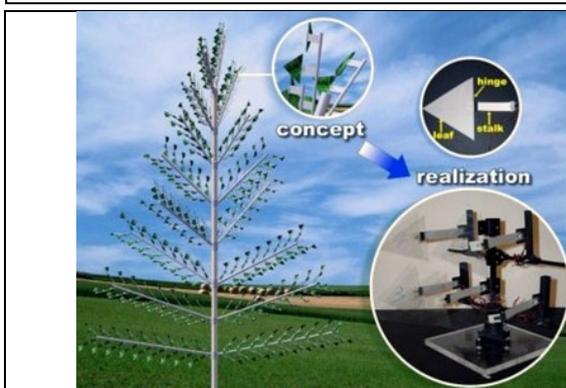


Fig. 3-3-12 Piezo-tree (source : energyharvestingjournal.com).

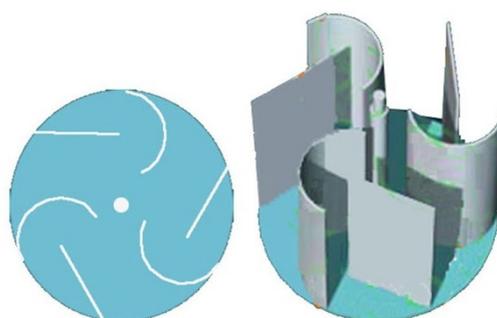


Fig. 3-3-13 Eolienne Sénégal (source : [Mo 2011](#)).

⁵¹ <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/flapping-leaf-generator-for-wind-energy-harvesting-00001791.asp>

Nugyen vinh et Houmair ont inventé un type de VAWT Sénégal, modifié sur la base de type Savonius mais utilisé moins de matériau pour arriver à une même capacité de puissance (Fig. 3-3-13) (Mo 2011, pp. 23). En outre, pour profiter des vents causés par l'effet de coin, l'éolienne Crossflex a été inventée. Elle est du type Darrieus mais elle possède une grande adaptabilité aux bâtiments et un grand espoir d'augmenter le rendement grâce aux plaques courbes aérodynamiques qui sont ajoutées (Fig. 3-3-14) (Sharpe et al. 2010).



Fig. 3-3-14 L'éolienne Crossflex (source : Sharp et al. 2010).

3.3.4 Lignes directrices pour mettre en oeuvre l'éolienne urbaine

Compte tenu des nombreux problèmes et des contraintes auxquels les éoliennes urbaines font face, des conseils et des lignes directrices sont résumés dans la littérature.

3.3.4.1 Résumé de la littérature

Les documents concernant au développement de l'énergie éolienne en milieu urbain sont synthétisés ci-dessous.

Tout d'abord, sur ce sujet il y a eu plusieurs projets européens importants, lorsqu'en Europe la ressource éolienne est riche et la conscience de développement durable est forte. En 1998, le projet européen « *Wind Energy for the Built environment* » (WEB, *Energie éolienne pour l'environnement bâti*), a proposé les premières études sur l'intégration de petites éoliennes en milieu urbain et a développé un prototype de technologie Systèmes de Conversion d'Énergie Éolienne Urbaine (UWECS) (Campbell 2001, Stankovic 2009). Ce projet n'a duré que deux ans mais la motivation de la recherche sur l'énergie éolienne en ville continue. En 2003-2004, le projet « *The Feasibility of Building Mounted / Integrated Wind Turbines* » (BUWTs, *Faisabilité d'éoliennes sur le toit / intégrées à un bâtiment*) a démarré en Angleterre. Des investigations et des analyses sur la technologie d'éoliennes intégrées aux bâtiments sont faites dans le but de réduire le CO₂ en ville (Dutton et al. 2005). Ensuite, en 2005-2007 un autre projet européen « *Wind Energy Integration in the Urban Environment* » (WINEUR, *Intégration de l'énergie éolienne en milieu urbain*) a été mis en œuvre pour enquêter sur l'installation de petites éoliennes et pour analyser la faisabilité, la technologie, les contraintes administratives et juridiques de l'éolienne urbaine dans trois pays d'Europe (Angleterre, France et Pays-Bas). Ce projet a également publié un catalogue de fabricants d'éoliennes urbaines en Europe, où on peut trouver les informations techniques détaillées d'une cinquantaine d'éoliennes installées en milieu urbain (IT Power 2005, WINEUR 2005, 2006, 2007, Cace et al. 2007). De plus, l'Agence Régionale de l'environnement et des Nouvelles Énergies (ARENE) en Ile-de-France a fait en 2004 des études générales sur les contraintes techniques, économiques et réglementaires importantes d'éoliennes installées en milieu urbain. Le principal intérêt réside sur l'implantation d'éoliennes sur des bâtiments collectifs d'une hauteur importante et d'éoliennes indépendantes dans un contexte urbain en examinant une soixantaine d'éoliennes (Grignoux et al. 2006).

Outre les documents liés au domaine CFD qui sont déjà cités et discutés dans le chapitre précédent, il y a plusieurs thèses et mémoires qui travaillent sur l'énergie éolienne urbaine. Z.Peker

(2005) a fait sa thèse sur l'intégration de l'énergie renouvelable (notamment l'énergie éolienne et l'énergie géo-thermale) avec aménagement urbain en Europe et en Turquie. Le principal intérêt réside sur la planification, la législation et l'impact de l'environnement de l'énergie renouvelable. P.D.Izaguirre (2008) a présenté une méthode pour trouver les données de base d'entrée pour la simulation CFD, afin d'installer une éolienne HAWT sur le toit de bâtiments dans la ville de Gävle. K.Ferrigno (2010) a donné un point de vue plus général sur l'état du développement de l'énergie éolienne en ville et surtout sur la recherche de stratégies économiques pour l'installation des éoliennes. J.Turesson (2011) a fait des évaluations de l'énergie renouvelable, principalement l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie biogaz, de trois villes en Europe (Grenoble, Delft and Växjö) en 2020, La méthode d'évaluation qu'il a utilisé est simple mais pas tout à fait adaptée à la réalité, car il a prévu des données des grandes HAWTs plus de 100 m en haut qui s'adaptent rarement au contexte urbain. W.K.Yu (2011) a considéré la situation et le développement de l'énergie éolienne de la ville de Hong Kong. S. Shi (2011) a analysé l'utilisation et la technologie de stockage de l'énergie éolienne autour de grandes tours en ville. H.S.Zeng (2011) a fait des études sur l'énergie éolienne et photovoltaïque avec des indicateurs de morphologie urbaine dans quatre quartiers de la ville de Jinan (Chine) et a proposé des conseils pratiques pour le développement d'énergie renouvelable dans le cadre de l'urbanisme. Dans des cas plus techniques, D.M.Whaley (2009) dans sa thèse se concentre sur le redresseur de générateur de faible coût d'une petite éolienne.

Parallèlement, les livres publiés dans ce domaine sont nombreux. Le livre « *Windmill Power for City People* » (*Energie de l'éolienne pour le citoyen*) (Energy Task Force, 1977) donne un point de vue historique sur le premier système de l'énergie éolienne en ville. Le livre « *Urban Wind Energy* » (*Energie éolienne urbaine*) (Stankovic et al. 2009) donne une description générale de plusieurs aspects sur l'implantation d'éoliennes urbaines. Un autre livre avec le même nom publié par Moreno (2011) donne un exemple détaillé de la ville de Gävle (Sweden) et fait l'expérience en soufflerie avec le modèle de Läkerol Arena pour l'installation de deux petites éoliennes sur le toit. En outre, le rapport de BRE Trust « *Micro-wind Turbines in Urban Environments : An assessment (FB17)* » (*Micro--éoliennes en milieu urbain : Une évaluation FB17*) (Phillips et al. 2007) publie des travaux sur l'évaluation du potentiel éolien dans trois villes typiques anglaises. Les impacts des éoliennes installées en ville sur l'environnement tels que l'économie d'émission de CO₂ a aussi été analysé. Un autre rapport nommé « *Siting micro-wind turbines on house roofs (FB18)* » (*Implantation d'éoliennes urbaines sur le toit*) (Blackmore 2008) s'est concentré sur des essais en soufflerie et a proposé un outil simple pour optimiser l'implantation d'une éolienne sur toit.

Les articles sur ce sujet sont aussi nombreux. Kalmikov et al. (2010) a évalué le potentiel éolien à 20 m en haut dans le campus du Massachusetts Institute of Technology en analysant les données de mesures sur site et la simulation CFD. La méthode d'assimilation entre les données locales de mesures et les résultats de simulation CFD est intéressante. Zhao et al. (2011) ont donné des présentations générales sur l'intégration éolienne à une architecture. Balduzzi et al. (2012_b) a étudié le flux à un angle oblique d'incidence dans l'environnement bâti et conçu un nouveau type de H-rotor Darrieus sur le toit bien adaptée à ce phénomène. De plus, beaucoup d'articles concernent l'évaluation du potentiel éolien et le rendement énergétique. McIntyre et al. (2011) ont fait une recherche sur les éoliennes dans les quartiers de la ville de Guelph. Oh et al. (2012) ont fait une recherche sur une ferme éolienne côtière en Corée du sud-ouest. Plus souvent, les documents portent sur la recherche de petites éoliennes sur le toit. Ayhan et al. (2012) ont donné une description simple sur l'application de petite éolienne sur le toit en ville et des affaires concernées. Abohela et al. (2013) ont analysé les impacts de différentes formes de toiture et de différentes hauteurs de bâtiment sur la production énergétique éolienne.

3.3.4.2 Lignes directrices sur la technique de l'éolienne urbaine

1) Comparaison d'éoliennes

- Comparée à l'HAWT, la VAWT est plus adaptée aux endroits où les vents sont faibles et turbulents, sensible de nuisance sonore, aux endroits sensibles à l'impact esthétique et aux coins de mur extérieur de bâtiment (Axenne 2007, Stankovic 2009).
- Comparée à la VAWT, l'HAWT est plus efficace aux lieux où les vents sont plutôt stables. Elle est également moins coûteuse et possède une technologie plus développée dans le monde (Axenne 2007, Stankovic 2009).
- Comparée à la VAWT de type Savonius, le type Darrieus est plus efficace pour un vent stable. Pourtant, il arrive souvent qu'elle ne peut pas se démarrer toute seule et pose aussi un problème de contrôle en cas d'orage. Pour le problème d'auto-démarrage, un hybride de ces deux types d'éoliennes est proposé (Mertens 2006, Axenne 2007, Stankovic 2009).
- Comparée à la VAWT de type Darrieus, le type Savonius est plus silencieux, plus discret, plus robuste (pas besoin de protection dans un vent fort), et présente moins d'entretien et moins de risque de dommage (e.g., casse de pale ou blessure des oiseaux) (Stankovic 2009).
- Une VAWT de type H-rotor peut avoir un coefficient de puissance plus élevé qu'une éolienne de type Darrieus classique. Pourtant, la performance de type H-rotor avec une longueur constante de corde s'effondre dramatiquement si elle ne fonctionne pas à sa *TSR* optimale. alors que l'éolienne du rotor de Darrieus avec une corde constante est moins sensible au changement de *TSR* (Beller 2011).

2) Aide à la conception d'éoliennes urbaines

- La conception appropriée d'éoliennes (e.g., la conception de lame, l'influence du nombre de Reynolds, la sécurité, la minimisation des besoins d'entretien, etc.) est nécessaire (Dutton et al. 2005).
- Les modèles d'une solidité élevée sont efficaces pour arriver à une *TSR* faible alors qu'ils ne fonctionnent que pour une gamme étroite de *TSR*. Pourtant, pour auto-démarrer une éolienne avec un vent faible, il vaut mieux une conception de solidité faible (Beller 2011, Mohamed 2013).
- L'efficacité d'une petite éolienne est souvent plus faible que celle d'une grande éolienne à cause de son nombre de Reynolds faible sur les sections de pales. L'augmentation du nombre de Reynolds lorsqu'il est faible va augmenter l'efficacité du rotor dramatiquement et la gamme de variation de *TSR* adaptée va élargir (Beller 2011).
- La courbe de puissance de l'éolienne doit correspondre au vent local (e.g., le profil, la rose des vents, etc.) (Axenne 2007).
- Les éoliennes à proximité des bâtiments sont limitées en taille, environ 10 à 20 % de la taille du bâtiment caractéristique, en raison de ses performances et de son efficacité (Mertens 2006). La plupart du temps, une éolienne avec une taille moins de 10 % du bâtiment conduit à une efficacité maximale (Jha 2011⁵², Zeng 2011).
- Une éolienne carenée est proposée en raison de la concentration du vent afin de diminuer la turbulence, d'isoler du bruit et de protéger les oiseaux (Dutton et al. 2005, Grant 2008).
- L'effet de serre ou le concept de cheminée solaire peut être utilisé pour augmenter le rendement et pour améliorer la ventilation du bâtiment (Dutton et al. 2005, Wang et al. 2014).

⁵² Jha, A. R. Wind turbine technology. Boca Raton, FL, CRC Press. 2011.

3.3.4.3 Lignes directrices sur le projet de l'éolienne urbaine

1) Aide à l'implantation

- Des sites qui ont une rugosité faible sont proposés pour installer une éolienne : zones industrielles, sites à proximité de travaux d'infrastructure (pont, digue), fleuve ou rivière, montagnes, etc. (Mertens 2006, Beller 2011).
- Les simulations CFD avec différentes formes et configurations de toits et de bâtiments sont proposées pour trouver une meilleure implantation de l'éolienne (Dutton *et al.* 2005).
- L'évaluation du potentiel de site en milieu urbain est difficile lorsque la direction et la vitesse du vent varient souvent (Axenne 2007, Walker 2011).
- La distribution du vent local au lieu de la vitesse moyenne du vent doit être utilisée pour évaluer le potentiel. (Pallabazzer 1995, Pallabazzer 2003, Axenne 2007).
- Il faut prendre considération l'influence significative de la rose des vents locale et l'orientation du bâtiment (Axenne 2007). Pour un environnement où les vents sont multidirectionnels, l'espace entre deux éoliennes, notamment pour les HAWTs, doit être suffisamment large (5 à 7 diamètres du rotor dans la direction perpendiculaire du vent et de 7 à 8 diamètres du rotor dans la direction du vent) (Zeng 2011).
- Le bâtiment sur lequel l'éolienne sera installée doit avoir une hauteur minimale de 20 m et 50 % de plus que la hauteur moyenne des bâtiments alentour. Une façade pentée au vent est favorable pour concentrer le vent (Axenne 2007).
- L'HAWT placée au milieu du toit doit avoir un mât d'une hauteur de 30 à 60 % de la hauteur du bâtiment pour éviter l'influence négative de la turbulence (Axenne 2007).

2) Prise en compte des aspects socio-économiques

- Pour le problème du bruit, des solutions pratiques sont proposées : améliorer la conception des pales et du système mécanique, choisir des lieux moins exigés, augmenter la séparation entre l'éolienne et les habitations, poser des obstacles comme les murs anti-bruit entre eux et utiliser une carénage, etc. (ADEME 2004, WINEUR 2005, Dutton *et al.* 2005).
- Pour le problème de l'effet stroboscopique, les influences suivantes doivent être évaluées : la position du soleil, le temps ensoleillé, la façade concernée, l'orientation du rotor et son angle relatif, la présence de vent, les masques et le matériau constituant la pale (Grignoux *et al.* 2006).
- Pour le problème de coût élevé, nous avons des solutions suivantes : développement de la technologie, économie sur l'installation, ingénierie et entretien, approvisionnement de la production pour choisir une technologie adaptée, etc. (Dutton *et al.* 2005, Grignoux *et al.* 2006).
- Dans un but d'économie, le choix d'un site avec une vitesse du vent élevée est plus important que l'amélioration de l'efficacité de l'éolienne (Ferrigno 2010).
- Une éolienne doit avoir plusieurs tailles pour adapter aux différents lieux et être modularisée pour être plus économique (Sharpe *et al.* 2010).
- Il faut respecter l'aspect esthétique d'éolienne lorsqu'elle est intégrée à une architecture, surtout à une architecture existante (Dutton *et al.* 2005, Sharpe *et al.* 2010).
- Le raccordement aux réseaux et au panneaux photovoltaïques sont proposés pour répondre aux exigences de qualité de l'électricité (Dutton *et al.* 2005).
- Un objectif de référence d'une éolienne urbaine est 200 à 400 kW/m²/an (Axenne 2007).
- Les installations auxiliaires (sécurité d'ancrage, isolation de vibration) sont importants pour les considérations d'esthétique, de vibration et de sécurité lorsqu'on pose une éolienne sur un bâtiment existant (Dutton *et al.* 2005).
- La fiabilité au long de la durée de vie opérationnelle du système de l'éolienne doit être considérée avec l'entretien et la mise à jour facile (Dutton *et al.* 2005).

3.4 Conclusion

L'application de l'énergie éolienne a une longue histoire. Dans la dernière vingtaine d'années, l'énergie éolienne a connu un développement très important dans le monde entier. Des essais sont faits sur l'application de petites éoliennes qui sont installées en milieu bâti. Les éoliennes urbaines possèdent des avantages pour la ville durable. Pourtant, jusqu'à nos jours, le marché de l'éolienne urbaine est au début de son développement. Les problèmes et les challenges que nous confrontons sont nombreux.

Dans ce chapitre, trois sections ont été abordées : l'énergie éolienne, l'éolienne urbaine et les lignes directrices pour le développement de l'énergie éolienne pour la ville du futur.

Tout d'abord, une brève introduction sur le développement de l'énergie éolienne et de ses caractéristiques est donnée. Dans les dernières dizaine d'année, la puissance éolienne cumulée dans le monde a connue une croissance moyenne de 24 % chaque année. Pour l'énergie des petites éoliennes, la croissance a été surtout observée en Chine et aux États-Unis alors que les autres pays sont encore au début du développement de cette technologie. Sur le choix des moyens de développement et d'application de l'énergie éolienne, on remarque que la méthode de production centralisée est favorable pour les grandes agglomérations compactes alors que la méthode de production décentralisée est plutôt favorable pour les petites villes ou pour les villes dispersées. Comparé au système photovoltaïque et au système biogaz, le système de l'énergie éolienne montre les avantages suivants : 1) une technologie simple, 2) un coût compétitif sur un terrain venté et 3) un marché de plus en plus développé. De même, l'éolienne à petite ou moyenne échelles est préférée pour la ville.

Ensuite, sur l'introduction de l'éolienne urbaine, nous présentons sa définition, ses composantes et les différents classements (notamment HAWT et VAWT). Une liste détaillée des différentes types d'éoliennes (plutôt des petites et micro-éoliennes) avec leur description caractéristique et l'évaluation provisoire sur leur adaptabilité en milieu urbain est donnée. Ensuite, des exemples d'éoliennes urbaines installées, tels des éoliennes indépendantes, des éoliennes installées sur ou autour d'une architecture et des éoliennes intégrées à une architecture, sont présentés. En outre, les problèmes techniques et socio-économiques de l'éolienne urbaine sont discutés. On remarque que la technologie est moins développée et son efficacité de rendement est moins intéressante, comparé à celles de grandes éoliennes classiques. Aucune norme ni standard ont été établis pour assurer la qualité technique de l'éolienne urbaine. L'avis du public sur l'éolienne urbaine est positif mais l'application réelle est limitée aux fonctions éducatives ou à la présentation d'une image associée à l'écologie. Les coûts d'investissement sont trop élevés. Les évaluations cas par cas rendent les procédures très longues et découragent les propriétaires. L'urbanisme, la loi de nuisance sonore et la difficulté de se raccorder au réseau sont des grandes obstacles pour installer une éolienne urbaine. Des éoliennes en mauvaise performance sont souvent placées à des endroits trop bas où les vents sont faibles et turbulents.

Enfin, pour évaluer l'énergie éolienne et la performance d'une éolienne, des termes techniques, la distribution du vent et la courbe caractéristique de puissance d'éolienne sont expliqués. Des indicateurs d'évaluation de l'énergie éolienne sont également discutés et initialement choisi pour la thèse. Des propositions d'implantation, des nouvelles technologies d'éoliennes adaptées en milieu urbain et des conceptions architecturales innovantes avec des éoliennes intégrées sont présentées. Suite à un résumé de littérature autour ce sujet, des lignes directrices pour développer l'énergie éolienne urbaine à l'avenir sont proposés.

Partie II : Simulation et analyse

Cette partie concerne les essais de simulation CFD et l'analyse des résultats.

Avant les simulations numériques, la validation par les études des paramètres du code CFD est effectuée. Des méthodes de vérification sont également présentées ([Chapitre 4](#)).

Des différents modèles simplifiés sont étudiés. Différentes formes et configurations d'un, deux et trois bâtiments sont analysés sur le potentiel éolien autour de bâtiments, notamment au-dessus du toit ([Chapitre 5](#)). En suite, des modèles de quartier réel sont considérés et comparés. Les impacts de la morphologie urbaine sur le potentiel éolien sont ainsi évalués ([Chapitre 6](#)). Enfin, l'implantation des éoliennes et l'évaluation du potentiel éolien sont appliqués sur un quartier réel avec des conditions réelles ([Chapitre 7](#)).

4. Méthode de validation et vérification

Dans ce chapitre nous présentons la méthode de validation et la vérification de notre simulations CFD. Pour la partie validation, nous avons utilisé un modèle de référence d'expérimentation en soufflerie sur l'étude d'écoulement autour d'un bâtiment. De nombreux essais de simulations ont été comparés aux données de sortie de cette expérimentation. Différents valeurs des paramètres du code CFD sont ainsi étudiées et les meilleurs ont été choisies pour les simulations futures. Pour la partie du vérification, les approches comme l'étude de la cohérence du flux, de la sensibilité à la taille du domaine et du maillage sont présentées ici avec des exemples.

4.1 Validation du modèle paramétrique retenu

Pour la simulation CFD, il est très important de caler raisonnablement les paramètres d'entrée pour obtenir un résultat acceptable. En cas d'absence de mesures in situ ou d'expérimentations en soufflerie, nous faisons en premier lieu une validation des paramètres du code ANSYS que nous allons utiliser dans les simulations suivantes. Une expérimentation en soufflerie validée et publiée par *Architectural Institute of Japan (Yoshie et al. 2007)* est utilisée pour nous guider sur les études des paramètres. Le modèle du test est un bâtiment de 5 m * 20 m * 20 m (largeur * longueur * hauteur) à l'échelle de 1 : 100 dans la soufflerie. Il y a 109 points de mesure disposés sur la coupe verticale à la ligne centrale.

57 essais de simulation avec des paramètres du code sont effectués. Un processus d'établir les valeurs des paramètres CFD est donné dans l'[Annexe 4.1](#). Avec la meilleure installation des paramètres, une belle conformité sur la distribution des vitesses du vent entre la simulation CFD et l'expérimentation est trouvée. En fait, l'erreur absolue moyenne de la grandeur d'une vitesse moyenne de référence de 3,05 m/s (variant entre 0,10 m/s et 6,48 m/s) est de 0,37 m/s (variant entre 0,02 m/s et 1,39 m/s), soit 12 % en moyenne de l'erreur relative. Des grands écarts sont apparus plutôt sur les zones à proximité du sol et dans la turbulence à l'arrière du bâtiment ([Wang et al. 2015](#), voir l'article suivant cette page).

Il existe une grande incertitude sur la pertinence de choix de valeur des paramètres de code CFD et un risque important de validation d'un seul cas en raison de la faible portée quand à l'application dans des conditions réelles. Ainsi les méthodes de simulation CFD sont problématiques, e.g. sur le choix du modèle de turbulence. Nous déclarons donc que les choix de valeurs des paramètres ne sont adaptés que pour notre cas particulier. Nous proposons ces meilleurs choix de valeurs pour nos futures simulations similaires, mais pour les modèles avec des grandes modifications de la taille géométrique, il faut faire des vérifications avant et après la simulation.

4.2 Vérification des simulations CFD

Par le cas de validation présenté ci-dessus avec la référence à l'expérience en soufflerie, la majorité de paramètres de code ANSYS Fluent peuvent être conservés pour les futurs simulations. Pourtant, il y a toujours des paramètres qui doivent être modifiés en raison du changement de modèle: e.g. sur la forme, dimension, configuration, condition initiale, etc. Donc, pour assurer la pertinence de changement de paramètre de code, des évaluations et analyses supplémentaires doivent être considérées.

Quatre méthodes sont appliquées pour la vérification de la simulation : la cohérence du flux au champ de simulation, la sensibilité de taille du domaine, la sensibilité du maillage et l'évitement des erreurs fortuites (détails voir l'[Annexe 4.2](#)).

5. Simulation de modèles simplifiés de bâtiments

Dans le cas d'un écoulement complexe du vent dans un environnement bâti, la simulation de modèles simplifiés est utilisée en premier lieu pour découvrir la relation entre le potentiel éolien et la configuration des bâtiments. Dans ce chapitre, l'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés est simulé et discuté. Pour évaluer l'énergie éolienne à l'échelle du bâtiment des indicateurs sont définis et évalués. La précision, la praticabilité et le champ d'application des indicateurs sont ainsi abordés. Ensuite, avec les indicateurs proposés, différentes formes de bâtiments isolés (plan, taille, toiture, avec cour, etc.) sont analysées pour donner des premières évaluations des performances énergétique éolienne de formes et géométries génériques. Ensuite, différentes configurations à deux bâtiments et à trois bâtiments sont étudiées (séparation, angle de coin, etc.).

Les résultats de simulations de ces modèles simplifiés permettent de comparer le potentiel éolien à partir de différentes formes simples dans des conditions simplifiées. Ils permettent aussi de faciliter la simulation du potentiel éolien pour les bâtiments particuliers, et constituent de ce fait, une référence d'analyse pour les simulations locales à l'échelle de quartier.

5.1 Indicateurs du potentiel éolien à l'échelle de bâtiment

5.1.1 Définitions des indicateurs

Suivant la définition de puissance d'énergie éolienne (*Equation 3-1*) qui est en fonction du cube de la vitesse du vent, un indicateur simplifié pour évaluer le potentiel éolien dans une surface choisie⁵³, dite le potentiel éolien total de surface, peut être défini :

$$M = \sum_{i=1}^n (A_i * u_i^3) \quad (\text{Equation 5-1})$$

où A_i est la surface de la zone dont la vitesse moyenne est u_i . Dans le cas de simulation d'écoulement autour d'une couple de bâtiments (*Fig. 5-1-1a*), on peut exporter à partir du code FLUENT des images des contours de vitesse sur des plans au-dessus du toit, et trouver les surfaces de chaque zone correspondant à différentes classes de vitesse (avec des codes couleur différentes) en utilisant le logiciel AutoCAD (*Fig. 5-1-1b*). En tenant compte de la faisabilité et du potentiel éolien d'un environnement urbain, l'espace au-dessus des toits des bâtiments est souvent considéré comme l'un des endroits les plus pratiques et les plus productifs en termes d'énergie éolienne en raison de sa altitude et de l'effet de concentration du vent. Dans notre cas, nous évaluons les performances à plusieurs altitudes sur les toits des bâtiments comme le montre la *Fig. 5-1-1c*.

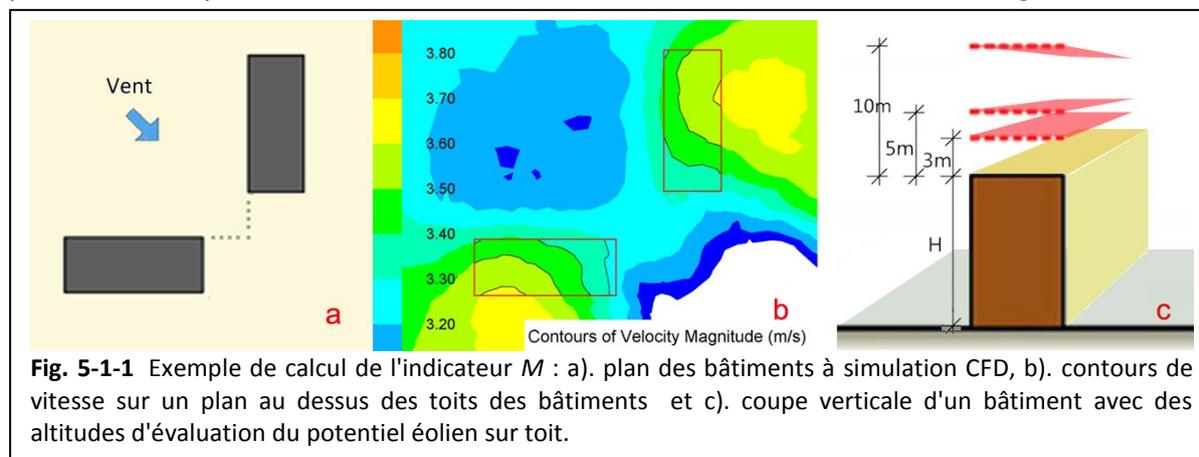


Fig. 5-1-1 Exemple de calcul de l'indicateur M : a). plan des bâtiments à simulation CFD, b). contours de vitesse sur un plan au dessus des toits des bâtiments et c). coupe verticale d'un bâtiment avec des altitudes d'évaluation du potentiel éolien sur toit.

⁵³ En fait, il faut mieux d'évaluer l'énergie éolienne dans un espace de 3D. Cependant, la quantification d'un espace en 3D avec le vent de différentes gammes de vitesse est difficile en raison de leur volume non-géométrique. Pour simplifier le cas, plusieurs coupes sont évaluées pour rendre un regard global en 3D.

En outre, pour comparer le potentiel éolien sur des surfaces différentes, un indicateur comme la densité d'énergie éolienne par unité de surface est défini :

$$D_e = \frac{M}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i * u_i^3)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{Equation 5 - 2})$$

De même, pour analyser l'impact de bâtiment sur la performance du vent (e.g. l'effet de concentration), le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent C_v peut être utilisé (Equation 3-6). Pourtant, pour une surface avec des vents à différentes vitesses, un coefficient moyen de C_v ne peut pas être utilisé pour évaluer l'énergie éolienne en raison de la relation entre la puissance d'éolienne et le cube de la vitesse du vent. On définit donc l'indicateur, appelé coefficient d'augmentation d'énergie éolienne, comme le rapport entre la puissance énergétique éolienne d'un espace bâti et celle du vent libre à la même hauteur et sur une même surface :

$$F = \frac{M}{A * (U_0)^3} \quad (\text{Equation 5 - 3})$$

5.1.2 Indicateur équivalent

Parmi les indicateurs calculés directement par le code FLUENT, il y en existe un qui correspond à l'indicateur M proposé, c'est la vitesse moyenne pondérée par la surface (Area-weighted average velocity), qui est obtenue en divisant le produit de la vitesse et la surface de parcelle correspondante, par la surface totale du champ sélectionné :

$$U_{mp} = \frac{1}{A} \int u dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n u_i |A_i| \quad (\text{Equation 5 - 4})$$

où A est la surface totale de la surface étudiée, u_i et A_i sont la vitesse moyenne et la surface correspondante à la $i^{\text{ème}}$ parcelle. Donc, un indicateur équivalent de l'indicateur M peut être défini :

$$M' = U_{mp}^3 A \quad (\text{Equation 5 - 5})$$

De même, comme dans l'Equation 5-3 un indicateur équivalent de l'indicateur F peut être défini :

$$F' = \frac{M'}{A * (U_H)^3} = \left(\frac{U_{mp}}{U_0}\right)^3 \quad (\text{Equation 5 - 6})$$

Pour évaluer la différence entre M et M' , un groupe de 24 bâtiments de 12m*30 m*20 m (W*L*H) avec des positions décalées l'un à l'autre est choisi (Fig. 5-1-2) Pour chaque bâtiment, les contours de vitesse du vent à deux altitudes (Z = 5 m et 10 m) dans les plans au-dessus du toit sont considérés.

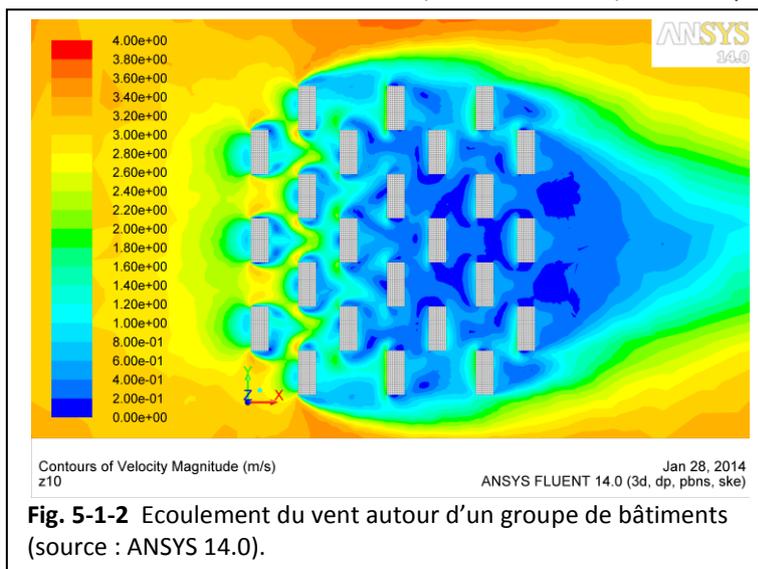


Fig. 5-1-2 Ecoulement du vent autour d'un groupe de bâtiments (source : ANSYS 14.0).

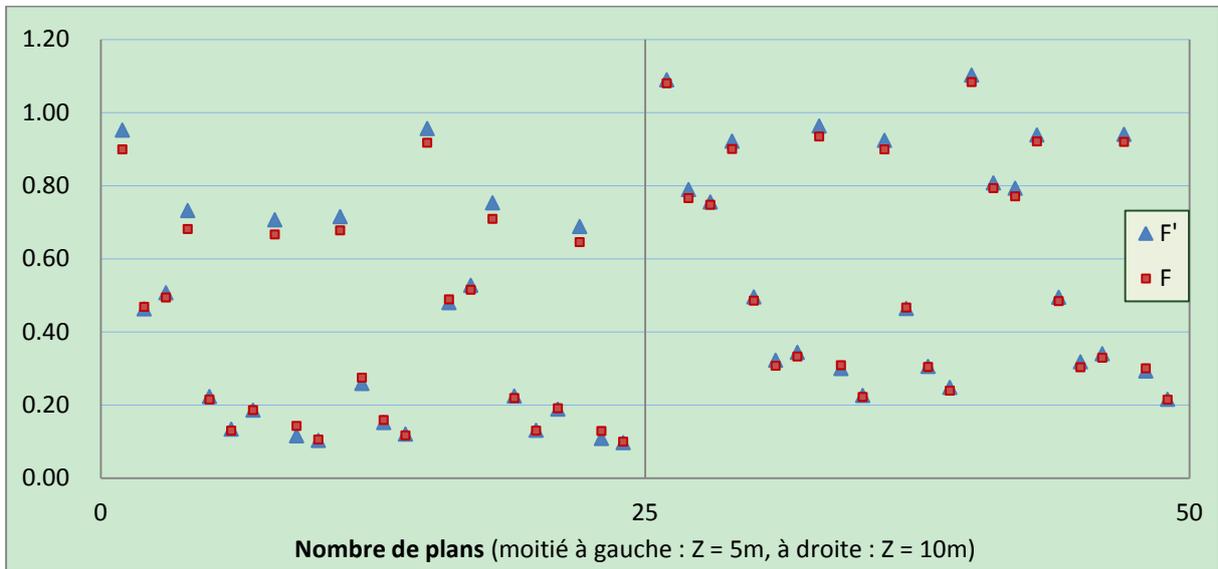


Fig. 5-1-3 Comparaison entre les deux indicateurs F et F' .

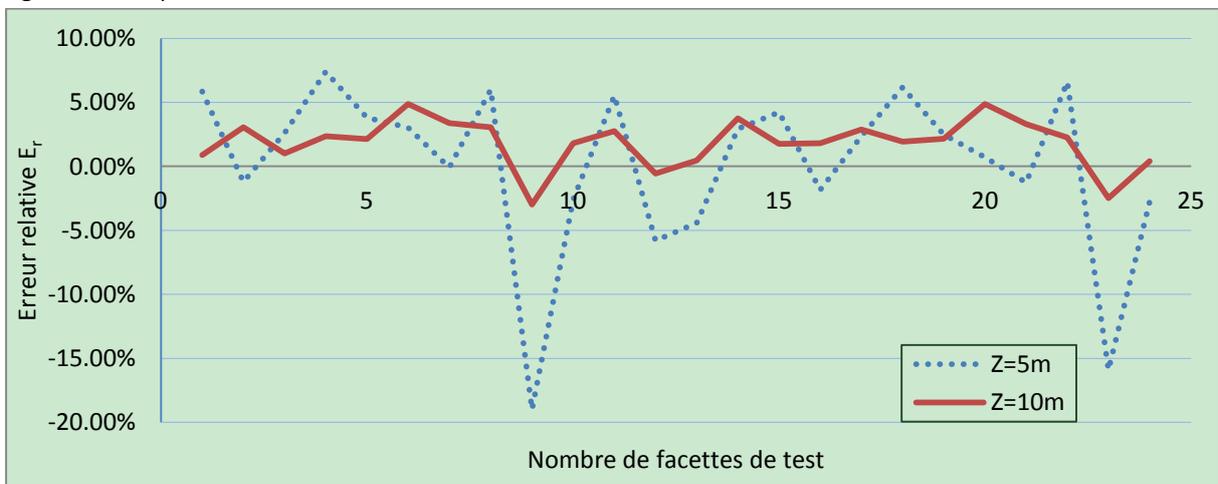


Fig. 5-1-4 Erreurs relatives entre les deux indicateurs F et F' .

Nous pouvons remarquer que les écarts entre les deux indicateurs sur les 48 plans (deux plans au-dessus du toit de chaque bâtiment) sont faibles (Fig. 5-1-3). La Fig. 5-1-4 présente les erreurs relatives entre les deux : $E_r = F'/F - 1$. Nous pouvons constater que l'erreur moyenne quadratique (6,44 %) pour tous les plans de l'altitude au-dessus du toit $Z = 5$ m est généralement plus grande que celle à $Z = 10$ m (2,66 %). En outre, la majorité de parcelles ont une valeur F' plus grande que F (comme l'erreur moyenne E_r est positive).

Donc, la vitesse moyenne pondérée (U_{mp}) que FLUENT calcule directement, peut être utilisée pour simplifier les processus de calcul de M (qui consomme beaucoup de temps en traitant les images), et être appliquée pour le premier choix des modèles.

5.1.3 Evaluation de l'indicateur

Pour évaluer les erreurs sur l'indicateur m , des essais avec différentes précisions de classes de vitesse sont comparés. La Fig. 5-1-5 montre deux groupes de différentes précisions de contours de vitesse. Le modèle A montre une comparaison entre une échelle de 0,02 m/s et de 0,1 m/s, tandis que le modèle B montre une comparaison entre une échelle de 0,05 m/s et de 0,2 m/s.

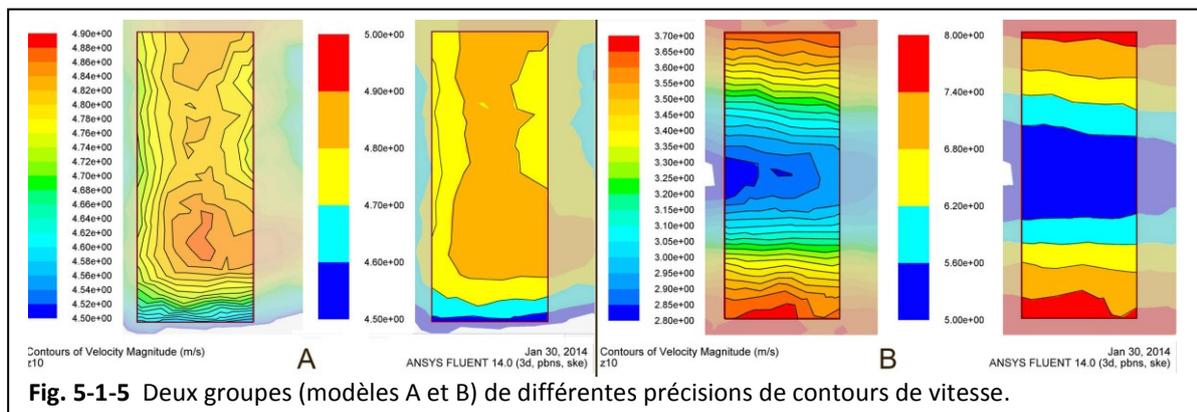


Fig. 5-1-5 Deux groupes (modèles A et B) de différentes précisions de contours de vitesse.

Tableau 5-1-1

Comparaison entre les différentes précisions de classes de vitesse

indicateur	Modèle A	Modèle B
F (classe étroite)	1,0894	0,3382
F (classe large)	1,0932	0,3390
F' (par FLUENT)	1,1077	0,3538

Par rapport aux valeurs de l'indicateur F de (Tableau 5-1-1), nous trouvons que les différences entre les différentes précisions de classes de vitesse sont très faibles (l'erreur relative pour le modèle A est de 0,35 % et pour le B est de 0,08 %), et sont beaucoup plus faibles que celles entre F et F' (2,89 % en moyenne). Donc, l'influence de l'échelle de classes de vitesse reste assez faible.

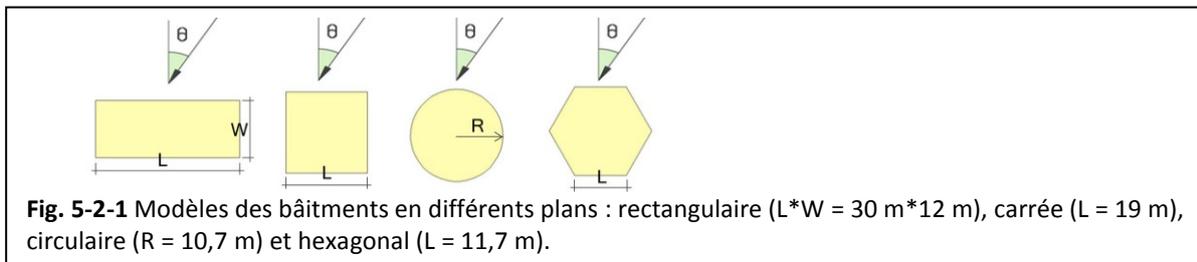
5.2 Simulation d'un bâtiment isolé

Les impacts de la morphologie urbaine sur l'écoulement du vent sont très nombreux et complexes. Les caractéristiques morphologiques d'un bâtiment isolé sont étudiées au début. Elles concernent principalement la forme géométrique en plan, la longueur et la largeur d'une barre, la forme de la toiture, la forme du coin extérieur du bâtiment, la forme de cour, les variantes de passages du vent au-dessus et en dessous du bâtiment. Des vents autour d'un bâtiment avec des variations de l'angle d'incidence de 15° sont considérés. Deux ou trois altitudes d'évaluation au-dessus du toit sont analysées pour rendre les résultats plus pertinents.

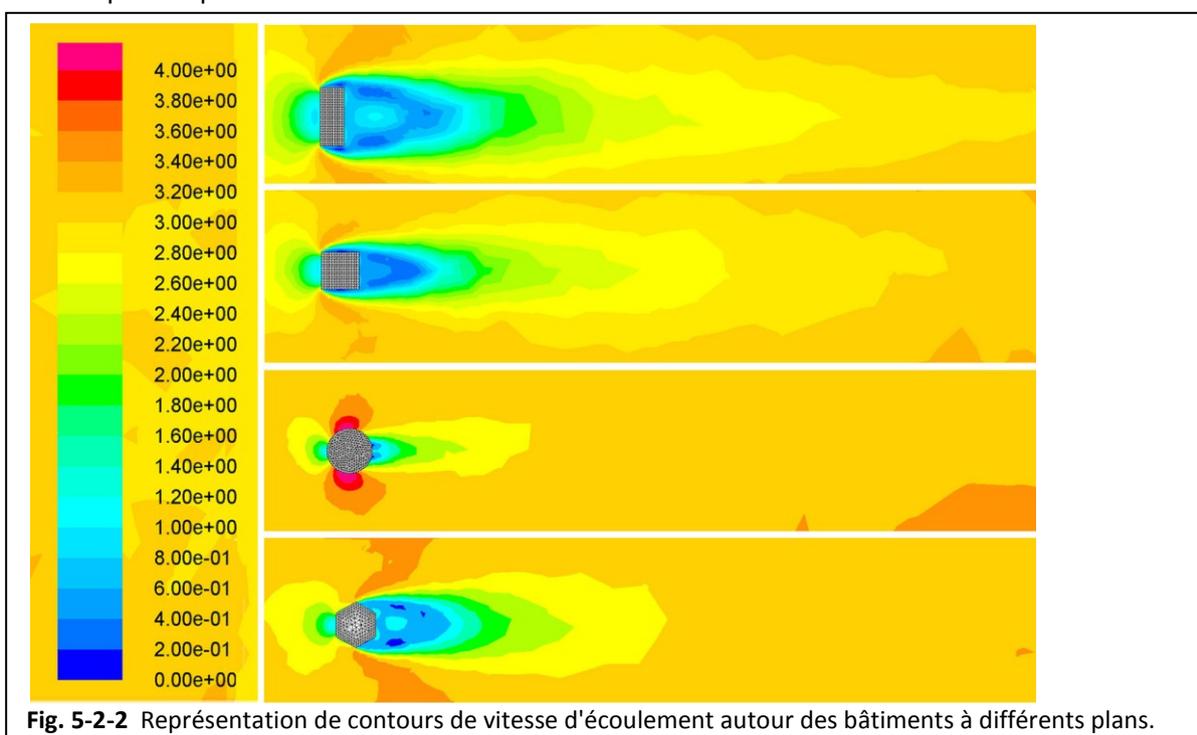
La plupart des paramètres du code CFD restent les mêmes que dans le cas de validation (voir chapitre 4-1-1) Pour la géométrie, un taux de blocage inférieur à 0,6 % est atteint. Pour le maillage, une qualité moyenne des éléments supérieure à 0,64 et un taux d'asymétrie moyenne moins de 0,25 sont atteints. Pour s'adapter à un environnement urbain plus rugueux qu'une faible ville correspondant au modèle de validation, un nouveau profil du vent d'entrée est appliqué : $U = 3 * \left(\frac{Z}{10}\right)^{0,4}$ (m/s). Pour la condition de la convergence, nous avons retenu un niveau du résidu de continuité inférieur à $1*10^{-6}$, et des niveaux de résidu sur les vitesses dans les trois dimensions inférieurs à $1*10^{-7}$.

5.2.1 Impact du plan sur le potentiel éolien

Pour évaluer l'impact de la forme en plan d'un bâtiment sur le potentiel éolien au-dessus du toit, quatre modèles de même hauteur ($H = 20$ m) et de même surface du plan ($S = 360$ m²) mais avec différentes formes de plan sont testés (Fig. 5-2-1) En raison des symétries, un seul angle de 90° avec des variations de 15° sont considérés pour l'angle d'incidence du vent.



Les valeurs des contours de vitesse en plan ($H = 10\text{ m}$) sous vent normal ($\Theta = 0^\circ$) sont données dans la Fig. 5-2-2. Nous pouvons remarquer les différences de la taille de tourbillon en amont et en aval du bâtiment, ainsi que la forme de la zone d'une vitesse importante autour du bâtiment. Pourtant, ce qui nous intéresse ici, c'est de comparer le potentiel éolien exploitable pour tous les modèles. A travers des essais de simulation, nous remarquons que les vents exploitables à proximité des murs ont une distance au mur très variée, qui donc rend la comparaison entre des modèles difficile. Par contre, l'évaluation de l'énergie éolienne au-dessus du toit sur une surface identique est facile et précise pour tous les modèles étudiés.



Les valeurs de l'indicateur M à trois altitudes au-dessus du toit ($Z = 3\text{ m}$, 5 m , 10 m) pour modèles de différentes formes de plan sont données dans la Fig. 5-2-3. Les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) La valeur du M au-dessus du toit du bâtiment à plan circulaire est supérieure à celle des autres plans lorsque $Z = 3\text{ m}$ et 5 m , mais au $Z = 10\text{ m}$ elle devenue inférieure.

2) La valeur du M au-dessus du toit du bâtiment à plan hexagonal est presque monotone par rapport au changement de l'angle d'incidence du vent. En fait, l'écart entre le meilleur (30°) et le pire des cas (0°) pour les trois altitudes d'évaluation est située entre 1,28 % et 6,55 %.

3) Les performances du modèle à plan rectangulaire et de plan carré sont très proches à une altitude d'évaluation ($Z = 3\text{ m}$). Lorsque l'altitude d'évaluation augmente à $Z = 10\text{ m}$, le modèle carré devient un peu plus intéressant (plus de 1,5 %).

4) En terme d'impact de l'angle d'incidence du vent, un angle de 30° correspond à un potentiel éolien maximal au-dessus du toit pour le plan hexagonal, tandis que pour un plan carré cet angle est de 45° et de 60° pour un plan rectangulaire.

5) Sans vent dominant, à basse altitude au-dessus du toit, la densité d'énergie potentielle des différents plans diminue dans l'ordre suivant : circulaire, hexagonal, carré puis rectangulaire. Tandis pour haute altitude l'ordre change : hexagonal, carré, rectangulaire puis circulaire.

6) Le potentiel éolien du vent libre en absence de bâtiment à une même hauteur et des mêmes conditions initiales (ligne discontinue rouge, marqué « Réf ») est sert de référence. Nous trouvons qu'à l'altitude $Z = 3$ m tous les modèles sont inférieures à la référence, alors qu'à $Z = 10$ m, la majorité sauf le plan circulaire sont supérieures à la référence.

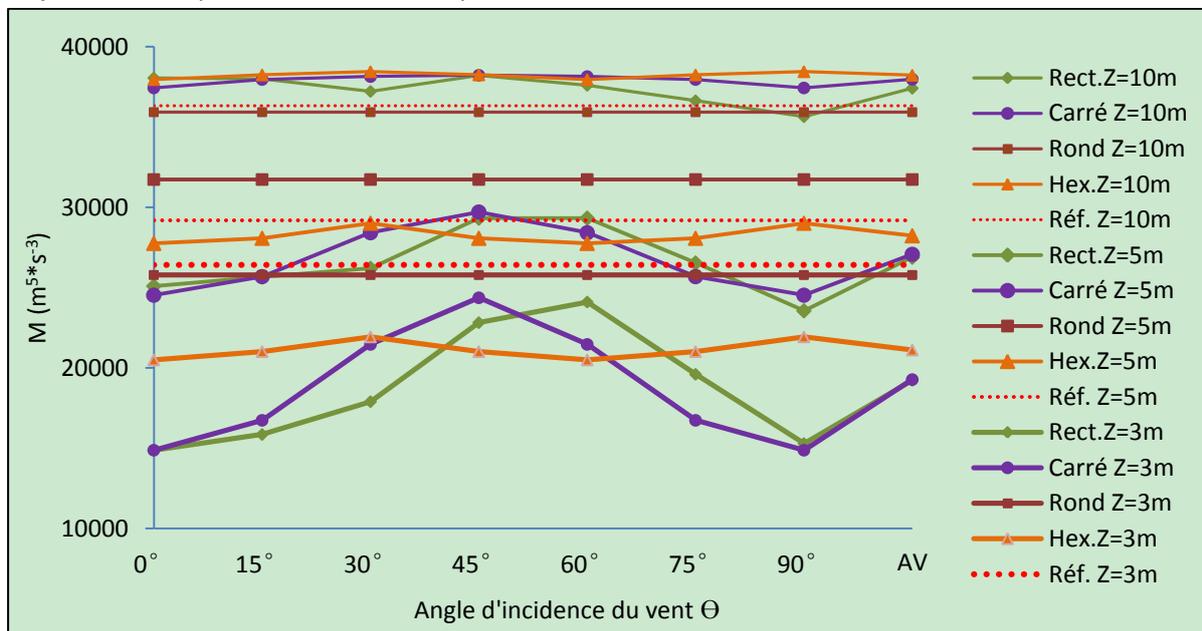


Fig. 5-2-3 Indicateur du potentiel éolien au-dessus du toit pour les bâtiments à différentes plan.

5.2.2 Impact de la longueur sur le potentiel éolien

Pour évaluer l'impact de la longueur d'un bâtiment rectangulaire sur le potentiel éolien au-dessus du toit, une barre de taille $12m \times 30m \times 20m$ ($W \times L \times H$) est choisie et trois autres barres de même hauteur ($H = 20$ m) et de même largeur ($W = 12$ m) mais avec différents longueurs ($L = 15$ m, 45 m, 60 m) sont considérées (Fig. 5-2-4) En raison de la forme symétrique à la fois horizontalement et verticalement, trois angles d'incidence du vent sont testés ($\Theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$).

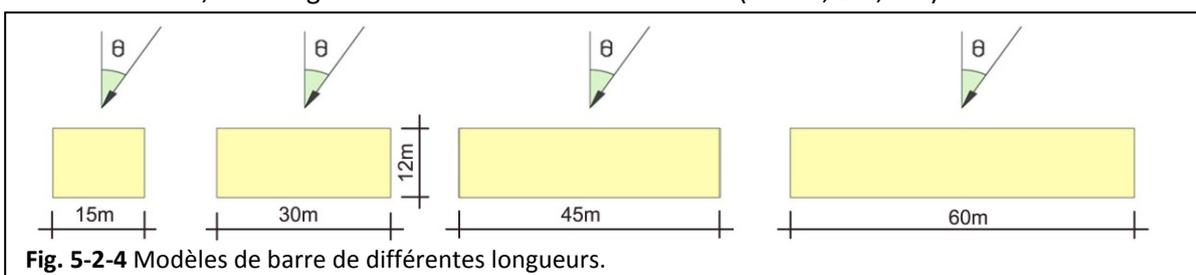


Fig. 5-2-4 Modèles de barre de différentes longueurs.

Comme la surface du plan varie entre les modèles, au lieu d'utiliser le coefficient du potentiel éolien total de surface m , nous faisons appel à l'indicateur de la densité d'énergie éolienne D_e . Les résultats à deux altitudes au-dessus du toit ($Z = 5$ m, 10 m) pour des modèles de différentes formes de longueur sont donnés dans la Fig. 5-2-5. Les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Généralement, la densité d'énergie éolienne D_e de la barre $L = 15$ m (ligne verte) est plus élevée que celle des autres modèles. Pourtant, quand l'altitude augmente (à $Z = 10$ m), la barre $L = 30$ m peut avoir une densité d'énergie éolienne plus importante (avec un angle d'incidence de 0°).

2) A une altitude faible ($Z = 5$ m), les variations entre de D_e pour différentes longueurs sont plus grandes que celles à haute altitude ($Z = 10$ m).

3) Généralement, la densité D_e décroît avec la longueur, jusqu'à $L = 45$ m. La densité du modèle $L = 45$ m et celle de $L = 60$ m sont relativement proches.

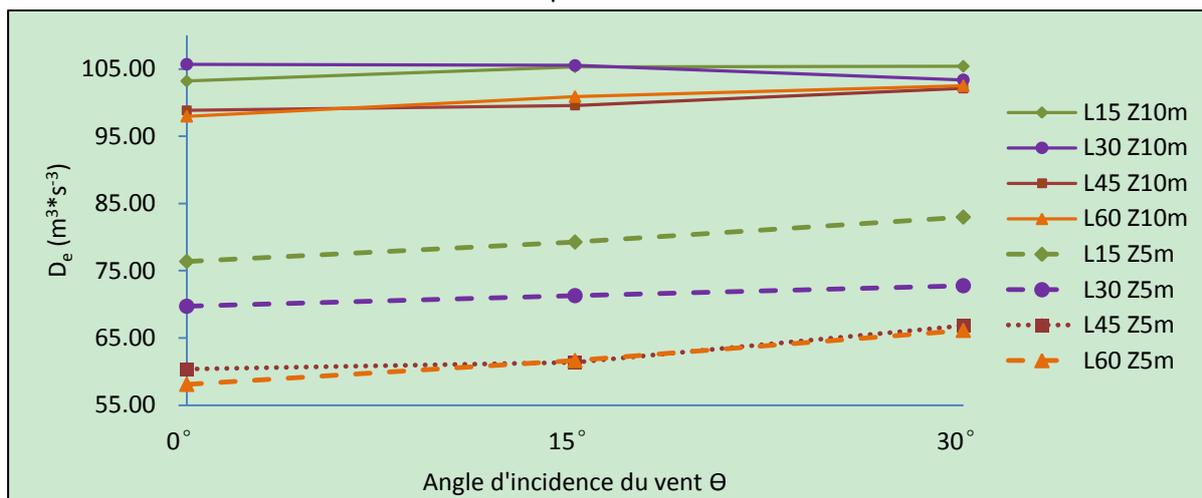


Fig. 5-2-5 Densité d'énergie éolienne au-dessus du toit d'une barre de différentes longueurs.

5.2.3 Impact de la largeur sur le potentiel éolien

Pour évaluer l'impact de la largeur sur le potentiel éolien au-dessus du toit, quatre modèles de même hauteur ($H = 20$ m) et de même longueur ($L = 30$ m) mais avec différentes largeurs ($W = 8$ m, 12 m, 16 m, 20 m) sont testés (Fig. 5-2-6).

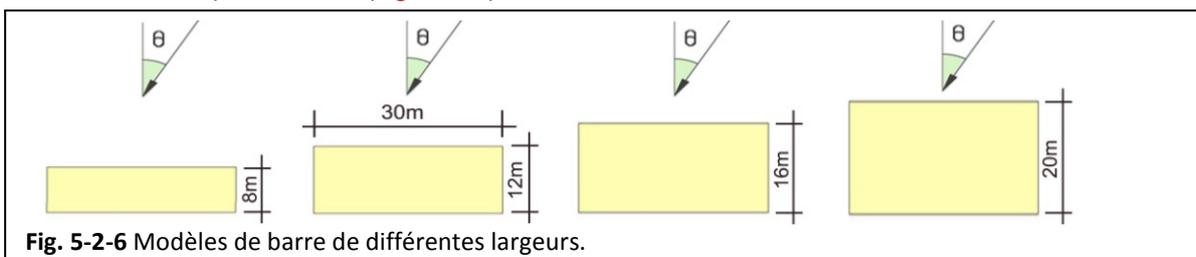


Fig. 5-2-6 Modèles de barre de différentes largeurs.

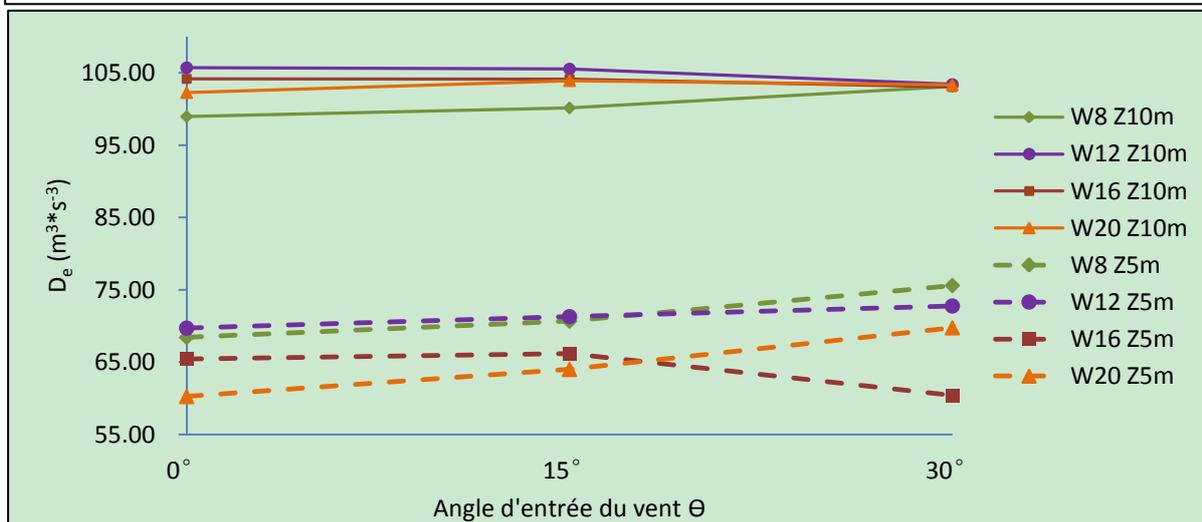


Fig. 5-2-7 Densité d'énergie éolienne au-dessus du toit pour une barre de différentes largeurs.

Comme la surface du plan varie entre les modèles, l'indicateur de la densité d'énergie éolienne D_e est utilisé. Les résultats à deux altitudes au-dessus du toit ($Z = 5$ m, 10 m) pour les modèles de différentes largeurs sont donnés dans la Fig. 5-2-7. Les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Généralement, la densité de l'énergie éolienne D_e de la barre $W = 12$ m (ligne bleue) est plus élevée que celle des autres modèles. Pourtant, quand l'altitude est faible ($Z = 5$ m), la barre $W = 8$ m peut avoir la densité d'énergie éolienne la plus élevée (avec un angle d'incidence de 30°).

2) A une altitude faible ($Z = 5$ m), les variations de D_e pour différentes largeurs sont plus grandes que celles à haute altitude ($Z = 10$ m).

3) Lorsque à différentes angles d'incidence du vent, l'ordre des performances du meilleur au pire varie entre les modèles de différentes largeurs, l'angle d'incidence du vent est très important pour évaluer l'impact de la largeur d'un bâtiment.

5.2.4 Impact de la toiture sur le potentiel éolien

Pour évaluer l'impact de la toiture sur le potentiel éolien au-dessus du toit, neuf modèles de même plan (12m*30 m) et de même hauteur moyenne ($H = 20$ m, avec le même volume de bâtiment) mais avec différentes formes de toiture (deux pans, un pan face au vent ou dos au vent) sont testés. Pour afficher le potentiel au-dessus du toit en fonction de la hauteur, en raison de la complexité d'écoulement au-dessus des toits de différentes formes, des plans à six altitudes au-dessus du toit sont proposés (rouges, en ligne discontinue, hauteur réelle $H = 23$ m, 24 m, 25 m, 26 m, 27 m, 30 m) (Fig. 5-2-8). En outre, en raison de la grande influence de la turbulence lorsque dans un vent oblique, un seul angle d'incidence du vent 0° est analysé. La coupe reste la même sur toute la longueur ($L = 30$ m).

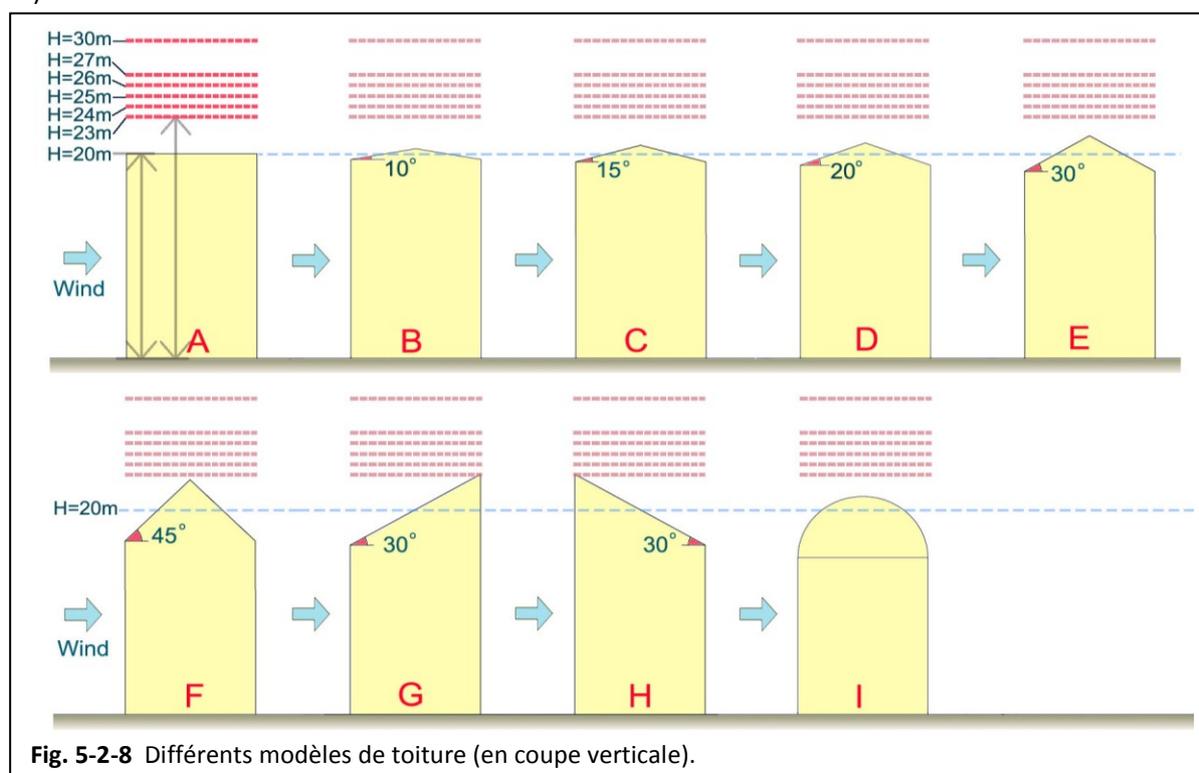


Fig. 5-2-8 Différents modèles de toiture (en coupe verticale).

En raison des temps importants pour traiter les données sur les six plans au-dessus du toit de tous les modèles, la méthode de calcul de la vitesse moyenne pondérée par la surface est appliquée. Pour éviter l'erreur liée à la transmission d'une vitesse moyenne à la puissance d'énergie éolienne (même si elle est faible, 3 - 7 %, Chapitre 5-1-2), nous appliquons directement le coefficient d'augmentation de la vitesse C_v pour évaluer la capacité de concentration du vent au-dessus du toit. Donc, les valeurs de vitesse moyenne de six parcelles sont obtenues directement depuis FLUENT et les valeurs de C_v sont calculées avec des U_{0s} correspondantes. Selon la Fig. 5-2-9a, b, les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) La toiture ronde (modèle I) a le plus grand coefficient d'augmentation de la vitesse moyenne, et la meilleure hauteur pour atteindre ce C_v maximal est $H = 25$ m.

2) Parmi les toitures à deux pans, la meilleure pour capter l'énergie éolienne est à deux pans avec une pente de 15° (modèle C), et la meilleure hauteur de capture est de $H = 27$ m. En fait, quand

l'altitude $H > 24$ m, le coefficient $C_v > 1$. C'est-à-dire qu'il faut plus de 24m pour profiter de l'effet de concentration du vent par ce bâtiment.

3) Parmi les toitures à un seul pan, la toiture face au vent (modèle G) est généralement plus favorable que celle dos au vent (modèle H). Pourtant, elle est moins favorable que la toiture à deux pans (modèle E).

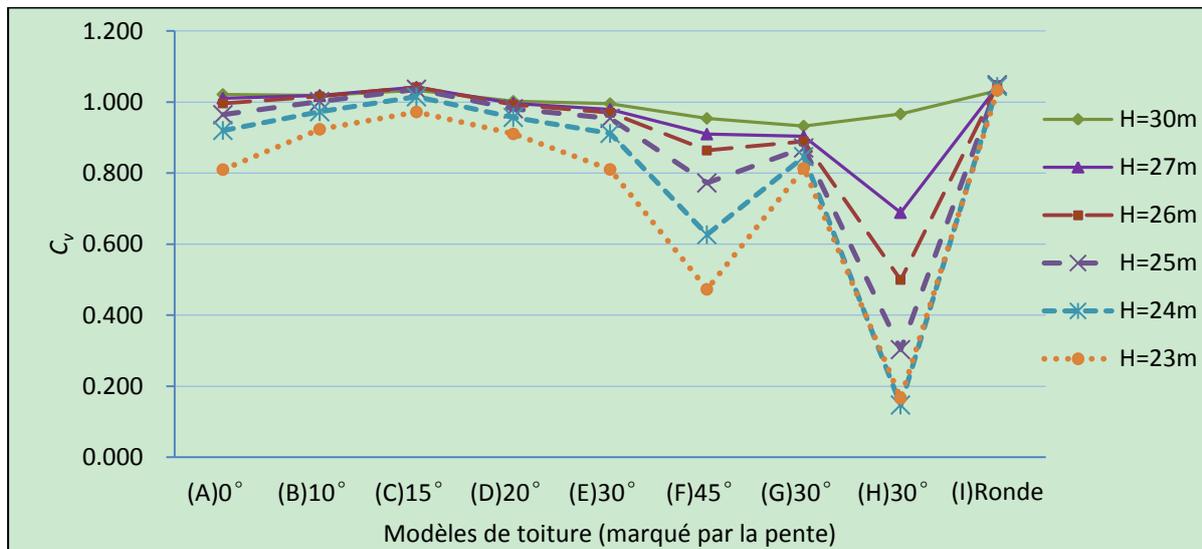


Fig. 5-2-9a Comparaison sur le coefficient C_v entre les différentes toitures.

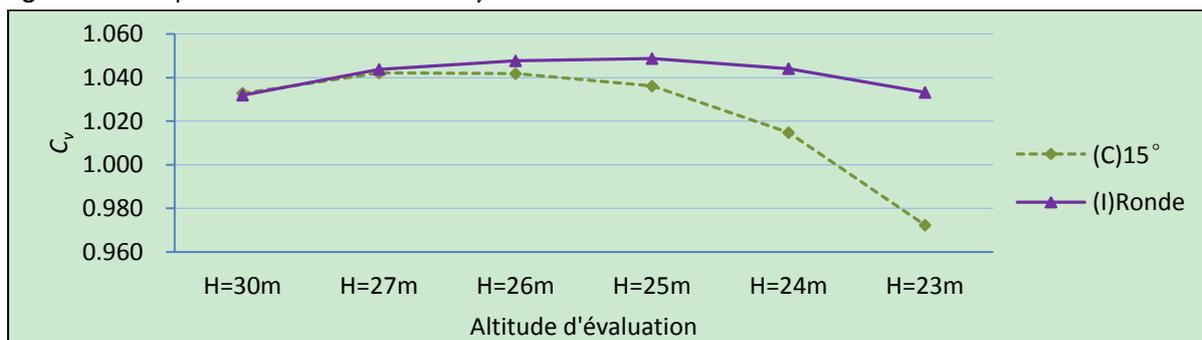


Fig. 5-2-9b Comparaison sur le coefficient C_v entre les différentes toitures.

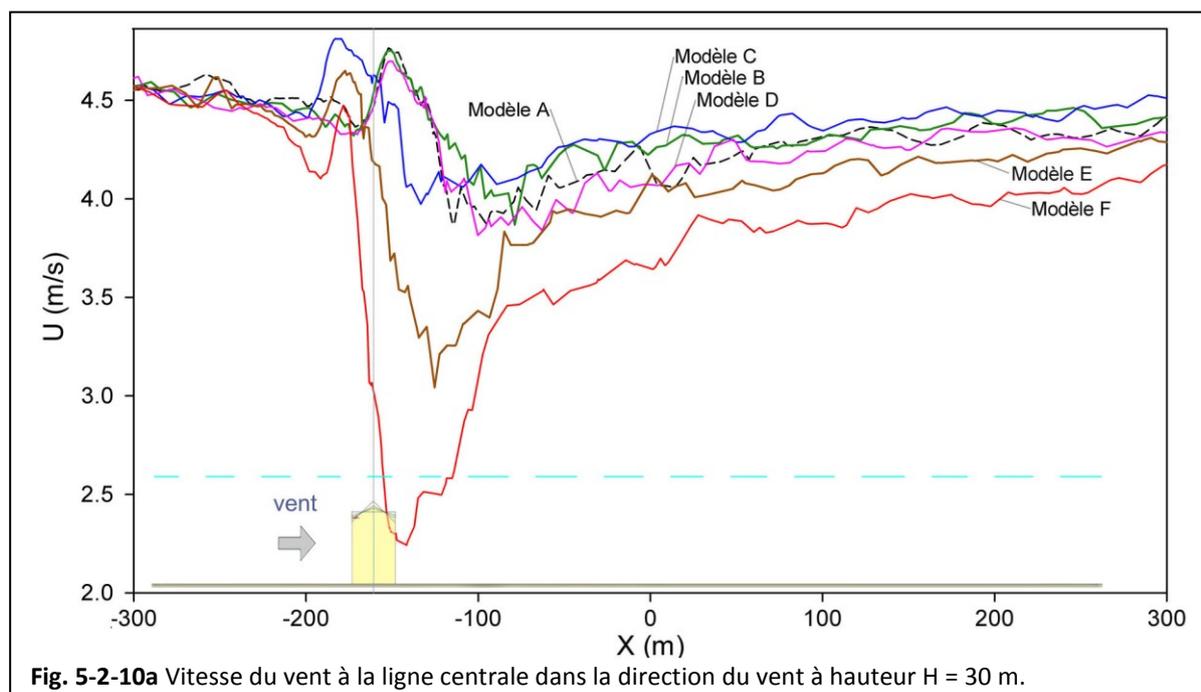
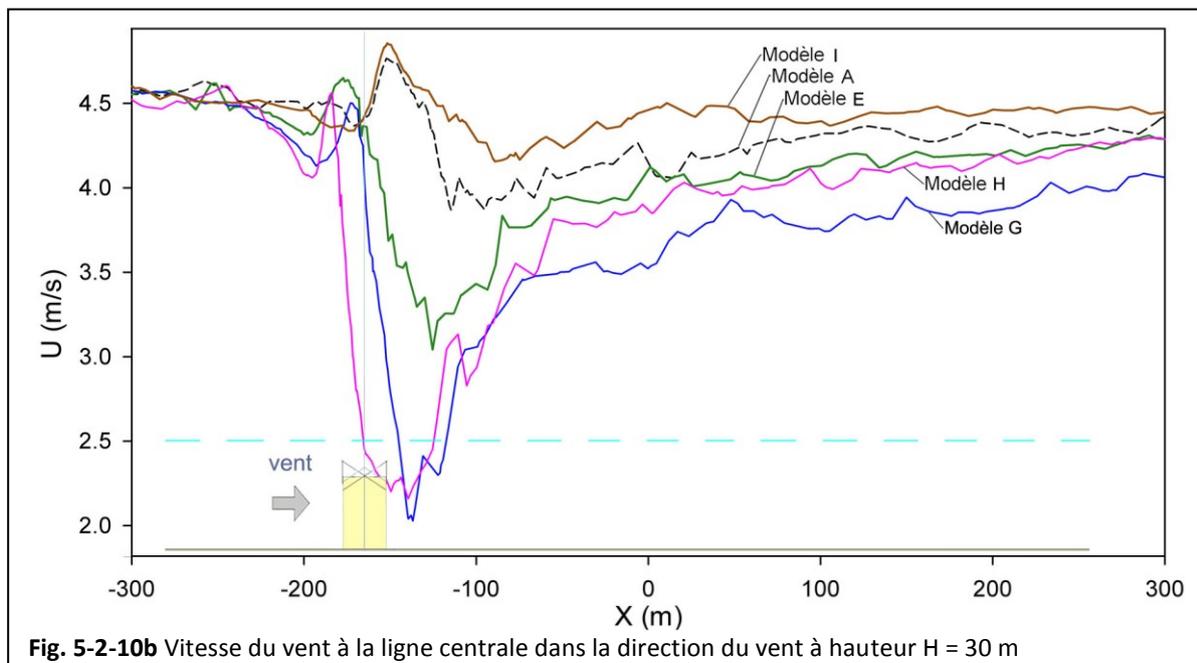


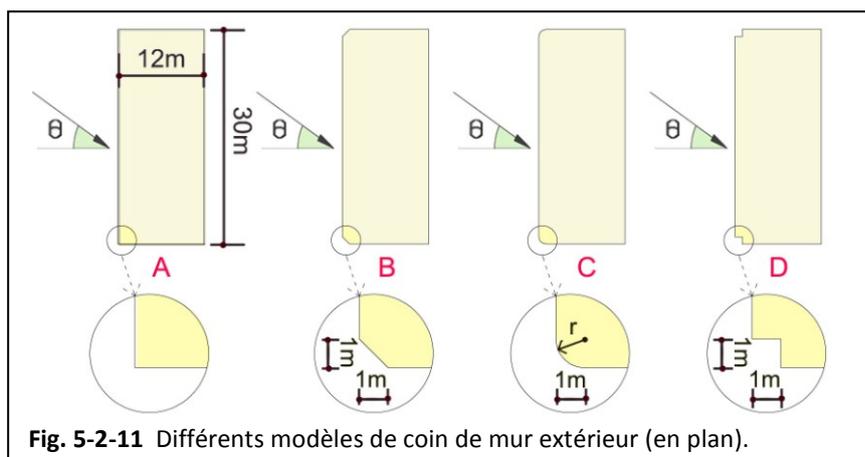
Fig. 5-2-10a Vitesse du vent à la ligne centrale dans la direction du vent à hauteur $H = 30$ m.



En outre, pour faire apparaître la formation d'écoulement derrière les différentes formes de toiture, des représentations du variation de vitesse à la ligne centrale dans la direction du vent à hauteur $H = 30$ m sont données (Fig. 5-2-10a, b). Nous constatons qu'en amont des bâtiments, les différences de la vitesse d'écoulement sont faibles ; par contre, en aval, elles sont importantes. Parmi les modèles de toiture à deux pans, ce qui rend le vent le plus fort derrière le bâtiment c'est le modèle C ($\alpha = 15^\circ$), puis le modèle B ($\alpha = 10^\circ$), le modèle D ($\alpha = 20^\circ$), le modèle E ($\alpha = 30^\circ$) et enfin, le modèle F ($\alpha = 45^\circ$). Cet ordre est exactement le même que celui du cas d'évaluation des plans au-dessus du toit. Les comparaisons parmi les modèles de toiture à un seul pan et de toiture ronde sont aussi correspondantes.

5.2.5 Impact du coin sur le potentiel éolien

Sur la base de la barre de référence ($W \cdot L \cdot H = 12\text{m} \cdot 30\text{m} \cdot 20\text{m}$), trois modèles de coins modifiés de mur extérieur (à une taille d'un mètre en plan, sur toute la hauteur) sont testés (Fig. 5-2-11) Deux angles d'incidence du vent ($\Theta = 0^\circ, 30^\circ$) et trois altitudes au-dessus du toit ($Z = 3$ m, 5 m, 10 m) sont considérés.



A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse des modèles de coin de la Figure 5-2-12, les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Parmi les trois modèles, le modèle de coin tronqué (modèle B) et le modèle de coin concave (modèle D) sont généralement plus performants que le modèle de coin arrondi (modèle C) pour les deux angles d'incidence de 0° et de 30° , et les différences entre les deux sont très faibles.

2) Avec un vent normal (0°), le modèle de coin tronqué et le modèle de coin concave sont un peu plus performant que le modèle de coin sans modification (modèle A, référence). Par contre, avec un vent oblique (30°), le modèle de référence présente un vent au-dessus du toit beaucoup plus puissant, notamment à basse altitude ($Z = 3\text{ m}$ et $Z = 5\text{ m}$).

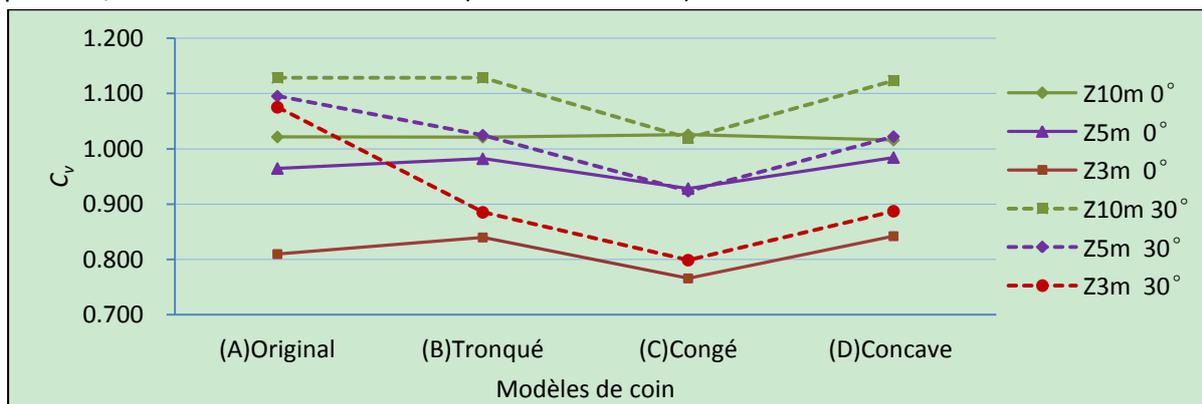


Fig. 5-2-12 Comparaison sur le coefficient C_v entre les différents modèles de coins de mur extérieur.

D'ailleurs, au delà de l'impact des coins modifiés en plan, l'impact des coins au bord du toit est aussi analysé. Les modèles étudiés ont trois coins modifiés, celui en face du vent et les deux latéraux, comme présenté dans la Figure 5-2-13 la coupe verticale à la direction du vent. Un seul angle d'incidence ($\Theta = 0^\circ$) est considéré. Pour connaître plus précisément les variations d'écoulement au-dessus du toit, cinq altitudes ($Z = 1\text{ m}, 2\text{ m}, 3\text{ m}, 5\text{ m}, 10\text{ m}$) sont étudiées.

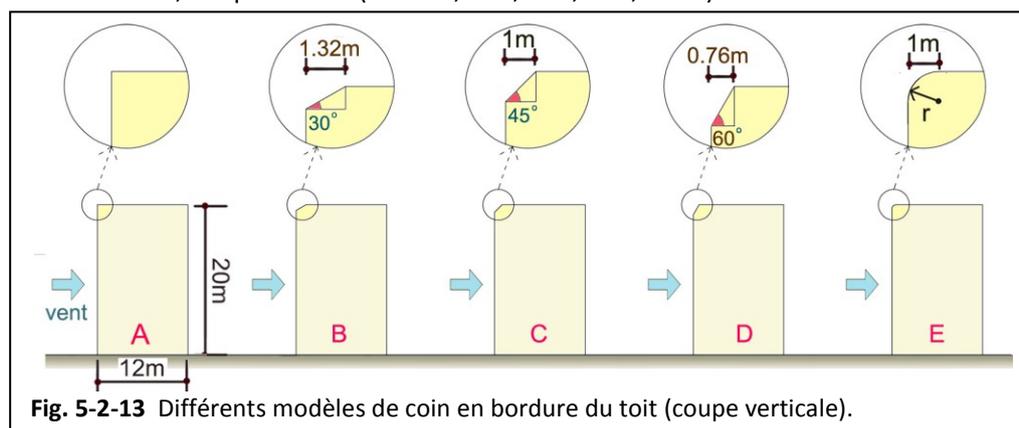


Fig. 5-2-13 Différents modèles de coin en bordure du toit (coupe verticale).

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse des modèles de coin de la Figure 5-2-14, les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Comparé au modèle de référence, tous les modèles avec coins modifiés au bord de toiture sont plus ventés à proximité du toit ($Z < 3\text{ m}$) ; même à $Z = 5\text{ m}$ la majorité des modèles sont encore plus ventés. Par contre, quand l'altitude est assez élevée ($Z = 10\text{ m}$), le modèle de référence devient d'avoir la même performance ou peut-être plus performant.

2) Parmi les trois modèles de coin tronqué avec une même surface modifiée (modèle B, C et D), c'est le modèle de coin tronqué de 30° (modèle B) qui a l'énergie éolienne la plus importante au-dessus du toit lorsque $Z < 5\text{ m}$.

3) Les deux meilleurs modèles de coins modifiés, à savoir, le modèles de coin arrondi rond (modèle E) et le modèle de coin tronqué de 30° ont presque les mêmes capacités moyennes d'énergie éolienne au-dessus du toit.

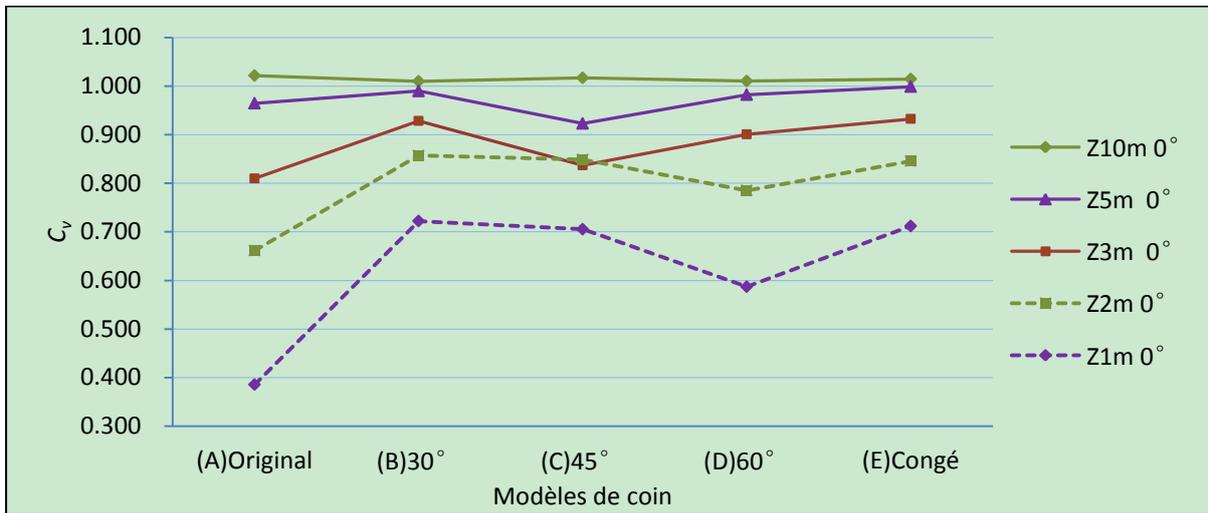


Fig. 5-2-14 Comparaison sur le coefficient C_v entre les différents modèles de coins en bordure du toit.

La représentation des contours de vitesse d'écoulement aux bords des toitures dans la Figure 5-2-15 confirme les résultats ci-dessus. Elle présente aussi les variations de position des classes de vitesse. Les coins modifiés réduisent une grande partie de la turbulence au-dessus du toit et donc rendent la vitesse du vent proche de toit plus élevée que le modèle de référence. Même si les valeurs montrent que le potentiel éolien du modèle de coin à 30° (B) est un peu plus élevé à proximité de toit (Fig. 5-2-14), le modèle de coin à 45° (C) présente une zone du vent plus fort au front du toit comme le modèle de coin arrondi (E). Pour précisément prévoir le potentiel éolien total d'un projet réel, il faut prendre en considération la position exacte de l'emplacement des éoliennes au lieu d'utiliser uniquement la vitesse moyenne sur une surface.

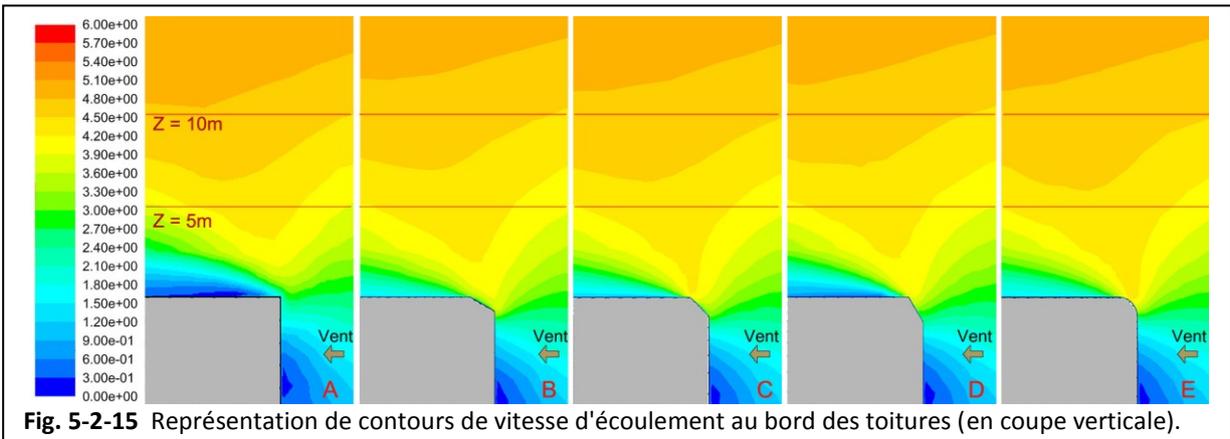


Fig. 5-2-15 Représentation de contours de vitesse d'écoulement au bord des toitures (en coupe verticale).

5.2.6 Impact de la présence d'une cour sur le potentiel éolien

Sur la base du modèle de barre de référence ($W*L*H = 12m*30m*20m$), cinq modèles de cours à ciel ouvert (nombre de cours * largeur * longueur = $1*3m*24m$, $2*6m*6m$, $4*6m*3m$, $2*6m*3m$, $2*6m*10m$) sont testés (Fig. 5-2-16). Deux altitudes d'évaluation ($Z = 5m, 10m$) et quatre angles d'incidence du vent ($\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) sont considérés.

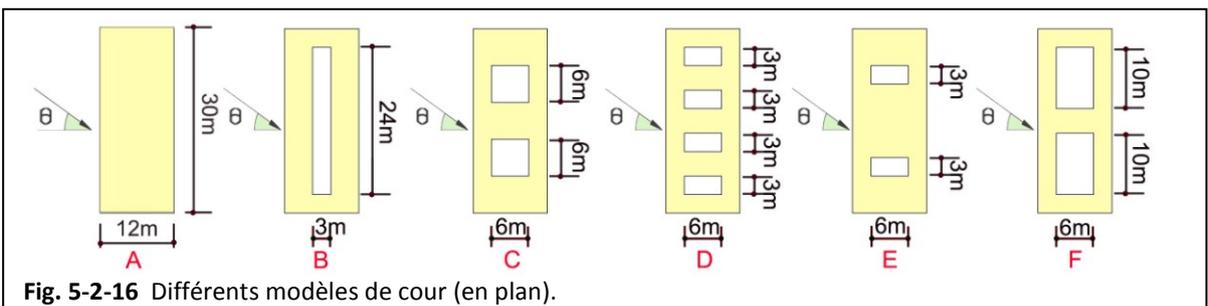


Fig. 5-2-16 Différents modèles de cour (en plan).

Parmi les cinq modèles de cour, les modèles B, C et D ont la même porosité (20 %), le modèle E a la plus faible porosité (10 %), tandis que le modèle F a la plus grande (33 %). L'indicateur M est calculé dans la Fig. 5-2-17 pour tous les modèles sur les plans entiers (360 m^2) à l'altitude $Z = 5 \text{ m}$ et à 10 m au-dessus du toit. Les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) En général (sauf avec un angle d'incidence de 90°), au-dessus du toit, les modèles avec cours sont plus ventés que le modèle de référence sans cour (correspondant à la ligne discontinue).

2) Parmi les modèles de différentes porosités de cour, le modèle F qui a la plus grande porosité correspond généralement au plus grand potentiel éolien au-dessus du toit.

3) Parmi les modèles de même porosité de cour (B, C et D), les performances varient en fonction de l'angle d'incidence. Pour un vent de 0° , le modèle B (avec une longue cour) est le plus performant. Pour les vents de 30° et de 60° les différences sont très faibles, alors que pour le vent de 90° c'est le modèle D (avec plusieurs petites cours) qui est le plus performant.

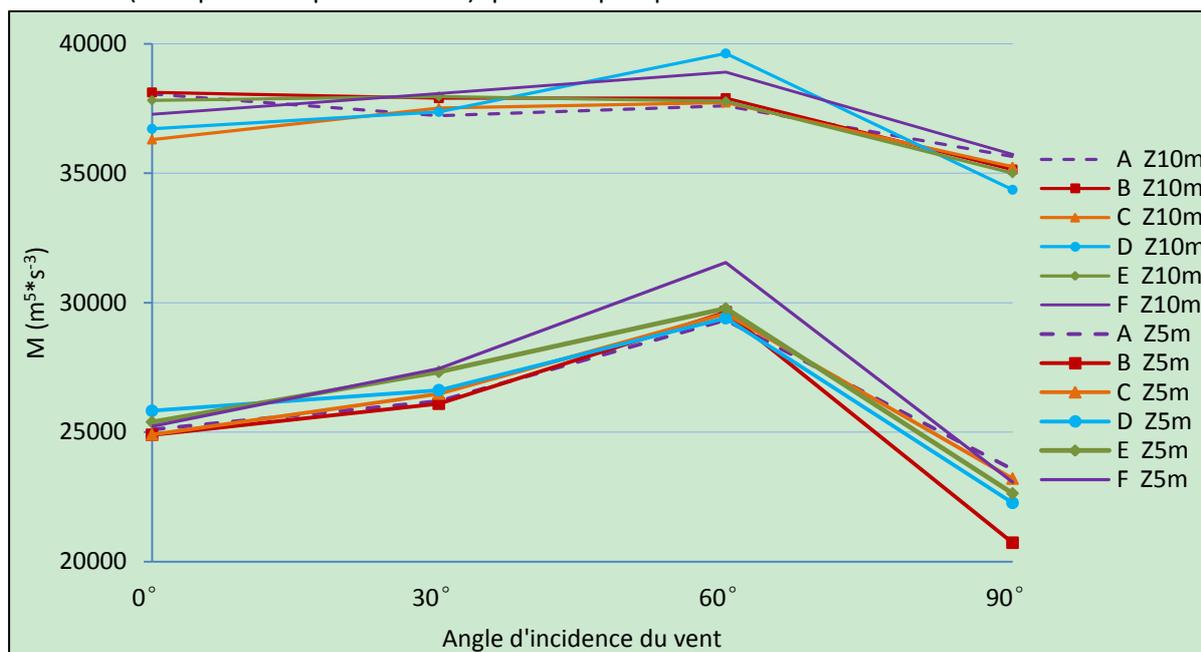


Fig. 5-2-17 Potentiel éolien total de surface au-dessus des toits pour les modèles de cours.

5.2.7 Impact du passage du vent sur le potentiel éolien

Sur la base de la barre de référence ($W \cdot L \cdot H = 12\text{m} \cdot 30\text{m} \cdot 20\text{m}$), plusieurs modèles avec des passages du vent différents sont testés (Fig. 5-2-18). Il y a des modèles avec une casquette de même forme que la toiture et à différentes hauteurs (modèle B : 3 m et modèle C : 4 m). Il y a des modèles avec les dalles débordantes de 1 m du front mais reculées de différentes largeurs (modèle D1 : 0 m , D2 : 3 m , D3 : 6 m et D4 : 9 m). Il y a des modèles avec des passages du vent au rez-de-chaussée (Rdc) pilotis ($H = 4 \text{ m}$) sans ou avec des dalles insérées à différentes hauteurs (modèle E : sans dalle, F1 : dalle à $H = 3 \text{ m}$, F2 : dalle circulaire débordant de 2 m à $H = 3 \text{ m}$, G1 : dalle à $H = 2,5 \text{ m}$ et G2 : dalle annulaire en bord de 2 m à $H = 2,5 \text{ m}$). Il y a aussi des passages du vent au rez-de-chaussée pilotis avec des coins (en raison de l'effet de concentration du vent) de différents angles (modèle H1 : 30° , H2 : 45° et H3 : 60°). Un seul angle d'incidence ($\Theta = 0^\circ$) est appliqué pour tous les modèles et la section présentée est la même sur toute la longueur ($L = 30 \text{ m}$) du bâtiment sauf pour les modèles F2 et G2 qui ont des dalles annulaires.

Pour les modèles de casquettes au-dessus du toit, plusieurs altitudes (ligne rouge discontinue, e.g. $H = 22 \text{ m}$, 23 m , 30 m) sont considérées pour l'évaluation de l'effet de concentration du vent en dessous et au-dessus de la casquette. Pour les passages du vent au Rdc pilotis avec dalle, les vitesses moyennes à deux hauteurs ($H = 3,25 \text{ m}$ et $3,5 \text{ m}$) sont évaluées correspondant à la hauteur de dalle.

Pour les passages du vent Rdc pilotis avec avec coin, une seule altitude d'évaluation ($H = 3,5$ m, au milieu de l'espace entre le sommet du coin et le plafond du rez-de-chaussée) est considérée.

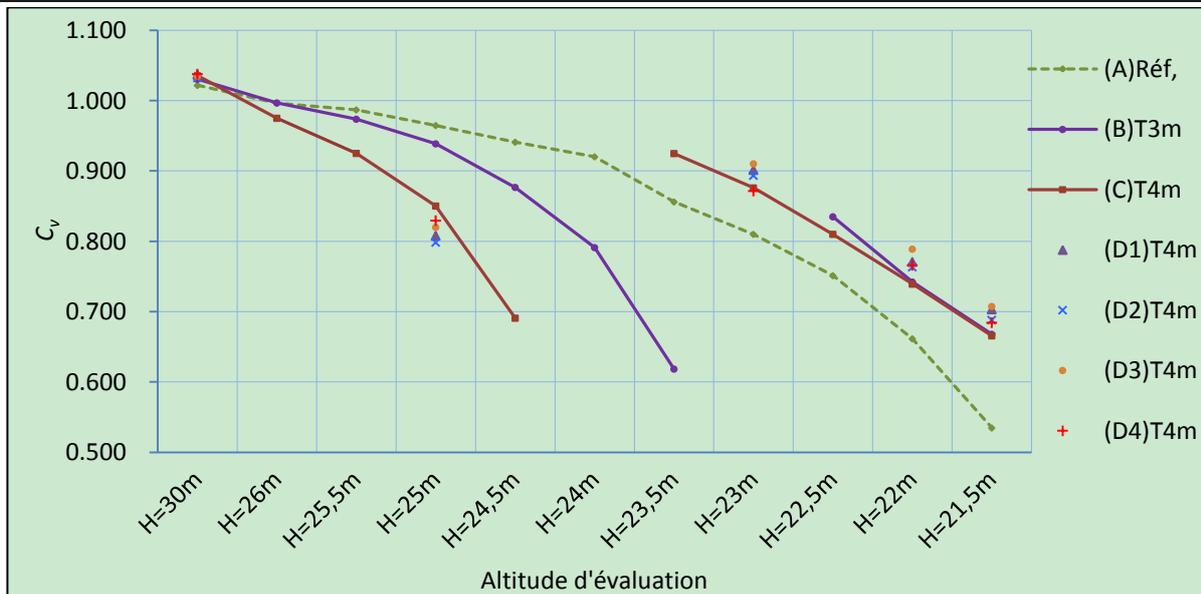
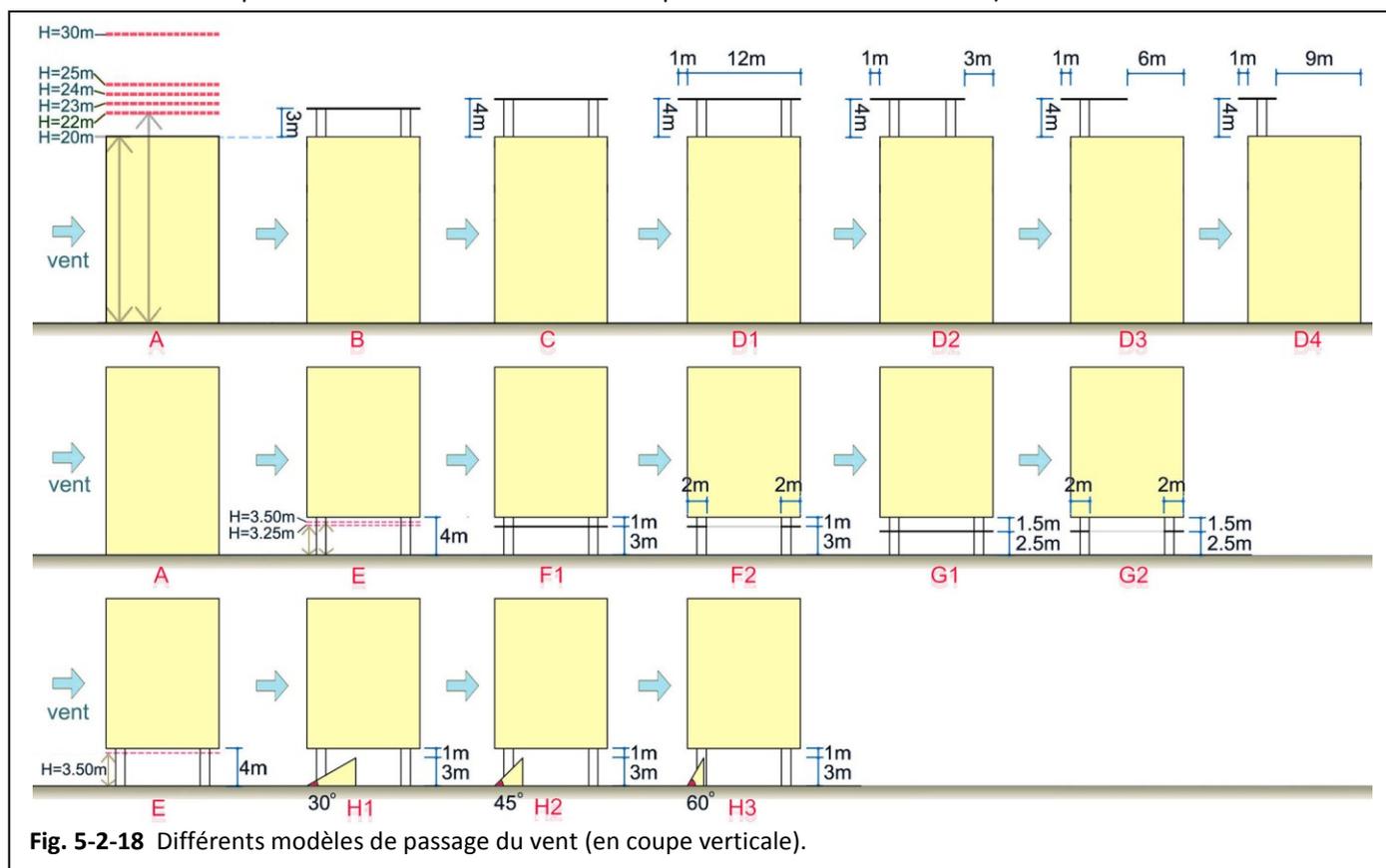


Fig. 5-2-19a Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles de passage du vent.

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse du vent au-dessus du toit (Fig. 5-2-19a), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) La comparaison avec le modèle de référence (A), démontre que les vents au-dessus des casquettes de 3 m et de 4 m de hauteur au-dessus du toit (modèle B et C) sont moins forts jusqu'à une hauteur assez élevée ($H = 30$ m) à partir de laquelle ils deviennent un peu plus forts. En revanche, comme prévu, les vents sous des casquettes (dans le passage du vent) sont plus forts qu'à la même hauteur au-dessus du toit du modèle de référence. Donc, il est inutile de profiter des vents au-dessus des casquettes mais plutôt de ceux au-dessous.

2) La comparaison entre les deux modèles de casquette à différentes hauteurs (B et C), démontre que c'est le modèle C avec une casquette plus élevée qui est plus favorable pour profiter du vent au-dessous de celle-ci.

3) A la même hauteur, les modèles avec une casquette débordante de 1m du front (D1, D2, D3 et D4) présentent presque tous les vents les plus forts en dessous de la casquette que le modèle avec une casquette sans débordement (C). Le débordement de la casquette du front contre le vent est un élément qui favorise l'accélération du vent.

4) Parmi les modèles de dalles débordantes, le modèle avec la casquette à mi-largeur, modèle D3 qui recule 6m en arrière, présente la vitesse moyenne de vent la plus élevée.

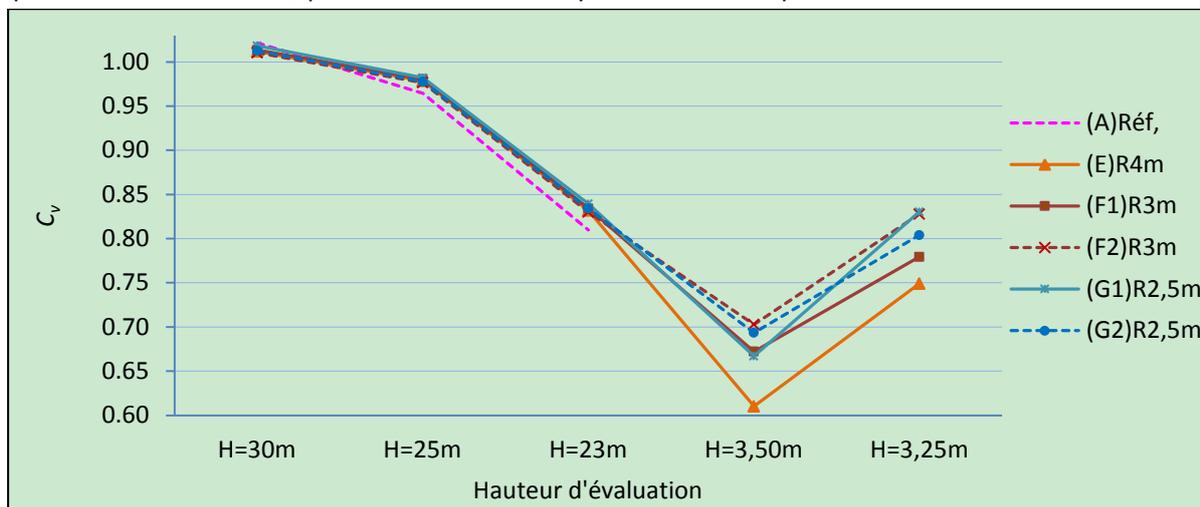


Fig. 5-2-19b Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles de passage du vent.

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse pour les passages du vent au Rdc pilotis avec des dalles insérées (Fig. 5-2-19b), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Tous les passages du vent au Rdc pilotis sont normalement plus ventés que le modèle de référence au-dessus du toit ($H < 30$ m).

2) Les modèles avec des dalles insérées dans le passage présentent des vents plus forts que le modèle sans dalle (E).

3) Entre les modèles de dalle à différentes hauteurs (F1, G1), c'est le modèle avec la dalle la plus proche du sol qui a un effet de concentration du vent le plus fort. Le potentiel éolien peut-être toutefois moins élevé à cause de la faible vitesse du vent enregistrée.

4) Entre les modèles de dalle de formes différentes (F1 et G1 : surface pleine, F2 et G2 : surface creusée en anneau), les performances aux différentes hauteurs sont variées. La hauteur $H = 2,5$ m est favorable pour la dalle pleine, alors que $H = 3$ m est intéressante pour la dalle annulaire de 2m.

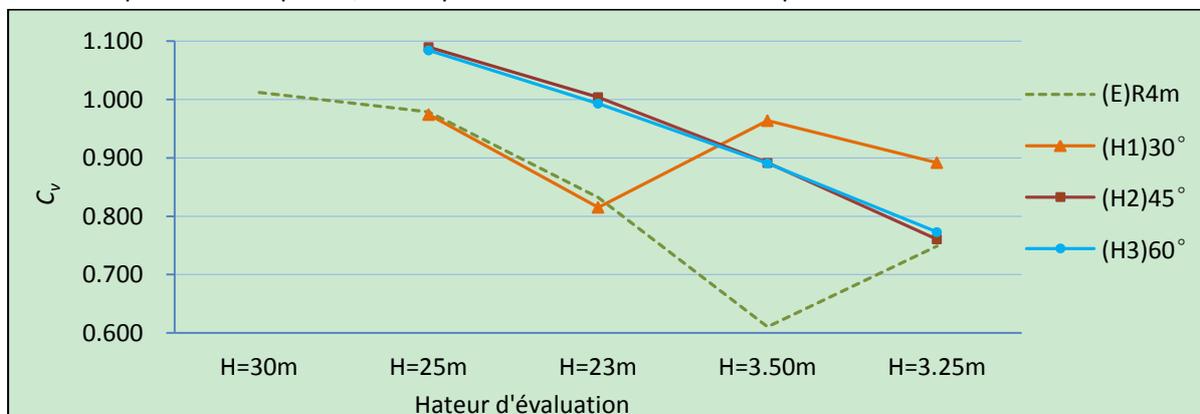


Fig. 5-2-19c Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles de passage du vent.

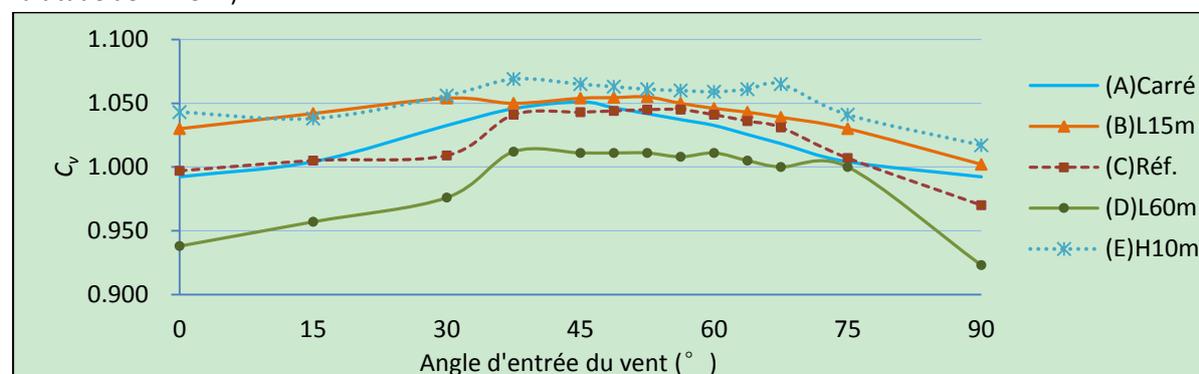
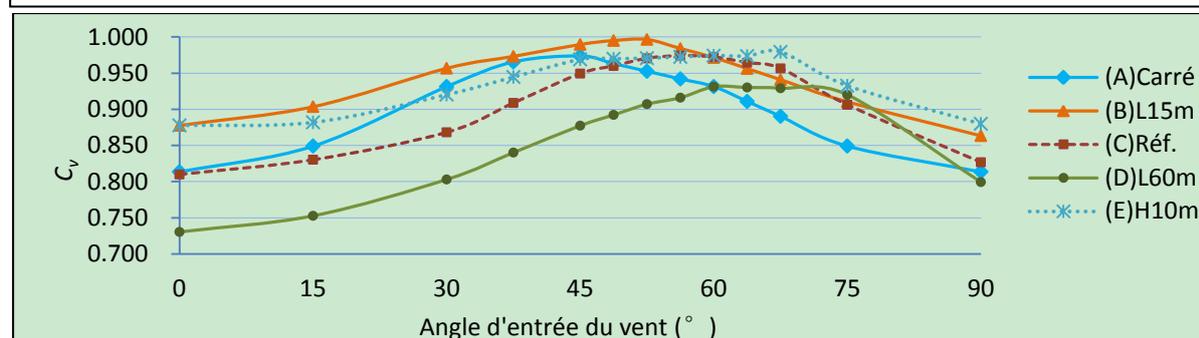
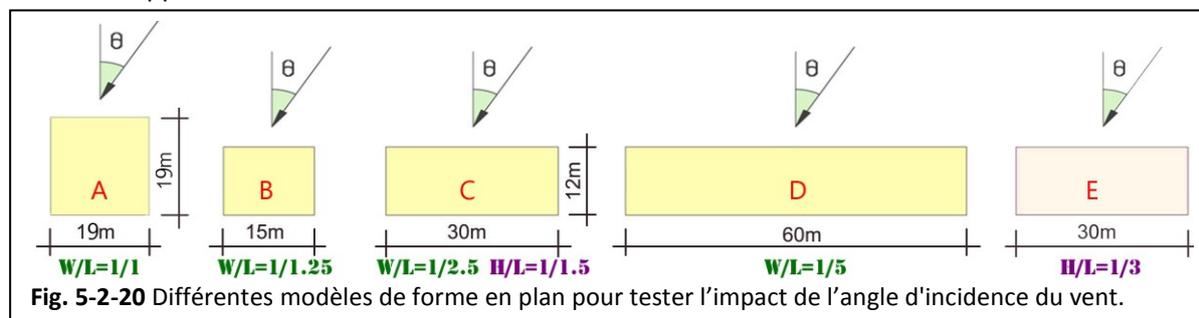
A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse pour les passages du vent au Rdc pilotis avec des coins dedans (Fig. 5-2-19c), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Les modèles de la coin avec un angle contre le vent de 45° et le modèle de 60° présentent presque la même puissance du vent. Ils sont plus ventés dans le passage et aussi au-dessus du toit que le modèle sans coin.

2) La performance du modèle en coin avec l'angle de 30° est instable par rapport aux deux autres modèles similaires. Le vent au-dessus du toit est un peu affaibli mais beaucoup plus élevé dans le passage.

5.2.8 Impact de l'angle d'incidence du vent sur le potentiel éolien

Comme nous l'avons déjà vu dans les cas précédents, les performances sont différentes en fonction des changements de direction du vent incident. Nous évaluons dans cette partie du chapitre, l'impact de l'angle d'incidence du vent à partir de modèles choisis et classés suivant deux groupes : groupe 01 (modèle A, B, C, D) avec différents rapports de W/L (largeur / longueur) mais de même hauteur ($H = 20\text{ m}$), et groupe 02 (modèle C, E) avec différents rapports de H/L (hauteur / longueur) mais de même forme en plan (Fig. 5-2-20). Pour des raisons de précision, nous introduisons plusieurs valeurs intermédiaires d'angles qui varient entre 30° et 75° , où souvent le potentiel énergie maximale apparaît.



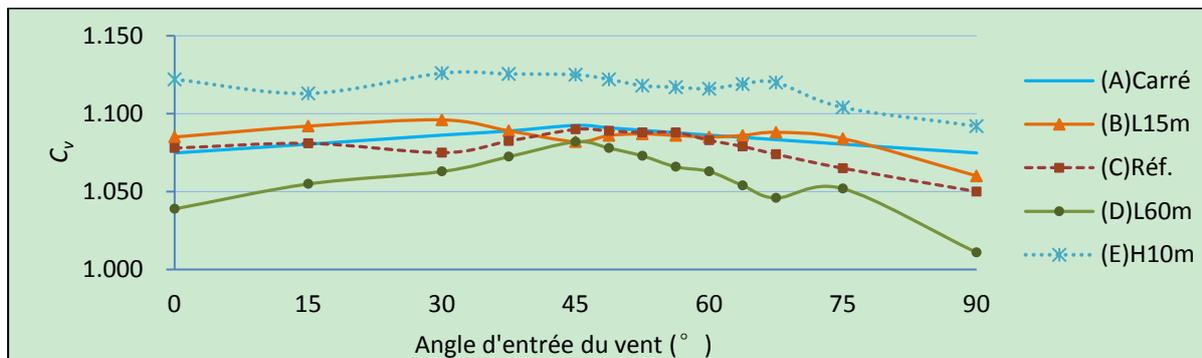


Fig. 5-2-21c Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles avec différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 7$ m).

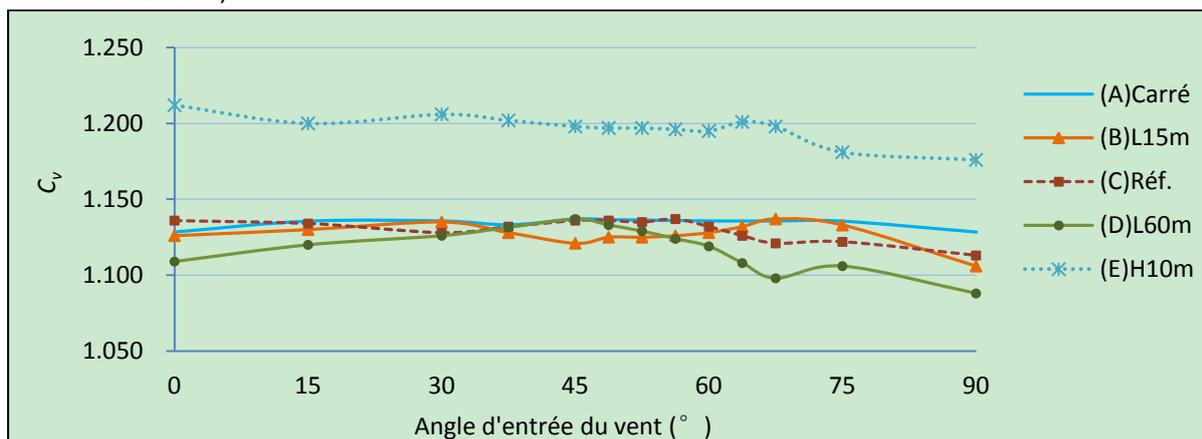


Fig. 5-2-21d Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles avec différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 10$ m).

A partir des valeurs du coefficient C_v des modèles avec différents angles d'incidence du vent à plusieurs altitudes d'évaluation ($Z = 3$ m, 5 m, 7 m, 10 m) dans la Fig. 5-2-21, les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) En général, les meilleurs angles d'incidence pour obtenir le coefficient maximal C_v sont : 45° pour le modèle carré (modèle A avec $W/L = 1$), $52,5^\circ$ pour le modèle L15 m (modèle B avec $W/L = 1/1,25$), $56,25^\circ$ pour le modèle de référence (modèle C avec $W/L = 1/1,5$ et $H/L = 1/1,5$), 60° pour le modèle L60 m (modèle D avec $W/L = 1/5$) et $67,5^\circ$ pour le modèle H10 m (modèle E avec $W/L = 1/1,5$ et $H/L = 1/3$). Comme le rapport W/L devient plus petit pour la même hauteur (du modèle A, B, C à D), le meilleur angle d'incidence pour un grand effet du vent doit être plus grand. Comme la hauteur de bâtiment est plus élevée pour la même forme en plan (de modèle E à C), le meilleur angle d'incidence du vent devient plus petit.

2) Par rapport aux performances aux différentes altitudes au-dessus du toit, les variations de vitesse du vent avec les angles d'incidences différents sont plus élevées à basse altitude qu'à haute altitude. C'est-à-dire que l'impact de l'angle d'incidence est plus élevé à proximité du toit.

5.2.9 Impact de la forme sur les vents à l'arrière du bâtiment

A partir de simulations faites sur la barre de référence ($W*L*H = 12m*30m*20m$) avec différentes variantes de hauteur, de longueur et de largeur, l'impact des paramètres de forme sur les vents arrière du bâtiment peut être évalué. Trois lignes verticales à la ligne centrale et espacées d'une distance de 80 m derrière le bâtiment sont considérées pour l'analyse des vitesses du vent (L-a, L-b et L-c dans la Fig. 5-2-22) Les coefficients d'augmentation de vitesse du vent pour les modèles de différentes hauteurs ($H = 10$ m, 20 m, 30 m), de différentes longueurs ($L = 15$ m, 30 m, 60 m) et de différentes largeurs ($W = 6$ m, 12 m, 24 m) sont donnés dans les Fig. 5-2-23 a, b et c.

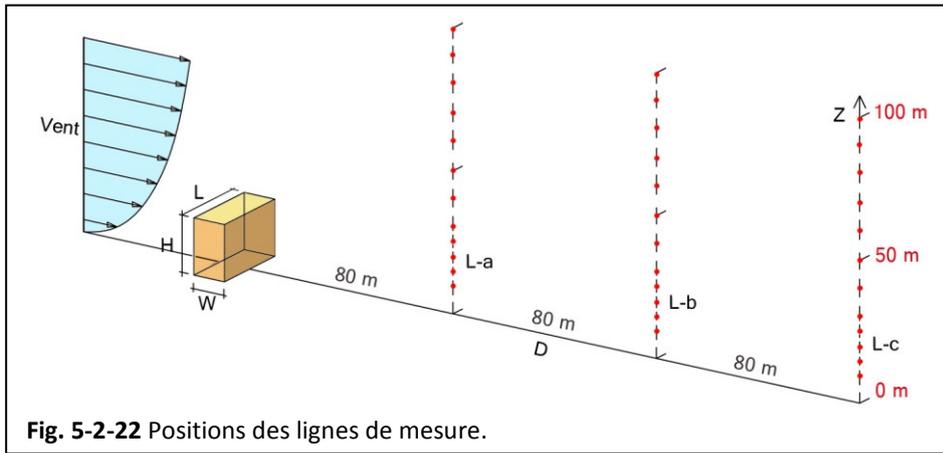


Fig. 5-2-22 Positions des lignes de mesure.

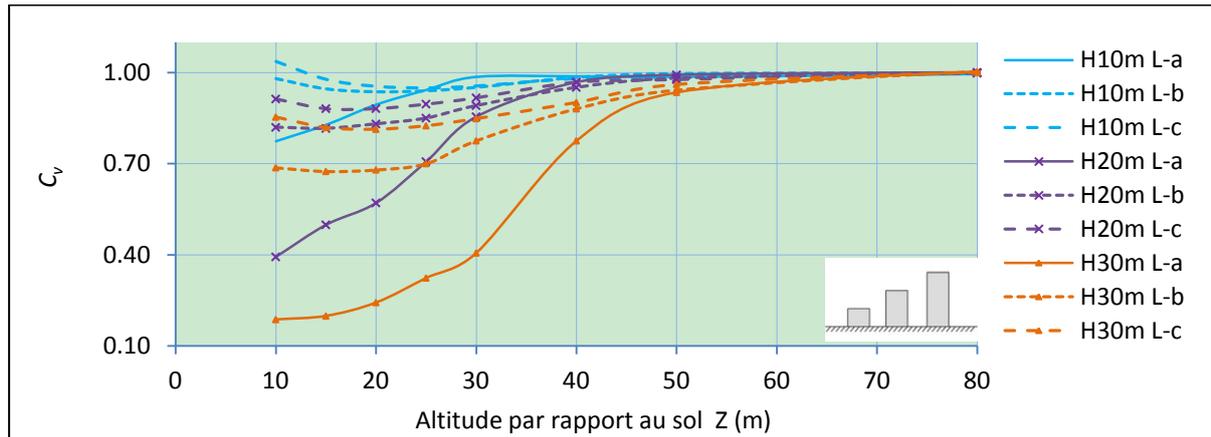


Fig. 5-2-23a Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles de différentes hauteurs.

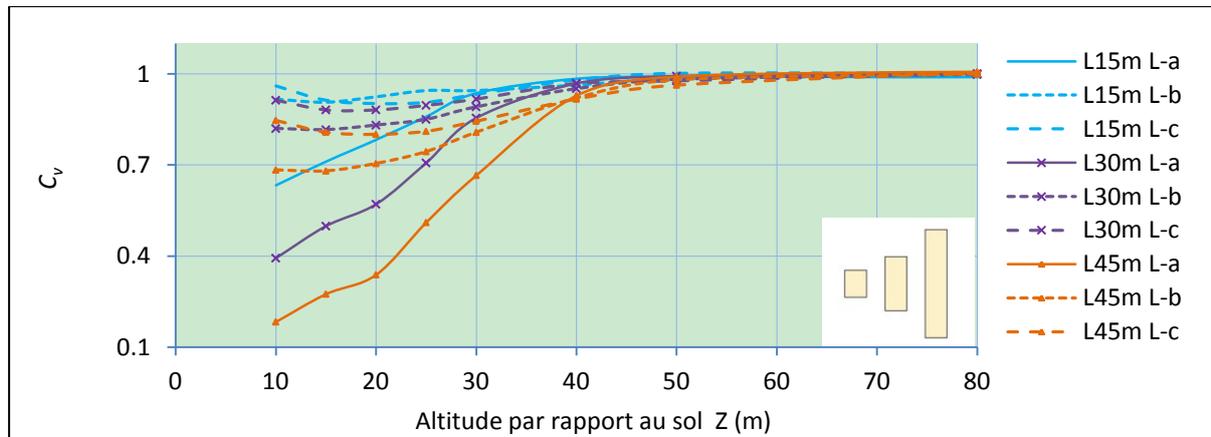


Fig. 5-2-23b Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles de différentes longueurs.

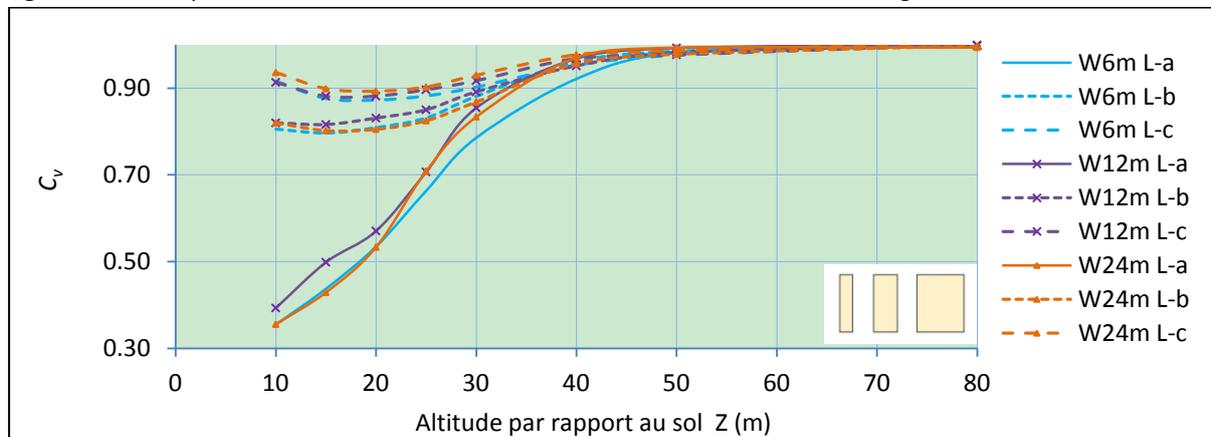


Fig. 5-2-23c Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles de différentes largeurs.

Pour préciser l'impact de différents paramètres du bâtiment sur les vents en arrière, les pourcentages de variation de la vitesse du vent sur la ligne L-b en changeant les paramètres du

bâtiment sont donnés dans le [Tableau 5-2-1](#). Les pourcentages précis de variations de la vitesse du vent en changeant la distance de la ligne de mesure en arrière du bâtiment (D) sont donnés dans le [Tableau 5-2-2](#). Les vents sur la ligne L-b derrière la barre de référence correspondent toujours au cas de référence. Selon les [Figures 5-2-23](#) (a, b, c), le [Tableau 5-2-1](#) et le [Tableau 5-2-2](#), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) L'impact des quatre paramètres diminue avec l'altitude. Pour un bâtiment de $H = 20$ m, l'influence de la variation des paramètres L, W et D est insignifiante ($< 1,5$ %) lorsque $Z > 50$ m. Pour le bâtiment dont $H = 30$ m, l'impact du paramètre D est insignifiant (< 1 %) lorsque $Z > 70$ m. Donc si l'on peut dire, lorsque $Z > 2,5H$, les paramètres L, W et D ont un impact insignifiant sur les vents derrière le bâtiment.

2) Généralement, la vitesse du vent à l'arrière du bâtiment diminue avec la hauteur et la longueur du bâtiment. Elle varie très peu avec la largeur du bâtiment. Par contre, elle augmente avec la distance à l'arrière du bâtiment.

3) Entre les paramètres H et L, le premier a un impact généralement un peu plus important (3 %) que le dernier. Les tendances de ses variations avec le paramètre D sont conformes.

4) Avec une valeur réduite de moitié et une valeur augmentée à 1,5 fois, les paramètres H, L et W ne présentent pas grande différence entre les deux taux de variation (< 7 %, e.g. entre 13 % et -18 % pour le paramètre H à $Z = 20$ m, ou entre 11 % et -13 % pour le paramètre L à $Z = 25$ m). Par contre, les taux de variation pour le paramètre D varient beaucoup à une altitude faible (e.g. 25 % à $Z = 20$ m).

Tableau 5-2-1

Variations de vitesse du vent en fonction de paramètres du bâtiment (H, L, W) sur la ligne de mesure L-b

Z (m)	<H>		<L>		<W>		<D>	
	$U_H \rightarrow U_{0,5H}$	$U_H \rightarrow U_{1,5H}$	$U_L \rightarrow U_{0,5L}$	$U_L \rightarrow U_{1,5L}$	$U_W \rightarrow U_{0,5W}$	$U_W \rightarrow U_{1,5W}$	$U_D \rightarrow U_{0,5D}$	$U_D \rightarrow U_{1,5D}$
20	13 %	-18 %	11 %	-15 %	-3 %	-3 %	-31 %	6 %
25	11 %	-18 %	11 %	-13 %	-2 %	-3 %	-17 %	5 %
30	7 %	-13 %	6 %	-9 %	-1 %	-3 %	-4 %	3 %
40	3 %	-7 %	1 %	-3 %	1 %	1 %	2 %	2 %
50	1 %	-4 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	-1 %
80	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

En outre, avec différentes hauteurs du bâtiment situé en amont, le changement de vitesse sur la ligne continue à l'arrière du bâtiment est analysé ([Annexe 5.1](#)). Généralement, le rapport entre la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre un vent stable (D_{stable}) et la hauteur du bâtiment (H), diminue avec l'augmentation de H. En fait, une relation entre eux est trouvée : $D_{stable} = \frac{84}{H^{0,6}} H$. Pour évaluer le potentiel éolien dessus le toit, deux tours en ligne dans la direction du vent sont simulés. Les impacts des plusieurs paramètres morphologiques sont analysés ([Annexe 5.2](#)).

5.3 Simulation de deux bâtiments

Dans cette partie, l'impact de différentes relations entre deux bâtiments sur le potentiel éolien est discuté. Les modèles principaux choisis varient entre deux bâtiments en ligne, de deux bâtiments parallèles, deux bâtiments décalés, deux bâtiments perpendiculaires et enfin deux bâtiments en coins sous différents angles. Il faut noter qu'aussi les paramètres à prendre en compte sont nombreux : taille de bâtiment (W, L, H), distance de séparation (D), angle d'incidence du vent (Θ), altitude d'évaluation, etc.. Ceci rend le nombre de variantes très important. Dans ce contexte, des exemples ne concernant que quelques paramètres ont été choisis pour présenter notamment la méthode de recherche, plutôt que de trouver une solution définitive à l'évaluation de l'énergie éolienne autour de bâtiments.

5.3.1 Potentiel éolien de deux bâtiments en ligne au vent

Sur la base d'un couple de barres de référence ($W*L*H = 12m*30m*20m$) en ligne, six groupes avec différentes distances de séparation entre elles ($D = 10\text{ m}, 20\text{ m}, 40\text{ m}, 80\text{ m}, 160\text{ m}$ et 240 m , de modèle B1 à B6), cinq groupes de hauteur $H = 10\text{ m}$ avec différentes distances de séparation ($D = 5\text{ m}, 10\text{ m}, 20\text{ m}, 40\text{ m}$ et 80 m , de modèle A1 à A5), trois groupes avec différents longueurs ($L = 15\text{ m}, 30\text{ m}$ et 60 m , de modèle C1 à C3), trois groupes avec différentes largeurs ($W = 6\text{ m}, 12\text{ m}$ et 18 m , de modèle D1 à D3), sont testés (Fig. 5-3-1) Pour analyser le rendement du couple, les modèles à une barre isolée avec les mêmes conditions du vent sont ajoutées à la comparaison : modèle A0 pour le groupe de modèles de $H = 10\text{ m}$, et modèle B0 pour le groupe de modèles de $H = 20\text{ m}$. A noter que la distance de séparation reste la même ($D = 40\text{ m}$) pour les groupes de largeur et de longueur variées (groupe C et D).

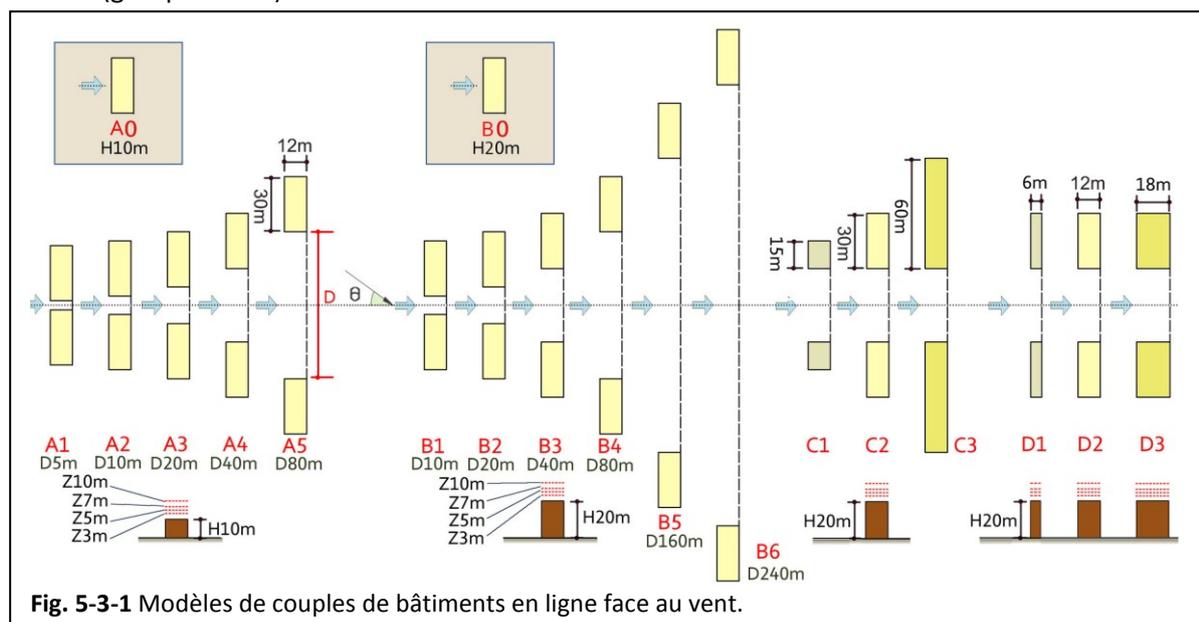


Fig. 5-3-1 Modèles de couples de bâtiments en ligne face au vent.

En analysant l'effet d'augmentation de la vitesse du vent au-dessus du toit à plusieurs altitudes, les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Le coefficient d'augmentation de la vitesse augmente généralement avec la distance de séparation pour le groupe de modèles de $H = 20\text{ m}$ (B1-B6) et pour les deux angles d'incidence (0° , 30°). Alors que pour le groupe de modèles de $H = 10\text{ m}$ (A1-A5), la performance avec l'angle d'incidence de 30° a la même tendance que les modèles de $H = 20\text{ m}$. Cependant avec un vent de 0° , il semble que l'effet du vent soit stable jusqu'à une distance $D = 40\text{ m}$ (Fig. 5-3-2a, b).

2) En comparaison avec la référence à un seul bâtiment, les couples de $H = 10\text{ m}$ ont des effets du vent faibles sauf le cas A5 avec un vent de 30° , ou à l'altitude de $Z = 3\text{ m}$. Pourtant, les couples de $H = 20\text{ m}$ peuvent être plus performants que le modèle à un bâtiment isolé : dès que la distance de

séparation dépasse $D = 40$ m, les couples de bâtiments en ligne enregistrent plus du vent au-dessus du toit (Fig. 5-3-2a, b).

3) La valeur du coefficient C_v diminue avec l'augmentation de la longueur et aussi avec l'augmentation de la largeur de bâtiment. L'amplitude de variation est ralentie avec l'altitude (Fig. 5-3-2c, d).

4) Concernant les performances à différentes altitudes, pour arriver à $C_v > 1$, l'altitude doit être supérieure à 7 m au-dessus du toit pour le modèle H = 20 m. Alors que pour le modèle H = 10 m, elle doit être plutôt supérieure à 10 m.

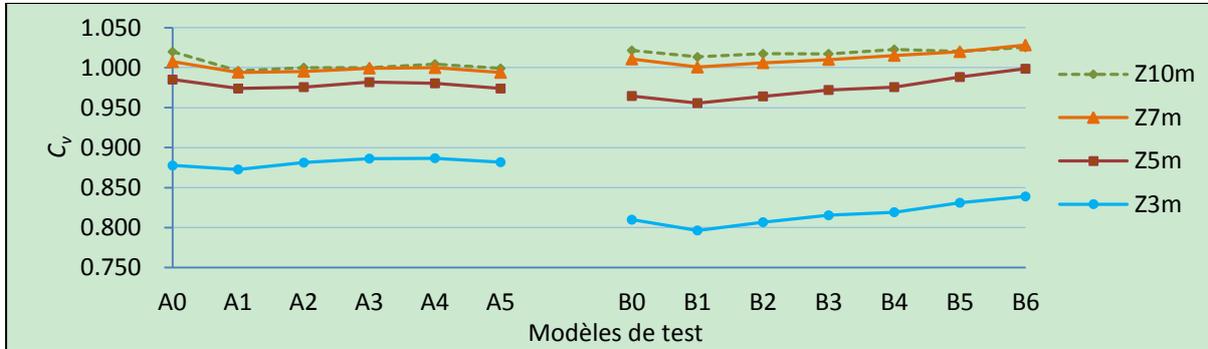


Fig. 5-3-2a Comparaison sur le coefficient C_v avec différentes distances de séparation entre deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 0°).

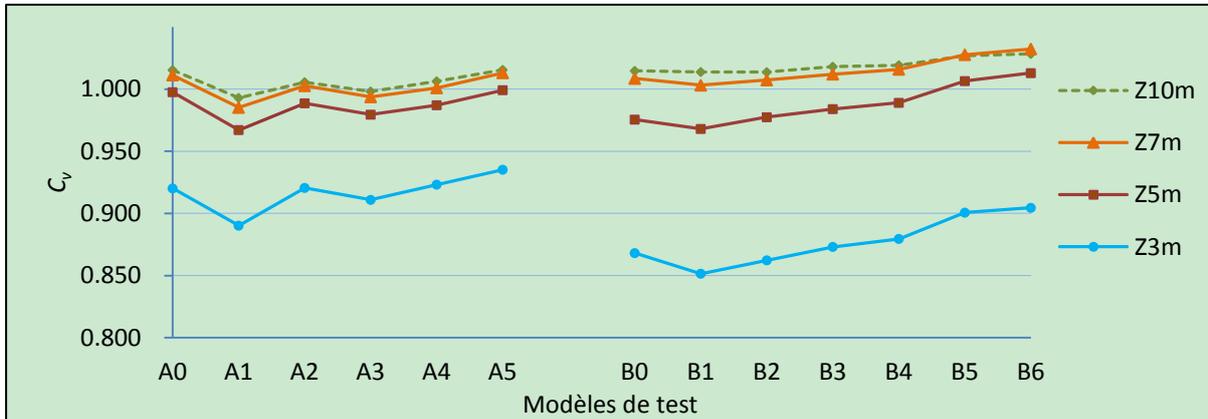


Fig. 5-3-2b Comparaison sur le coefficient C_v avec différentes distances de séparation entre deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 30°).

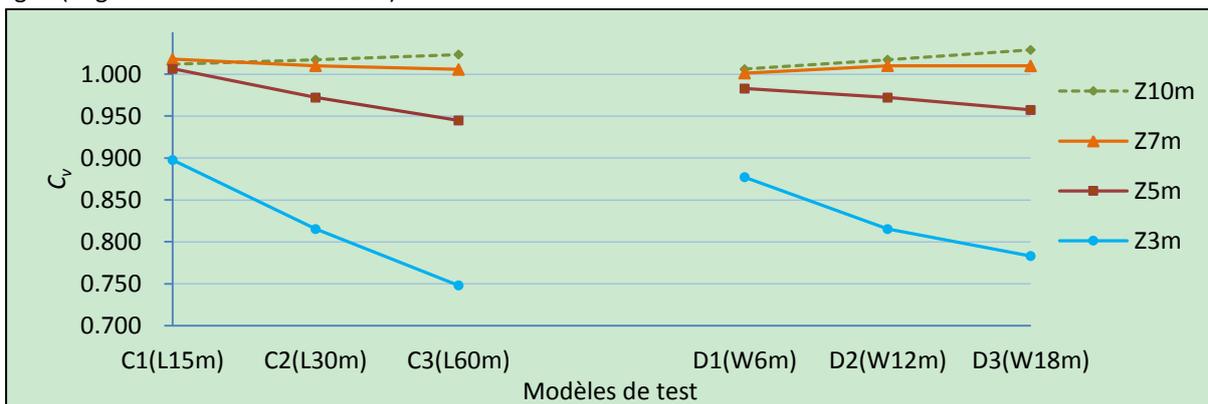


Fig. 5-3-2c Comparaison sur le coefficient C_v avec différentes longueurs et largeurs de bâtiments dans les modèles de deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 0°).

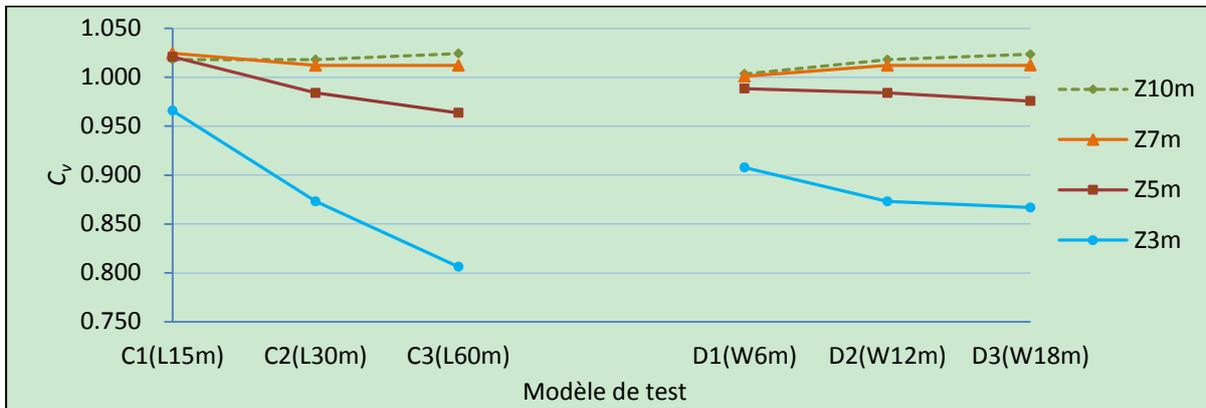


Fig. 5-3-2d Comparaison sur le coefficient C_v avec différentes longueurs et largeurs de bâtiment dans les modèles de deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 30°).

5.3.2 Potentiel éolien de deux bâtiments parallèles

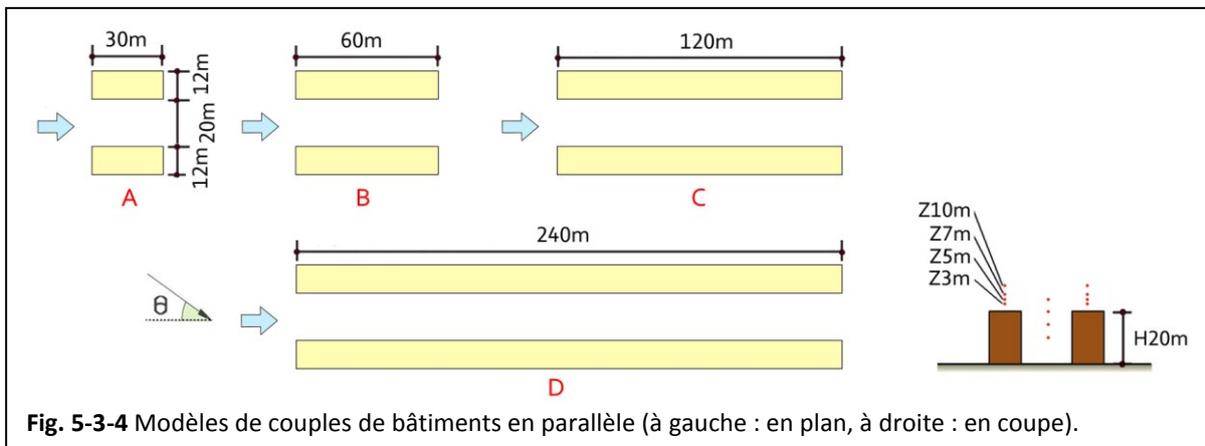
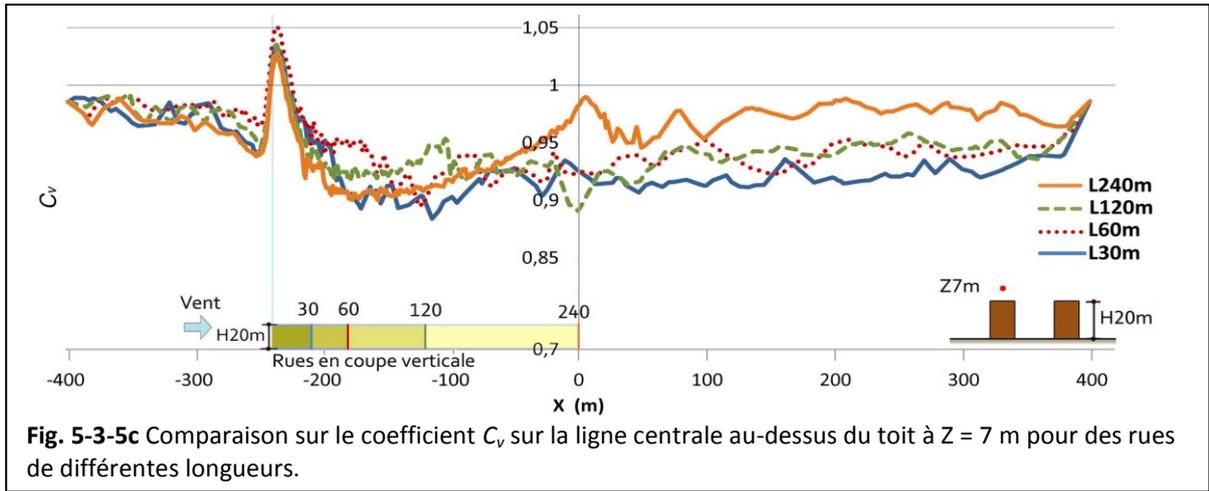
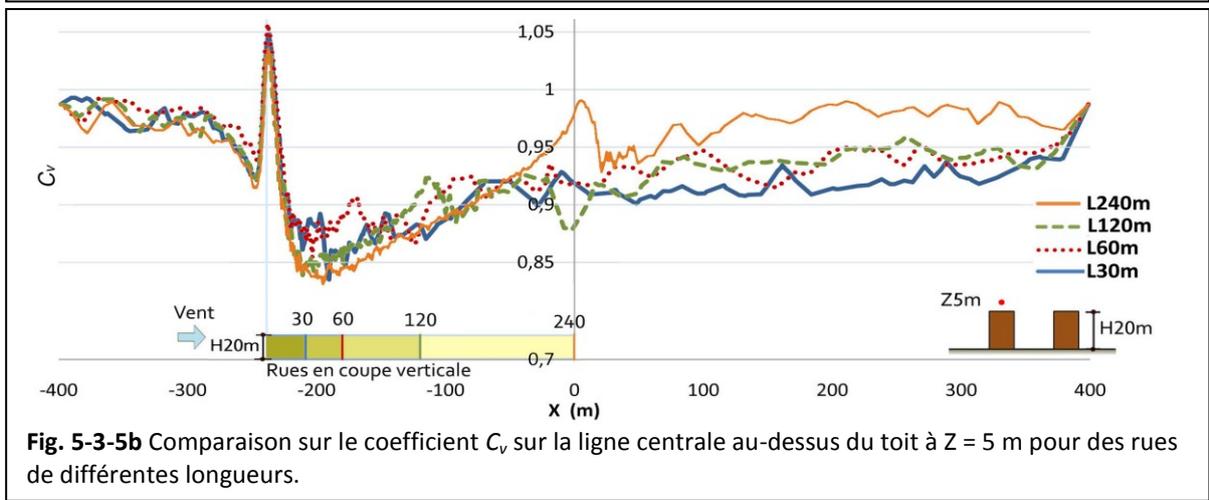
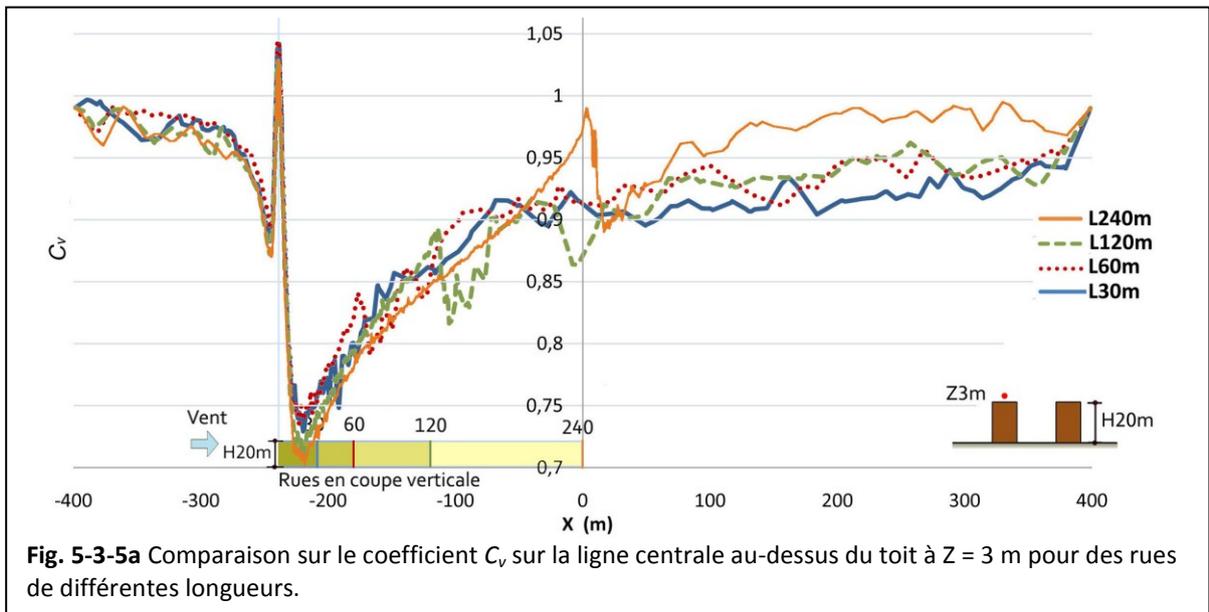
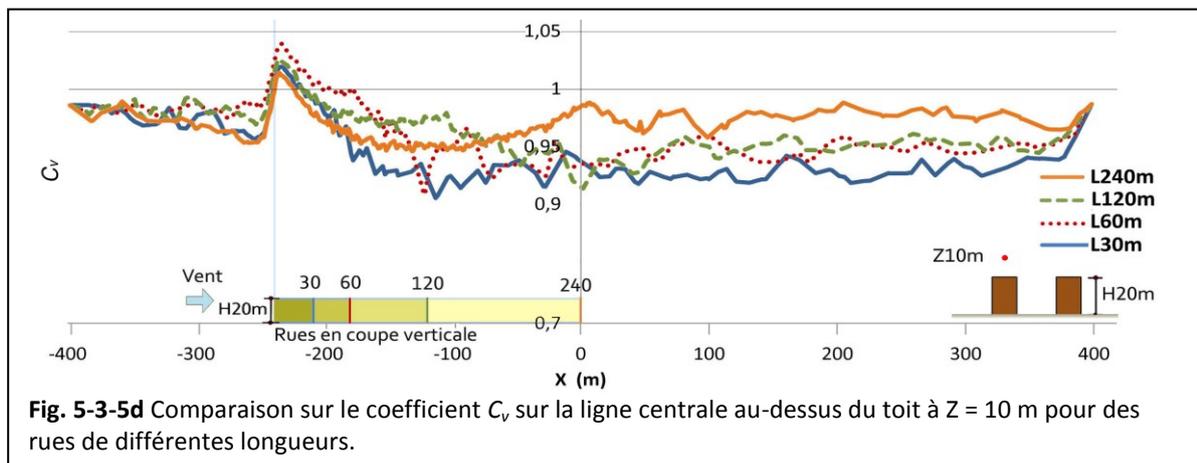


Fig. 5-3-4 Modèles de couples de bâtiments en parallèle (à gauche : en plan, à droite : en coupe).

Pour analyser les écoulements du vent dans une rue, deux barres identiques de bâtiment de référence sont placées face-à-face en parallèle et forment ainsi, quatre rues de longueurs différentes ($L = 30 \text{ m}, 60 \text{ m}, 120 \text{ m}, 240 \text{ m}$) avec une distance de séparation fixée ($D = 20 \text{ m}$) (Fig. 5-3-4). Un seul angle d'incidence du vent est appliqué ($\Theta = 0^\circ$). Des lignes centrales au milieu de la largeur du bâtiment à quatre altitudes au-dessus du toit sont considérées pour l'analyse de la performance d'écoulement ($Z = 3 \text{ m}, 5 \text{ m}, 7 \text{ m}, 10 \text{ m}$). A cause de la forme de bâtiments très longue, la distribution du vent en plan varie beaucoup, ce qui rend difficile la comparaison d'énergie avec des vitesses moyennes du vent pondérées par la surface. En outre, pour évaluer l'énergie éolienne dans les rues, dans un contexte d'effet de canalisation, l'effet d'augmentation de vitesse du vent est analysé sur les lignes centrales des quatre niveaux ($H = 10 \text{ m}, 15 \text{ m}, 20 \text{ m}, 25 \text{ m}$).



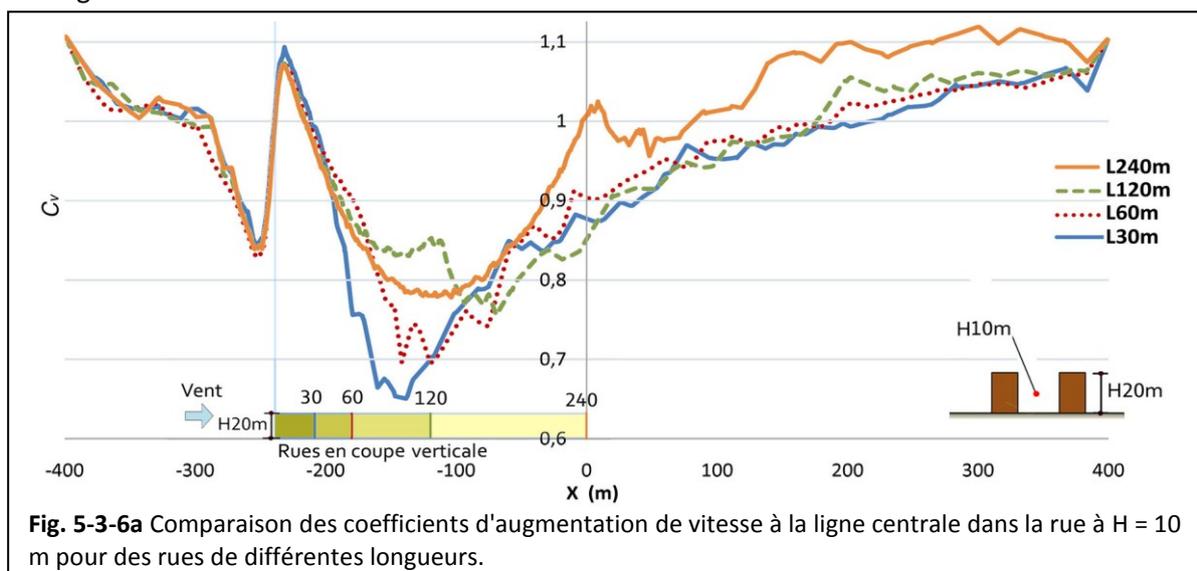


Concernant les valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse sur les lignes centrales au-dessus du toit à plusieurs altitudes (*Fig. 5-3-5a, b, c, d*), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Les vents en amont ont presque les mêmes vitesses pour toutes les longueurs de rue. Par contre, les vents en aval d'une longue rue sont plus forts dessus les bâtiments que les vents d'une courte rue.

2) Pour les rues de toutes longueurs, les vents les plus forts apparaissent au-dessus du front de toiture du bâtiment et le plus grand coefficient d'augmentation de la vitesse diminue avec la hauteur de l'altitude d'évaluation. Tandis que la longueur balayée à grandes vitesses (voir la longueur horizontale du pic de courbe où $C_v > 1$) est plus grande à une haute altitude, qui est une condition importante pour choisir la taille d'une éolienne. Donc une altitude adaptée peut être trouvée à la fois quand le coefficient de l'effet de concentration et la zone exploitable du vent concentré sont assez grands.

3) A l'exception d'une partie très limitée au-dessus du front de bâtiment (les pics), les vents sont généralement moins forts que les vents libres pour tous les modèles de rue. Ainsi, entre les rues de toutes les longueurs d'étude, l'effet d'augmentation de la vitesse du vent s'accroît et puis diminue avec l'allongement de rue. Celle de $L = 60$ m est apparemment la plus intéressante pour développer l'énergie éolienne au-dessus du toit en amont.



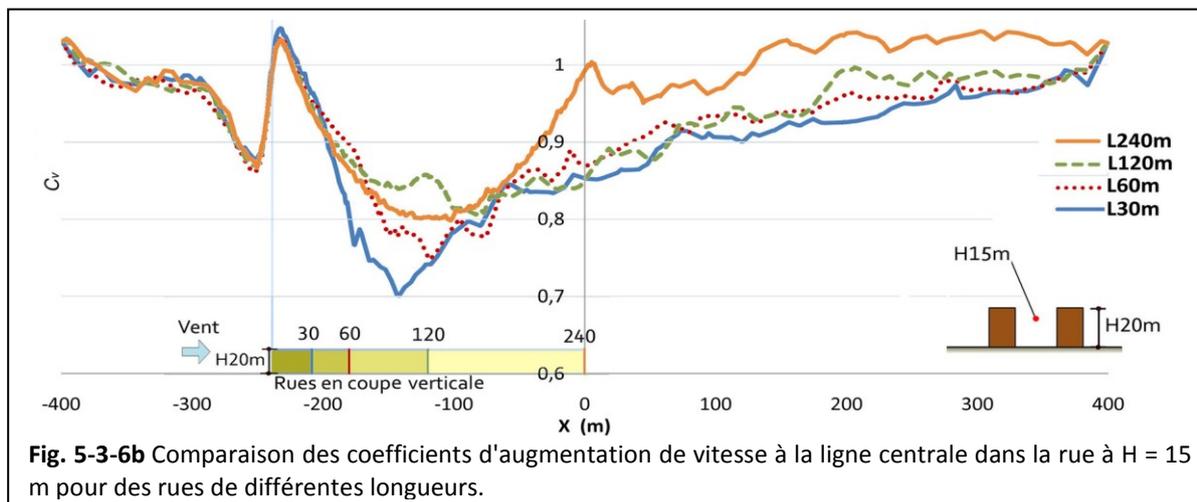


Fig. 5-3-6b Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à H = 15 m pour des rues de différentes longueurs.

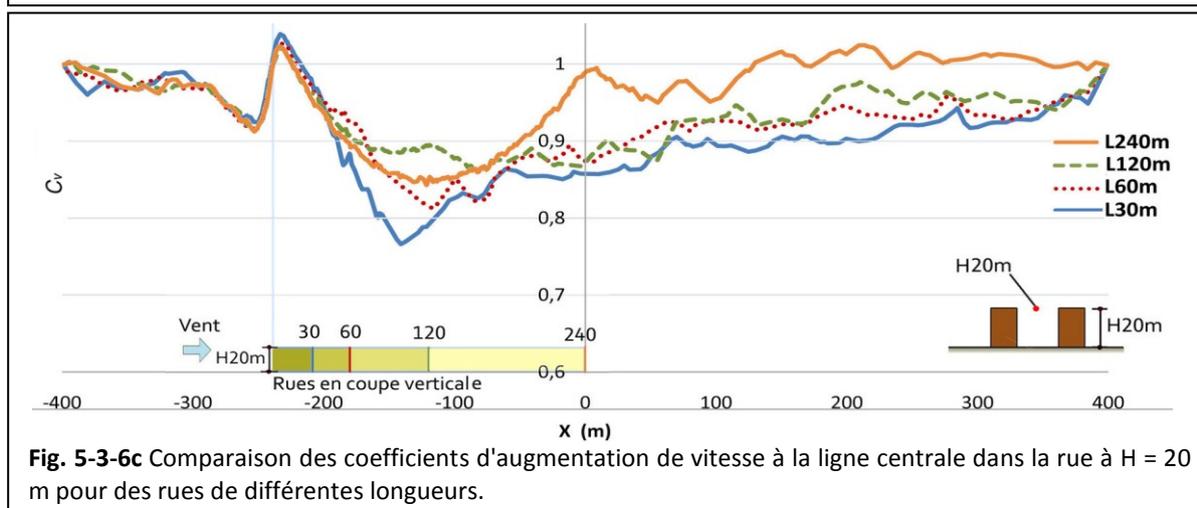


Fig. 5-3-6c Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à H = 20 m pour des rues de différentes longueurs.

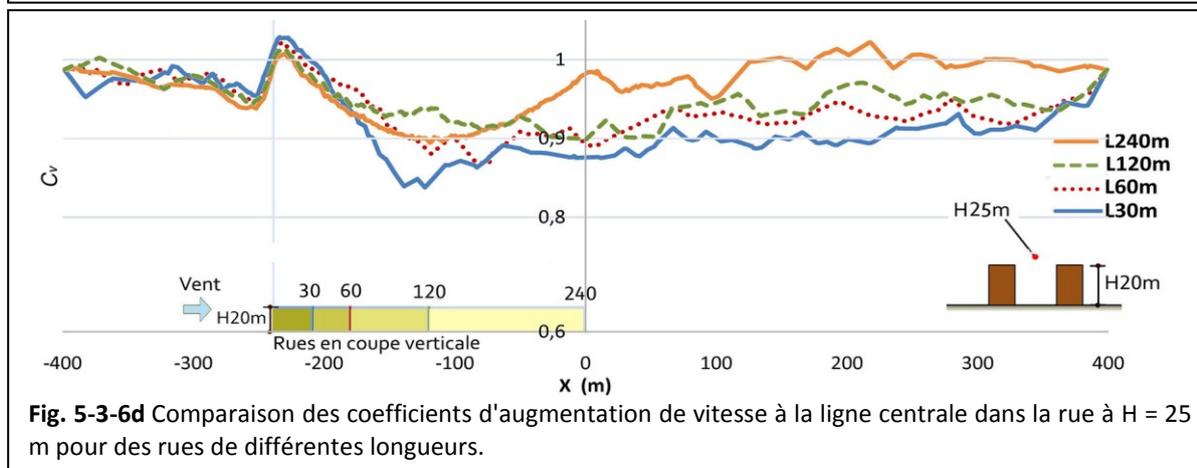


Fig. 5-3-6d Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à H = 25 m pour des rues de différentes longueurs.

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse sur les lignes centrales parallèles de la rue à plusieurs niveaux (*Fig. 5-3-6a, b, c, d*), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) En amont, les vents pour tous les rues ont presque les mêmes vitesses. En aval de proche, la plus courte rue a un coefficient un peu plus élevé qu'une longue rue. Par contre, en aval un peu loin, le vent dans la rue plus longue est beaucoup plus fort que celui dans une faible rue. Concernant l'amplitude des courbes présentées, le changement du vent traversant une courte rue est plus grand que celui traversant une longue rue.

2) quand la hauteur du point de test est plus élevée, les coefficients d'augmentation de vitesse sont moins variés tout au long du champ du vent : les valeurs de crêtes deviennent moins grands et les valeurs de vallée deviennent plus grands. C'est-à-dire que les vents sont plus influencés par l'environnement bâti au niveau bas qu'au niveau haut. En outre, quand la hauteur est plus que 15 m,

les vents sont généralement moins forts que les vents libres, en vue que la partie de courbe où $C_v > 1$ diminue avec la hauteur du teste. Dans ce cas là, pour développer l'énergie éolienne dans la rue, il faut penser à une hauteur adaptée où la magnitude de vitesse y est grande avec des effets de concentration.

5.3.3 Potentiel éolien de deux bâtiments décalés

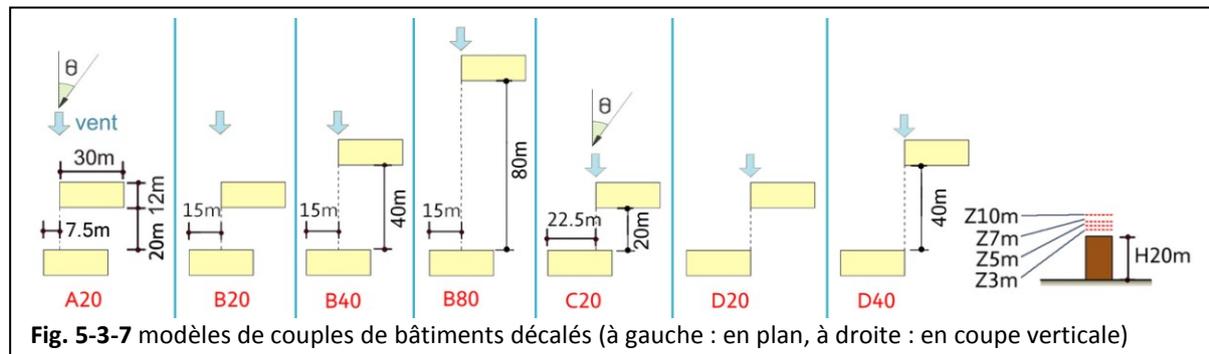


Fig. 5-3-7 modèles de couples de bâtiments décalés (à gauche : en plan, à droite : en coupe verticale)

A la base du modèle de deux barres de référence ($W*L*H = 12m*30m*20m$), plusieurs groupes de deux bâtiments avec différents décalages sont testés (Fig. 5-3-7). Modèles A20, B20, C20 et D20 ont une même séparation ($D = 20\text{ m}$) dans la direction du vent mais avec différents décalages perpendiculaire à la direction du vent ($d = 7.5\text{ m}, 15\text{ m}, 22,5\text{ m}, 30\text{ m}$). Modèles B20, B40, B80 ont un même décalage ($d = 15\text{ m}$) mais différentes distances de séparation ($D = 20\text{ m}, 40\text{ m}, 80\text{ m}$). Le groupe du modèle D20 et D40 est établi pour assurer les performances du groupe de décalage (modèles de série B). Quatre altitudes d'évaluation sont considérées ($Z = 3\text{ m}, 5\text{ m}, 7\text{ m}$ et 10 m) et neuf angles d'incidence du vent sont appliqués : $\theta = \pm 75^\circ, \pm 60^\circ, \pm 45^\circ, \pm 30^\circ$ et 0° . Les choix des angles irréguliers sont pris en raison de la forme particulière de la configuration décalée et de l'effet d'augmentation de la vitesse du vent relativement important comparé avec les autres angles d'incidence.

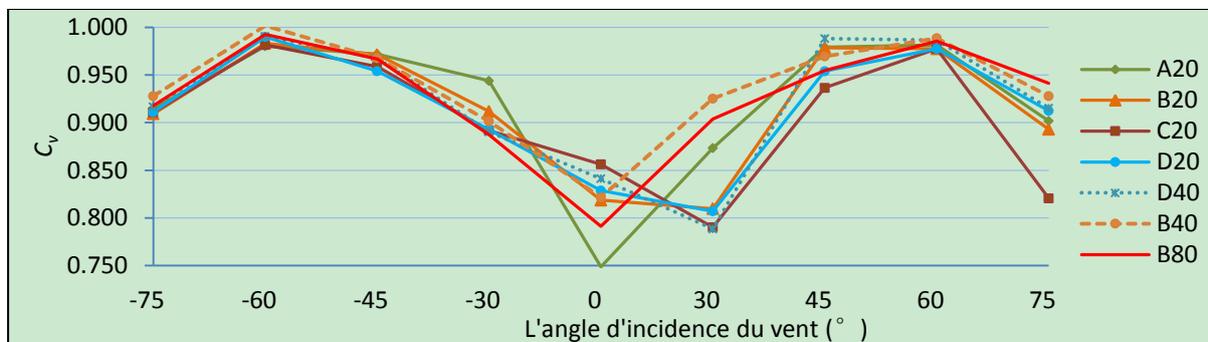


Fig. 5-3-8a Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 3\text{ m}$).

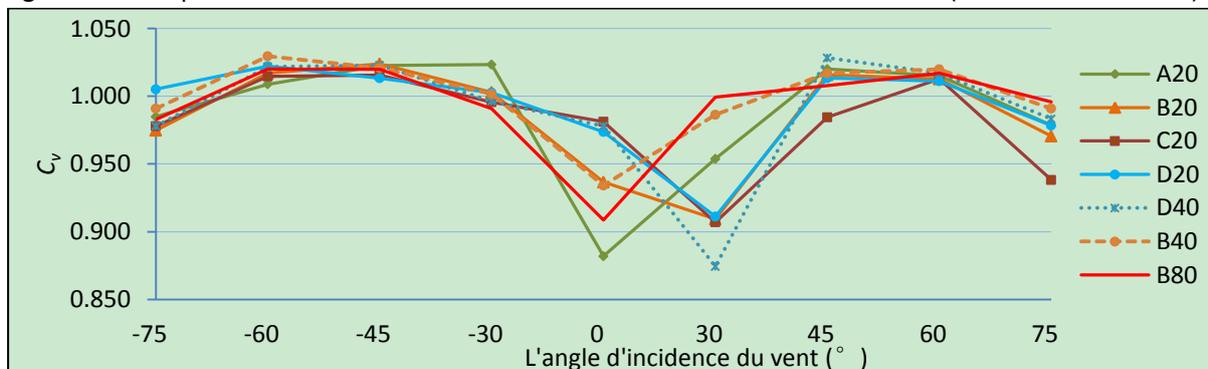


Fig. 5-3-8b Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 5\text{ m}$).

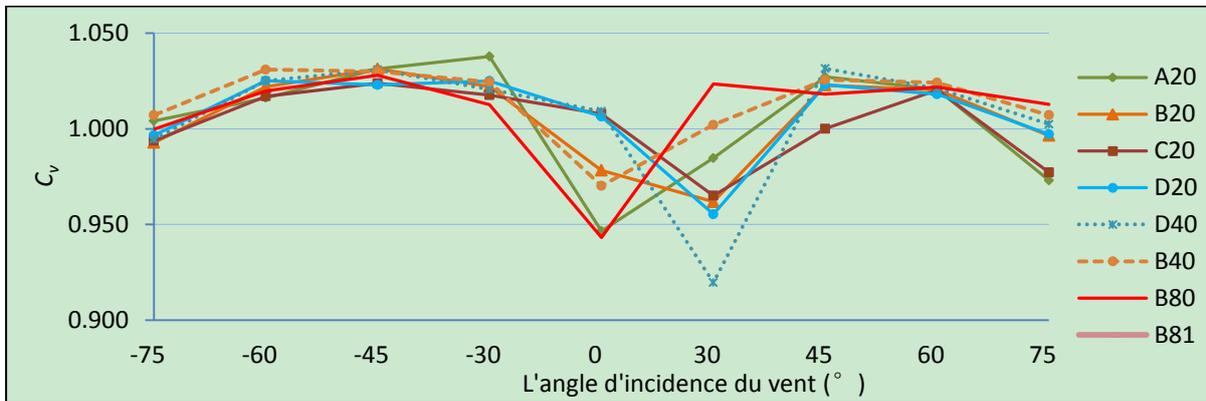


Fig. 5-3-8c Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 7$ m).

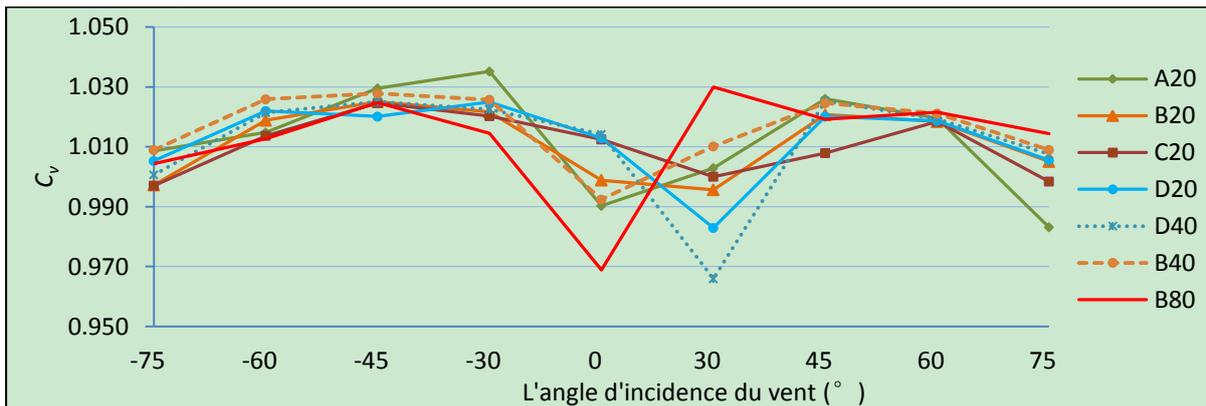


Fig. 5-3-8d Comparaison sur le coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 10$ m).

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse du vent (Fig. 5-3-8a, b, c, d), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) La plupart des modèles ont une valeur maximale autour de l'angle d'incidence de -60° ou -45° , alors que les valeurs à l'angle de 60° et 45° sont aussi bonnes mais un peu moins grandes à cause de la configuration asymétrique.

2) quand l'altitude d'évaluation s'élève, la valeur de crête bouge plutôt de deux côtés au centre, c'est-à-dire, elle est plutôt autour de $-60^\circ/60^\circ$ au niveau bas ($Z = 3$ m) et devient plutôt autour de $-45^\circ/45^\circ$ au niveau haut ($Z = 10$ m).

3) Concernant à la vitesse du vent libre, il faut que l'altitude d'évaluation soit plus de 5 m afin de pouvoir profiter du vent concentré au-dessus du toit (où $C_v > 1$).

4) Parmi les modèles de différents décalages mais avec la même distance de séparation (A20, B20, C20 et D20), le modèle A20 semble être un bon choix et son meilleur angle d'incidence est -30° .

5) Entre les modèles avec les mêmes décalages (D20 et D40, ou B20, B40 et B80), la valeur maximale du coefficient d'augmentation s'accroît simplement, ou s'accroît avant et puis diminue, avec la croissance de distance entre les deux bâtiments. C'est-à-dire qu'il doit y avoir une meilleure distance de séparation pour obtenir la maximum d'effet de concentration du vent, à un certain angle d'incidence.

5.3.4 Potentiel éolien de deux bâtiments perpendiculaires et symétriques

Pour évaluer l'impact de la forme du couple de barres en perpendiculaire, deux barres ($W \cdot L \cdot H = 6\text{m} \cdot 15\text{m} \cdot 10\text{m}$, par défaut) identiques et symétriques à la ligne de mi-angle sont choisies (Fig. 5-3-9). modèles avec différentes longueurs (L), largeurs (W), hauteurs (H), angles d'incidence du vent (γ compris le mode de convergence et le mode de divergence) sont comparés et les résultats à différentes altitudes d'évaluation au-dessus du toit sont analysés.

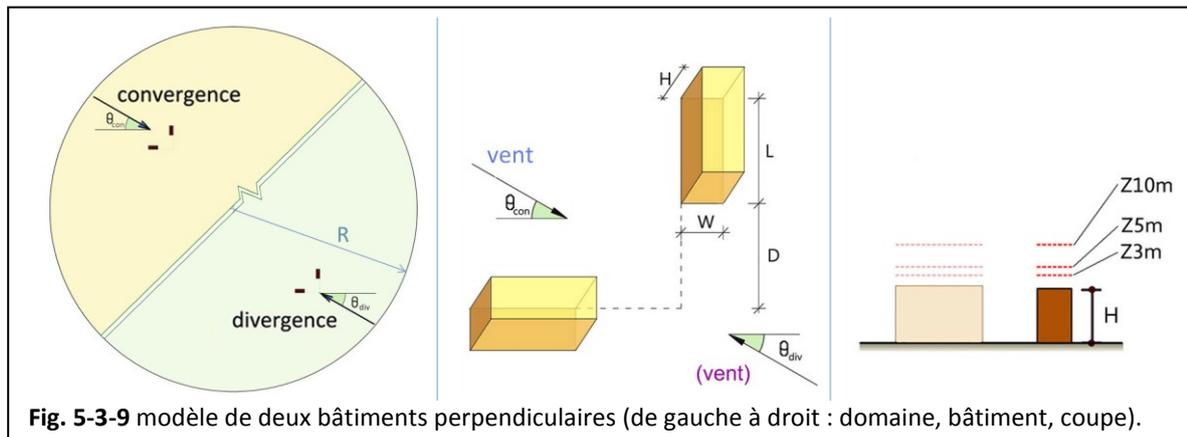


Fig. 5-3-9 modèle de deux bâtiments perpendiculaires (de gauche à droit : domaine, bâtiment, coupe).

Les détails des résultats sont présentés par Wang *et al.* (2015). Les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) 45° est le meilleur angle d'incidence dans la plupart de cas pour exploiter un maximum potentiel éolien, 30° ou 60° est parfois aussi un bon choix.

2) Avec le vent incident en mode convergence, le potentiel éolien au-dessus du toit (par l'indicateur m) augmente sensiblement avec la distance de séparation entre les deux côtés du coin. Alors qu'avec le vent incident en mode divergence, il diminue assez lentement avec l'élargissement de coin.

3) Pour les bâtiments bas, le mode d'entrée convergente doit être évitée pour le développement de l'énergie éolienne. Pour les bâtiments élevés, il y a très peu de différence entre les deux modes d'incidence du vent.

4) Par rapport à un seul bâtiment isolée, la plupart des cas de deux barres perpendiculaires étudiées ici ont montré une plus grande densité de l'énergie éolienne sur le toit.

5) En générale, les bâtiments couvrant une petite zone du plan (avec une petite longueur ou largeur) avaient plus de densité d'énergie éolienne que les bâtiments couvrant une grande zone de plan. Toutefois, le montant total de l'énergie produite et l'efficacité économique doit être considéré dans une situation réelle.

6) Avec l'élévation de l'altitude d'évaluation, le coefficient C_p s'accroît au début et descend après. Il semble y avoir une altitude optimale sur le toit où un maximum d'effet de concentration du vent peut être atteint.

5.3.5 Potentiel éolien de deux bâtiments en coin symétrique avec des angles variés

A la base du modèle du couple de bâtiments de référence ($W \cdot L \cdot H = 12\text{m} \cdot 30\text{m} \cdot 20\text{m}$) en coin, différents angles de coin ont été définis et testés ($\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ et 180°). Les noms des modèles sont marqués par le mode d'entrée du vent et l'angle de coin, e.g. 'C60' signifie 'mode de convergence, $\alpha = 60^\circ$ ' (Fig. 5-3-10). La distance entre la bâtiments et le point de coin en commun est la même pour tous les cas dans une groupe. En fait deux groupes de longueur de bras sont considérés ($D = 45\text{ m}, 90\text{ m}$). Sur la base des les résultats de deux bâtiments perpendiculaires et symétriques, nous n'appliquons qu'un angle d'incidence à la bissectrice de coin dans cette partie. En outre, quatre altitudes d'évaluation ($Z = 3\text{ m}, 5\text{ m}, 7\text{ m}, 10\text{ m}$) sont étudiées pour analyser l'impact de l'angle de coin sur le potentiel éolien au-dessus du toit.

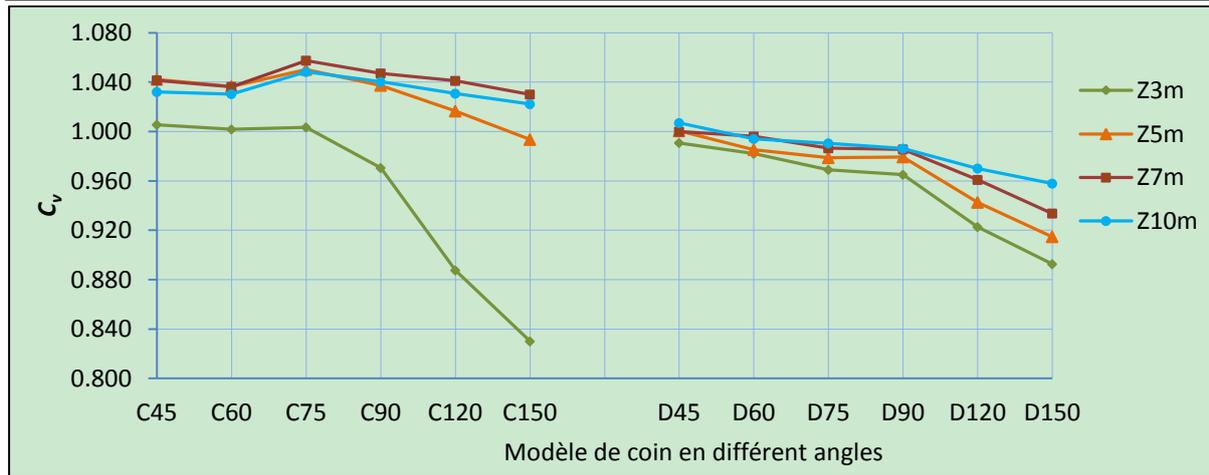
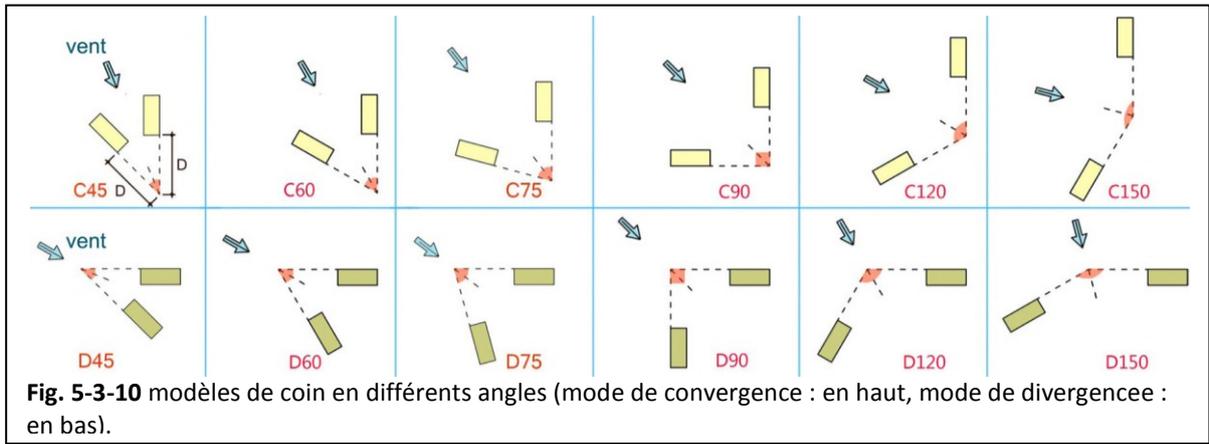


Fig. 5-3-11a Coefficient d'augmentation de la vitesse aux différentes altitudes d'évaluation ($D = 45$ m).

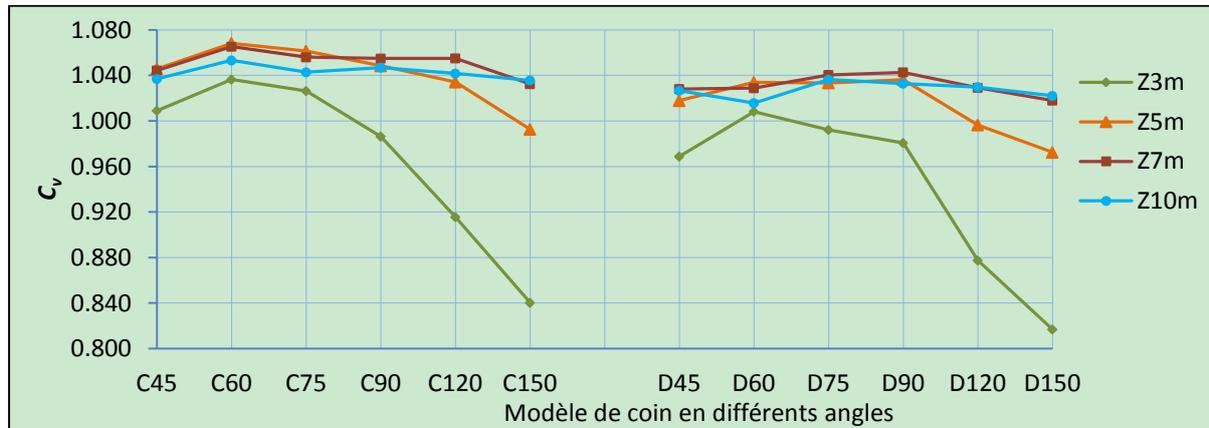


Fig. 5-3-11b Coefficient d'augmentation de la vitesse aux différentes altitudes d'évaluation ($D = 90$ m).

Concernant les résultats du coefficient d'augmentation des modèles en coin avec différents angles et à plusieurs altitudes d'évaluation (Fig. 5-3-11a, b), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Pour les modèles en mode de convergence, 75° semble être le meilleur angle de coin pour avoir les vents plus forts au-dessus du toit, alors que pour les modèles en mode de divergence, c'est plutôt 45° ou un angle plus petit.

2) Avec les mêmes formes de configuration, les coins en mode de convergence sont généralement plus ventés au-dessus du toit que les coins en mode de divergence, sauf quelques cas à l'altitude de Z3m (C120, C150). De plus, à partir d'une altitude pratique ($Z > 5$ m), les vents sur les toits des modèles en mode de convergence sont également plus forts que les vents libres ($C_v > 1$), alors qu'en mode de divergence, les modèles du groupe de $D = 45$ m sont toujours moins ventés que le vent libre ($C_v < 1$)

3) Pour différentes altitudes d'évaluation au-dessus du toit, il faut que $Z > 3$ m afin d'obtenir un effet de concentration de vent. C'est le cas pour tous les deux groupes en mode de convergence et pour le groupe D = 90 m en mode de divergence.

4) A mesure que la longueur de bras du coin (D) devienne plus grande (de 45 m à 90 m), les résultats du coefficient d'augmentation de la vitesse sont généralement plus importants qu'auparavant : pour les modèles en mode de convergence, on a une augmentation de 1.4 % entre les deux groupes et une augmentation de 3.4 %. D'ailleurs, pour les influence des angles de coin, en mode de convergence le meilleur angle de coin change de 75° à 60° , par contre en mode de divergence le meilleur angle plutôt passe de 45° (ou plus petit) à 75° ou encore 90° .

5.4 Simulation de trois bâtiments décalés

Sur les bases des les résultats du potentiel éolien autour (plutôt au-dessus du toit) d'un et deux bâtiments, des études de trois bâtiments sont rajoutées pour découvrir un peu plus les interactions du vent dans les modèles simples avant commencer avec des modèles complexes. Ici à la base du bâtiment de référence ($W*L*H = 12m*30m*20m$), des groupes d'une configuration de trois bâtiments en parallèle avec l'un de milieu décalés sont modélisés (Fig. 5-4-1a). Le modèle A avec trois barres posées en parallèle est comme un modèle de base. Dans le groupe des modèles B (B1-B6), on déplace progressivement la barre du milieu à gauche à un pas de $L/4 - L/2$ jusqu'à une distance de $2L$. Alors dans le groupe des modèles C (C1-C3), on déplace la barre du milieu à droite à un pas de $L/2 - 1L$ jusqu'à une distance de $2L$. Six angles d'incidence du vent ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ et 75°) sont considérés pour tous les modèles. Deux altitudes d'évaluation ($Z = 10$ m, 15 m) sont étudiées. Les exemples de distribution de contours de vitesse du vent avec l'angle d'incidence $\theta = 45^\circ$ et à la coupe $H = 20$ m pour chaque modèle sont donnés dans la Fig. 5-4-1b.

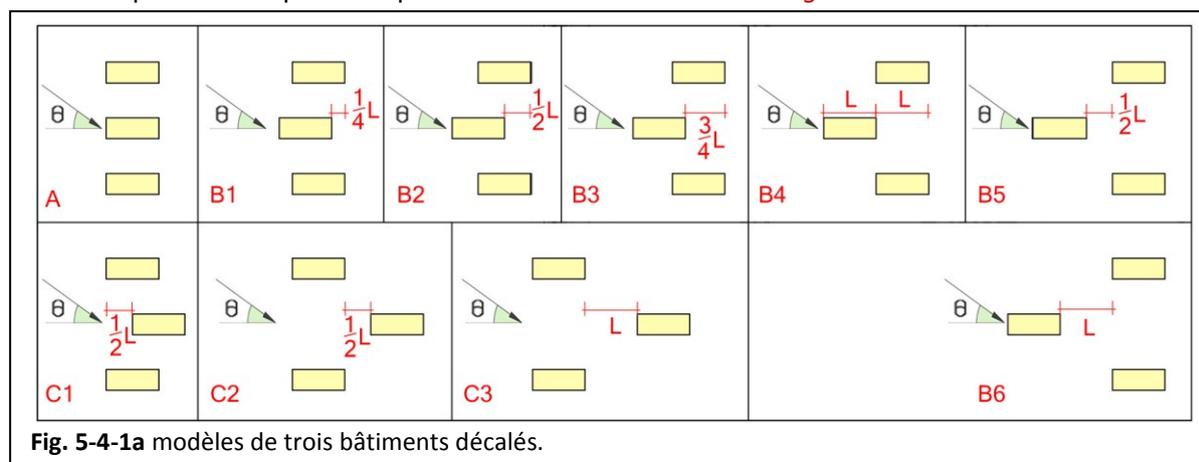


Fig. 5-4-1a modèles de trois bâtiments décalés.

Concernant les ratios de vitesse du vent au-dessus du toit du bâtiment central en deux altitudes ($Z = 10$ m et $Z = 15$ m) entre les différents configurations de décalage (Fig. 5-4-2), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) Pour le modèle A le meilleur angle d'incidence pour avoir un vent plus fort au-dessus du toit, c'est 45° . Pour les modèles du groupe B, c'est 45° ou 30° à une altitude moyenne ($Z = 10$ m) et 45° ou 60° à haute altitude ($Z = 15$ m). Pour les modèles du groupe C, c'est toujours 30° .

2) Concernant l'amplitude de changement de les résultats du coefficient d'augmentation de la vitesse en changeant d'angle d'incidence du vent, celles des modèles C sont beaucoup plus importantes que celles du modèle A et des modèles B. Pourtant, les vents des modèles C ne sont pas toujours plus faible que ceux des modèles B, e.g. le modèle C1 est plutôt plus venté que le modèle B4 à ses propres meilleures angles d'incidence.

3) Les coefficients moyens d'augmentation pour les quatre angles d'incidence (15°, 30°, 45° et 60°) sont donnés dans la Fig. 5-4-2c. Ils nous montrent que le bâtiment central peut trouver une optimisation d'énergie éolienne au-dessus du toit dans le modèle B2.

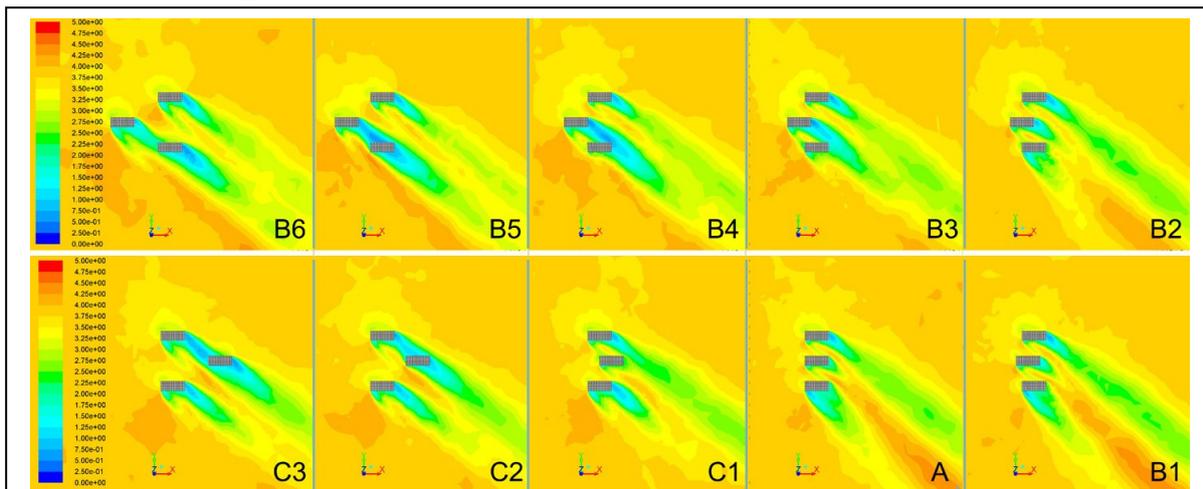


Fig. 5-4-1b Représentation de contours de vitesse des modèles de trois bâtiments décalés (plan à H = 20 m, $\theta = 45^\circ$).

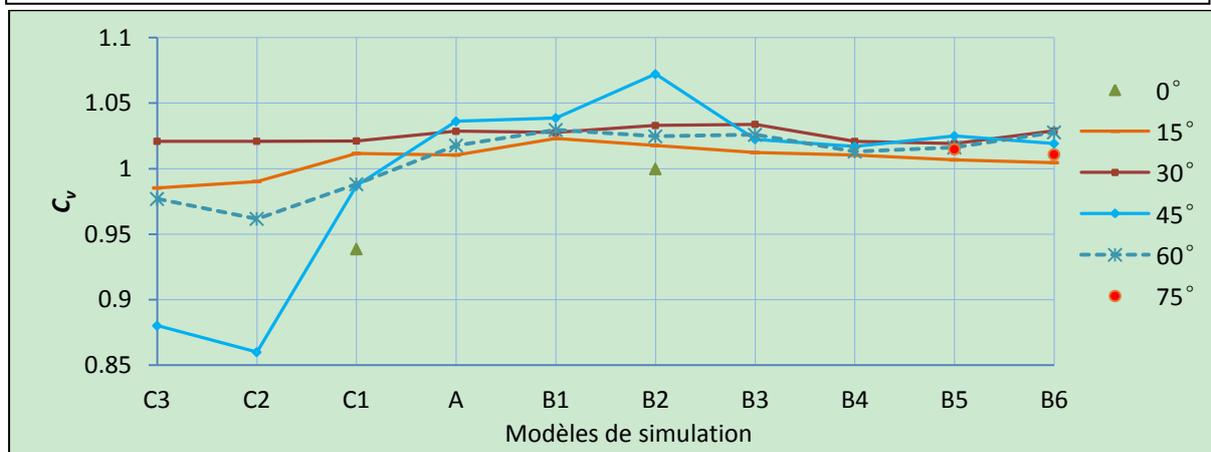


Fig. 5-4-2a Coefficient d'augmentation de la vitesse aux différents angles d'incidence ($Z = 10$ m).

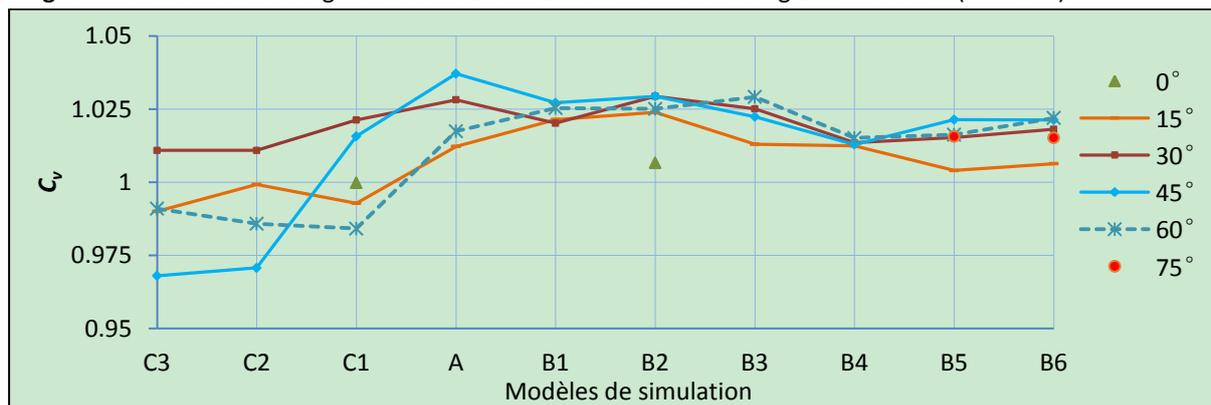


Fig. 5-4-2b Coefficient d'augmentation de la vitesse aux différents angles d'incidence ($Z = 15$ m).

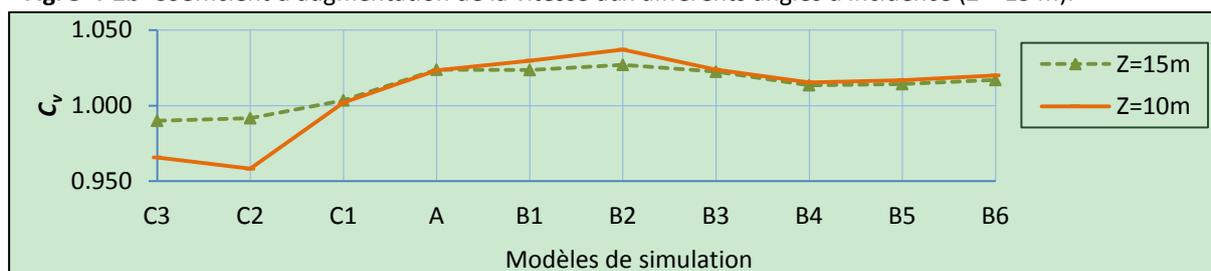


Fig. 5-4-2c Coefficient moyenne d'augmentation de vitesse aux différentes altitudes d'évaluation ($\theta = 15^\circ - 60^\circ$)

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés est simulé et discuté. Tout d'abord, des indicateurs sont proposés pour évaluer l'énergie éolienne dans l'environnement bâti. L'indicateur M est défini pour évaluer le potentiel éolien total dans une surface, notamment dans des parcelles de forme en plan au-dessus du toit d'un bâtiment lorsque l'espace au-dessus du toit est l'endroit le plus prometteur pour développer l'énergie éolienne au milieu urbain. L'indicateur D est défini comme la densité d'énergie éolienne par unité de surface. L'indicateur C_p est défini comme le coefficient d'augmentation de la vitesse pour évaluer l'effet de concentration du vent. L'indicateur F est défini pour évaluer l'effet général d'augmentation d'énergie éolienne d'une surface. Les méthodes de calcul sont expliquées et la précision, la praticabilité et le champ d'application des indicateurs sont aussi évalués. Les résultats montrent que l'utilisation directe de la vitesse moyenne pondérée par la surface de l'élément dans le code FLUENT inclut une marge erreur moyenne de 3-7 % sur les espaces d'étude. En comparaison, l'indicateur M donne un résultat précis mais prend plus de temps pour traiter des images de contours de vitesse. La précision de classes de vitesse dans une surface est évaluée. Les résultats montrent que l'influence de la précision de classe de vitesse est assez faible ou insignifiante (moins de 0,5 %). Ceci nous permet donc d'utiliser une classe un peu plus large qui nous fait gagner du temps de calcul.

Ensuite, avec les indicateurs proposés, différentes formes d'un bâtiment isolé sont analysées. Lorsque la direction du vent dominant n'est pas donnée, les vents tout autour d'un bâtiment avec un écart de 15° sont considérés et leurs impacts sont étudiés également. Deux ou trois altitudes d'évaluation au-dessus du toit sont analysées pour rendre un résultat plus pertinent. En raison de la taille et de la position variée de zone du vent exploitable à côté d'un bâtiment en plan, la comparaison du potentiel éolien proche de murs n'est pas facile à effectuer dans une manière égale pour tous les modèles. On ne peut pas comparer raisonnablement le rendement d'énergie éolienne à côté du mur avec une certaine distance de mur. De plus, les vents proches des côtés du mur sont généralement moins forts qu'au-dessus du toit à cause de sa hauteur inférieure.

Pour les modèles des bâtiments de différentes formes de plan mais de même surface en plan et de même hauteur, les résultats sur l'indicateur M montrent que les vents au-dessus du toit d'un modèle à plan rond est plus fort à proximité de toit mais devient très faible lorsque l'altitude s'élève. Les performances du modèle à plan rectangulaire et de plan carré sont beaucoup ressemblantes même si le plan carré est un peu plus venté à l'altitude élevée. Concernant l'impact de l'angle d'incidence du vent pour avoir un effet du vent plus fort, un angle de 45° est meilleur pour le plan carré et de 60° pour le plan rectangulaire. Comparés avec le vent libre, tous les modèles peuvent avoir un effet de concentration du vent à une altitude praticable au-dessus du toit.

Sur les résultats de simulation de l'impact de longueur d'un bâtiment rectangulaire, nous trouvons que généralement la densité D diminue avec la croissance de longueur. Donc le modèle d'une longueur plus faible est plus venté. Pourtant, la somme d'énergie doit être considérée. En fait, il prend compte à la fois la vitesse du vent et la surface de zone exploitable. Le modèle d'une faible longueur peut être moins productif en somme d'énergie même si le vent est fort.

Sur les résultats de simulation de l'impact de largeur d'un bâtiment rectangulaire, nous remarquons que pour la barre d'une certaine longueur et de hauteur il y a une largeur la plus adaptée qui permet d'avoir une densité maximale d'énergie éolienne au-dessus du toit (sans compte du vent dominant). Dans l'exemple de simulation c'est $W = 12\text{m}$ la meilleure (parmi $W = 8\text{ m}$, 12 m , 16m et 20 m) pour une barre de 30 m de long et 20 m de haut. De plus, à différentes angles d'incidence du vent, le choix de meilleure largeur se varie.

Sur la simulation de l'impact de forme de toiture d'un bâtiment rectangulaire, les résultats de l'indicateur C_p au-dessus du toit peuvent être conclus comme suivants. La toiture ronde (en section

verticale) a plus d'effet de concentration du vent qu'une toiture en pente. La hauteur où il est la plus fort est $H = 25$ m lorsque le bâtiment est de 20 m haut. Parmi les modèles de toiture en pente, la meilleure pour capter l'énergie éolienne est à deux pans avec une pente de 15° et sa meilleure hauteur de capture est environs $H = 27$ m. La pente de toiture moins ventée est 10° , puis 20° , 30° et enfin 45° . Avec la même hauteur moyenne, la toiture à une pan face au vent est moins ventée que la toiture à deux pans, pourtant elle est plus forte que la toiture à une pan avec dos contre le vent.

Sur la simulation de l'impact de forme de coin modifié en plan à une faible portion (1/20 de taille de taille de bâtiment dans l'exemple), les résultats de l'indicateur C_v au-dessus du toit peuvent être conclus comme suivants. Le modèle de coin tronqué et le modèle de coin concave sont généralement mieux que le modèle de coin arrondi. De plus, les deux au vent normal sont un peu mieux que le modèle de coin sans modification, dite le modèle de référence. Par contre, au vent oblique ($\Theta = 30^\circ$) ils sont pires, notamment à basse altitude dessus le toit. L'impact de forme de coin modifié au bord de toiture en coupe verticale est également étudié. Les résultats montrent que tous les modèles avec des coins modifiés sont plus ventés à proximité du toit que le modèle de référence. Pourtant à haute altitude d'évaluation ils montrent non plus des avantages. Parmi les différents coins obliques modifié, c'est le coin tronqué de 30° qui a une vitesse moyenne du vent plus forts au-dessus du toit. Le coin arrondi a une puissance ressemblante comme le coin tronqué de 30° .

Sur la simulation de l'impact de cour d'un bâtiment rectangulaire, plusieurs formes de cour avec différentes tailles et différents nombres sont testées. Les résultats de l'indicateur M montrent que généralement les modèles avec des cours sont plus ventés au-dessus du toit que le modèle sans cour. Le modèle qui a la plus grande porosité atteint généralement le plus grand potentiel éolien au-dessus du toit. Parmi les modèles de même porosité de cour, l'influence de l'angle d'incidence est importante.

Sur la simulation de l'impact de passage du vent, plusieurs modèles de passage du vent sont testées. Les résultats de l'indicateur C_v sur les modèle de passage du vent au-dessus du toit avec différentes casquettes au-dessus du toit montrent que les vents dessous les casquettes (dans le passage) sont plus forts qu'à la même hauteur au-dessus du toit du modèle de référence sans casquette. Par contre, le vent en est moins fort au-dessus. Le modèle avec une casquette relativement plus haute à partir du toit est plus favorable pour profiter le vent dans le passage. Une casquette débordée (e.g. 1 m) du front a un effet fort pour accumuler plus de vent dans le passage. De plus, la raccourcissement de l'arrière de la casquette aussi permet de renforcer l'effet de concentration du vent. Les résultats de l'indicateur C_v sur les modèle de passage du vent au rez-de-chaussée dessous le bâtiment montrent que tous les modèles avec les passages du vent au Rdc sont normalement plus ventés au-dessus du toit que le modèle sans le passage du vent. Rajout d'une dalle au milieu dans le Rdc vide peut renforcer l'effet de concentration du vent dans le passage entre la dalle et le plafond de Rdc. La largeur verticale du passage doit être assez grande pour obtenir un effet de concentration le plus fort. L'ajout d'une coin avec une angle vers $45 - 60^\circ$ dans le passage du vent au Rdc peut favoriser le capture d'énergie éolienne au-dessus du toit ou dans le passage au Rdc.

Sur la simulation de l'impact d'angle d'incidence, plusieurs modèles de rapport de W/L et de H/L différent sont testées. Les résultats de l'indicateur C_v montrent que le meilleure angle d'incidence pour l'effet d'augmentation de la vitesse du vent est plus grand lorsque le rapport W/L s'accroît et 45° est meilleur pour le modèle carré. D'ailleurs, comme la hauteur de bâtiment est plus élevée pour la même forme de plan, le meilleure angle d'incidence du vent diminue.

Sur la simulation de l'impact de forme sur le vent à l'arrière du bâtiment, différentes variantes de hauteur, de longueur et de largeur d'un bâtiment est évalués. Nous trouvons que les vents à l'arrière d'un bâtiment sont ralentis avec la hauteur et la longueur du bâtiment, alors qu'ils sont renforcés avec la distance de mesure par rapport au bâtiment en amont. L'impact de la largeur est insignifiant. A basse altitude, $Z < 1,25H$, l'impact du paramètre D est le plus important, puis ensuite les

paramètres H et L. A une altitude importante, $Z > 2,5H$, les paramètres L, W et D ont un impact insignifiant sur les vents à l'arrière du bâtiment.

Ensuite, différentes configurations de deux bâtiments et de trois bâtiments identiques sont étudiés. En raison de nombreux paramètres qui y concernent, e.g. La taille de bâtiment, la configuration d'association, la distance de séparation, etc., les variants de chaque groupe de modèle sont tellement nombreux. Donc au lieu de faire des recherches profondes et des évaluations complètes, des exemples qui ne concernent que quelques paramètres sont choisis pour présenter la méthode de recherche sur l'évaluation d'énergie éolienne autour de bâtiments.

Sur la simulation de deux bâtiments posés en ligne, plusieurs modèles de différentes séparations, de différentes hauteurs, de différentes longueurs et largeurs du bâtiment sont considérés. Les résultats de l'indicateur C_v montrent que l'effet de concentration du vent s'accroît généralement avec l'augmentation de la séparation entre les deux bâtiments jusqu'à une distance très importante. Pourtant il diminue avec l'augmentation de la longueur ainsi la largeur du bâtiment. Une hauteur assez importante est nécessaire pour avoir un effet de concentration au-dessus du toit dans un groupe de deux bâtiments, comparée avec le cas d'un bâtiment isolé.

Sur la simulation de deux bâtiments en parallèle, plusieurs modèles en forme de rue avec différentes longueurs sont étudiés. Les résultats de l'indicateur C_v sur des lignes centrales au-dessus du toit et au milieu de rue à des différentes hauteurs sont trouvés. Nous trouvons que les vents dessus les bâtiments de rue sont généralement moins efficaces que les vents libres aux de mêmes hauteurs. Les vents dessus des bâtiments d'une longue rue sont plus forts en aval que ceux d'une courte rue. Un coefficient d'augmentation de la vitesse le plus grand est trouvé à basse altitude au-dessus du toit. Alors la zone de grande vitesse avec des effets de concentration est trouvée à une haute altitude. Donc une altitude adaptée peut être trouvée où à la fois le coefficient de l'effet de concentration et la surface de la zone du vent concentré sont assez grands. L'effet d'augmentation de vent s'accroît avant et puis diminue avec l'allongement de rue. Donc une longueur la plus efficace pour développer l'énergie éolienne au-dessus du toit peut être trouvée. Concernant les résultats au milieu de rue aux hauteurs différentes, nous trouvons que l'effet de concentration du vent est plus fort en aval proche des bâtiments chez une courte rue mais en aval de loin chez une longue rue. Un équilibre doit être trouvé lorsque l'effet de concentration du vent diminue avec l'augmentation d'altitude mais la magnitude de vitesse du vent s'accroît avec.

Sur la simulation de deux bâtiments décalés, plusieurs modèles de différents décalages et de différentes distances de séparation sont étudiés. Les résultats de l'indicateur C_v montrent que la plupart de modèles ont des vents les plus forts autour de l'angle d'incidence de -60° ou -45° . Alors qu'à 60° et 45° ils sont aussi bons mais un peu moins forts. L'angle d'incidence où l'effet de concentration du vent est le plus fort est plutôt autour de $-60^\circ/60^\circ$ à basse altitude au-dessus du toit et devient plutôt autour de $-45^\circ/45^\circ$ à une haute altitude. La distance de décalage et l'angle d'incidence sont très sensibles sur les résultats. L'effet de concentration du vent s'accroît au début et puis diminue avec la croissance de distance de séparation entre les deux bâtiments, qui signifie qu'il y a une meilleure distance pour avoir un maximum d'effet de concentration à un certain angle d'incidence du vent.

Sur la simulation de deux bâtiments perpendiculaires et symétriques, plusieurs modèles de différentes tailles de bâtiment, de différentes distances de séparation, et de différents angles d'incidence sont étudiés. Les résultats montrent que la densité d'énergie éolienne au-dessus du toit s'augmente au début et puis diminue avec la croissance de séparation de coin. Comparé avec un bâtiment isolé, le couple de bâtiments perpendiculaires peut avoir des effets de concentration du vent en mode de divergence pour tous les modèles et en mode de convergence pour les modèles d'une séparation importante. Comme l'altitude d'évaluation s'élève, la meilleure direction du vent change de 45° à $30^\circ / 60^\circ$. Le potentiel éolien est plus sensible en mode de convergence qu'en

mode de divergence en changeant la séparation de coin. En mode de convergence il vaudrait mieux une distance importante. Alors qu'en mode de divergence une faible distance est préférée pour obtenir le maximum d'énergie éolienne moyenne au-dessus du toit. Pour une couple des bâtiments bas le mode de divergence est affirmativement proposée au lieu du mode de convergence. Alors pour une couple des bâtiments hauts, l'avantage de l'un sur l'autre n'est pas évident. Sur l'impact de largeur et longueur de bâtiment, nous trouvons que la meilleure séparation de coin se varie pour des modèles de différentes longueurs. Généralement le modèle de la plus courte longueur a la plus haute densité d'énergie. La meilleure largeur se varie en dépendant de l'altitude d'évaluation, plus basse l'altitude plus faible largeur il faut. La meilleure distance de séparation de coin s'augmente plutôt avec la croissance de largeur de côté de coin.

Sur la simulation de deux bâtiments en coin symétrique des angles variés, plusieurs angles d'ouverture et deux distances entre les bâtiments et le point de coin en commun sont étudiés. Les résultats de l'indicateur C_v montrent qu'en mode de convergence 75° semble être le meilleur angle de coin pour avoir les vents plus forts au-dessus du toit, alors qu'en mode de divergence le meilleur angle est plutôt 45° ou un angle plus petit. Avec les mêmes formes de configuration, les coins en mode de convergence sont généralement les plus ventés au-dessus du toit que les coins en mode de divergence, et le phénomène est plus clair lorsque la longueur de bras est plus grande. De plus, à partir d'une altitude pratique les coins en mode de convergence ont toujours des effets de concentration du vent au-dessus du toit, alors qu'en mode de divergence il faut une longueur de bras assez importante pour obtenir l'effet de concentration. Ainsi, lorsque la longueur de bras devient plus grande, le meilleur angle de coin change de 75° à 60° en mode de convergence et de 45° (ou plus petit) à 75° (ou plus grand) en mode de divergence.

Pour les modèles de trois bâtiments, en raison de la complexité de configuration on ne choisit qu'un cas pour découvrir l'impact de forme bâtie sur le vent. Plusieurs groupes de trois bâtiments en parallèle dont celui du milieu est dégagé sont testés. Les résultats de l'indicateur C_v montrent que les meilleurs angles d'incidence pour différents modèles sont variés. Le bâtiment au milieu joue un rôle important sur la configuration de groupe. Une meilleure position du bâtiment au milieu peut être trouvée pour un maximum de rendement d'énergie éolienne du groupe.

Les résultats de simulations de modèles simplifiés permettent de comparer le potentiel éolien des différentes formes simples avec des conditions simplifiées. Ces résultats constituent une base de connaissance sur l'évaluation d'énergie éolienne de l'écoulement autour de bâtiments et aussi une référence pour des études précises dans les simulations à l'échelle de quartier.

6. Simulation de modèles complexes

Dans ce chapitre des modèles complexes sont considérés. Tout d'abord, des indicateurs de forme urbaine ont été choisis et définis pour identifier une forme urbaine à l'échelle de quartier, dont la dimension varie entre 200 à 500 m. Ensuite, deux indicateurs spécifiques sont analysés comme exemples. Les impacts de ces deux indicateurs morphologiques sur le vent et le bilan de l'énergie éolienne produite sont discutés. Ensuite, six modèles de quartier réel choisis à l'échelle du monde sont simulés et analysés. Les performances du vent dans ces différents modèles sont discutées et comparées en cherchant à déterminer des relations avec les indicateurs de forme urbaine. Enfin, sur la base du modèle de quartier, des modèles d'unité avec des bâtiments simplifiés ou avec des modifications sont testés. Quelques prototypes d'unité urbaine sont proposés.

6.1 Choix des indicateurs de forme urbaine pour évaluer le potentiel éolien

Dans la synthèse de bibliographie ([Chapitre 1.3.2](#)), on a remarqué que les paramètres de forme urbaine et les attributs de morphologie urbaine sont nombreux, en raison des domaines multidisciplinaires concernés : architecture (ventilation, ensoleillement, bilan énergétique, accessibilité), urbanisme (densité de construction, transport, qualité d'air, espace vert et public, usage des sols, etc.), démographique (densité d'habitant, statut social), géographie (climat, distribution d'espace), sociologie (sentiment d'appartenance, coutume), économie (revenus, niveaux de consommation) ou encore politique (réglementations, taxes, politiques locales). Dans notre approche sur l'analyse de l'écoulement du vent dans la ville, les paramètres choisis pour la forme urbaine portent sur la forme physique et les relations de configuration. Quelques indicateurs socio-économiques sont ajoutés dans la partie d'analyse locale et de l'application dans les cas réels ([Chapitre 7](#)). Nous concentrons sur les éléments physiques ayant une influence sur le vent à l'échelle de quartier, les paramètres et indicateurs de morphologie urbaine peuvent être résumés dans le [Tableau 6-1](#).

Tableau 6-1

Les indicateurs de vent et les paramètres de morphologie urbaine correspondants (selon [Bottema 1997](#), [Adolphe 2001](#), [Steemers 2002](#), [Edussuriya et al. 2011](#))

Indicateurs de vent	Attributs de morphologie urbaine	Paramètres et indicateurs de morphologie urbaine
Vitesse moyenne	Configuration générale des bâtiments.	Densité (CES, COS), compacité, porosité, sinuosité, densité de surface frontale au vent, hauteur moyenne des bâtiments, volume moyen de construction, complète ratio d'aspect.
Vitesse maximale	Forme des rues, des bâtiments et des espaces ouverts.	Taille des bâtiments les plus hauts, taille des rues spéciales.
Orientation	Forme des rues et des grands espaces ouverts.	Direction des rues, sinuosité, taille des espaces ouverts principales.
Intensité de turbulence	Forme et variété de bâtiments, rues et espaces ouverts, végétation.	Coins, côtés, façade et toiture de bâtiments en amont, changement de configuration des rues et des espaces ouverts, porosité, rugosité, occlusivité, densité de surface frontale, densité de végétation.

Quand on s'intéresse à l'évaluation du potentiel énergétique éolien, la vitesse moyenne est souvent considérée comme l'indicateur le plus important, pour les modèles généraux (formes simples, formes de bâtiment des unités), tandis que la vitesse maximale, l'orientation et la turbulence du vent sont considérés comme des indicateurs complémentaires pour évaluer la sécurité, le confort, la stabilité, le choix de technique d'éolienne et l'efficacité de rendement énergétique.

Pour les indicateurs de morphologie urbaine concernés, sur la base de paramètres simples comme la longueur, la largeur et la hauteur des bâtiments, dans les cas de modèles simples ([Chapitre 5](#)), Treize indicateurs ont été choisis pour décrire les caractéristiques morphologiques des modèles complexes à l'échelle de quartier.

(1) Coefficient d'emprise au sol (CES)

Le CES est défini comme l'emprise au sol par la construction, sachant qu'une partie du terrain reste souvent non bâtie pour d'autres fonctions urbaines (paysage, sanitaire, loisirs, etc.) :

$$CES = \lambda_p = \frac{\sum_i A_i}{S} \quad (\text{Equation 6-1})$$

où A_i est la superficie bâtie de rez-de-chaussée du $i^{\text{ème}}$ bâtiment et S représente la surface totale de terrain. Le CES est un indicateur pour décrire la densité de construction, notamment sur l'utilisation de sol.

(2) Coefficient d'occupation des sols (COS)

Le COS est défini comme la quantité de construction admise (en urbanisme) sur une propriété foncière en fonction de sa superficie :

$$COS = \lambda_a = \frac{\sum_{ij} (A_{ij})}{S} \quad (\text{Equation 6-2a})$$

où A_{iN} est la superficie bâtie du $j^{\text{ème}}$ étage du $i^{\text{ème}}$ bâtiment et S représente la surface totale de terrain. Si la superficie bâtie de chaque étage est la même pour chaque bâtiment et le nombre d'étage du $i^{\text{ème}}$ bâtiment est N_i , l'[Equation 6-2a](#) peut être écrit comme suit :

$$COS = \lambda_a = \frac{\sum_i (A_i N_i)}{S} \quad (\text{Equation 6-2b})$$

Le COS est un indicateur pour décrire la densité de construction, notamment par rapport à la capacité de construction sur le terrain.

(3) Ratio d'espace verts

Le ratio d'espace vert est défini comme le pourcentage d'emprise de sol occupé par des espaces verts (forêt, jardin, rivière, etc.) :

$$REV = \frac{\sum_i R_i}{S} \quad (\text{Equation 6-3})$$

Le REV est un indicateur qui peut être utilisé pour évaluer le confort aéralique. Même si la végétation a un impact sur le ralentissement direct du vent ([Melbourne 1987](#)), un espace vert peut avoir une force positive sur la vitesse moyenne du vent à une grande échelle ([Miao et al. 2013](#)). Pourtant, lorsque les formes des arbres et des buissons sont difficiles à modéliser et l'état de leurs porosités dépendent de la saison, nous ne considérons pas cet indicateur dans la simulation CFD. Néanmoins, pour évaluer l'environnement aéralique dans un projet d'urbanisme, cet indicateur est intéressant.

(4) Densité de surface frontale ([Raupach 1992](#))

$$\lambda_f = \frac{\sum_i F_i}{S} \quad (\text{Equation 6-4})$$

où F_i est la superficie frontale normale au vent du $i^{\text{ème}}$ bâtiment. Ce paramètre correspond à un angle d'incidence particulier du vent. Pour les cas de modèle simple où le vent dominant n'est pas saisi, on ne prend pas en compte cet indicateur.

(5) Hauteur moyenne des bâtiments

$$\bar{H} = \lambda_a \frac{\Delta H}{\lambda_p} = \frac{\sum_i (A_i N_i) \Delta H}{\sum_i A_i} \quad (\text{Eq.6-3-4})$$

où ΔH est la hauteur moyenne d'un étage. Cet indicateur est utilisé pour décrire la rugosité (absolue) de terrain. La longueur de rugosité de la couche limite urbaine est beaucoup influencée par la hauteur moyenne des bâtiments.

(6) Ecart type de la hauteur des bâtiments

$$\sigma_h = \sqrt{\sum_i p_i (H_i - \bar{H})^2} \quad (\text{Equation 6-6})$$

où p_i est la proportion de surface du $i^{\text{ème}}$ bâtiment sur la surface totale d'emprise au sol, qui est définie par : $p_i = A_i / \sum_i A_i$, H_i est la hauteur du $i^{\text{ème}}$ bâtiment.

(7) Volume moyen de construction (Mean building volume) (Yoshida et Omae 2005)

$$\bar{V}_b = \sum_i V_{bi} / N \quad (\text{Equation 6-7})$$

où V_{bi} est le volume du $i^{\text{ème}}$ bâtiment et N est le nombre total de bâtiments. Cet indicateur peut être utilisé pour décrire le niveau de dispersion des bâtiments.

(8) Ratio d'aspect

Grimmond et Oke (1998) ont décrit l'effet de l'enveloppe du bâtiment en termes de ratio d'aspect. Celui-ci donne une information sur l'augmentation des liens entre les surfaces de bâtiment et l'ambiance extérieure par rapport à la surface de terrain.

$$\lambda_c = \sum_i E_i / S \quad (\text{Equation 6-8})$$

où E_i est la surface de l'enveloppe du $i^{\text{ème}}$ bâtiment, qui contient les surfaces de tous les murs extérieurs et toitures. Cet indicateur a un impact important sur l'échange thermique entre les bâtiments et l'environnement, mais peut aussi jouer un rôle important par rapport à la rugosité de la surface des bâtiments.

(9) Rugosité absolue

C'est un paramètre qui décrit l'état d'une surface, par rapport à l'ensemble des obstacles qui forment cette surface et qui empêchent l'air de s'écouler librement (Dictionnaire des mots-cles - CNRS⁵⁴). Pour la ville, celui-ci est défini pour analyser l'effet d'obstacle par rapport à l'écoulement du vent (Adolphe 2001, Yoshida et Omae 2005) :

$$R_a = \sum_i (A_i N_i) \Delta H / S = \bar{H} * CES \quad (\text{Equation 6-9})$$

(10) Rugosité relative

La rugosité relative est définie par l'écart type du volume des bâtiments (Balocco et Grazzini 2000) :

$$R_r = \sqrt{\sum_i (V_{bi} - \bar{V}_b)^2 / N - 1} \quad (\text{Equation 6-10})$$

où V_{bi} représente le volume du $i^{\text{ème}}$ bâtiment, \bar{V}_b représente le volume moyen des bâtiments et N représente le nombre de bâtiments étudiés. Cet indicateur montre le niveau de variation du volume bâti, qui a une influence importante sur la turbulence et la direction de vent.

(11) Porosité (absolue)

La porosité est la propriété d'un milieu comporté des pores, c'est-à-dire des vides interstitiels interconnectés ou non, résultant de l'emprisonnement de gaz. Il est le rapport du volume de ces vides comparé au volume total du milieu (Dictionnaire des mots-cles - CNRS⁵⁵). En ce qui concerne la ville, les pores sont des espaces ouverts et vides comme pour la rue, la place, la rivière, la pelouse,

⁵⁴ <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/motscles/develop.html>

⁵⁵ <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/motscles/develop.html>

etc.. Ici nous suivons la définition de la porosité absolue donnée par [Adolphe \(2002\)](#) pour la forme urbaine comme le ratio du volume utile d'espace ouvert par le volume total d'urbain étudié :

$$P_o = 1 - (\sum_i V_{bi} + \sum_i k_i V_{ci}) / V \quad (\text{Equation 6-11})$$

où V_{ci} représente le volume du $i^{\text{ème}}$ espace fermé à ciel ouvert ou de l'îlot où elle est insérée. k_i représente le coefficient de fermeture de la $i^{\text{ème}}$ cour. On peut le définir par rapport à la surface de cour (A_c) :

$$k = 30 \% \text{ si } A_c < 50 \text{ m}^2.$$

$$k = 20 \% \text{ si } 50 \text{ m}^2 < A_c < 200 \text{ m}^2.$$

$$k = 10 \% \text{ si } 200 \text{ m}^2 < A_c < 3000 \text{ m}^2.$$

$$k = 0 \text{ si } 3000 \text{ m}^2 < A_c.$$

V est le volume total de l'espace d'étude, dit volume de contrôle, qui est défini par ([Balocco et Grazzini 2000](#)) : $V = (H_{max} + 10) * S$ où la H_{max} est la hauteur maximale du bâtiment dans le champ d'étude et 10 m représente la hauteur de mesure du vent donné par la station météorologique.

Selon la définition de la porosité relative donnée par [Adolphe \(2001\)](#), le volume de l'espace ouvert correspond à la surface utile d'une section de rue, qui est calculée à partir d'un rayon hydraulique équivalent. Dans notre cas, sans considération de la direction du vent, la surface utile peut être définie par : $A_i = \pi r_h^2 = \pi \left(\frac{ab}{a+b}\right)^2$ où a et b sont respectivement la largeur et la longueur de l'espace ouvert en plan.

(12) Sinuosité

La sinuosité représente la projection des rues dans le plan vertical correspondant à celui du vent incident. La sinuosité est définie comme le rapport entre la longueur de parcours et la distance en ligne droite entre les points extrêmes du tracé ([Denis et Jean 1765](#), pp 219). Pour les rues d'un quartier, sous une certaine direction du vent incident, la sinuosité peut être définie par :

$$S_\theta = \frac{\sum_i L_i}{\sum_i (L_i \cos \theta_i)} \quad (\text{Equation 6-12})$$

où L_i représente la longueur de la $i^{\text{ème}}$ rue, θ_i est l'angle entre la rue et la direction du vent. Comme décrit par [Adolphe \(2001\)](#), une rose de sinuosité construite pour différents angles d'incidence du vent peut être dessinée pour un tissu urbain. Cependant, l'application de cet indicateur est limitée pour un tissu qui a des groupes de bâtiments connectés en formant des rues comme les corridors du vent.

(13) Occlusivité

L'occlusivité est une caractéristique de l'ouverture d'un espace au ciel ouvert. C'est un indicateur important pour étudier l'espace ouvert d'une ville. Elle est définie par :

$$O_c = \frac{\sum_N (\sum_i L_b / L_o)}{N} \quad (\text{Equation 6-13})$$

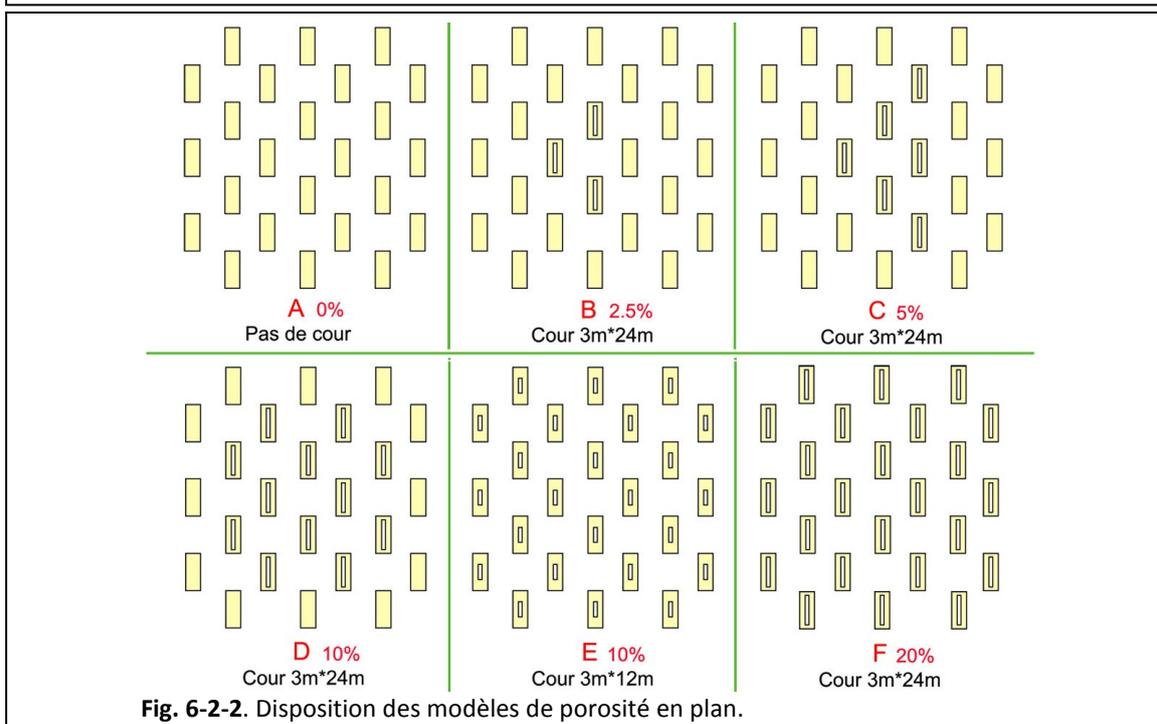
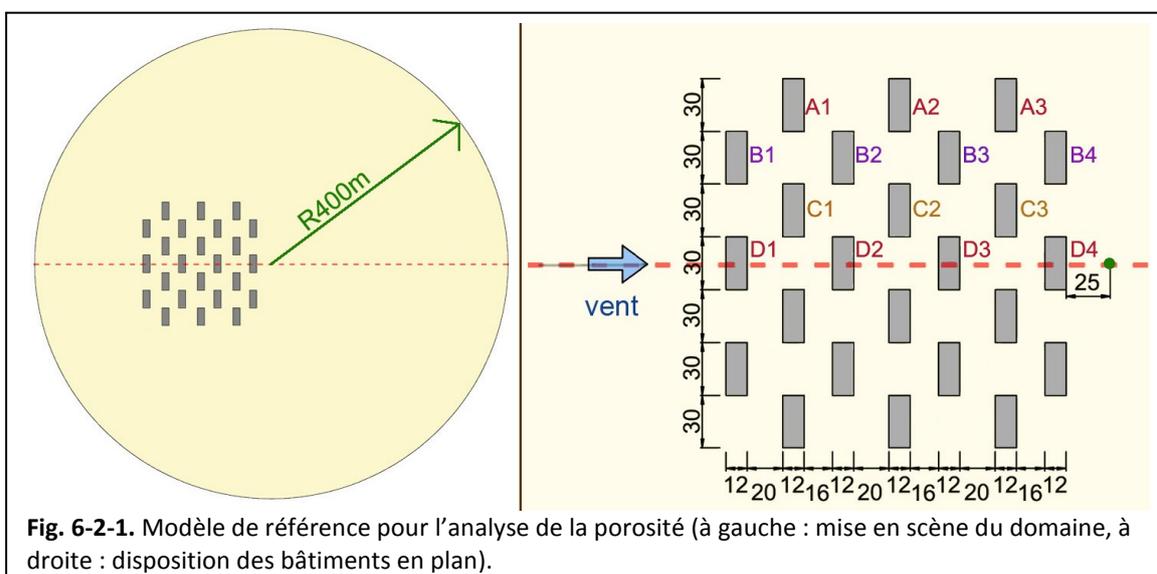
où L_b est le périmètre du bâtiment dans un plan de coupe, L_o est le périmètre de la surface ouverte, et N est le nombre de plans de coupe ([Adolphe 2001](#)).

6.2 Impact des indicateurs sur le potentiel éolien

Avant d'appliquer les indicateurs morphologiques à des modèles réels complexes, des modèles de groupe des bâtiments avec des configurations assez simples sont testés, afin de mieux comparer les résultats, et d'analyser les impacts des indicateurs. Des exemples d'analyse de l'impact de la porosité et de la densité sont donnés.

6.2.1. Impact de la porosité sur le vent

Pour tester l'impact de la porosité, un groupe de base de 24 bâtiments identiques de $W*L*H = 12m*30m*20m$ est mis en scène dans un domaine hémisphérique de rayon 400 m. Tous les autres paramètres de simulation CFD sont réglés comme dans la configuration précédente ([Chapitre 4.1](#)). La disposition des bâtiments dans le domaine est présentée dans la [Fig. 6-2-1](#). La disposition est symétrique par rapport à une ligne centrale qui est parallèle au vent normal, mais les distances entre les rangs de bâtiment ne sont pas identiques, ce qui facilite la production de résultats variés et contrastés.



Sur la base du modèle de référence, on insère des cours variantes dans les bâtiments pour simuler les différentes porosités (0 %, 2,5 %, 5 %, 10 %, 20 %) de ce « quartier » (Fig. 6-2-2). Des modèles de même porosité mais avec différentes tailles et différentes dispositions de cour sont aussi analysés. Les cours à ciel ouvert sont placés au rez-de-chaussée. Une seule direction du vent incident (normal) est considérée. Deux altitudes d'évaluation ($Z = 5 \text{ m}$ et 10 m) au-dessus du toit sont appliquées. Les parcelles d'évaluation correspondent à la surface en plan du bâtiment sont les mêmes pour tous les bâtiments, avec ou sans cours.

Pour comparer les caractéristiques générales des différents modèles, les valeurs de coefficient moyen d'augmentation de vitesse du vent C_v au-dessus du toit de tous les bâtiments sont calculées (Fig. 6-2-3). Les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Généralement les modèles avec cour au milieu (B, C et D) sont moins ventés au-dessus du toit (1 - 3 %), comparé au modèle sans cour (A, modèle de référence).

2) Les deux modèles avec cours dans tous les bâtiments (E et F) sont légèrement plus ventés au-dessus du toit (0 - 2 %) que le modèle sans cour. En outre, entre les deux modèles celui qui a une porosité faible bénéficie d'un vent plus fort au-dessus du toit (1,2 - 1,6 %). Comme la porosité change de zéro (A) à 10 % (E) et puis à 20 % (F), l'effet du vent commence par augmenter et puis diminue. C'est-à-dire qu'il y existe une porosité correspondant à l'effet maximal du vent au-dessus du toit.

3) Entre les modèles de même porosité (D et E), le modèle avec des cours dans tous les bâtiments (E) est beaucoup plus venté au-dessus du toit (2,3 - 4,1 %) que le modèle avec des cours installées uniquement dans les bâtiments situés au milieu (D).

4) En considérant le rajout des cours aux bâtiments autour de anciens bâtiments avec cour (la porosité s'accroît alors du modèle C 5 % au modèle D 10 % et puis au modèle F 20 %), nous pouvons dire que l'addition de cour (lorsque les bâtiments au milieu sont déjà installés des cours) peut accélérer les vents généraux sur le toit.

5) La disposition des cours a un impact important sur les résultats, au vue des variations irrégulières du vent par rapport à la différence de porosité.

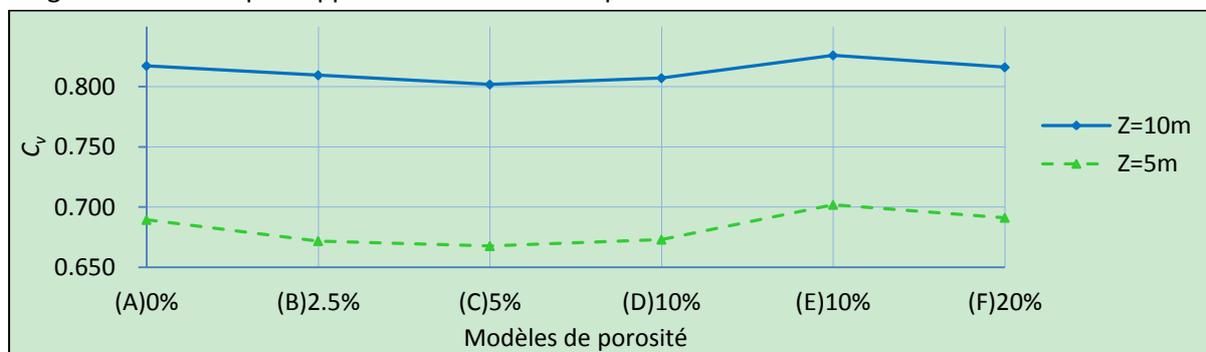


Fig. 6-2-3 Comparaison du coefficient C_v entre les modèles de porosité.

Lorsqu'on voit l'influence importante de la disposition des cours sur le bilan aéraluque, les performances de chaque bâtiment dans chaque modèle peuvent être intéressantes pour étudier la distribution des vitesses du vent. Les résultats sur le coefficient C_v de tous les bâtiments en particuliers sont comparés dans les Fig. 6-2-4a et b, aux deux altitudes. La moitié des bâtiment sont considérés puisque tous les modèles sont symétriques, et que les valeurs moyennes du coefficient sont prises entre les deux groupes de bâtiments symétriques. Ils se montrent dans un ordre de décroissance de valeurs du coefficient chez l'exemple du modèle A. Les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Pour tous les modèles, les vents au-dessus des toits des bâtiments en amont (A1, A2, B1) sont très peu influencés par l'existence des cours ; au contraire, les bâtiments situés en aval (B3, C3, D3, B4, D4) sont très influencés.

2) Pour les modèles avec cours au milieu (modèle B, C, D), les vitesses de vent au-dessus des toits des bâtiments situés sur la ligne centrale (D1, D2, D3, D4) sont presque tous plus élevées que pour le modèle sans cour, mais dans la zone en aval et de côté (A3, B3, B4, C2, C3) les vitesses de vent sont toujours moins élevées.

3). Comparé au modèle sans cour, les modèles avec cours dans tous les bâtiments (E et F) ont une vitesse de vent un peu plus élevée, notamment en aval et de côté (B2, B3, B4), mais sur la ligne centrale en amont (D1, D2, D3) les vitesses de vent sont moins élevées. En outre, entre les deux modèles avec cours dans tous les bâtiments, celui qui a des petites cours est généralement plus venté surtout dans la zone centrale en aval (B3, B4, C1, C2, C3, D2, D3, D4), et moins venté en aval de côté (A3).

4). Dans le groupe de modèles C, D et F, ordre qui correspond à une séquence d'augmentation de la porosité par l'addition de cours autour de cours existantes, le modèle F est le plus venté au-dessus des toits, alors que le modèle C est justement plus venté sur la ligne centrale (D1, D2, D3, D4) et en amont et de côté (A1).

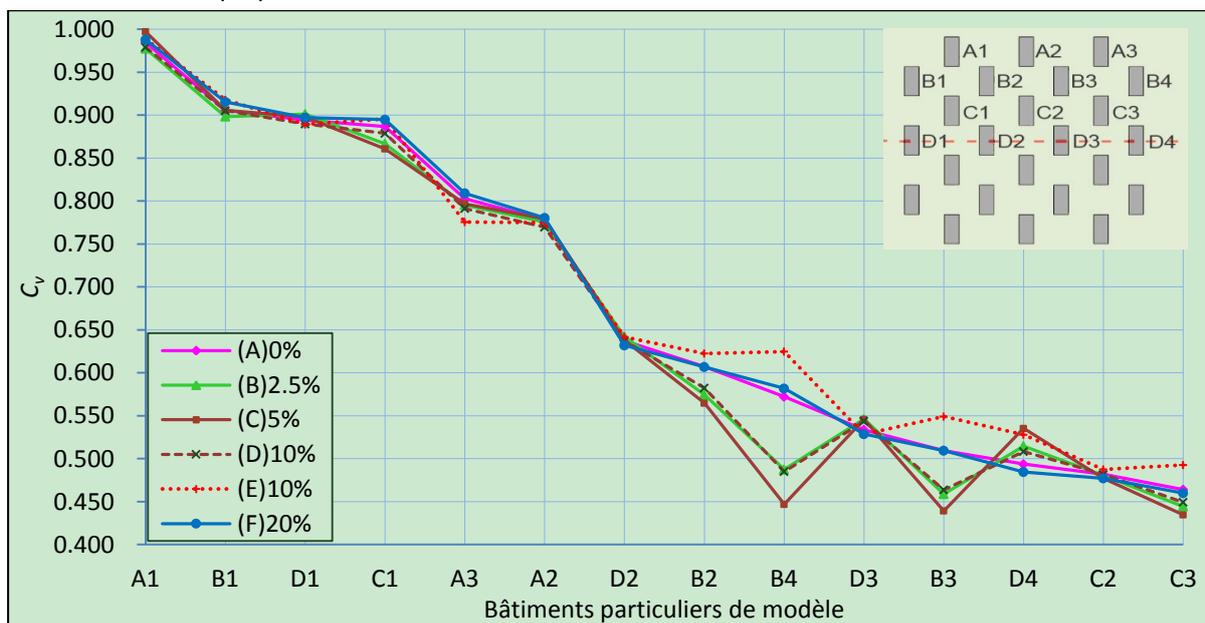


Fig. 6-2-4a Comparaison du coefficient C_v entre les modèles de porosité ($Z = 5$ m).



Fig. 6-2-4b Comparaison du coefficient C_v entre les modèles de porosité ($Z = 10$ m).

6.2.2 Impact de la densité sur le vent

Sur la base du groupe de 24 bâtiments identiques de $W*L*H = 12m*30m*20m$, comme dans le cas précédent, plusieurs autres groupes de bâtiments avec différences formes en plan ($W*L = 12m*45m$, $12m*20m$, $18m*30m$, $8m*30m$, $12m*10m$) ont été choisis pour analyser l'impact de la densité à l'échelle de quartier. Dans la *Fig. 6-2-5*, les modèles B et C correspondent aux changements de longueur face du vent, alors que les modèles D et E correspondent à ceux sur la largeur de bâtiment. Les densités (CES) sont calculées et varient entre les modèles (A à E). En outre, pour tester et éliminer l'impact de bâtiments périphériques, des modèles de référence sans changement de "l'enveloppe" du modèle A, sont étudiés (A' à E'). Le modèle A' garde la même densité que le modèle de référence, mais les quatre bâtiments au centre sont découpés chacun en trois fragments dans la même emprise au sol et sont placés de manière uniforme.

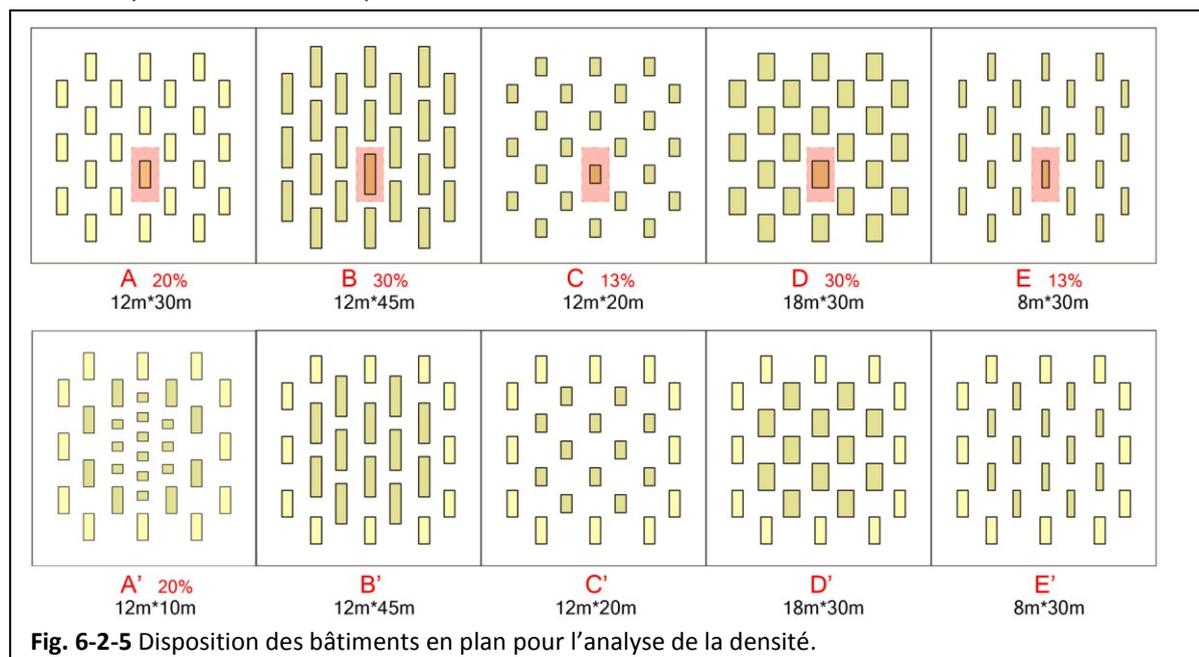


Fig. 6-2-5 Disposition des bâtiments en plan pour l'analyse de la densité.

Concernant les valeurs du coefficient C_v du vent au-dessus du toit en deux niveaux ($Z = 5m$ et $10m$), on calcule une valeur moyenne de tous les bâtiments situés au centre pour chaque modèle, afin d'avoir une vue claire sur l'impact général de densité sur le vent au-dessus des toits (*Fig. 6-2-6*). Les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Entre le modèle A et le modèle A', le potentiel éolien total au-dessus du toit diminue entre 1,5 % et 3,9 %. C'est-à-dire que la fragmentation du volume des bâtiments dans le même espace ralentit le vent d'ensemble.

2) Parmi les modèles avec différentes longueurs de bâtiments face au vent (modèles A, B, C, B' et C'), ceux qui ont les longueurs les plus courtes (modèles C et C') sont plus ventés au-dessus du toit que les autres. D'ailleurs, le rendement d'énergie au-dessus des toits dans la zone centrale semble être fortement influencé par le périphérique de bâtiments, lorsqu'on voit que l'écart entre le modèle B et le modèle C est beaucoup plus important que celui entre le modèle B' et le modèle C'.

3) Parmi les modèles avec différentes largeurs de bâtiment (A, D et E), les différences entre valeurs du coefficient sont faibles. La réduction de largeur de bâtiment (du modèle D à A et puis à E), s'accompagne d'une augmentation de la valeur du coefficient C_v , puis d'une diminution ensuite. Il existe donc une largeur la plus adaptée pour obtenir un effet du vent maximal.

4) Parmi les modèles de même densité (B et D, ou C et E), les rendements énergétiques éoliens sont différents. On peut conclure que l'impact de la longueur des bâtiments (face au vent) est beaucoup plus grand que l'impact de leur largeur.

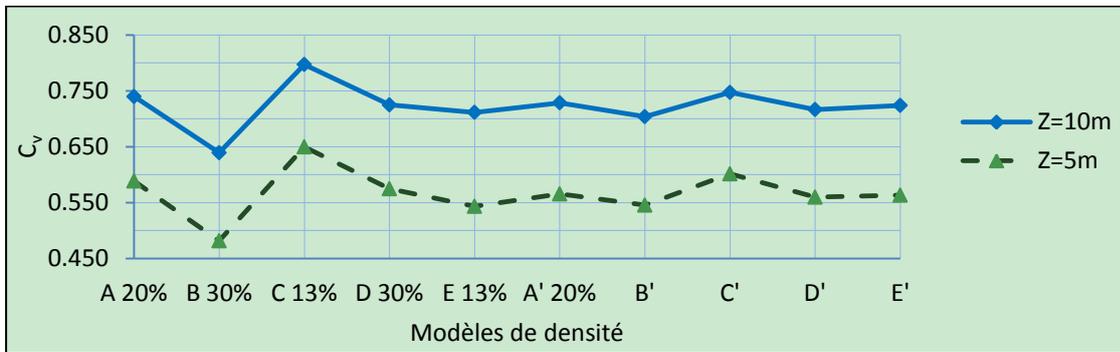


Fig. 6-2-6 Comparaison du coefficient moyen C_v entre les modèles de densité.

Pour évaluer l'impact de la densité sur des différentes zones des bâtiments dans un modèle, nous présentons les coefficients d'augmentation de vitesse du vent au-dessus du toit de chaque bâtiment dans les Fig. 6-2-7a et b (avec des valeurs moyennes pour les bâtiments symétriques), dans un ordre décroissant de valeurs chez le modèle A. Les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Généralement, les bâtiments les plus en amont du vent (e.g. B2, C1, C2) sont plus ventés sur le toit que ceux situés en aval.

2) Les bâtiments qui sont sur la ligne centrale (D2 et D3) sont relativement peu influencés par les changements des formes bâties.

3) La fragmentation des bâtiments réduit la vitesse des vents au-dessus des toits de la majorité des bâtiments, sauf les fragments de bâtiment C2.

4) Lors du changement de longueur des bâtiments (modèles A, B, C et A', B', C'), le modèle qui a la plus petite densité est le plus venté au-dessus des toits de tous les bâtiments.

5) En baissant la densité bâtie à la périphérie du modèle B, le modèle B' a des vitesses de vent moins élevées au-dessus des toits de la plupart de bâtiments. En outre, avec l'augmentation de la densité bâtie périphérique le modèle C' a des vitesses de vent généralement plus élevées (sauf sur la ligne centrale) que le modèle C. Le rendement énergétique éolien s'accroît donc avec la diminution de la densité bâtie périphérique.

6) Lors du changement de largeur des bâtiments (modèles A, D, E et A', D', E'), les tendances ne sont pas claires.

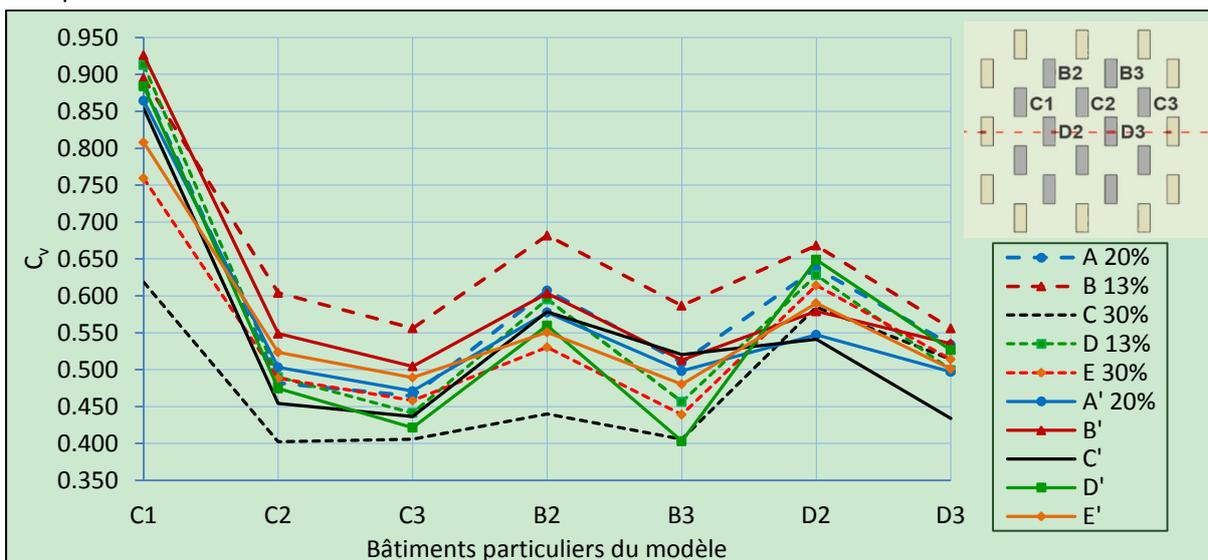


Fig. 6-2-7a Comparaison du coefficient C_v des barres au centre (Z = 5 m).

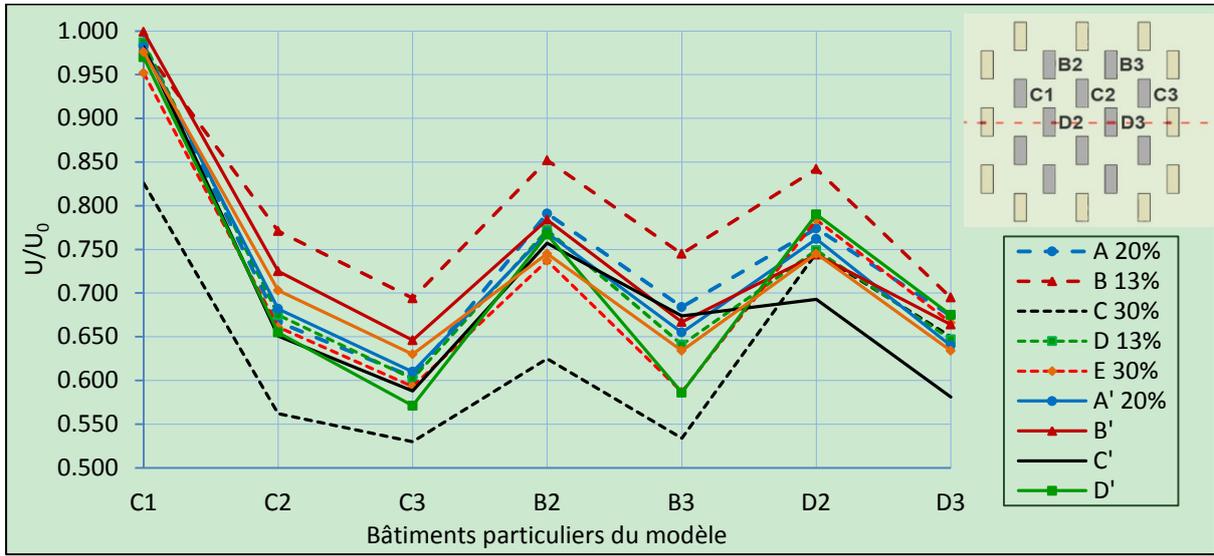


Fig. 6-2-7b Comparaison du coefficient C_v des barres au centre ($Z = 10$ m).

6.3 Simulation préliminaire de six formes urbaines à l'échelle de quartier

Six quartiers typiques de morphologie urbaine dans six différentes villes du monde (Paris, Toulouse, Bombay, Barcelone, New York et Pékin) ont été choisis, conformément aux évaluations prévisionnelles données par le [Tableau 1.1](#). Les simulations CFD permettent d'évaluer le potentiel éolien en comparant différentes formes typiques en fonction de leurs caractéristiques morphologiques. Afin de les comparer, les conditions initiales sont supposées identiques sans prendre en compte le climat local ou l'environnement socio-économique dans cette phase d'étude.

6.3.1 Condition et exigences de simulation CFD pour les modèles de quartier

En raison de la grande variation de taille, les paramètres choisis lors de la validation doivent être modifiés. Les paramètres du modèle CFD ont été réglés comme suit.

1) Sur le domaine et sur la géométrie

La surface du domaine d'étude est à l'échelle du quartier : $450m * 450m = 202500 m^2$ où avec une précision sur les constructions de 3 m. Pour rendre la simulation plus réaliste, nous représentons un certain nombre de constructions autour de la zone d'étude dans un rayon de 350 à 400 m ou un carré de 350 m de côté. La taille du domaine de simulation est variable selon la forme de géométrie, afin de se conformer aux lignes directrices : pour les modèles des quartiers à Paris, à Toulouse, à Bombay et à Barcelone où la hauteur maximum de bâtiment $H_{max} < 35m$ nous appliquons un domaine (hémisphérique) de rayon de 750 m ; pour le modèle du quartier à New York où $H_{max} < 250m$, nous appliquons un rayon de 1100 m ; pour le modèle du quartier de ville Pékin où $H_{max} < 100m$, nous appliquons un rayon de 1000 m.

2) Sur le maillage

Des nouveaux paramètres de maillage sont choisis pour trouver un compromis entre la précision du calcul et le nombre de mailles. Plusieurs tests d'évaluation de la stabilité du maillage sont effectués pour vérifier les choix. Les paramètres généraux de maillage sont maintenus identiques comme pour le cas de validation. L'objectif de cette phase est de comparer les différences entre les modèles (en valeur relative) plutôt que de trouver un résultat précis pour s'adapter à la réalité (en valeur absolue). Des modifications nécessaires sont apportées comme : le niveau du "Centre de pertinence" (RC) est modifié de médium à grossier, et le niveau de "Lisse" est changé de médium à bas.

En outre, il y a des modifications sur la précision du maillage des bâtiments et l'inflation de la couche limite. Dans les quartiers à Paris, à Toulouse, à Bombay et à Barcelone, les tailles des bâtiments ne varient pas beaucoup, donc nous gardons les mêmes paramètres de l'inflation de la couche limite de sol et de mur de bâtiments. Nous y adoptons 6m pour la taille du côté de tous les bâtiments en considérant le nombre total de mailles. Pour le modèle de quartier à New York, nous adoptons 10 m pour la taille de côté des bâtiments et les paramètres de l'inflation de la couche limite sont : $N = 5$, $T_g = 0,5 m$, $r_g = 1,3$, $T_b = 0,1 m$, $r_b = 1,5$. Pour le modèle de quartier à Pékin, nous adoptons 6m pour la taille du côté des bâtiments et les paramètres de l'inflation de la couche limite sont : $N = 8$, $T_g = 0,3 m$, $r_g = 1,3$, $T_b = 0,1m$ et $r_b = 1,3$. Le nombre de mailles et les indicateurs de qualité du maillage pour chaque quartier sont listés dans le [Tableau 6-2](#). La qualité d'éléments est basée sur le rapport entre le volume et la longueur d'un élément donné. Une valeur de 1 indique un cube ou carré parfait, tandis que la valeur 0 indique que l'élément a un volume nul. Une des mesures principales de la qualité d'un maillage, l'asymétrie, détermine le niveau de proximité à la forme idéale (i.e. équilatéral) d'une surface ou d'une cellule. Valeurs de référence de l'asymétrie de maille sont données par : bonne qualité si $0,25 < Q_{asy} < 0,5$, excellente qualité si $Q_{asy} < 0,25$ ([ANSYS 2013](#)).

Tableau 6-2

Nombres de mailles et qualité du maillage des modèles des quartiers réels

	2 ^{ème} arr., Paris	Mirail, Toulouse	Khar West, Bombay	Mercodona, Barcelone	Midtown centre, New York	Jinsong, Pékin
Nombre de mailles	1 174 622	1 447 081	1 169 303	1 250 964	3 133 267	2 796 897
Qualité moyenne des éléments	0.502	0.618	0.557	0.528	0.605	0.571
Asymétrie moyenne	0.342	0.282	0.321	0.325	0.296	0.297

3) Sur la solution CFD

Le choix du modèle de turbulence et des paramètres de rugosité de la validation sont conservés (**Chapitre 4.1**) : k-e Standard pour la modèle de turbulence, $K_s=1$ m, $C_s=0,99$ pour le sol, schème Simple pour la solution, 2^{ème} ordre pour la discrétisation. Un profil d'incidence du vent dans une ville moyenne typique peut être approché par la relation : $U = 3 * (\frac{Z}{10})^{0,25}$ (m/s). Le nombre d'interactions de calcul est normalement supérieur à 3000 (jusqu'à 6000), selon la situation de convergence. Le niveau de résidu de continuité est gardé inférieur à $2*10^{-5}$, alors les niveaux de résidu de vitesse en trois dimensions sont tous gardés inférieur à 10^{-5} .

6.3.2 Description des indicateurs morphologiques des six quartiers réels

Les informations sur les indicateurs morphologiques des six quartiers sont présentées dans le **Tableau 6-3**. Les valeurs de l'occlusivité par rapport à la hauteur de l'axe Z sont présentées dans la **Fig. 6-3-1**, et les valeurs moyennes en sont listées dans le **Tableau 6-3**. Pour une simulation préliminaire sans tenir compte de l'environnement réel extérieur, les indicateurs de morphologie urbaine choisis sont : le coefficient d'emprise au sol, le coefficient d'occupation des sols, la hauteur moyenne et maximale des bâtiments, le volume moyen des bâtiments, le ratio d'aspect, la rugosité, la porosité et l'occlusivité. On voit que la densité de bâtiments varie de manière importante, entre 19 % et 58 % en CES, et entre 1,1 et 12,1 en COS.

Tableau 6-3

Description des indicateurs morphologiques des six modèles de quartier réel

Indicateur morphologique \ Site	2 ^{ème} arr., Paris	Mirail, Toulouse	Khar West, Bombay	Mercodona, Barcelone	Midtown centre, New York	Jinsong, Pékin
Type de forme urbaine	Noyau de centre ville	Logement collectif	Logement individuel	Noyau de centre ville	Centre commercial	Logement collectif
Coefficient d'emprise au sol (CES)	56,21 %	18,66 %	22,28 %	56,87 %	57,94 %	19,93 %
Coefficient d'occupation des sols (COS)	2,98	1,18	1,08	2,94	12,08	3,57
Hauteur moyenne des bâtiments (\bar{H})	18,48 m	20,98 m	15,98 m	18,06 m	84,29 m	56,62 m
Ecart type de la hauteur des bâtiments (σ_h)	1,77 m	17,90 m	6,25 m	5,79 m	59,66 m	38,02 m
Coefficient de variation de la hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})	10 %	85 %	39 %	32 %	71 %	67 %
Hauteur maximale des bâtiments (H_{max})	24 m	50 m	35 m	32 m	230 m	93 m
Volume moyen des bâtiments (\bar{V}_b)	75 016 m ³	37 978 m ³	3 841 m ³	86 665 m ³	201 852 m ³	69 246 m ³
Ratio d'aspect (λ_c)	2,14	0,78	1,16	2,34	4,50	1,41
Rugosité absolue (R_a)	10,37 m	3,92 m	3,53 m	10,27 m	48,86 m	11,28 m
Rugosité relative (R_r)	85 830 m ³	48 480 m ³	2 803 m ³	71 722 m ³	143 488 m ³	50 130 m ³
Porosité absolue (P_o)	32,70 %	68,26 %	78,64 %	32,04 %	42,14 %	66,51 %
Occlusivité moyenne (O_c)	82,44 %	53,43 %	57,47 %	66,47 %	60,11 %	57,60 %

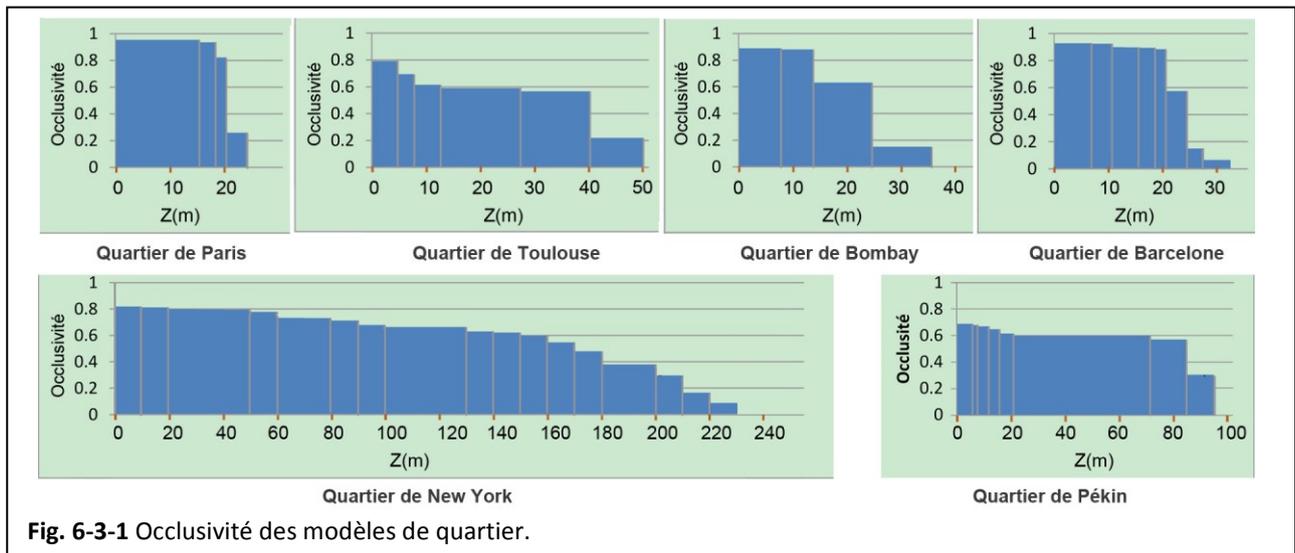


Fig. 6-3-1 Occlusivité des modèles de quartier.

Les Fig. 6-3-2 (a à f) présentent les plans et les perspectives des six modèles de quartier. Sur le plan, la limite du domaine d'étude est figurée par un carré. La couleur varie avec la hauteur des bâtiments : plus la couleur est sombre, plus la hauteur des bâtiments est importante.

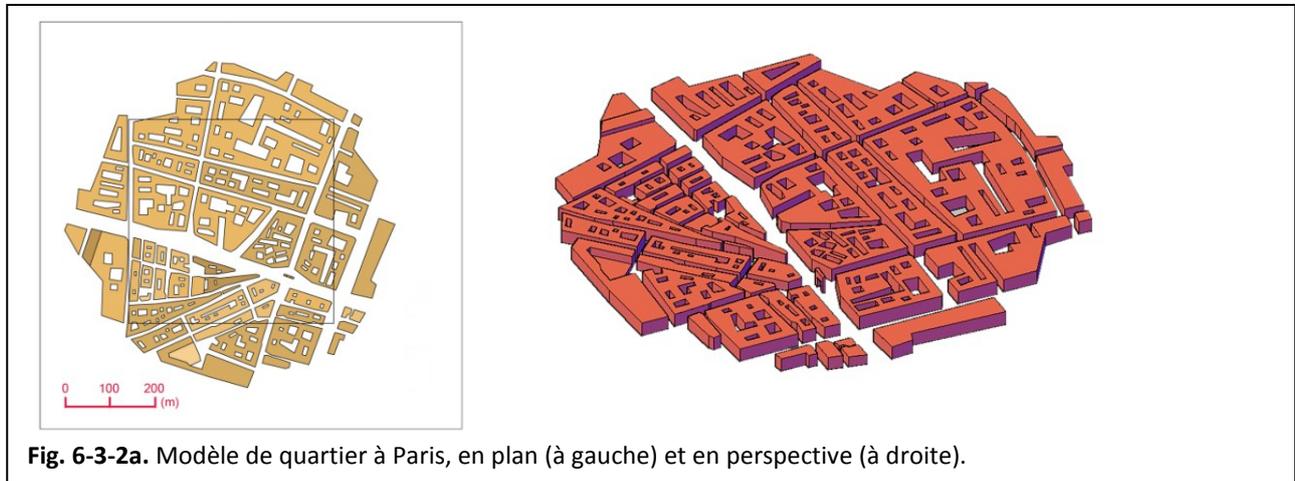


Fig. 6-3-2a. Modèle de quartier à Paris, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

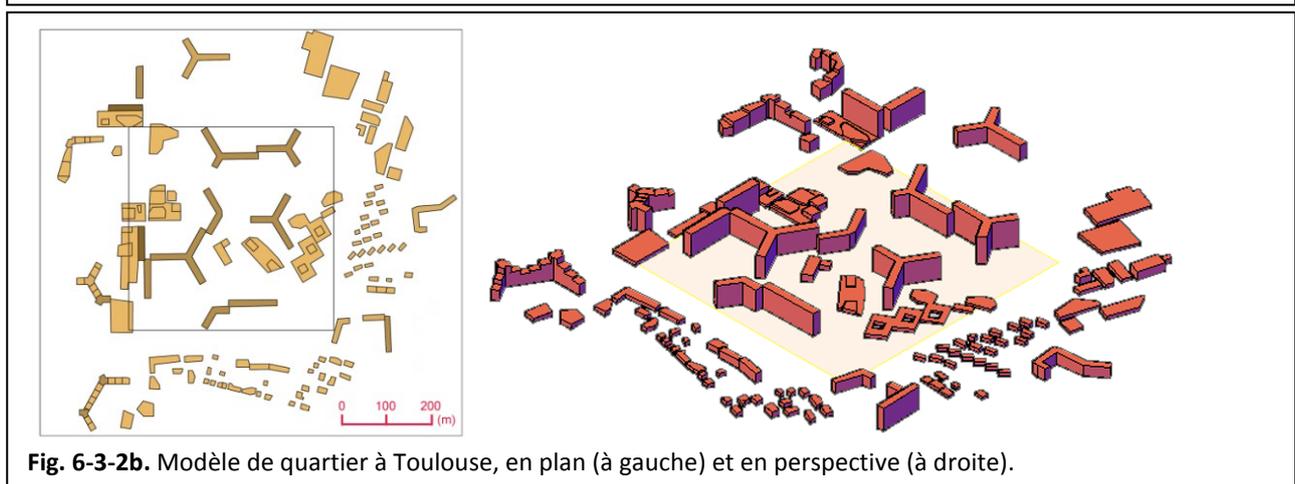


Fig. 6-3-2b. Modèle de quartier à Toulouse, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

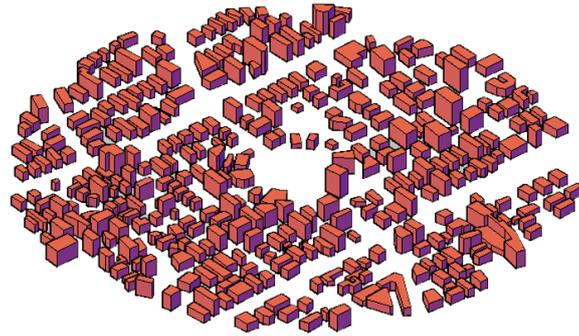
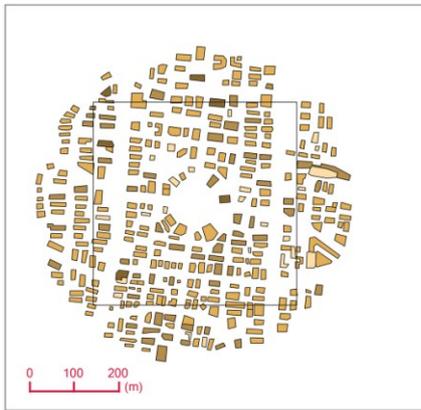


Fig. 6-3-2c Modèle de quartier à Bombay, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

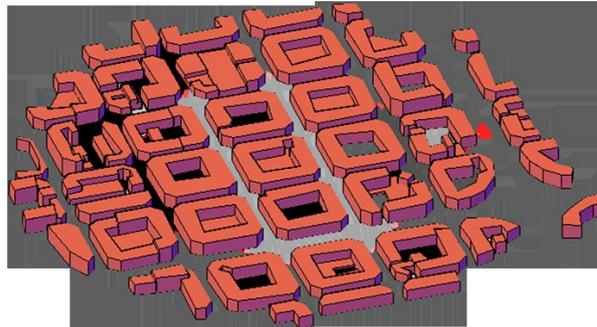
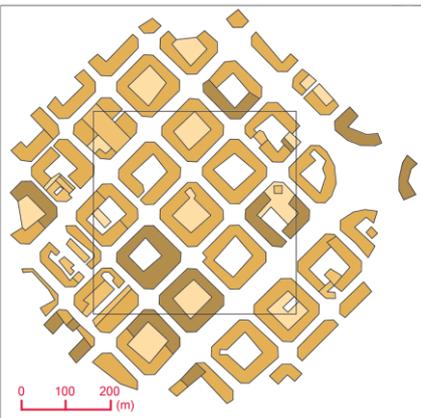


Fig. 6-3-2d Modèle de quartier à Barcelone, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

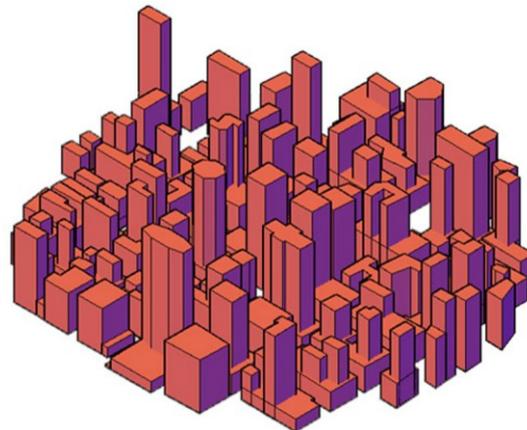
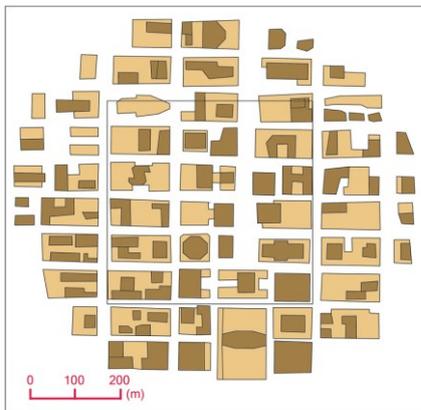


Fig. 6-3-2e Modèle de quartier à New York, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

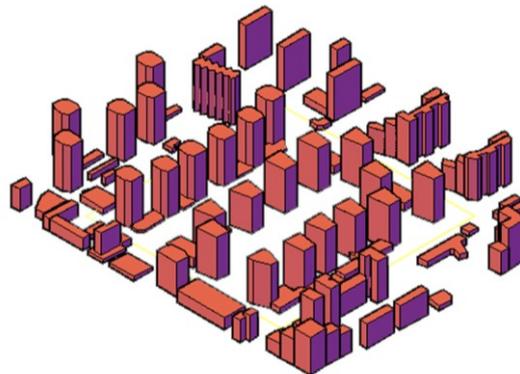
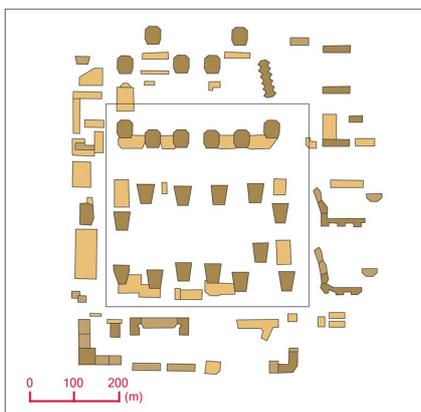


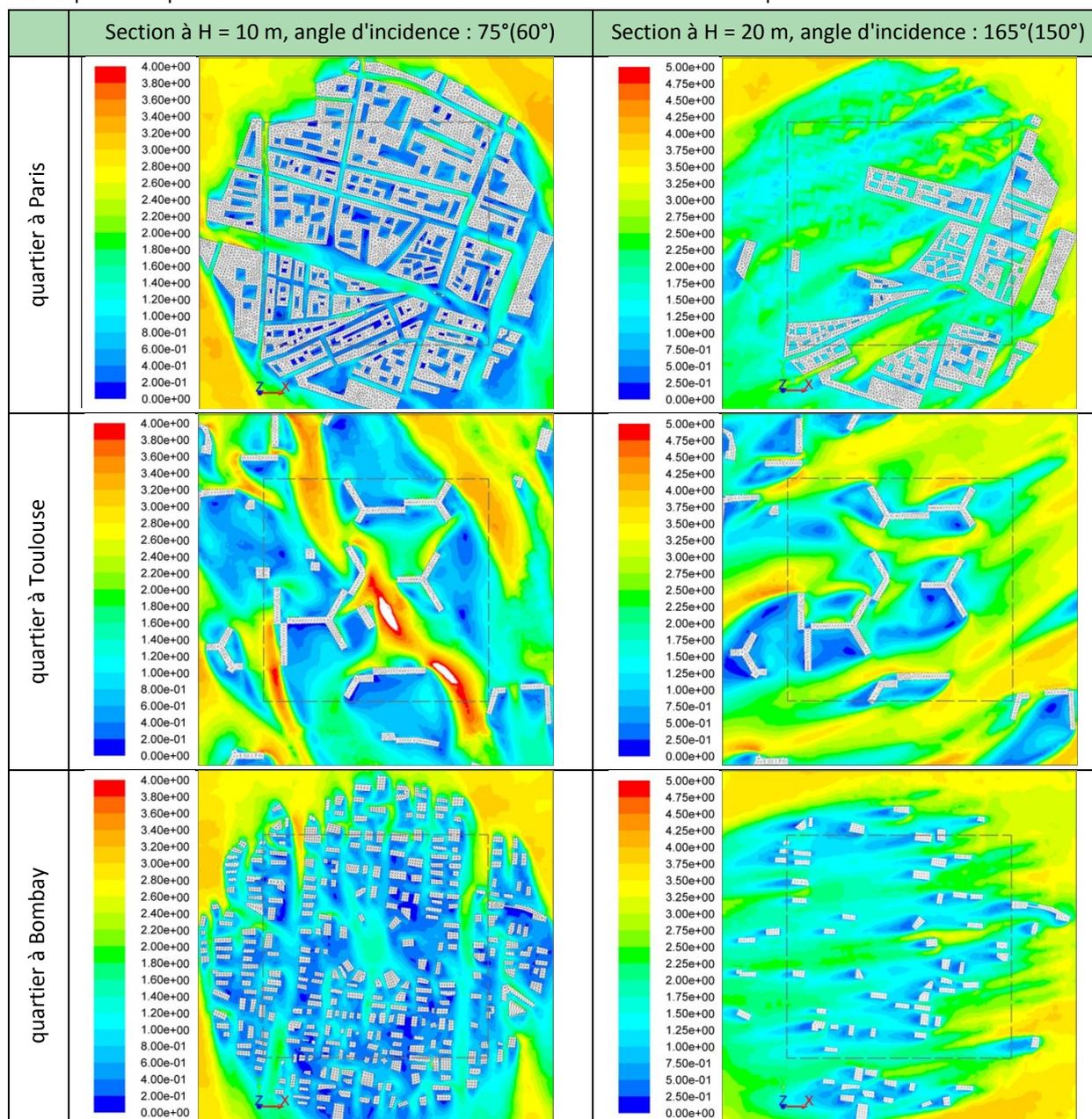
Fig. 6-3-2f Modèle de quartier à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

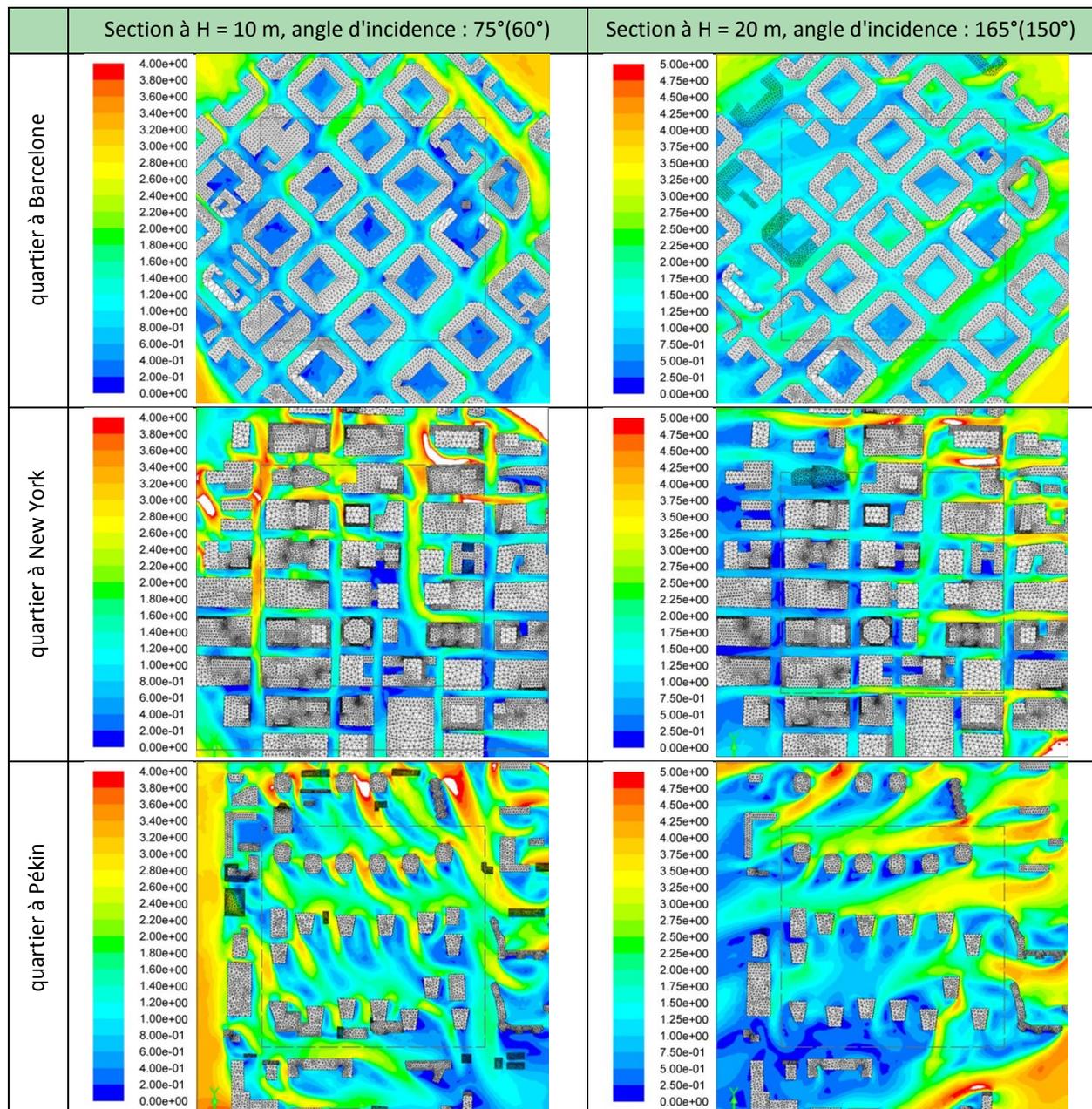
6.3.3 Résultats sur le rendement énergétique éolien des quartiers réels

Les conditions locales du climat n'étant pas prises en compte (e.g. la rose des vents), nous appliquons le même profil de vent et simulons 8 directions d'incidence du vent (avec un écart de 45°), pour tous les modèles de quartier. De cette façon, on peut évaluer l'impact de la forme bâtie sur les vents, en comparant le rendement énergétique éolien moyen de différentes formes urbaines à l'échelle de quartier. Des exemples de représentation de contours de vitesse de vent dans deux directions d'incidence (75° et 165°, ou 60° et 150°) et à deux altitudes (H = 10 m et 20 m à partir du sol) de chaque modèle sont donnés (Tableau 6-4). Notons qu'à ces deux altitudes, le poste de légende sur la vitesse varie respectivement entre 0 et 4 m/s et entre 0 et 5 m/s.

Tableau 6-4

Exemples de représentation des contours de vitesse de vent des modèles de quartier





Pour évaluer quantitativement le potentiel éolien de chaque modèle, nous appliquons les valeurs de vitesse moyenne pondérée par la surface, données directement par FLUENT, en raison de la complexité du modèle et de l'exigence de précision du résultat pour chaque modèle pris individuellement. La vitesse moyenne pondérée est calculée sur les parcelles aux trois altitudes ($Z = 5$ m, 10 m, 15 m) au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts ($H > \bar{H}$, qui sont les plus ventés et les plus prometteurs pour exploiter l'énergie éolienne) du modèle. En raison de la grande variation des hauteurs parmi les plus grandes tours dans certains modèles (e.g. quartier à New York), nous ne choisissons que des bâtiments avec des emprises importantes. Le coefficient C_v en moyen des bâtiments d'une certaine hauteur et l'indicateur M' sont analysés pour chaque modèle. Pour favoriser la comparaison entre les modèles, les valeurs de coefficient d'augmentation de vitesse, l'intervalle de variation de chaque groupe de bâtiment, l'intervalle de variation moyen et l'amplitude moyenne sont calculés dans le [Tableau 6-5](#). Les groupes de bâtiments A à D correspondent aux groupes de bâtiments les plus hauts de chaque modèle utilisés dans les [Fig.6-3](#). Les valeurs moyennes d'intervalles de variation de chaque groupe de bâtiments sont obtenues pour les trois altitudes d'évaluation et sont pondérées par les surfaces de chaque groupe de bâtiments.

Tableau 6-5

Valeurs minimale et maximale, Intervalle de variation moyen de chaque groupe de bâtiments, intervalle de variation moyen total et amplitude moyenne de variation du coefficient C_v pour les six quartiers.

		Paris	Toulouse	Bombay	Barcelone	New York	Pékin
Min		0,43	0,49	0,51	0,56	0,11	0,16
Max		1,06	1,08	1,07	0,91	1,23	0,96
Intervalle moyen de chaque groupe de bâtiments	A	0,68~0,90	0,61~0,90	0,85~1,00	0,65~0,85	0,58~0,96	0,55~0,78
	B	0,63~0,86	0,52~0,77	0,63~0,87	0,60~0,79	0,57~0,85	0,56~0,79
	C					0,58~0,82	0,38~0,53
	D					0,34~0,64	
Intervalle moyen total		0,63~0,86	0,54~0,80	0,67~0,90	0,61~0,81	0,50~0,80	0,54~0,76
Amplitude moyenne		0,228	0,259	0,221	0,193	0,300	0,219

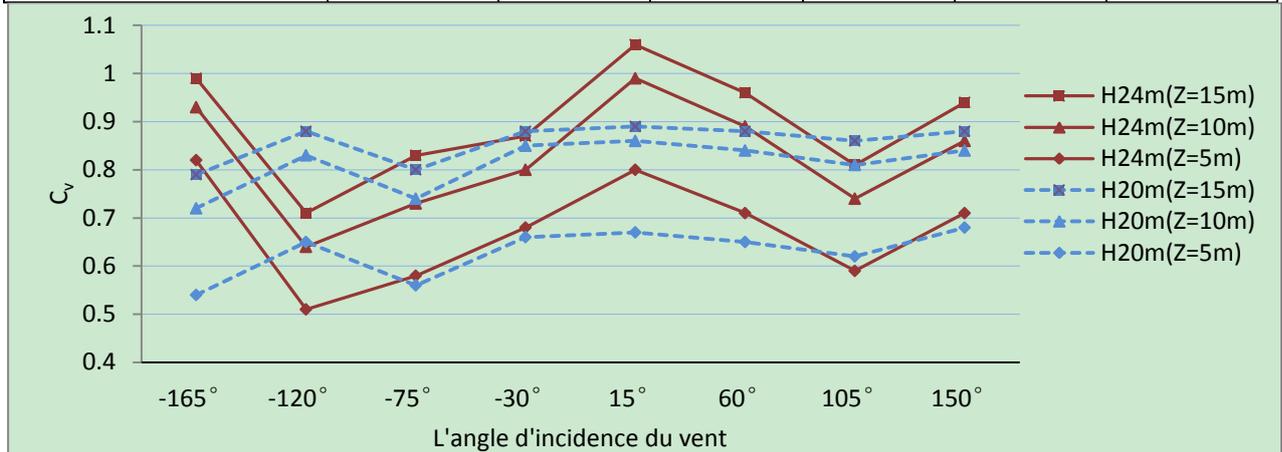


Fig. 6-3-3a. Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Paris).

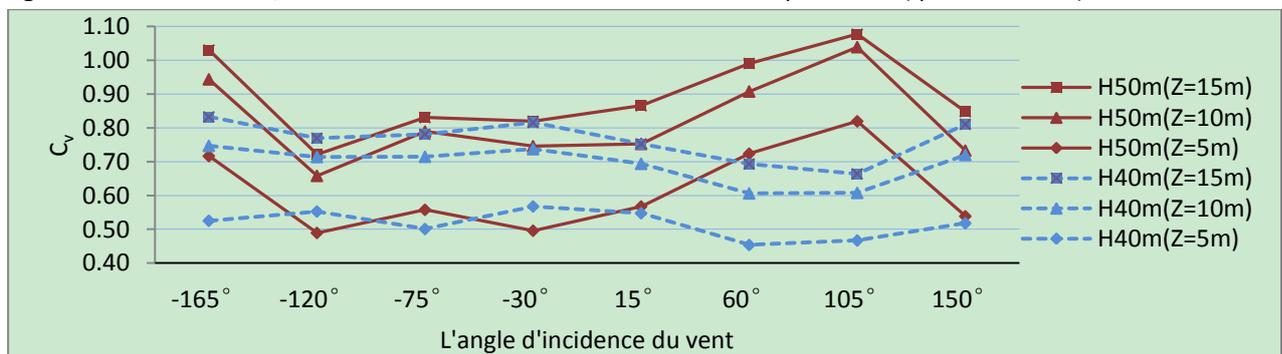


Fig. 6-3-3b. Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Toulouse).

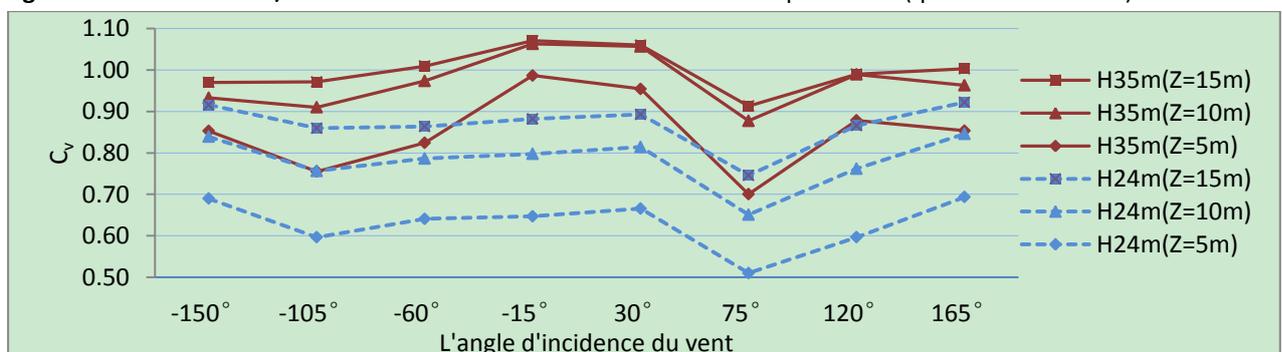


Fig. 6-3-3c. Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Bombay).

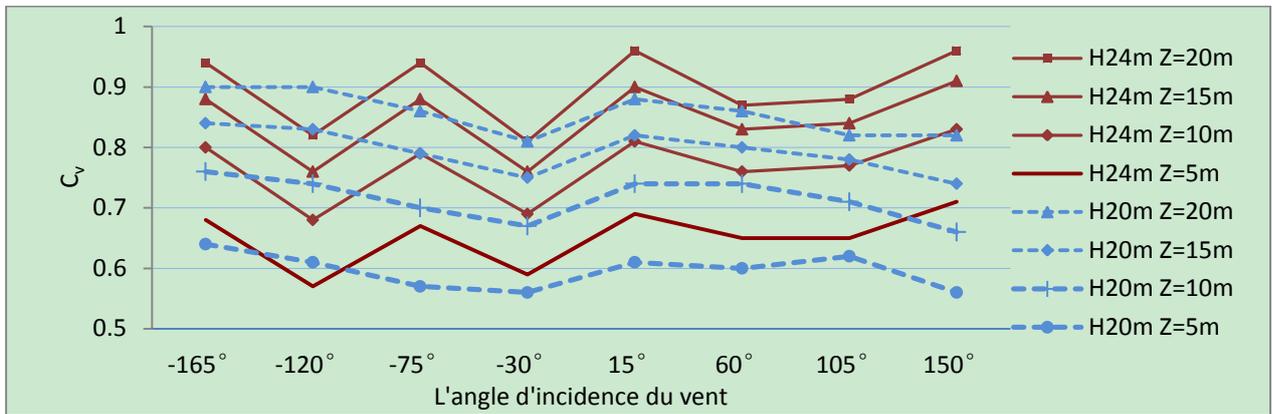


Fig. 6-3-3d. Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Barcelone).

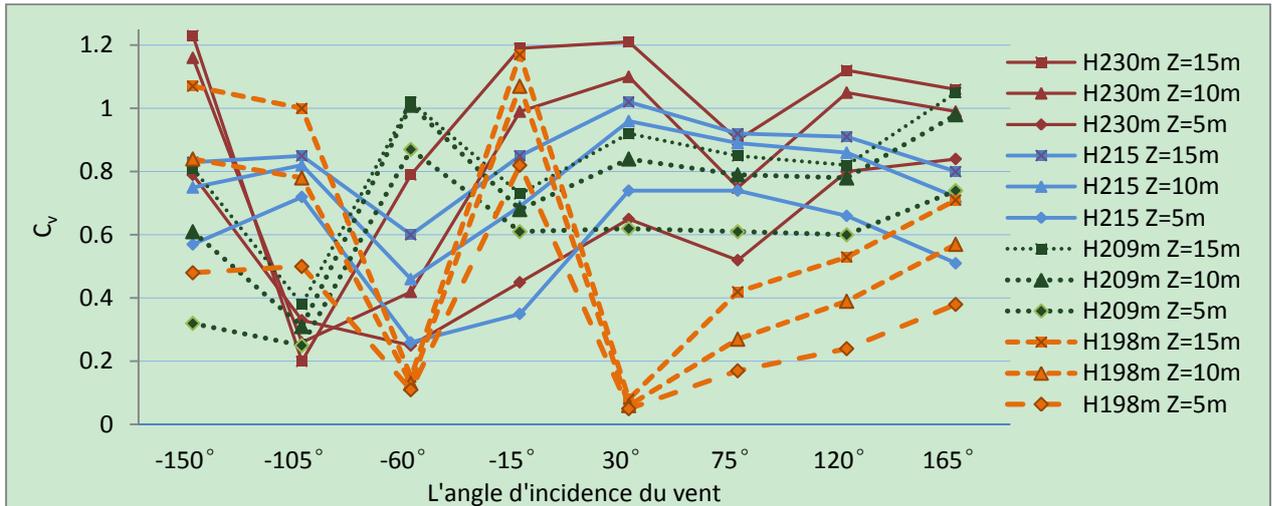


Fig. 6-3-3e. Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à New York).

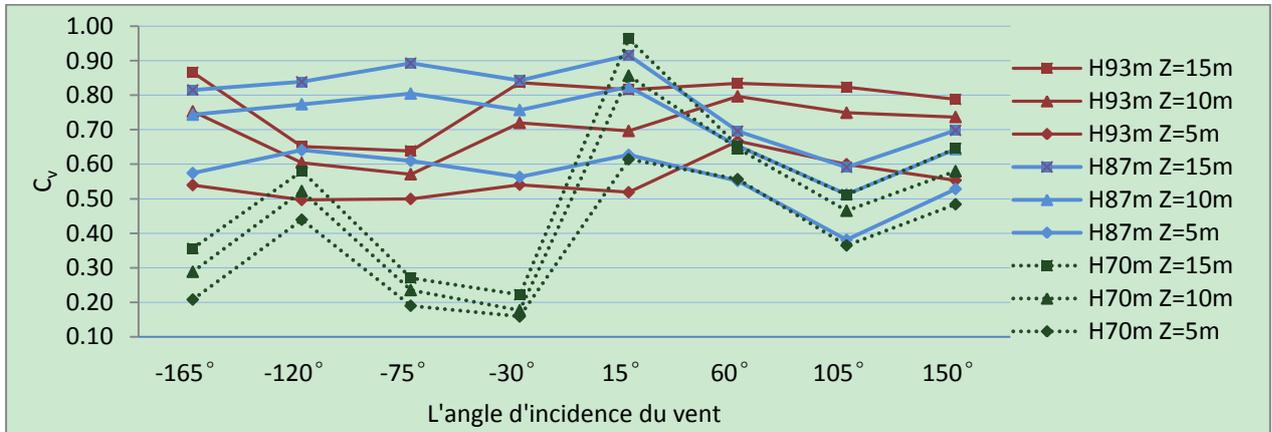


Fig. 6-3-3f. Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Pékin).

Concernant les résultats du coefficient d'augmentation de la vitesse de modèle de quartier (Fig.6-3-3 a à f, et Tableau 6-5), les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Les meilleurs angles d'incidence du vent peuvent correspondre à ceux des vents dominants pour profiter de l'effet du vent au-dessus des toits de certains bâtiments. Par exemple, pour les bâtiments de 24m haut du quartier à Paris, à 15° le vent est le plus fort. Pour les bâtiments de 50 m du quartier à Toulouse, le vent le plus fort est à -105°.

2) Comparés avec le vent libre (sans bâtiment), les modèles du quartier à Paris, de Barcelone et de Pékin ont rarement un effet d'augmentation du vent lorsque leur $C_v < 1$, alors que les modèles de quartier à Toulouse et à Bombay ont de légers effets d'augmentation du vent au-dessus des toits des plus hauts bâtiments avec certains angles d'incidence du vent. Le cas du quartier à New York est un peu plus favorable, mais l'effet d'augmentation de la vitesse du vent se limite à certains des plus

hauts bâtiments et avec certains angles d'incidence du vent. Une des raisons pourrait être la faible altitude d'évaluation. Le cas du modèle de quartier à Barcelone montre qu'à $Z = 20$ m, les valeurs du coefficient sont supérieures à celles à $Z = 15$ m au-dessus du toit (Fig.6-3-3 d).

3) Concernant les valeurs minimales et maximales du coefficient C_v , on voit que les quartiers de grandes tours (New York et Pékin) ont une valeur minimale assez étonnante car inférieure à 0,11 à $Z = 5$ m. La raison vient peut-être de la grande rugosité ainsi que la grande hauteur des bâtiments étudiés. Rappelons qu'un bâtiment avec une hauteur élevée a une couche d'écoulements turbulents plus épaisse au-dessus du toit qu'un bâtiment bas (Lu et Ip 2009). De plus, la valeur maximale du coefficient C_v du quartier à New York est aussi la valeur la plus importante parmi les six quartiers. Ceci est dû à la hauteur très importante des bâtiments (> 200 m), ce qui accélère le vent autour de l'environnement bâti. Pourtant, avec une hauteur moins importante (< 100 m), les bâtiments dans le quartier à Pékin n'atteignent pas une valeur $C_v > 1$. Les raisons sont peut-être une grande rugosité et la faible variation des hauteurs des plus hauts bâtiments.

4) Sur l'intervalle moyen de chaque groupe de bâtiments des valeurs du coefficient C_v , on voit que les valeurs minimale et maximale du coefficient C_v pour les groupes de bâtiments les plus hauts (A, B) sont généralement plus grandes que celles des groupes de bâtiments plus bas (C, D). C'est-à-dire que la hauteur des bâtiments joue un rôle décisif dans la recherche du lieu le plus favorable pour exploiter l'énergie éolienne. Dans certains cas, un bâtiment d'une hauteur faible peut correspondre à un C_v plus important qu'un bâtiment plus élevé pour un certain angle d'incidence du vent (e.g. dans le modèle de Paris sous le vent de -120°). La position du bâtiment compte donc aussi beaucoup, en fonction de la direction des vents.

5) Sur l'intervalle total de variation du coefficient C_v pour chaque modèle de quartier, on voit que les valeurs minimale moyenne et maximale moyenne des quartiers avec des grandes tours (quartiers à New York et à Pékin) sont toutes plus petites que celle des autres quartiers. Sur l'amplitude de variation du coefficient, on voit que la majorité des amplitudes moyennes des valeurs du coefficient C_v entre $Z = 5$ m et $Z = 15$ m, sont inférieure à 0,3. Les quartiers à Toulouse et à New York ont une amplitude de variation plus grande que les autres quartiers. C'est-à-dire que les deux ont un niveau de turbulence plus élevé que les autres. En fait, leurs coefficients de variation de la hauteur des bâtiments sont les deux plus grands parmi les six modèles (voir Tableau 6-3).

Tableau 6-6

Valeur moyenne de l'indicateur M' pour évaluer le potentiel éolien à trois altitudes sur le toit, amplitude moyenne des valeurs de M' , hauteurs des bâtiments les plus hauts dans le modèle et surface totale de toiture (unités de M' : $10^6 \text{ m}^5 \cdot \text{s}^{-3}$)

		Paris	Toulouse	Bombay	Barcelone	New York	Pékin
Moyenne de M' à $Z=15$ m		1,74	1,46	0,79	3,50	3,82	2,03
Moyenne de M' à $Z=10$ m		1,17	1,14	0,59	2,32	2,77	1,54
Moyenne de M' à $Z=5$ m		0,57	0,49	0,32	1,70	1,23	0,72
Amplitude moyenne de M'		0,54	0,42	0,26	0,73	0,98	0,89
Bâtiments les plus hauts ($H > \bar{H}$)	Hauteurs des bâtiments (m)	20, 24	27, 40, 50	24, 35	20, 24, 27, 32	87-230	70, 87, 93
	Surface totale de toits (m^2)	37 588	16 724	13 223	85 260	42 482	24 220

Pour évaluer l'énergie éolienne au-dessus des toits, nous prenons tous les bâtiments qui sont plus hauts que la hauteur moyenne des bâtiments du quartier ($H > \bar{H}$). Les valeurs moyennes de l'indicateur M' aux trois altitudes sur le toit et l'amplitude moyenne de variation sont résumées dans le Tableau 6-6. Les valeurs de l'indicateur M' avec plusieurs angles d'incidence du vent sont données dans l'Annexe 4. A partir des valeurs du Tableau 6-6, les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Les quartiers à Barcelone et à New York ont beaucoup plus du potentiel éolien au-dessus des toits que les autres quartiers. En fait, les deux quartiers ont de plus grandes de surfaces totales de toits des bâtiments les plus hauts qui peuvent être utilisés pour exploiter le potentiel éolien. Pour le quartier à New York la cause peut aussi provenir de la grande hauteur des bâtiments.

2) La comparaison entre les quartiers à Paris et à Barcelone, fait apparaître que la majorité des indicateurs morphologiques (COS , CES , \bar{H} , λ_c , R_a , P_o) sont très proches, on peut supposer que la raison de grande différence sur le potentiel éolien vienne de la variation de hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H}). En d'autres termes, une grande variation des hauteurs de bâtiment pourrait augmenter le potentiel éolien sur les toits. En fait, en comparaison les quartiers à Toulouse et à Bombay, qui eux aussi partagent une densité bâtie similaire, nous remarquons que le quartier à Toulouse a un potentiel éolien supérieur et un grand coefficient de variation de la hauteur des bâtiments.

3) Le quartier à Pékin a un potentiel éolien moyen. Même s'il a une hauteur moyenne importante (56,6 m), il a une surface totale de toiture faible, comparée au quartier à Barcelone et à celui à New York. Par contre, comme sa hauteur moyenne est beaucoup plus importante que celle du modèle de Paris, le modèle de Pékin a un potentiel plus élevé.

En outre, en considération la vitesse minimal exploitable du vent (U_d), pour une éolienne à axe vertical (VAWT) $U_d = 1,8 - 2,5 \text{ m/s}$ et pour une éolienne à axe horizontal (HAWT) $U_d = 3 \text{ m/s}$, on peut adopter une méthode plus réaliste pour mesurer le potentiel éolien total : seuls les bâtiments potentiellement ayant une vitesse du vent $U > 3 \text{ m/s}$ (ou 2 m/s) à l'altitude $Z = 10 \text{ m}$ au-dessus du toit sont alors considérés. L'indicateur M' est recalculé pour tous les modèles avec les deux conditions de vitesse minimale exploitable. Les hauteurs et la surface totale des bâtiments avec des vents exploitables ($U > U_d$) sont données (Tableau 6-7).

Tableau 6-7

Valeur moyenne de l'indicateur M' à l'altitude d'évaluation $Z=10 \text{ m}$ au-dessus des toits où les vents sont plus forts que la vitesse minimal exploitable du vent pour une éolienne (2 ou 3 m/s), liste des hauteurs des bâtiments avec des vents exploitable par les éoliennes et la surface totale des toits (unité de valeur du M' : $106 \text{ m}^5 \cdot \text{s}^{-3}$)

		Paris	Toulouse	Bombay	Barcelone	New York	Pékin
Moyenne de M' exploitable à $Z = 10 \text{ m}$ ($U > 3 \text{ m/s}$)		2,42	1,00	0,51	1,60	2,55	1,45
Moyenne de M' exploitable à $Z = 10 \text{ m}$ ($U > 2 \text{ m/s}$)		3,29	1,14	0,59	2,35	2,73	1,53
Bâtiments avec des vents exploitables	Hauteurs (m)	16, 18, 20, 24	27, 40, 50	24, 35	18, 20, 24, 27, 32	80-230	70, 87, 93
	Surface totale des toits (m^2)	111 346	16 724	13 223	88 212	46 174	24 220

Selon les données dans le Tableau 6-7, les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Le modèle de Paris est devenu beaucoup plus avantageux sur le total de valeur du m , grâce à une grande addition de bâtiments avec des toits exploitables. En fait, les hauteurs de ces bâtiments sont juste un peu inférieures que la hauteur moyenne et elles ne sont pas comptées dans le Tableau 6-6. Lorsque les autres modèles n'ont pas ou pas grande addition de bâtiments exploitables, l'avantage du modèle de Paris est monté. On peut voir que sa surface totale des toits est la plus grande parmi tous les modèles.

2) Le modèle de New York reste encore très avantageux pour le potentiel éolien sur le toit. Pourtant, lorsqu'on utilise une VAWT, qui est plus adaptée au vent turbulent, son avantage n'est pas évident. En fait, le modèle de Paris et celui de Barcelone ont une valeur de M' assez importante grâce à leurs grandes surfaces de toits avec des vents exploitables pour les VAWTs.

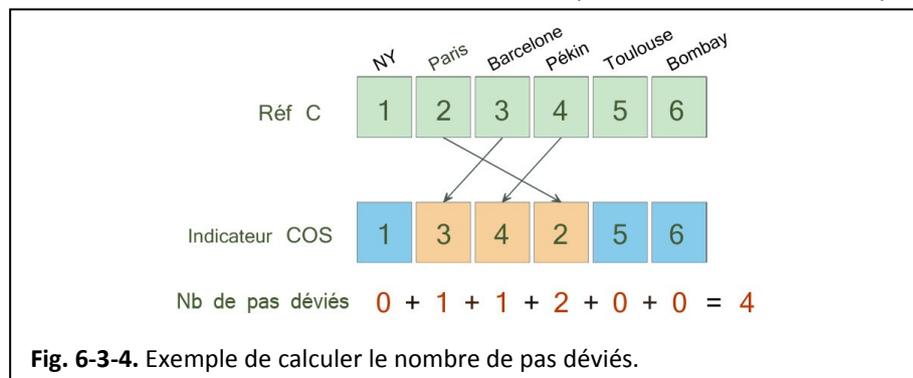
3) Différents que les modèles de Paris et de Barcelone, les autres modèles ont un petit changement des valeurs de M' entre deux conditions de seuils de vitesse. C'est-à-dire, pour eux une éolienne d'une petite vitesse de démarrage n'est pas un grand avantage, lorsque leurs surfaces de toits exploitables sont limitées et donc l'énergie éolienne dans les vents d'une vitesse de 2-3 m/s n'est pas importante.

6.3.4 Cohérence entre les paramètres morphologiques et les indicateurs énergétiques

Pour analyser la cohérence de l'indicateur de forme urbaine avec les performances du vent, les ordres des valeurs des indicateurs de performance du vent et les ordres des valeurs des indicateurs morphologiques sont comparés. La méthode de compter le nombre total de pas déviés dans la séquence est appliquée :

$$N_p = \sum_i N_{pi}$$

où $i = 1, 2, \dots, 6$ représente une séquence de 6 éléments (modèles de quartier), N_{pi} représente le nombre de : comparé l'ordre de référence. Quatre indicateurs de performance du vent sont sélectionnés : moyenne de C_v (**A**), amplitude moyenne de variation de C_v (**B**), moyenne de M' exploitable à $Z=10$ m au seuil de $U > 3$ m/s (**C**) et celle au seuil de $U > 2$ m/s (**D**). Les ordres sont pris de la valeur de l'indicateur la plus grande (marqué en 1) à la valeur la plus petite (marqué 6). Les ordres pour les indicateurs de forme urbaine sont aussi pris d'une valeur grande à une valeur petite en marquant 1 à 6. Un exemple de calculer le nombre de pas déviés dans une séquence est donné dans la Fig. 6-3-4. Les ordres des indicateurs de performance du vent sont comme des références et les nombres totaux de pas déviés de séquence pour chaque ordre de l'indicateur morphologique sont calculés (Tableau 6-8). Un nombre négatif de pas déviés signifie que le niveau de déviation de l'anti-séquence de l'ordre de référence. Le nombre de pas déviés est plus petit, la cohérence entre l'indicateur de forme urbaine et l'indicateur de performance du vent est plus grande.



Selon les résultats de N_p , les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Avec la moyenne de C_v (réf. **A**) et l'amplitude moyenne de C_v (réf. **B**), peu des indicateurs de forme urbaine ont une cohérence medium ($4 < |N_p| \leq 8$) et aucune indicateur morphologique présent ont une grande cohérence ($|N_p| \leq 4$).

2) Avec la moyenne de M' exploitable à $Z=10$ m au seuil de $U > 3$ m/s (réf. **C**), l'indicateur rugosité relative (R_r) a une cohérence « parfaite » ($N_p = 0$) et les indicateur $\overline{V_b}$, λ_c , R_a , P_o ont une cohérence assez grande ($|N_p| \leq 4$).

3) Avec la moyenne de M' exploitable à $Z=10$ m au seuil de $U > 2$ m/s (réf. **D**), les indicateurs comme $\overline{V_b}$, R_r , λ_c , R_a , P_o et O_c ont une cohérence assez grande ($|N_p| \leq 4$).

Tableau 6-8

Nombre de pas déviés entre les ordres des indicateurs morphologiques et les ordres des indicateurs de performance du vent pour des modèles de quartier

		Ordre de valeur de l'indicateur la plus grande (marqué en 1) à la plus petite (marqué en 6)						Nombre de pas déviés N_p			
		New York	Paris	Barce lone	Pékin	Toulo use	Bomb ay				
A	Moyenne de C_v	5	2	3	6	4	1				
B	Amplitude moyenne de C_v	1	3	6	5	2	4				
C	Moyenne de M' exploitable à Z=10 m (U > 3 m/s)	1	2	3	4	5	6				
D	Moyenne de M' exploitable à Z=10 m (U > 2 m/s)	2	1	3	4	5	6	A	B	C	D
	Coefficient d'emprise au sol (CES)	1	3	2	5	6	4	12	8	6	8
	Coefficient d'occupation des sols (COS)	1	3	4	2	5	6	-6	10	4	6
	Hauteur moyenne des bâtiments (\bar{H})	1	4	5	2	3	6	-6	8	8	10
	Ecart type de la hauteur des bâtiments (σ_h)	1	6	5	2	3	4	-6	8	12	12
	Coefficient de variation de la hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})	2	6	5	3	1	4	-8	8	-10	-8
	Hauteur maximale des bâtiments (H_{max})	1	6	5	2	3	4	-6	8	12	14
	Volume moyen des bâtiments (\bar{V}_b)	1	3	2	4	5	6	-10	10	2	4
	Complète ratio d'aspect (λ_c)	1	3	2	4	6	5	-12	10	4	6
	Rugosité absolue (R_a)	1	3	4	2	5	6	-6	10	4	6
	Rugosité relative (R_r)	1	2	3	4	5	6	-10	10	0	2
	Porosité absolue (P_o)	4	5	6	3	2	1	12	10	-4	-4
	Occlusivité moyenne (O_c)	3	1	2	4	6	5	12	14	6	4

En résumé, la majorité des modèles n'ont pas un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit, comparés avec les vents libres de mêmes hauteurs. Les bâtiments les plus hauts normalement ont un effet d'augmentation plus important. La moyenne des valeurs minimales et la moyenne des valeurs maximales du coefficient C_v sont toutes plus grandes pour les bâtiments hauts que pour les bâtiments bas. La hauteur du bâtiment est un élément décisif pour l'effet d'augmentation de la vitesse du vent. Les modèles des grandes tours avec des hauteurs variées ont une amplitude plus grande de variation de l'effet. Sur le potentiel éolien sur le toit, la surface totale des toits exploitable pour installer des éoliennes et la hauteur moyenne des bâtiments les plus hauts du modèle sont parmi des éléments d'impact les plus importants. De plus, une grande variation des hauteurs de bâtiment pourrait augmenter le potentiel éolien sur les toits. Pour l'adaptation des éoliennes, les VAWTs à une petite vitesse de démarrage ne produisent pas beaucoup plus d'énergie que les HAWTs. L'intensité de turbulence et l'efficacité de production d'éolienne sont nécessaires pour trouver un bon choix. Comme l'énergie éolienne totale sur toute la surface des parcelles dessus un toit, le coefficient M' n'est pas valable tout seul pour l'exploitation de l'énergie éolienne en pratique. En fait, les distributions de nombre des éoliennes et les tailles d'éoliennes doivent être précisés pour arriver un bilan juste de l'énergie éolienne au-dessus du toit. Un exemple sera donné dans le Chapitre 7.

De côté des indicateurs de forme urbaine, nous remarquons que deux indicateurs sont très cohérents avec le potentiel éolien au-dessus des toits : le coefficient de variation de la hauteur des bâtiments σ_h/\bar{H} , et l'indicateur de rugosité relative R_r . Avec une même densité (CES), une grande

valeur de ces indicateurs correspond à un potentiel éolien important sur les toits. Les indicateurs comme $\overline{V_b}$, λ_c , R_a , P_o ont une cohérence générale assez grande, les indicateurs COS, CES et H_{max} offrent des informations nécessaires pour définir un tissu en urbanisme, et les autres n'ont pas été trouvés des cohérences évidentes.

6.4 Simulations des modèles d'unité de forme urbaine

Pour faciliter la comparaison entre les modèles et rendre les modèles applicables dans le monde entier, trois modèles d'unité simplifiée des quartiers à Pékin (définis comme l'unité 01, 02 et 03) et un modèle d'unité simplifiée du quartier à Hong Kong (l'unité 04) ont été choisis. De plus, sur la base du modèle de l'unité 01, le modèle de l'unité 01b est plus simplifié en enlevant une tour et mis en scène de mode symétrique. Sur la base du modèle de l'unité 04, le modèle de l'unité 04b enlève les trois bâtiments de coin et est installé pour tester l'impact de cette modification. Les positions et les tailles de bâtiments dans les quatre modèles d'unités originales (l'unité 01-04) correspondent strictement aux situations réelles. Les modifications et changements dans l'unité 01b et 04b sont acceptables et faisable dans les conditions réelles. Nous représentons les unités de quartier en réalité dès que possible pour respecter les conceptions architecturales (e.g. mise en scène du plan d'une grande tour de logement) et les réquis d'urbanisme (e.g. l'exigence d'accès de soleil entre les bâtiments). Chaque modèle a assemblé 9 unités identiques et l'unité au centre est utilisé comme l'objet d'étude. L'échelle d'une unité varie de 170 m*170 m à 430 m*330 m.

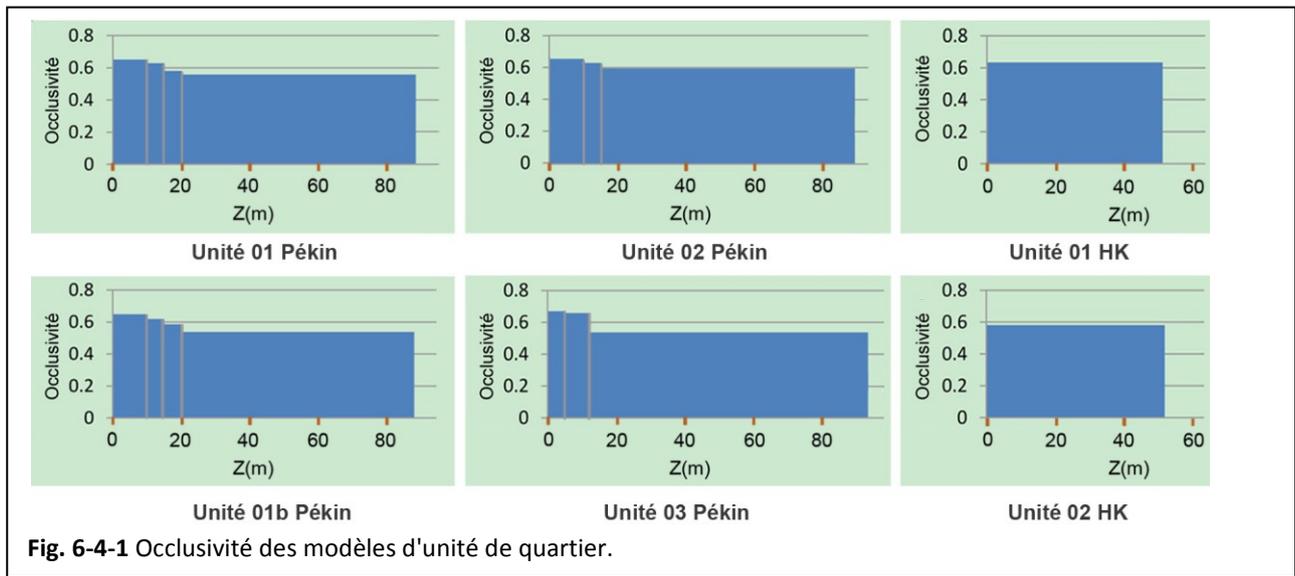
6.4.1 Description des indicateurs morphologiques des modèles d'unité

Sur les formes, on voit que l'unité 01 et l'unité 03 sont des groupes de tours de logements en forme de point particulier, l'unité 02 est un groupe de tours de logements en forme de barre et l'unité 04 est un groupe de tours en forme de points connectés. La majorité des indicateurs de la morphologie urbaine sont les mêmes que ceux de modèle de quartier réel présenté. Les valeurs de ces indicateurs des six modèles d'unité sont présentées dans le **Tableau 6-4-1** et la **Fig. 6-3-1**. On voit que les densités de bâtiment des quatre modèles de l'unité à Pékin sont similaires.

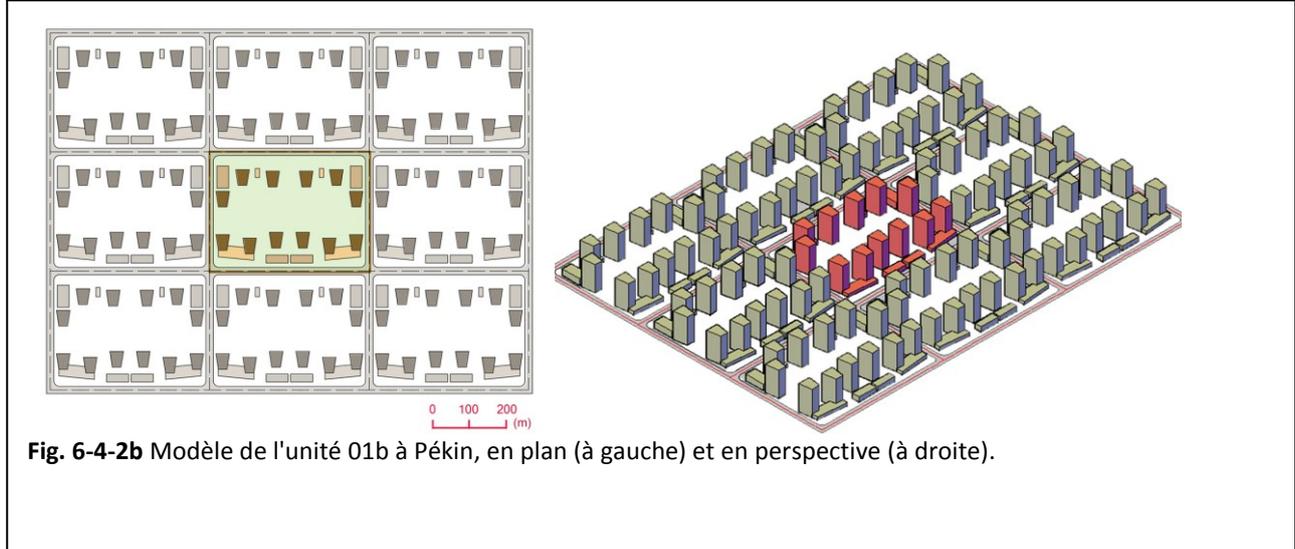
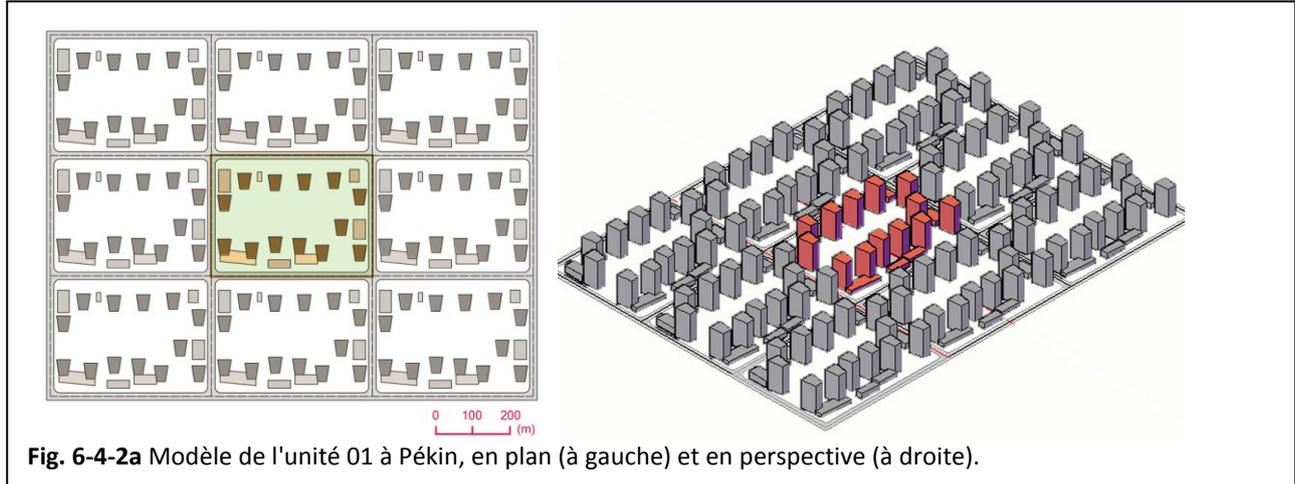
Tableau 6-4-1

Description des indicateurs morphologiques des modèles d'unité

Indicateur morphologique \ Site de quartier	Jinsong, Pékin unité 01	Jinsong, Pékin unité 01b	Jinsong, Pékin unité 02	Jinsong, Pékin unité 03	Hung hom, Hong Kong unité 04	Hung hom, Hong Kong unité 04b
Type de forme urbaine	Logement collectif	Logement collectif	Logement collectif	Logement collectif	Logement collectif	Logement collectif
Surface de terrain de l'unité	142145 m ²	142145 m ²	134522 m ²	136583 m ²	26200 m ²	26200 m ²
Coefficient d'emprise au sol (CES)	19,09 %	19,42 %	14,12 %	19,13 %	35 %	26,92 %
Coefficient d'occupation des sols (COS)	3,59	3,40	3,15	3,49	5,95	4,58
Hauteur moyenne des bâtiments (\bar{H})	59,53 m	55,50 m	70,01 m	57,53 m	50 m	50 m
Hauteur maximum de bâtiment (H_{max})	87 m	87m	87m	93 m	50 m	50 m
Coefficient de variation de la hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})	59,6 %	65,1 %	44,4 %	72,1 %	0 %	0 %
Volume moyen des bâtiments (\bar{V}_b)	80 744 m ³	76 611 m ³	66 458 m ³	62 627 m ³	35 250 m ³	35 250 m ³
Complète ratio d'aspect (λ_c)	1,46	1,39	1,60	1,36	2,48	2,63
Rugosité absolue (R_a)	11,36 m	10,78 m	9,89 m	11 m	17,5 m	13,46 m
Rugosité relative (R_r)	46 053 m ³	46 933 m ³	39 613 m ³	55 563 m ³	0 m ³	0 m ³
Porosité absolue (P_o)	88,3 %	88,9 %	89,3 %	89,8 %	70,8 %	77,6 %
Occlusivité moyenne (O_c)	57,24 %	55,71 %	60,17 %	55,28 %	63,31 %	58,14 %



Les Fig. 6-4-2 (a à f) présentent les plans et les perspectives de géométries des six modèles d'unité. Sur le plan la limite du domaine d'étude, dite l'unité au milieu, est marquée avec couleur. La profondeur de couleur en plan remarque la hauteur du bâtiment : plus profonde est la couleur, plus importante est la hauteur du bâtiment.



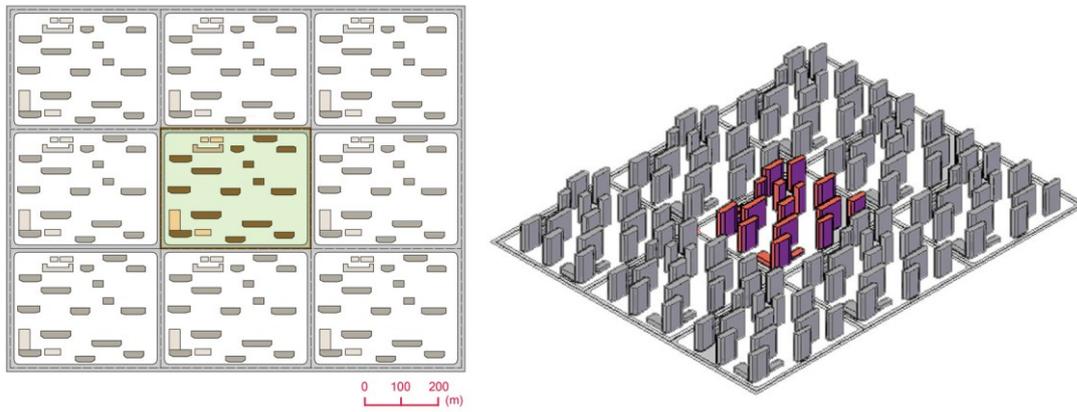


Fig. 6-4-2c Modèle de l'unité 02 à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

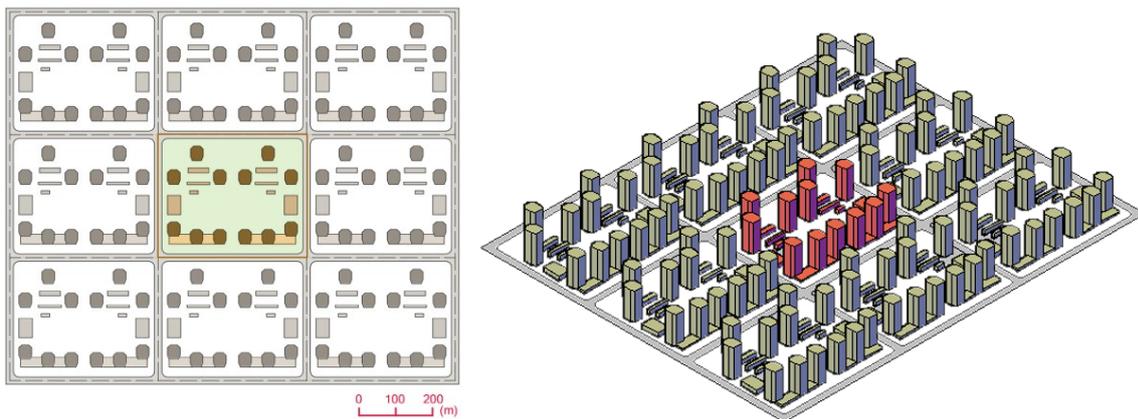


Fig. 6-4-2d Modèle de l'unité 03 à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

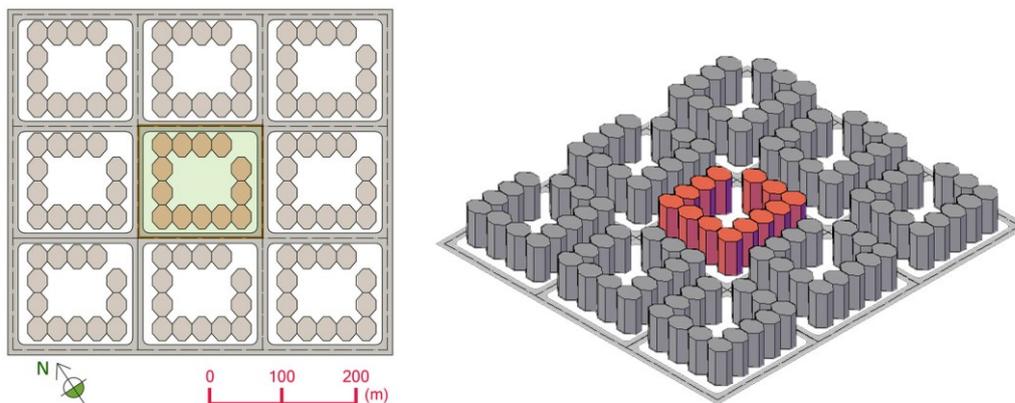


Fig. 6-4-2e Modèle de l'unité 04 à Hong Kong, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

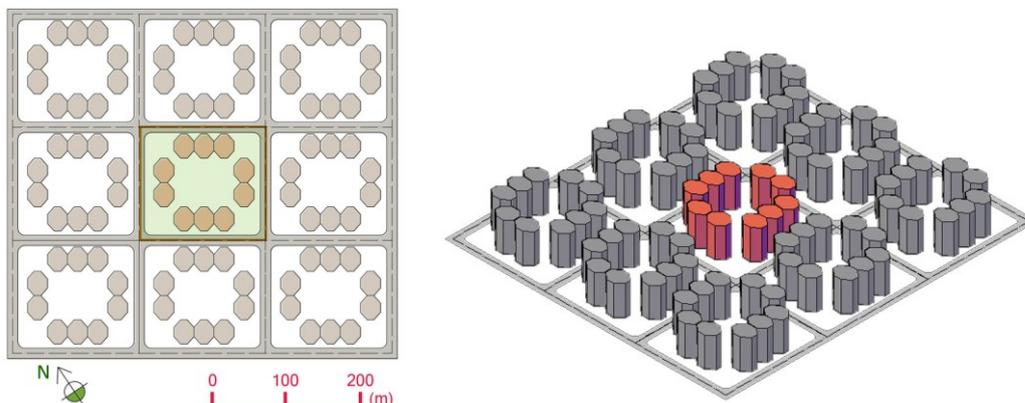


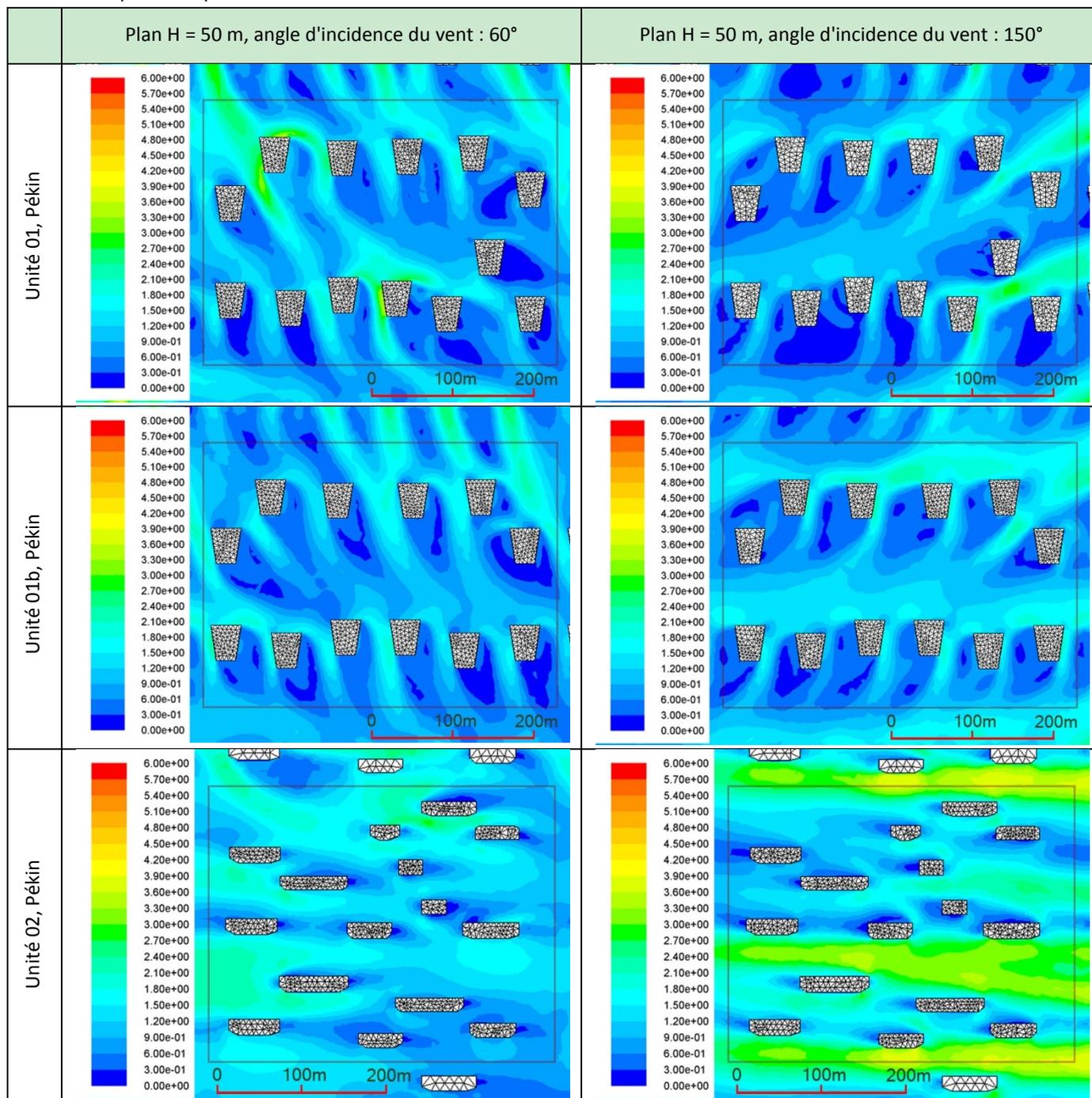
Fig. 6-4-2f Modèle de l'unité 04b à Hong Kong, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

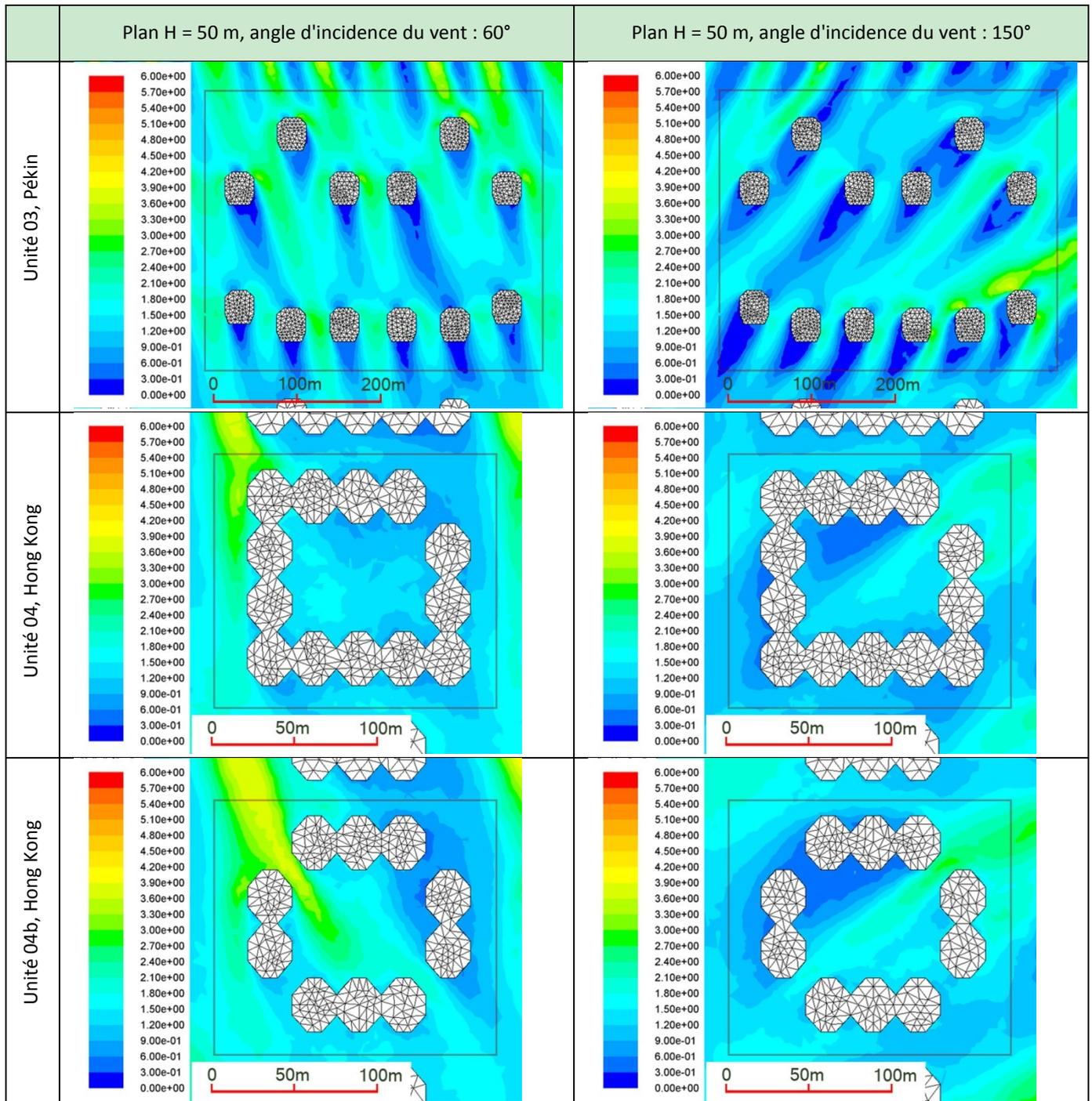
6.4.2 Résultats sur le rendement énergétique éolien des modèles d'unité

Sans compter sur la condition locale de climat, nous appliquons le même profil de vent et stimulons 8 directions d'incidence du vent tout au tour pour tous les modèles d'unité. L'impact de forme sur le vent est évalué sur le rendement énergétique éolien. Des exemples de représentation de contours de vitesse de vent dans deux directions d'incidence, 60° et 150°, à une hauteur de coupe H = 50 m de chaque modèle dans la zone d'unité au milieu sont donnés dans le **Tableau 6-4-2**.

Tableau 6-4-2

Exemples de représentation de contours de vitesse de vent des modèles d'unité





Comme l'analyse des modèles de quartier réel, la vitesse moyenne pondérée est calculée sur les parcelles aux trois altitudes ($Z = 5\text{ m}$, 10 m , 15 m) au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts dans les modèles d'unité. En fait, chaque modèle a un seul type de tour à évaluer. Le coefficient C_v au-dessus des toits des tours et la somme du potentiel éolien de surface (M') pour différents angles d'incidence du vent sont analysés pour chaque modèle. Pour favoriser la comparaison parmi les modèles, les valeurs du coefficient C_v sont évaluées. Ses valeurs moyennes et amplitudes moyennes sur tous les angles d'incidence du vent et à trois différentes altitudes d'évaluation, l'intervalle de variation à $Z = 10\text{ m}$, et les meilleurs angles d'incidence du vent pour un grand effet d'augmentation sont précisés dans le [Tableau 6-4-3](#). Les résultats détaillés du coefficient C_v des modèles d'unité pour différents angles d'incidence du vent sont données dans l'[Annexe 04](#). Selon les résultats dans le [Tableau 6-4-3](#), des conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Comparés avec le modèle du quartier à Pékin, tous les modèles d'unité avec des configurations des bâtiments similaires ont un C_v beaucoup plus faible. Par exemple, à $Z = 15\text{ m}$, la valeur moyenne du coefficient C_v égale à 0,87 au-dessus du toit d'une tour de 87m dans le modèle du quartier à

Pékin, alors au-dessus du toit d'une tour de même hauteur dans le modèle d'unité 01, 01b et 02, C_v égale à 0,50. Le raison vient probablement de la grande rugosité alentour de l'unité d'étude lorsque 8 autres unités identiques sont installées tout autour.

2) En changeant l'angle d'entre du vent, l'unité de tour en forme de barre (unité 02) a une variation de valeur de C_v beaucoup plus importante que celle d'une unité de tour en forme de point indépendant (unité 01, 03). C'est-à-dire, un assemblage des bâtiments en barre est beaucoup plus sensible dans la direction du vent incident qu'un modèle des bâtiments en forme de point.

3) Lors qu'elle enlève une tour et rend l'espace entre les tours plus spacieux sur la base de l'unité 01, l'unité 01b touche un C_v un peu plus élevé que l'unité originale. Les meilleurs angles d'incidence du vent ne changent pas.

4) Entre les deux unités de bâtiments en forme de point, l'unité 01b et l'unité 03, qui ont des valeurs des indicateurs morphologiques très similaires, nous remarquons que l'unité 03 a un effet d'augmentation du vent plus grand que l'autre unité. L'amplitude moyenne de changement sur différents angles d'incidence est plus petite pour l'unité 03 que pour l'unité 01b. Les raisons viennent peut-être des tours de l'unité 03 un peu plus hautes (93 m) que celles de l'autre (87 m) et la forme de plan bâti de ses tours plus arrondi. Rappelons nous que un bâtiment de plan hexagonal a toujours un effet d'augmentation du vent supérieur au-dessus du toit à un bâtiment de plan carré ou rectangulaire avec la même surface (voir le [Chapitre 5.2.1](#)).

5). Lors qu'elle enlève trois tours de coin sur la base de l'unité 04, l'unité 04b a un C_v légèrement plus élevé que l'unité originale. L'amplitude moyenne de changement sur différents angles d'incidence est devenue plus petite. Les meilleurs angles d'incidence du vent ne changent pas.

Tableau 6-4-3

Valeur moyenne à trois altitudes d'évaluation, Intervalle de variation à $Z = 10$ m, amplitude moyenne de variation des valeurs du coefficient C_v pour les six modèles d'unité et les meilleurs angles d'incidence du vent

	Pékin unité 01	Pékin unité 01b	Pékin unité 02	Pékin unité 03	Hong Kong unité 04	Hong Kong unité 04b
A Z = 15 m	0,49	0,51	0,50	0,56	0,39	0,44
A Z = 10 m	0,43	0,46	0,45	0,51	0,34	0,38
A Z = 5 m	0,35	0,37	0,37	0,39	0,26	0,30
Intervalle à Z = 10 m	0,36~0,54	0,38~0,56	0,25~0,64	0,45~0,57	0,20~0,43	0,32~0,46
Amplitude moyenne	0,178	0,184	0,375	0,113	0,216	0,142
Meilleurs angles d'incidence	-75°, -120°	-75°, -120°	-165°, 15°	-75°, 60°	60°, -120°	-120°, 60°

Pour l'énergie éolienne totale au-dessus des toits, nous prenons compte de tous les tours dans la zone de l'unité d'étude. Les valeurs de l'indicateur M' pour différents angles d'incidence du vent sont données dans l'[Annexe 04](#). Ses valeurs moyennes à trois altitudes sur le toit, l'amplitude moyenne de variation, hauteur de tours et les surfaces totales de toits des tours sont résumés dans le [Tableau 6-4-4](#).

Les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Avec une surface totale de toits exploitables 8 % moins que l'unité 01, l'unité 01b touche une somme du potentiel éolien au-dessus du toit 12 % (en moyenne à trois altitudes) moins que celle de l'unité originale, même si elle a un C_v un peu plus important (5 % en moyenne, voir le [Tableau 6-4-3](#)).

2) En comparaison entre les deux unités similaires de bâtiments en forme de points (l'unité 01b et l'unité 03), on voit que l'unité 03 qui a une surface 4 % moins mais une somme de l'énergie éolienne 30 % en moyenne plus que celles de l'unité 01b. La raison vient d'un effet supérieur d'augmentation du vent au-dessus du toit.

3) Même si sa valeur moyenne de C_v a un avantage insignifiant que celle de l'unité 01, de plus avec une surface totale de toits 14 % de moins, l'unité 02 touche un potentiel éolien 21 % en moyenne de plus que l'autre. Le raison vient de la grande variation de vitesse (voir l'amplitude

moyenne) lorsque l'énergie éolienne varie avec le cube de la vitesse du vent : avec une même vitesse moyenne, le vent qui a une fréquence plus élevée des grandes vitesses, ainsi une fréquence plus élevée des petites vitesses, touche une somme d'énergie plus importante que celui qui a des vitesses peu variées.

4) Avec 3 % moins de surface totale de toits et 10 % moins de densité bâti (COS) que l'unité 03, l'unité 02 touche une somme de l'énergie éolienne plus importante à une petite altitude sur le toit mais moins importante à une grande altitude.

5) Même si sa surface totale de toits des tours est 23 % moins que celle de l'unité 04, l'unité 04b a une somme du potentiel éolien 28 % plus que l'unité 04. Donc, l'enlèvement des trois tours de coin est favorable pour augmenter l'effet du vent et l'énergie éolienne totale au-dessus du toit.

Tableau 6-4-4

Valeur moyenne de l'indicateur M' pour évaluer le potentiel éolien aux trois altitudes sur le toit, amplitude moyenne des valeurs du M' , hauteur des tours et surface totale de toiture des tours des modèles d'unité (unités de $m' : 10^6 m^5 \cdot s^{-3}$)

	Pékin unité 01	Pékin unité 01b	Pékin unité 02	Pékin unité 03	Hong Kong unité 04	Hong Kong unité 04b
Moyenne de M' à $Z=15$ m	0,413	0,377	0,460	0,505	0,143	0,191
Moyenne de M' à $Z=10$ m	0,296	0,263	0,355	0,358	0,089	0,125
Moyenne de M' à $Z=5$ m	0,161	0,137	0,212	0,166	0,043	0,061
Amplitude moyenne de M'	0,279	0,246	0,613	0,205	0,124	0,116
Hauteur de tours	87 m	87 m	87 m	93 m	50 m	50 m
Surface totale de toits des tours	16 939 m ²	15 636 m ²	14 608 m ²	15 072 m ²	9 165 m ²	7 050 m ²

Pour analyser la cohérence de l'indicateur de forme urbaine avec les performances du vent, la cohérence entre les ordres des valeurs des indicateurs de performance du vent et les ordres des valeurs des indicateurs morphologiques sont analysés. La méthode de calculer le nombre total de pas déviés dans la séquence est réutilisée. En raison de grande différence, les unités de Pékin et de Hong Kong sont évaluées séparément. Selon les résultats de N_p (Tableau 6-4-5), nous trouvons que, sauf σ_h/\bar{H} et R_r , la majorité des indicateurs morphologiques ont peu de cohérence générale avec les indicateurs de performance du vent. En fait, comme les résultats de modèles de quartier, les deux indicateurs mentionnés ci-dessus montrent aussi une grande cohérence générale ici ($|N_p| \leq 2$).

Tableau 6-4-5

Nombres de pas déviés entre les ordres des indicateurs morphologiques et les ordres des indicateurs d'évaluation du vent pour des modèles d'unité

		Ordre						Nombre de pas déviés N_p			
		de valeur de l'indicateur la plus grande (marqué en 1) à la plus petite (marqué en 6)									
		unité 01	unité 01b	unité 02	unité 03	unité 04	unité 04b				
A	Moyenne de C_v	3	2	4	1	2	1				
B	Amplitude moyenne de C_v	3	2	1	4	1	2				
C	Moyenne de M' à $Z=15$ m	3	4	2	1	2	1				
D	Moyenne de M' à $Z=5$ m	3	4	1	2	2	1	A	B	C	D
Coefficient d'emprise au sol (CES)		3	1	4	2	1	2	4/1	4/0	4/1	2/1
Coefficient d'occupation des sols (COS)		1	3	4	2	1	2	6/1	6/0	6/1	4/1
Hauteur moyenne des bâtiments (\bar{H})		2	4	1	3			6	6	-4	-2
Coefficient de variation de la hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})		3	2	4	1			0	2	2	4
Volume moyen des bâtiments (\bar{V}_b)		1	2	3	4			-4	4	-2	-4
Complète ratio d'aspect (λ_c)		2	3	1	4	2	1	4/0	2/1	4/0	-4/1
Rugosité absolue (R_a)		1	3	4	2	1	2	6/1	6/0	6/1	4/1
Rugosité relative (R_r)		3	2	4	1			0	2	2	4
Porosité absolue (P_o)		4	3	2	1	2	1	4/0	-4/0	2/0	4
Occlusivité moyenne (O_c)		2	3	1	4	1	2	4/1	2/0	-2/0	-4/0

En résumé, aucune modèle d'unité n'a un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit, et ils sont même pires que les modèles de quartier réel. La raison vient de la grande rugosité autour l'unité de recherche. Pourtant, l'objectif des simulations d'unité est de comparer la performance du vent ente des unités avec peu de changement ou avec des valeurs des indicateurs morphologiques très similaires. Les résultats montrent que le modèle avec des bâtiments en forme de points a une variation pour différents angles d'incidence du vent inférieure à le modèle avec des bâtiments en forme de barre. A une altitude faible les bâtiments en forme de barre récolte un potentiel éolien plus important que les bâtiments en forme de point, mais au contraire à une altitude importante. Les bâtiments en forme de points plus arrondie comme un hexagonal en plan sont plus favorables pour obtenir un vent fort au-dessus des toits. L'enlèvement d'un ou plusieurs bâtiments dans un modèle est favorable pour augmenter la vitesse du vent moyenne au-dessus du toit, mais il n'assure pas l'augmentation de l'énergie éolienne totale. Il faut prendre aussi en considération de la perte de surface de toits exploitables. Du côté des indicateurs morphologiques, l'indicateur σ_h/\bar{H} et l'indicateur R_r continuent de montrer une grande cohérence générale avec les indicateurs de performance du vent.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre des modèles complexes à l'échelle de quartier sont considérés.

Tout d'abord, suivi l'analyse d'application des différents indicateurs de forme urbaine dans la synthèse bibliographique, des indicateurs potentiellement utiles pour identifier l'impact de la morphologie urbaine sur le vent ont été choisis. Pour l'étape présente, les treize indicateurs choisis portent sur la forme physique et les relations de configuration. Leurs méthodes de calcul et leurs implications potentielles de l'impact de la forme urbaine sur le vent sont expliquées.

Ensuite, deux indicateurs morphologiques sont analysés particulièrement. Avec un modèle de base de groupe de 24 bâtiments identiques de $W*L*H = 12m*30m*20m$, les impacts de la porosité et de la densité (CES) du modèle sur l'effet du vent et le bilan de l'énergie éolienne sont discutés. Les résultats sur la porosité montrent que, pour un groupe de bâtiments sans cours, l'addition des cours dans des bâtiments au milieu rend généralement le vent au-dessus du toit moins fort. Par contre, l'addition des cours dans tous les bâtiments du tissu rend le vent au-dessus du toit plus fort. Pour les groupes de bâtiments avec cours dans chaque bâtiment, il y aura une porosité correspondant à l'effet du vent maximal au-dessus du toit. De plus, l'addition des cours dans les bâtiments autour de cours existantes au milieu du modèle peut accélérer les vents au-dessus du toit. En fait, différentes positions dans le plan montrent les différents effets du vent. Nous trouvons que les vents au-dessus des toits des bâtiments situés en amont sont peu influencés par l'existence des cours mais les bâtiments situés en aval sont beaucoup influencés. Pour les modèles avec des cours au milieu, qui ont un effet du vent plus faible en générale que le modèle sans cours, récoltent des vents plus forts à la ligne centrale du plan. Au contraire, les modèles avec cours dans tous les bâtiments ont des vents forts en générale mais faibles à la ligne centrale. Plusieurs groupes de bâtiments avec différentes formes en plan ont été choisis pour analyser l'impact de la densité à l'échelle de quartier. Les résultats sur la densité montrent que, la fragmentation de volume d'un bâtiment dans la même emprise du sol ralentit le vent d'ensemble. La diminution de densité d'un tissu par raccourcir la longueur de tous les bâtiments accélère les vents au-dessus des toits. Tandis que le changement de densité par varier la largeur des bâtiments a une influence faible sur l'effet du vent au-dessus du toit. Les bâtiments à la ligne centrale du modèle sont peu influencés par les changements de forme bâtie (longueur, largeur). Parmi les modèles de même densité ou de même porosité, les rendements de l'énergie éolienne sont différents. Les formes et les positions de cours prennent beaucoup plus d'importance que l'indicateur de la porosité et la densité.

Ensuite, six quartiers typiques dans des différentes villes sont modélisés : quartiers à Paris, à Toulouse, à Bombay, à Barcelone, à New York et à Pékin. Afin de comparer et discuter parmi eux les conditions initiales sont mis en identiques sans prendre en compte le climat local ou l'environnement socio-économique dans cette phase d'étude. Sur la base du modèle de la validation les paramètres de code CFD sont réévalués et s'adaptés aux conditions nouvelles. Un compromis est trouvé entre la précision des résultats et le temps du calcul. Des mesures de vérification sont pris pour assurer une cohérence et pertinence des résultats. Le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent (C_v) au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts ($H > \bar{H}$) du modèle et le potentiel éolien total de surface (M') sur les parcelles au-dessus du toit sont analysés pour chaque modèle. 8 directions d'incidence du vent tout autour d'un modèle sont considérées. Les résultats montrent que, la majorité des modèles de quartier n'ont pas un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit. Les grandes tours ont des vents très faibles à une petite altitude sur le toit, mais des vents peut-être très forts à une altitude élevée. Pourtant son effet moyen est plus faible que les bâtiments d'une hauteur moyenne. Les bâtiments les plus hauts normalement montrent un C_v plus important. La hauteur du bâtiment est un élément décisif pour l'effet d'augmentation de la vitesse du vent. Les modèles avec des grandes tours qui ont des hauteurs variées montrent une amplitude plus grande de variation de

l'effet du vent. Sur le potentiel éolien total au-dessus du toit (M'), la surface totale des toits exploitable pour installer des éoliennes et la hauteur moyenne des bâtiments les plus hauts du modèle sont parmi les impacts les plus importants. Une grande variation de la hauteur des bâtiments pourrait augmenter le potentiel total du quartier. Comparés avec les éoliennes à axe horizontal (HAWTs), les éoliennes à axe vertical (VAWTs), qui sont normalement plus adaptées au Environnement aéraulique turbulent dans une ville et ont une plus petite vitesse de démarrage, ne produisent pas beaucoup plus d'énergie sauf dans les modèles qui ont une surface totale très importante de toits exploitables. L'intensité de turbulence et l'efficacité de production électrique éolienne sont parmi des informations nécessaires pour orienter un bon choix d'éolienne. Le coefficient M' n'est pas valable tout seul pour évaluer l'énergie éolienne. La distributions de vitesses variées des vents dans un espace est un autre élément très important. A l'étape présente, les valeurs moyennes du coefficient C_v et du M' sont évaluées pour comparer le potentiel éolien général entre les différents modèles de quartier.

Enfin, sur la base de modèle de quartier réel, six modèles d'unité avec des bâtiments simplifiés ou avec des petites modifications sont testés. L'objectif des simulations des modèles d'unité est de comparer la performance du vent entre des unités qui ont peu de changement l'un de l'autre, ou qui ont des valeurs des indicateurs morphologiques très similaires. Les résultats montrent que le modèle avec des bâtiments en forme de points est moins sensible pour différents angles d'incidence du vent que le modèle avec des bâtiments en forme de barre. A une altitude faible sur les toits, les bâtiments en forme de barre récolte un potentiel éolien plus important que les bâtiments en forme de point, mais à une altitude élevée ils récoltent moins que les autres. Les bâtiments en forme de points avec un plan plus arrondi comme un hexagonal, sont plus faciles d'obtenir un vent fort au-dessus des toits. L'enlèvement d'un ou plusieurs bâtiments dans un modèle peut augmenter la vitesse du vent moyenne au-dessus du toit, mais il n'assure pas une augmentation de l'énergie éolienne totale du quartier à cause de la perte de surface de toits exploitables. Donc, sur les prototypes de forme urbaine pour développer énergie éolienne au-dessus du toit, nous proposons un tissu urbain avec des tours en forme de point avec des coins tronqués ou arrondis en plan, et un tissu avec des tours en forme de barres quand le vent dominant est parallèle à la longueur de la barre.

Du côté des indicateurs morphologiques, nous trouvons que deux indicateurs sont très cohérents avec le potentiel éolien au-dessus des toits : le coefficient de variation de la hauteur des bâtiments σ_h/\bar{H} et l'indicateur de rugosité relative R_r . Avec une même densité (CES), une grande valeur de ces deux indicateurs correspond à un potentiel éolien important sur les toits. Les autres indicateurs comme \bar{V}_b , λ_c , R_a , P_o ont une certaine de cohérence mais pas assez pour prévoir la capacité de production éolienne.

7. Développement et application de l'énergie éolienne dans la ville

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode d'évaluation de l'énergie éolienne dans un quartier réel. Les facteurs socio-économiques ainsi que les climats locaux, notamment la distribution du vent, sont considérés. Le modèle du quartier choisi ici est plus large en échelle que celui discuté dans le chapitre précédent, afin de présenter une précision plus élevée. La simplification du modèle est évaluée et appliquée. Les paramètres morphologiques du quartier sont comparés entre le modèle du domaine d'étude et le modèle du domaine étendu, ainsi qu'entre les modèles avant et après simplification. Selon la distribution du vent local, le coefficient C_v et l'indicateur M correspondant aux vents au-dessus des toits sont calculés pour le quartier dans son ensemble et pour chaque grande tour exploitable.

Ensuite, des propositions sur des éoliennes adaptées au cas d'étude, ainsi que sur leurs rendements énergétiques sont données. Un exemple d'implantation des éoliennes sur le toit et d'évaluation de l'énergie éolienne dans différentes positions est présenté. Selon les résultats de simulation et les conditions locales, la rentabilité de l'éolienne choisie est étudiée.

Enfin, une méthode mathématique basée sur des paramètres morphologiques est présentée pour évaluer le potentiel éolien au-dessus du toit. L'indicateur de l'impact d'obstacle est choisi. De nombreux essais de simulation sont effectués pour analyser l'impact de différents paramètres morphologiques. Des fonctions provisoires sont trouvées pour présenter la relation entre le coefficient C_v et ces paramètres. La cohérence entre les résultats de la méthode mathématique et ceux de la simulation CFD est analysée.

7.1 Simulation et analyse le potentiel éolien du quartiers de Jinsong

7.1.1 Etat de lieu du quartiers de Jinsong

Le quartier de Jinsong se trouve dans le district de Chaoyang à Pékin, au milieu de la zone urbaine et à côté du centre ville. La position du quartier à différentes échelles ainsi que des photos de constructions typiques du quartier sont présentés dans la Fig. 7-1-1. Le quartier de Jinsong est choisi en raison de la forme typique des tours d'habitation. Puisque ce n'est pas un quartier municipal, les données particulières au site ne sont pas disponibles. Les données du district de Chaoyang et de la ville Pékin sont donc prises en compte comme la référence.

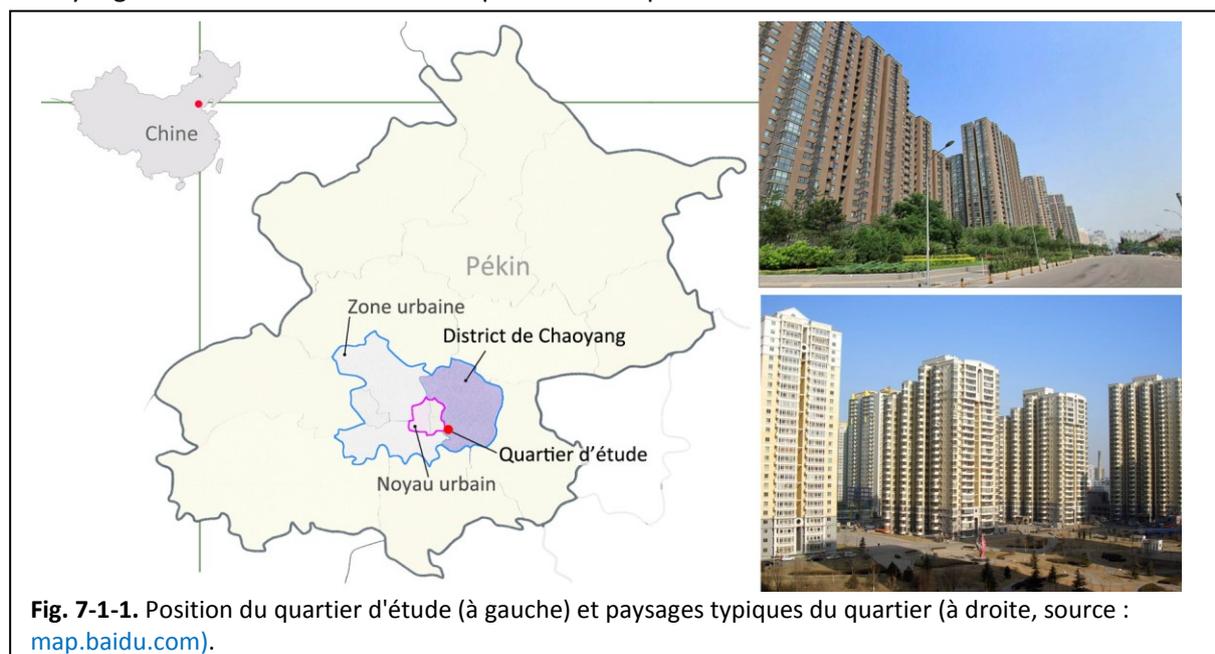


Fig. 7-1-1. Position du quartier d'étude (à gauche) et paysages typiques du quartier (à droite, source : map.baidu.com).

1) Population

Pékin est la capitale et le centre politique et culturel de la Chine. Elle est également la deuxième ville la plus peuplée en Chine continentale avec 21 millions d'habitants en 2013. A Est de Pékin, le district de Chaoyang a une population résidente de 3,84 millions en 2013 et une superficie de 470,8 km², soit une densité de 8.158 Hab/km². 45,8 % de la population du district sont les étrangères résidentes⁵⁶. Une grande proportion d'immigrants (67 %) est arrivée pour le travail⁵⁷. 82 % de la population sont entre 15 à 64 ans et 9 % sont les personnes âgées (> 65 ans).

2) Economie

Pékin est la première ville post-industrielle en Chine continentale, avec une industrie tertiaire qui représente 76,9 % de son PIB⁵⁸. Le revenu disponible des ménages par habitant du district de Chaoyang est de 41.035 RMB (6.627 \$) en 2013 et son PIB par habitant est de 104.498 RMB (16.874 \$)⁵⁹. En comparaison, le PIB par habitant en 2013 en France est de 42.991 \$ et aux Etats-Unis il est de 52.839 \$⁶⁰.

3) Travail

Le taux de chômage enregistré du district de Chaoyang est de 0,73 % en 2013. En 2013, le district a créé 138.000 nouveaux emplois. 70 % de population possèdent l'Assurance retraite de l'Etat et 74 % possèdent l'Aide médicale de l'Etat. La proportion de la population qui reçoit l'allocation de subsistance minimum est de 0,4 %.

4) Vie d'habitant

Dans le district de Chaoyang, les dépenses de consommation annuelle moyenne par habitant sont de 28.315 RMB (4.573 \$), soit 69 % du revenu disponible des ménages. Le coefficient d'Engel, la proportion de dépense de nourriture dans la dépense totale, est de 32 % pour la zone urbaine. Chaque groupe de 100 familles urbaines possèdent 43 voitures, 106 ordinateurs, 205 téléphones portables et 169 climatiseurs.

5) Environnement

Pékin a un climat continental sec sous influence de la mousson humide, caractérisé par des étés chauds et humides et des hivers généralement froids, venteux et secs. Les températures moyennes vont de -2,7 °C pour le mois le plus froid, à 27,0 °C pour le mois le plus chaud. La pluviométrie atteint 532,0 mm en moyenne par an et environ 70 jours de pluie par an. La difficulté de l'approvisionnement en eau potable, la forte pollution atmosphérique, l'insuffisance des capacités de transport sont parmi les problèmes environnementaux les plus aigus.

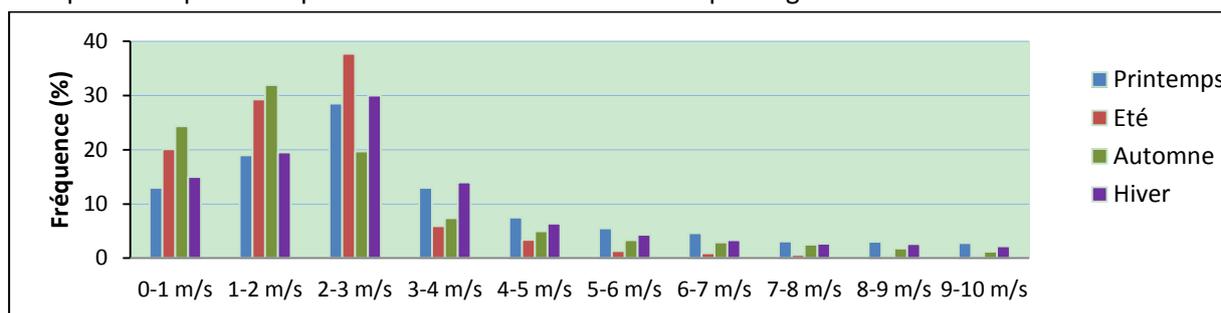


Fig. 7-1-2 Distribution des vitesses des vents aux différentes saisons (selon Météo Chaoyang).

Le district de Chaoyang se situe à une latitude de 39°53'N et à une longitude de 116°28'E. La distribution des vitesses des vents aux quatre saisons est donnée par le Bureau de la Météorologie du district de Chaoyang (Fig. 7-1-2). Les roses des vents des quatre saisons et de l'année sont également données (Fig. 7-1-3). On voit que le vent dominant est de Nord-ouest. La vitesse moyenne

⁵⁶ <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjxx/bulletin/8a24fe8345f410840145f8be044800c3.html>

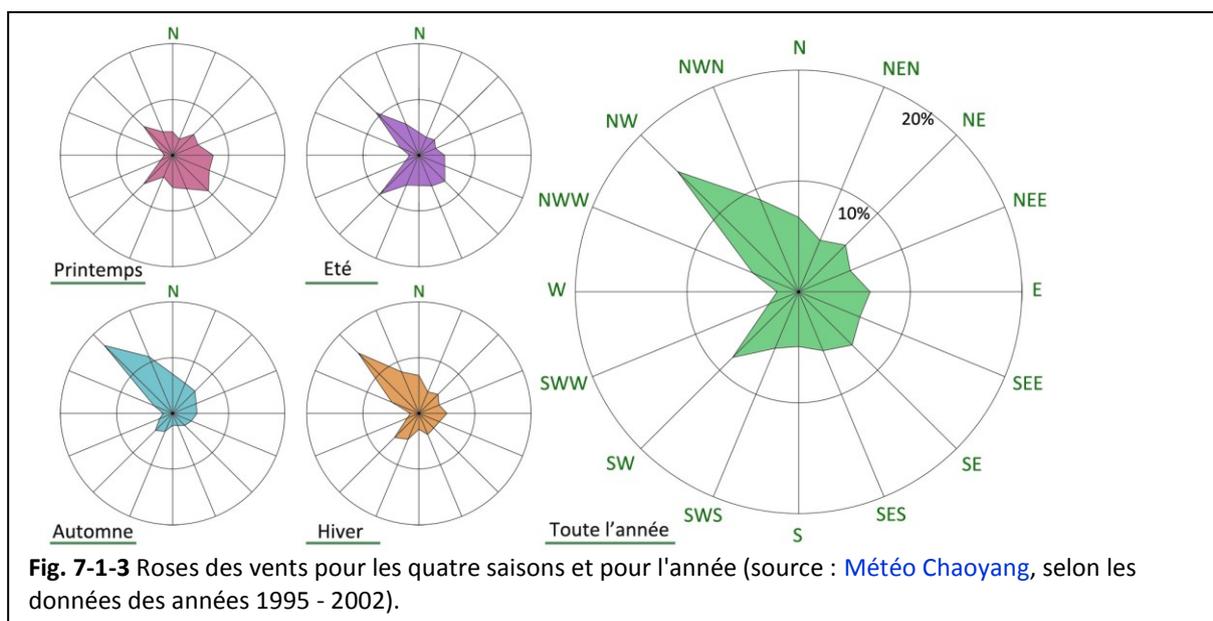
⁵⁷ <http://news.163.com/14/0619/02/9V2MS0JK0001124J.html>

⁵⁸ http://www.360doc.com/content/14/0313/15/502486_360270979.shtml

⁵⁹ <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjxx/bulletin/8a24fe8345f410840145f8be044800c3.html>

⁶⁰ <http://www.journaldunet.com/economie/magazine/classement-pib.shtml>

du vent est de 3,21 m/s au printemps, 2,09 m/s en été, 2,4 m/s en automne, 2,98 m/s en hiver, et 2,67 m/s dans l'année en moyenne. Le taux de couverture arborée du district est de 47 % et la surface d'espace vert par habitant est de 27 m². La densité linéique du réseau routier est 4 km/km².⁶¹



En conclusion, le quartier de Jinsong, situé au centre ville de Pékin, a des activités économiques dynamiques et un niveau de vie assez élevé. Ces conditions offrent à l'achat d'une installation d'énergie renouvelable une base économique solide. En outre, le quartier comme l'ensemble du centre ville de Pékin, a une population très dense, et des problèmes environnementaux assez aigus. Ceux-ci génèrent une volonté générale, du gouvernement ainsi que des habitants, quand à l'application des technologies liées aux énergies renouvelables. De plus, l'ensemble des grandes tours du quartier est favorable à l'implantation d'éoliennes sur les toits.

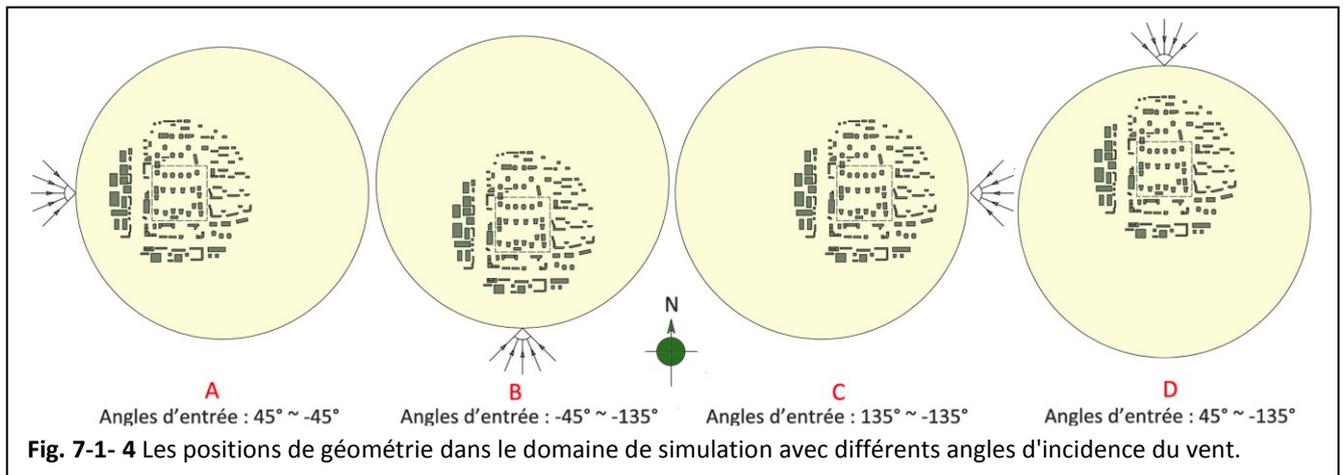
7.1.2 Conditions de simulation

Sur la base de modèle de quartier de Pékin présenté dans le chapitre précédent, des modifications nécessaires sur les conditions initiales et sur les paramètres de simulation ont dû être prises en compte.

1) Sur le domaine et géométrie

La surface du domaine d'étude correspond à l'échelle de quartier soit $450m * 450m = 202\,500\,m^2$. Un terrain d'extension en rayon de 600 m ($S = \pi r^2 = 1\,130\,973\,m^2$) est modélisé avec des constructions réelles autour de la zone d'étude. La taille du domaine de simulation est définie avec un rayon $R = 1200\,m$, à travers plusieurs essais et analyses de la sensibilité de domaine. La géométrie est positionnée d'une façon d'économiser l'espace du domaine ainsi de prendre en compte des lignes de directrice sur la simulation CFD (Fig.7-1-4) : la distance entre l'entrée du champ et le bâtiment au premier rang $D_a > 4H$ où H est la hauteur du bâtiment ; la distance entre le bâtiment du dernier rang et le fond du champ dans la direction du vent $D_b > 11H$; la distance latérale $D_c > 6H$; la hauteur du domaine $H_a > 7H$; le taux de blocage de l'écoulement par la zone de construction inférieure à 1,5 %.

⁶¹ <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjxx/bulletin/8a24fe8345f410840145f8be044800c3.html>



2) Sur le maillage

Des nouveaux paramètres de maillage ont été choisis pour obtenir un compromis entre la précision de calcul et le nombre de mailles. Les modifications principales sont les suivantes : la précision sur la taille des bâtiments dans la zone d'étude $L_b = 6$ m, la précision sur la taille des bâtiments autour de la zone d'étude $L_a = 16$ m, l'épaisseur de la première couche au sol $T_g = 0,5$ m, l'épaisseur de la première couche à partir des murs des bâtiments dans la zone d'étude $T_b = 0,1$ m, l'épaisseur de la première couche à partir des murs des bâtiments autour de la zone d'étude $T_a = 0,2$ m, le taux d'inflation $r = 1,3$ et le nombre de couches d'inflation $N = 5$ à partir du sol ainsi à partir des murs, et deux cellules au minimal à travers une fente. Des statistiques sur le maillage obtenu sont présentées dans le **Tableau 7-1**.

Tableau 7-1

Nombre de mailles et qualité de maillage des différents modèles du quartier de Jinsong en changeant la position de la géométrie du quartier dans le domaine de simulation

	Modèle A	Modèle B	Modèle C	Modèle D
Nombre des mailles	1 840 598	1 836 013	1 852 866	1 847 509
Qualité moyenne des éléments	0,645	0,644	0,645	0,645
Asymétrie moyenne	0,282	0,282	0,282	0,282

3) Sur la solution CFD

Les conditions climatiques locales sont appliquées. La vitesse moyenne annuelle du vent à $H = 10,5$ m à la périphérie lointaine de centre ville du district de Chaoyang est donnée par la situation météorologique de Chaoyang : $U_{10,5} = 2,67$ m/s. La rugosité du terrain de mesure est définie avec $\alpha = 0,16$ dans la loi puissance, et la hauteur de couches de surface (voir la **Fig. 1-13**)⁶², assimilée à $H_{ml} = 400$ m. Pour la zone périphérique proche du centre ville du district, l'exposant de la loi puissance peut être défini par $\alpha = 0,22$ (Lin et Hu 2009), et la hauteur de couches de surface peut être définie par $H_{mp} = 450$ m (GB50009-2012) (**Fig. 7-1-5**). Dans la périphérie lointaine de la ville où se trouvent les points de mesure de la situation météorologique de Chaoyang, la vitesse du vent U_{pl} à une hauteur H_{pl} est définie par :

$$U_{pl} = U_{10,5} * \left(\frac{H_{pl}}{10,5}\right)^{0,16} \quad (\text{Equation 7-1})$$

Et la vitesse du vent du gradient (à la hauteur de couches de surface) sur place :

$$U_{ml} = U_{10,5} * \left(\frac{H_{ml}}{10,5}\right)^{0,16} \quad (\text{Equation 7-2})$$

Dans la périphérie proche du centre ville, la vitesse du vent U_{pp} à une hauteur H_{pp} est fonction de la vitesse du vent du gradient :

⁶² Appelle aussi l'altitude du vent du gradient, ceci correspond à une vitesse réelle du vent dans l'atmosphère libre au-dessus de la couche limite sans influencée par la friction des éléments sur le sol.

$$U_{pp} = U_{mp} * \left(\frac{H_{pp}}{H_{mp}}\right)^{0,22} \quad (\text{Equation 7-3})$$

Lorsque les vitesses de vent du gradient de deux terrains sont égales : $U_{ml} = U_{mp}$, grâce aux Equations. 7-2, 7-3, on obtient :

$$U_{pp} = U_{10,5} * \left(\frac{H_{ml}}{10,5}\right)^{0,16} * \left(\frac{H_{pp}}{H_{mp}}\right)^{0,22} = 4,78 * \left(\frac{H_{pp}}{450}\right)^{0,22} \quad (\text{Equation 7-4})$$

Donc on peut trouver la vitesse de référence à une hauteur $H = 10,5$ m dans la périphérie proche de centre ville : $U'_{10,5} = 2,09$ m/s. Le profil du vent d'entrée pour la simulation CFD peut donc être défini comme : $U = 2,09 * \left(\frac{Z}{10,5}\right)^{0,22}$ (m/s).

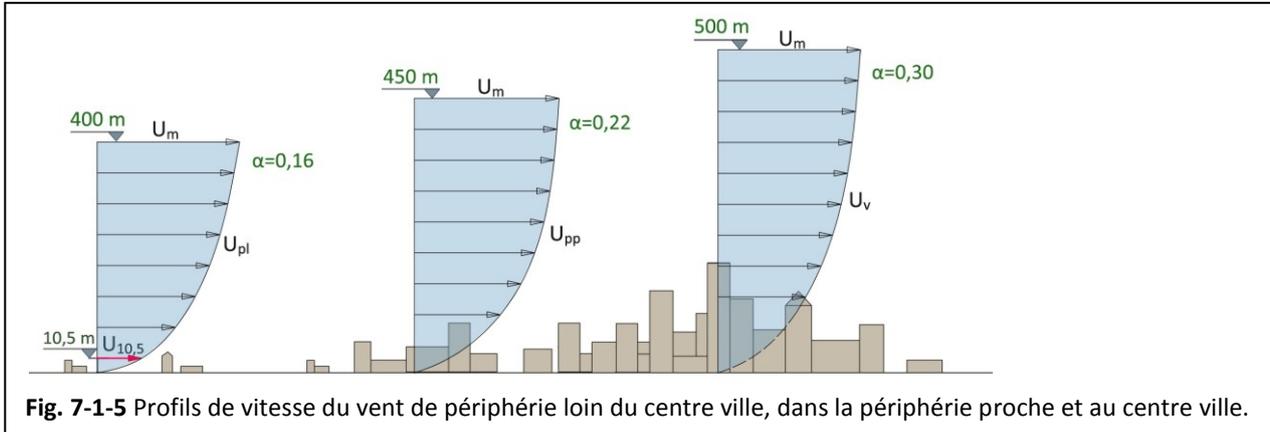


Fig. 7-1-5 Profils de vitesse du vent de périphérie loin du centre ville, dans la périphérie proche et au centre ville.

Le nombre d'interaction du calcul est typiquement plus de 3000. Les niveaux du résidu, correspondant à la convergence de la simulation, de la continuité est inférieure à $2*10^{-5}$, et de la vitesse en trois dimensions sont généralement tous trois inférieures à $1*10^{-5}$.

7.1.3 Description des paramètres morphologiques du modèle de Jinsong

Ce qui est actuellement appliqué dans la simulation est un modèle simplifié. Tous les bâtiments inférieurs à 10 m sont négligés. Des bâtiments de petites tailles et de hauteurs $H = 18$ m et 24 m sont assimilés à des grands blocs de même hauteur et de limite d'espace similaire. L'impact de la simplification du modèle sur l'évaluation de l'énergie éolienne est analysé (Annexe 7.1). Les résultats montrent que l'impact des petits bâtiments sont assez faibles : 4,75 % en moyenne. Pourtant, l'économie de nombre d'éléments du maillage est important : 24 %.

Ici, les informations sur la morphologie urbaine du quartier de Jinsong avant et après la simplification sont présentées dans le Tableau 7-2. Le quartier centre (zone d'étude) et le quartier étendu (zone pour la simulation) sont présentés séparément. Comparés avec les modèles originaux, le quartier centre et le quartier étendu ont des valeurs des indicateurs généralement similaires. Des variations importantes (> 20 %) sont apparues sur les indicateurs CES , \bar{H} , σ_h , σ_h/\bar{H} , \bar{V}_b et R_r pour le quartier centre et sur seulement \bar{V}_b pour le quartier étendu. Comme l'indicateur de densité CES varie, les comparaisons entre les indicateurs ont peu de sens. Les valeurs de l'occlusivité par rapport à la hauteur de l'axe Z, et de la densité de surface frontale par rapport à 16 angles d'incidence du vent sont présentées dans la Fig. 7-1-6.

Tableau 7-2

Description des paramètres morphologiques des modèles de quartier Jinsong

Paramètre morphologique \ Site	Quartier noyau simplifié	Quartier centre original	Quartier étendu simplifié	Quartier étendu original
Type de forme urbaine	Logement collectif	Logement collectif	Logement collectif, bureaux	Logement collectif, bureaux
Surface de terrain	202 500 m ²	202 500 m ²	1 130 973 m ²	1 130 973 m ²
Coefficient d'emprise au sol (CES)	14,85 %	19,93 %	15,68 %	16,87 %
Ratio d'espaces verts (REV)	37,13 %	37,13 %	32,09 %	32,09 %
Coefficient d'occupation des sols (COS)	3,47	3,57	1,90	1,84
Hauteur moyenne des bâtiments (\bar{H})	73,31 m	56,62 m	39,60 m	35,73 m
Ecart type de la hauteur des bâtiments (σ_h)	28,47 m	38,02 m	28,61 m	29,55 m
Coefficient de variation de la hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})	39 %	67 %	72 %	83 %
Hauteur maximale des bâtiments (H_{max})	93 m	93 m	93 m	93 m
Volume moyen des bâtiments (\bar{V}_b)	95 842 m ³	69 246 m ³	64 425 m ³	36 272 m ³
Complète ratio d'aspect (λ_c)	1,35	1,41	0,91	1,00
Rugosité absolue (R_a)	10,89 m	11,28 m	6,21 m	6,03 m
Rugosité relative (R_r)	34 429 m ³	50 130 m ³	46 781 m ³	41 738 m ³
Porosité absolue (P_o)	89,43 %	89,07 %	93,97 %	94,15 %
Occlusivité moyenne (O_c)	58,38 %	57,60 %	65,83 %	66,99 %

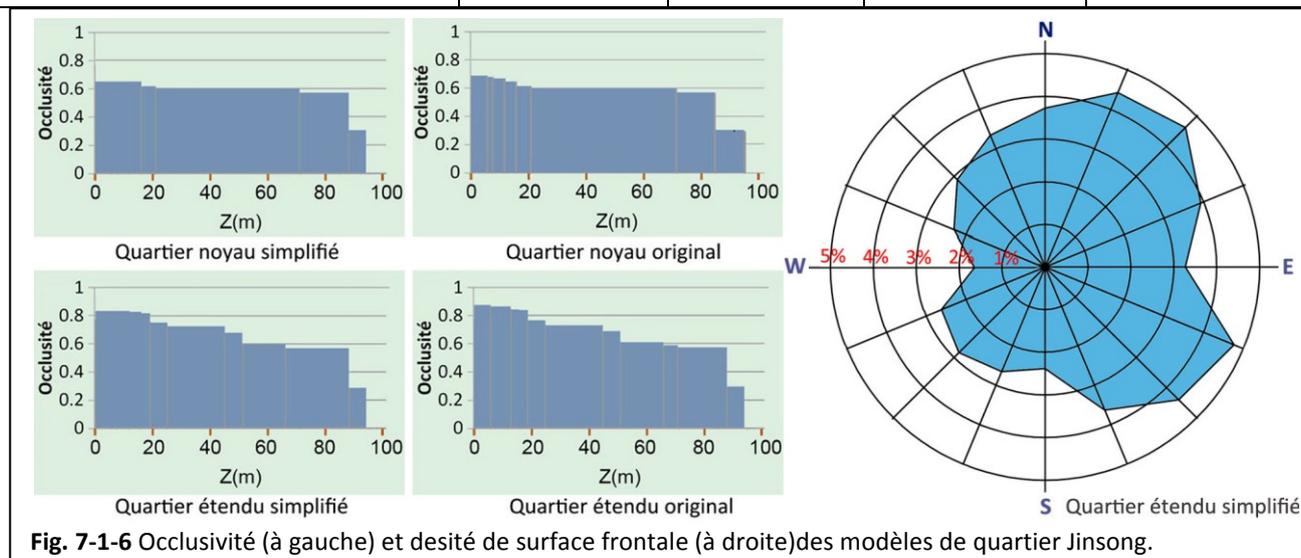
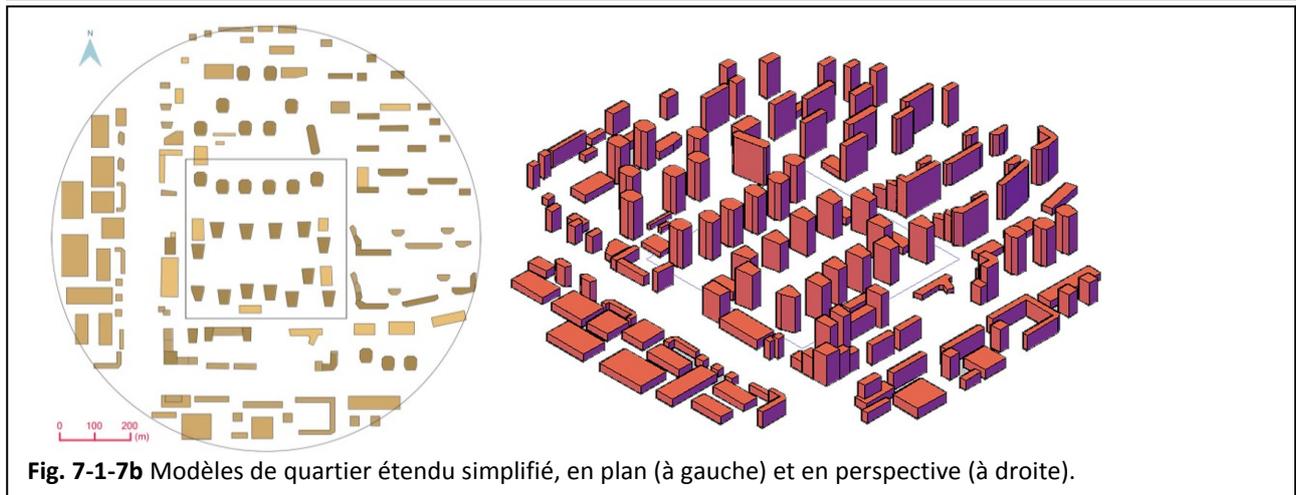
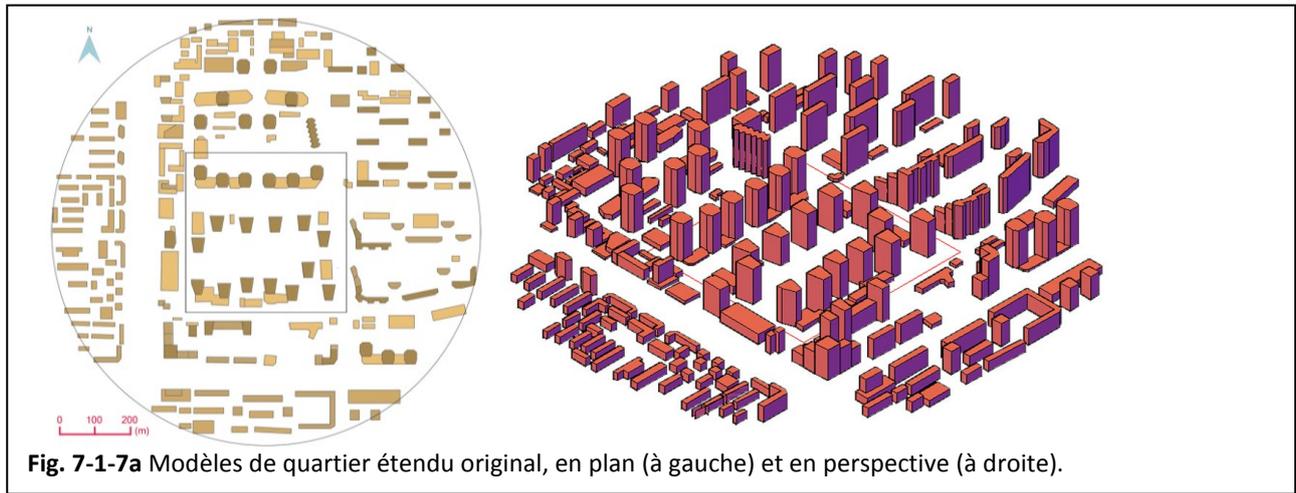


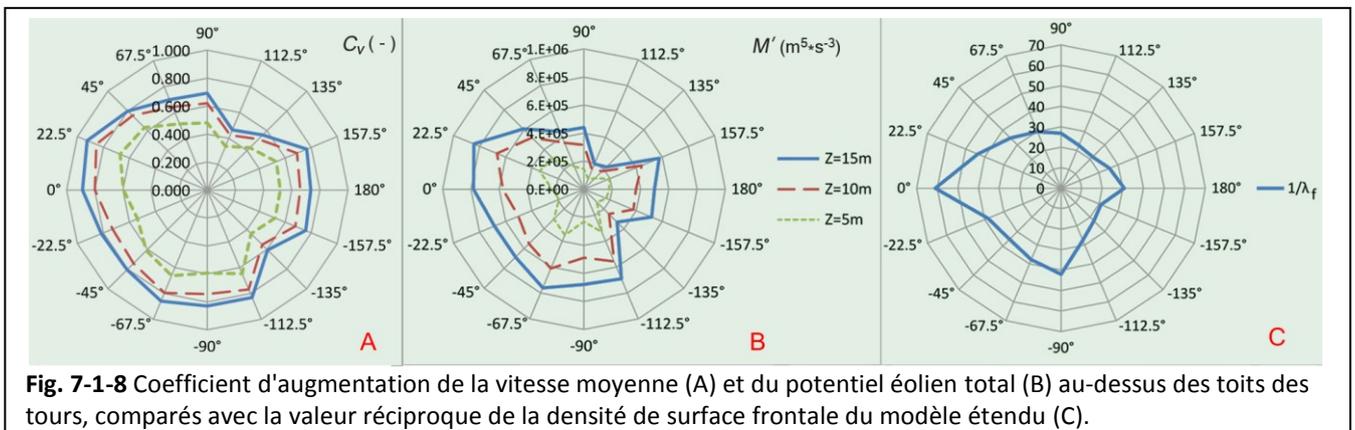
Fig. 7-1-6 Occlusivité (à gauche) et desité de surface frontale (à droite) des modèles de quartier Jinsong.

Les Fig. 7-1-7 (a et b) présentent les plans et les perspectives du quartier original et du quartier simplifié. La limite du quartier étendu est figurée par un cercle et la limite du quartier centre est figurée par un carré en plan. 6 tours de H = 93 m, 11 tours de H = 87m et 2 tours de H = 70 m dans la zone centre sont les objets d'étude. Trois altitudes au-dessus des toits sont considérées pour l'évaluation de l'énergie éolienne.



7.1.4 Analyse des résultats

Correspondant à la rose des vents, 16 angles d'incidence du vent sont considérés pour la simulation. Seuls les vents dans le quartier centre sont étudiés. Les résultats sont analysés au premier lieu sans prise en compte de la distribution du vent local, afin d'étudier l'impact de la forme urbaine du quartier de Jinsong sur le vent. Les valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse moyenne (C_v) et du potentiel éolien total (M') au-dessus des toits des tours sont donnés dans la Fig. 7-1-8.



Pour faciliter la comparaison avec eux, le schéma de la densité de surface frontale du modèle est redessiné en valeurs réciproques (Fig. 7-1-8 c). La distribution des vents locaux ne sont pas pris en compte pour les comparaisons. Nous remarquons que pour des angles d'incidence respectives de $112,5^\circ$, de 135° et de -135° du vent, les valeurs sur C_v et sur M' sont beaucoup plus faibles que pour d'autres angles d'incidence. Dans le schéma de valeur réciproque de la densité de surface frontale

($1/\lambda_f$), $112,5^\circ$, 135° et -135° sont aussi parmi les angles pour les quels les valeurs sont les plus faibles. Avec une incidence de 0° correspondant à des vents les plus forts, la valeur réciproque de la densité de surface frontale est aussi parmi les plus grandes. Malgré d'un certain décalage, la densité de surface frontale montre une cohérence importante par rapport aux indicateurs de vent au-dessus des toits.

Compte tenu de la rose des vents locaux (Fig. 7-1-2), le potentiel éolien total (M') à trois altitudes au-dessus des toits des tours les plus hautes est présenté dans la Fig. 7-1-9. Nous remarquons que 45° correspond au meilleur angle d'incidence du vent pour exploiter un potentiel éolien maximal.

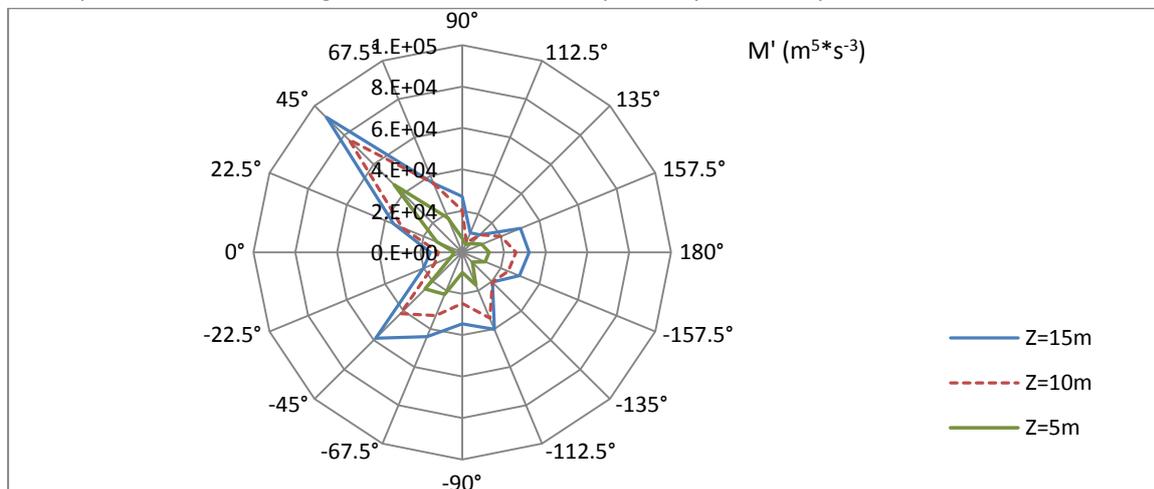


Fig. 7-1-9 Potentiel éolien total au-dessus des toits des tours, compte tenu de la rose des vents locaux.

De plus, pour définir l'emplacement des éoliennes sur les toits ventés, l'évaluation du potentiel éolien au-dessus du toit de chaque tour est faite (Fig. 7-1-10). Nous trouvons que les tours C1, C2, D1 et E1 sont généralement les plus ventées. Les tours D3 et E2 ont une capacité très importante avec l'angle d'incidence de 45° , mais elles sont moins intéressantes pour les autres angles. Il faut éviter le choix des tours C7, D4, D5 et D8, qui ont en fait un potentiel éolien moyen généralement moins de $2000 \text{ m}^5 \cdot \text{s}^{-3}$, quelque soit l'angle d'incidence.

Si nous nous intéressons à l'intensité de la turbulence au-dessus des toits des tours les plus ventées (Tableau 7-3), nous remarquons qu'à l'altitude $Z = 5 \text{ m}$ au-dessus du toit, on obtient une intensité de turbulence de 54 % en moyenne, à $Z = 10 \text{ m}$, de 41 %, et à $Z = 15 \text{ m}$, de 32 %. L'amplitude de variation moyenne est de 29 % à 37 %.

Tableau 7-3

Intensité de turbulence moyenne au-dessus des toits des tours les plus ventées, compte tenu des vents locaux

		C1	C2	D1	E1
Intensité de turbulence (%)	Z = 15 m	30	36	31	30
	Z = 10 m	41	43	42	39
	Z = 5 m	53	54	55	54
	Amplitude moyenne	29	34	37	33

La Fig. 7-1-11 montre la distribution des vitesses du vent du quartier dans une coupe de $H = 80 \text{ m}$. A cette hauteur des éoliennes verticales proche des murs extérieurs peuvent être installées. Les couches de contours de vitesse de chaque angle d'incidence du vent sont superposées avec une opacité correspondant à sa fréquence de distribution dans la rose des vents (Fig. 7-1-11A). Pour mieux identifier les zones les plus ventées, les contours de vitesse du vent plus de $3,25 \text{ m/s}$ sont marqués en jaune et rouge (Fig. 7-1-11B). Une distance de 5 m de décalage par rapport aux murs extérieurs, correspondant à la limite à laquelle des éoliennes peuvent être installées, est marquée pour toutes les tours du quartier. Nous trouvons que les vents à proximité des murs extérieurs sont souvent très faibles. Seules les tours E1, E2 et E3 ont des coins « exploitables ». Au contraire, les

vents au-dessus du toit de la tour D3 (qui a une hauteur de 70 m), sont beaucoup plus forts, même si la tour ne correspond au meilleur choix (voir la Fig.7-1-10).

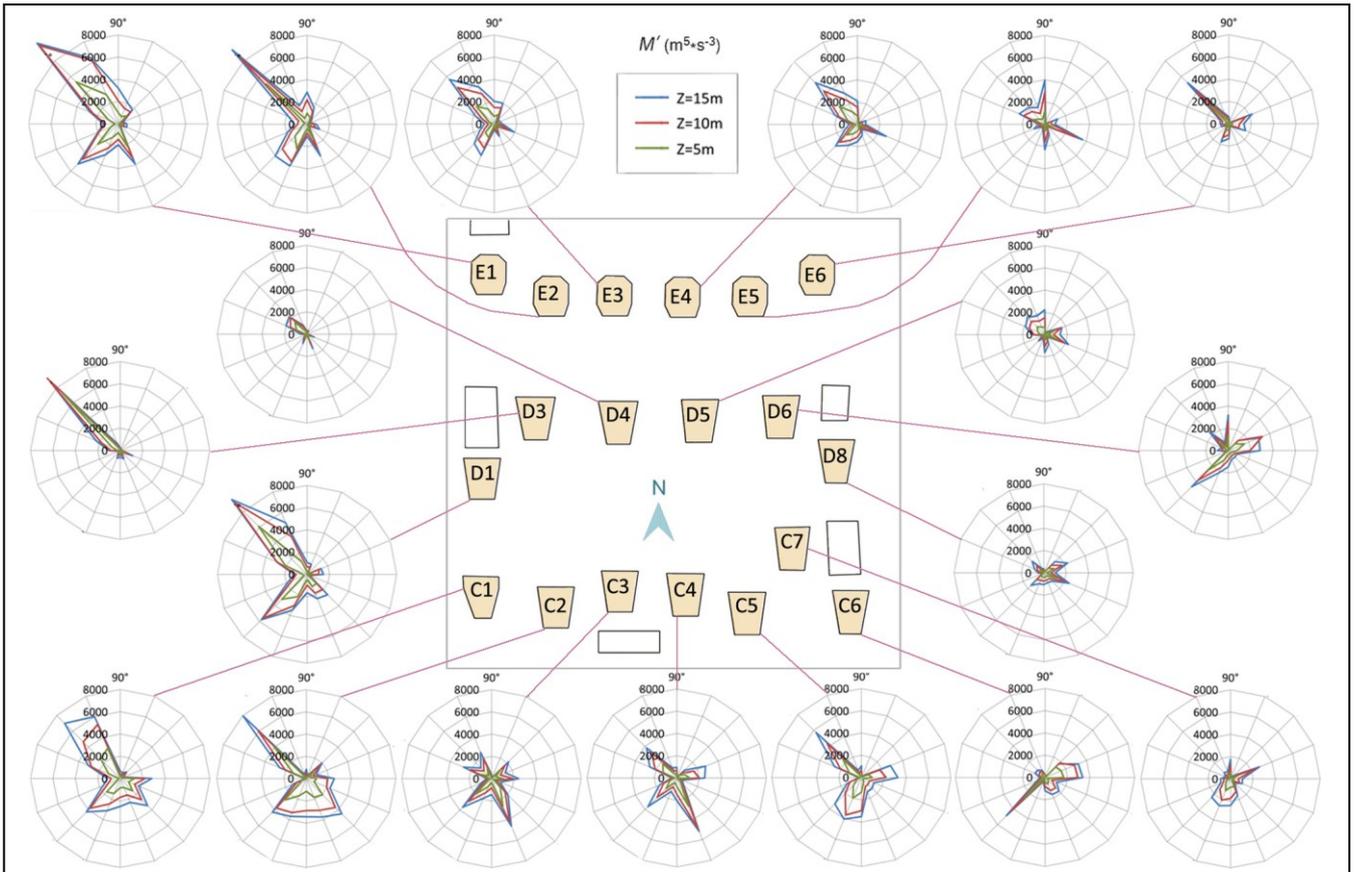
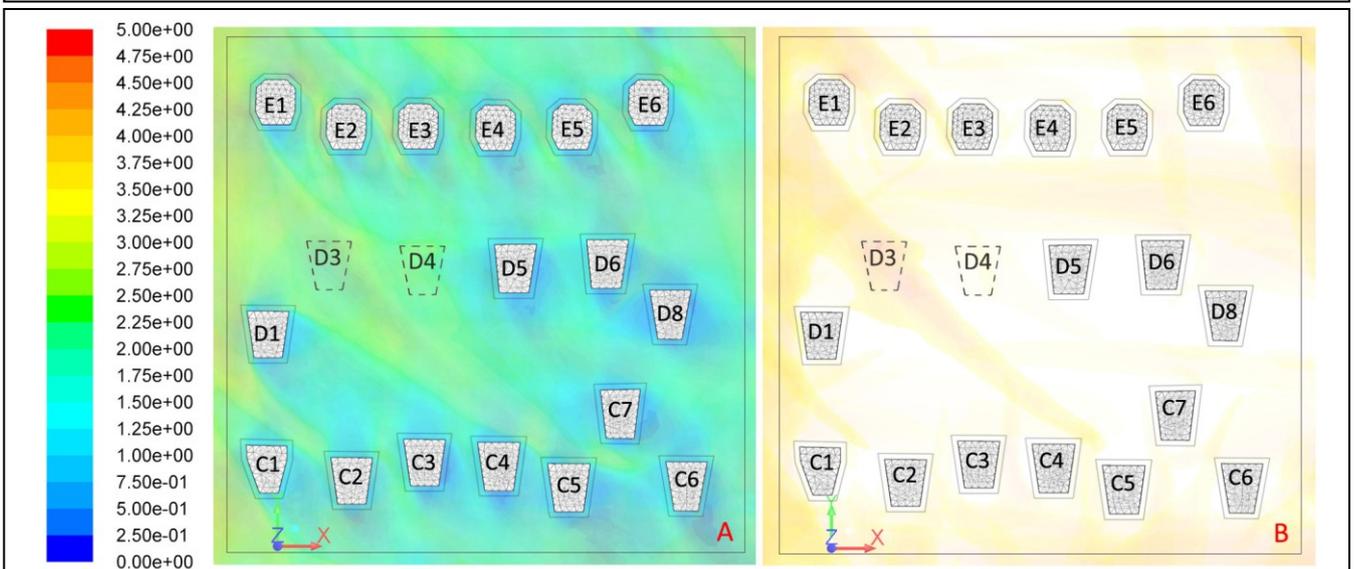


Fig. 7-1-10 Potentiel éolien total dessus les toits des tours, compte tenu de la rose des vents locaux.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Nov 16, 2014
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, ske)

Fig. 7-1-11 Contours de vitesse du vent superposés pour les 16 directions, sur le plan de coupe à H = 80 m, compte tenu de la rose des vents locaux.

7.2 Proposition d'emplacement d'éolienne et évaluation énergétique en pratique

7.2.1 Choix d'éolienne adaptée et son emplacement

En considérant une vitesse assez faible et une intensité de turbulence assez importante au-dessus des toits du quartier Jinsong, une micro ou petite éolienne à axe vertical sera utilisée. En fait, la vitesse moyenne du vent à $Z = 10$ m au-dessus du toit est de 2,3 m/s et l'intensité de turbulence est de 45 % en moyenne. Parmi les nombreux types d'éolienne commerciale, nous choisissons trois types qui permettent de fonctionner avec des vents faibles : l'éolienne Beijio Bdp-600/250, Archimedes Liam F1 et WindTronics BTPS6500. Les paramètres techniques de ces éoliennes sont donnés dans le **Tableau 7-4**. Après les comparaisons sur plusieurs aspects notamment sur la puissance utile et sur le prix unitaire, nous décidons de choisir le type Bdp-600/250, qui est en fait assez puissante pour un vent faible, la plus légère et la moins chère (une éolienne chinoise) parmi les trois éoliennes. La courbe de puissance de l'éolienne Bdp-600/250 est donnée (**Fig.7-2-1**).

Tableau 7-4

Paramètres techniques des éoliennes adaptées aux vents faibles et turbulents

	Beijio Bdp-600/250 ⁶³	Archimedes Liam F1 ⁶⁴	WindTronics BTPS6500 ⁶⁵
			
Puissance normale	600 W	1 000 W	1 500 W
Vitesse normale du vent	8 m/s	12 m/s	14 m/s
Vitesse minimale exploitable	3 m/s	2 m/s	1 m/s
Taille (largeur * longueur * Profondeur)	1,8 m * 1,8 m * 1,4 m	1,5 m * 1,9 m * 1,75 m	2 m * 2,2 m * 0,5 m
Surface balayée	2,5 m ²	1,8 m ²	2,5 m ²
Poids	42 Kg	75 Kg	110 Kg
Bruit		<42 dB	<35 dB
Prix unitaire	\$1,000	\$5,450 ⁶⁶	\$5,695 ⁶⁷
Puissance en expérimentation	2 m/s	0	22W
	3 m/S	48 W	10 W
	4 m/S	82 W	62 W
	5 m/S	130 W	141 W

L'exemple d'emplacement d'éolienne sur le toit de la tour E1 est présenté. Considérant la taille de l'éolienne choisie et la taille de l'espace au-dessus du toit, nous mettons en place une matrice d'éoliennes pour évaluer la distribution du potentiel éolien. Un décalage de trois diamètres du rotor entre deux éoliennes (axe à axe) dans la direction perpendiculaire au vent est considéré. Pour le deuxième rang, l'éolienne est posée au milieu du décalage entre les éoliennes du premier rang et est à part environ trois diamètres de rotor d'eux. La matrice d'arrangement provisoire d'éoliennes est présentée dans la **Fig.7-2-1**. Selon la recherche de Durrani et Qin (2011), la configuration en forme de T mentionnée ici, avec un décalage de trois diamètres du rotor entre deux éoliennes, est favorable pour renforcer l'exploitation du vent des éoliennes au deuxième rang. Bayeul-Laine *et al.* (2013) ont montré que, pour obtenir une bonne efficacité, il faut une distance faible entre deux éoliennes face

⁶³ <http://detail.1688.com/offer/36389662346.html>

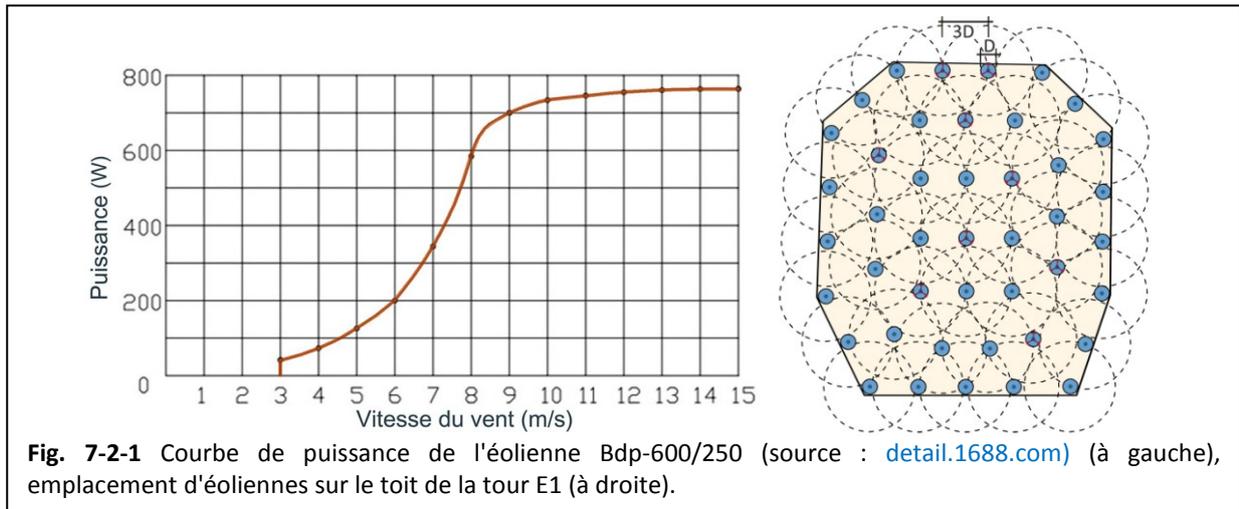
⁶⁴ <http://dearchimedes.com/>

⁶⁵ http://www.ecotownstore.com/wind/honeywell/wind_honeywell.html

⁶⁶ <http://wonderfulengineering.com/urban-wind-turbine-has-been-reinvented-with-this-new-design/>

⁶⁷ http://www.allsmallwindturbines.com/small_wind_turbines/119/111/BTPS6500/WindTronics/

au vent de même rang et une distance importante entre deux éoliennes en ligne dans la direction du vent. L'efficacité de chaque position d'éolienne dans la matrice d'arrangement sera évaluée ainsi que l'arrangement des positions les plus productives.



7.2.2 Evaluation énergétique et faisabilité économique

Les contours des vitesses des vents à $Z = 10$ m au-dessus du toit de la tour E1 pour les 16 directions du vent sont donnés pour identifier le potentiel éolien de chaque position d'installation (Fig. 7-2-2). Selon la courbe de puissance de l'éolienne Bdp-600/250, chaque gamme de vitesses du vent correspond à une puissance. Nous savons que l'évaluation du potentiel éolien doit utiliser les données de la distribution du vent local au lieu de la vitesse moyenne du vent (voir Chapitre 3.3.1.2). Nous appliquons les roses des vents du district de Chaoyang pour les quatre saisons séparément car pour chaque saison la distribution du vent est toute différente (Fig. 7-1-2, 7-1-3).

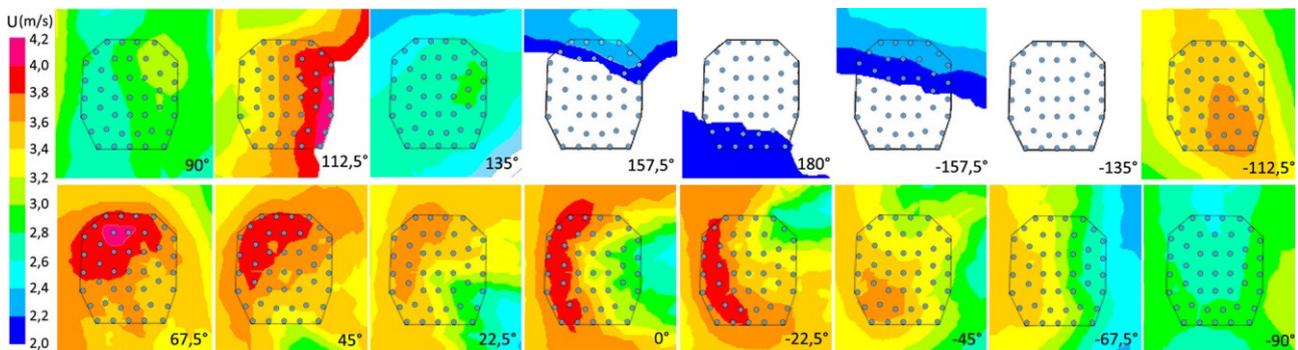
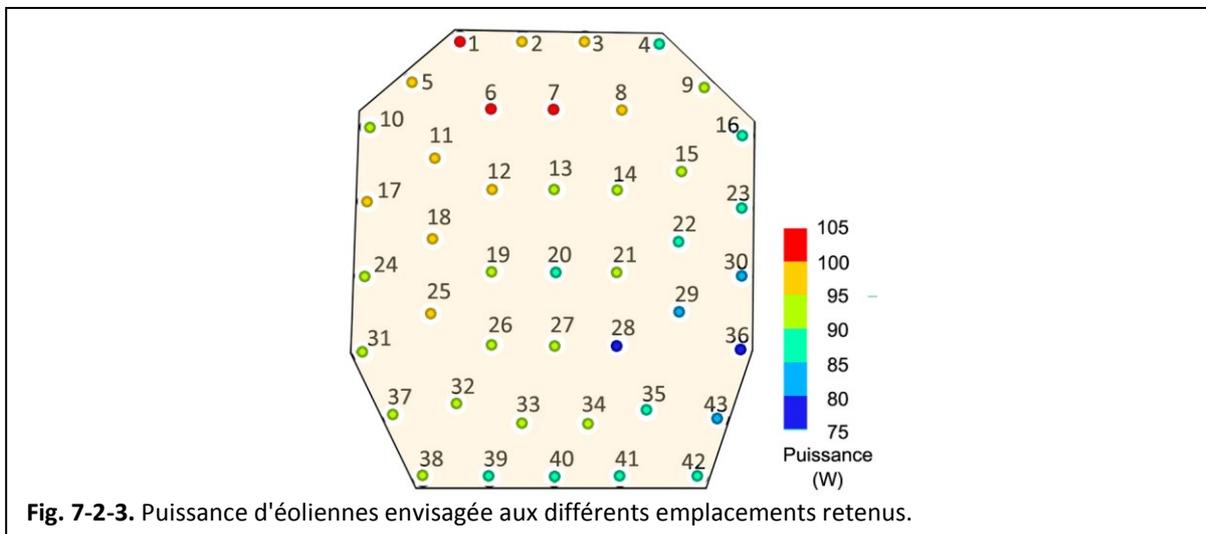


Fig. 7-2-2 Contours des vitesses du vent à $Z = 10$ m au-dessus du toit de la tour E1 pour les 16 directions du vent.



La puissance d'éolienne sur le point x , appelé P_x , est en moyenne sur les quatre saisons. Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_x = AV(P_{x,i}) \quad (\text{Equation 7 - 5})$$

$$P_{x,i} = \frac{U_x}{U_{0,i}} P_{0,i} = \frac{U_x}{U_{0,i}} \sum P_{e,j} f_{i,j}, \quad U_{i,j} > 3 \text{ m/s} \quad (\text{Equation 7 - 6})$$

où $P_{x,i}$ est la puissance d'éolienne sur le point x pour la $i^{\text{ème}}$ saison, U_x est la vitesse du vent calculée sur le point x dans la simulation CFD, $U_{0,i}$ est la vitesse du vent moyenne pour la $i^{\text{ème}}$ saison selon les données météo, $P_{0,i}$ est la puissance supposée d'une éolienne avec les vents sous la distribution de vitesses pour la $i^{\text{ème}}$ saison, $U_{i,j}$ est la vitesse moyenne de la $j^{\text{ème}}$ gamme dans le schéma de la distribution de vitesses du vent pour la $i^{\text{ème}}$ saison, $f_{i,j}$ est la fréquence et $P_{e,j}$ est la puissance de l'éolienne Bdp-600/250 correspondante à $U_{i,j}$. A noter que les vitesses inférieures à 3 m/s sont négligées, car l'éolienne choisie commence à produire l'électricité à partir de cette vitesse.

Les résultats sur la puissance d'éolienne envisagée de chaque point sont présentés dans la **Fig.7-2-3**. Nous remarquons que les points avec un potentiel relativement fort sont situés au bord du coin à Nord-ouest, où vient le vent dominant dans le district de Chaoyang. En fait, la puissance moyenne sur tous les points est de 91 W. Les variations entre les points ne sont pas grandes (± 13 W). Si on prend le point le plus venté (point 6 où $P_6 = 103$ W) par exemple, la rentabilité de l'éolienne sera :

$$R_n = \frac{C_{\text{éolienne}} + C_{\text{support}}}{R_{\text{annuel}}} = \frac{1000 + 800}{0,103 * 24 * 365 * 0,08} = 25 \text{ ans}$$

où $C_{\text{éolienne}}$ est le coût de l'éolienne, C_{support} est la dépense lié au support qui est constitué par le mât, l'installation, le génie civil et l'entretien, R_{annuel} est le revenu annuel équivalent grâce à la production de l'électricité, et 0,08 \$/kWh est le prix de l'électricité locale. La rentabilité de l'éolienne sur le point le moins venté au-dessus du toit de la tour E1 (point 36) correspond à 33 ans. Comparé aux autres cas d'analyse économique d'éolienne ([Debled et Deblock 2006](#)), la rentabilité de l'éolienne Bdp-600/250 sur les toits des tours les plus ventées dans le quartier de Jinsong est acceptable. Compte tenu du fait que la tour E1 est une des positions les plus ventées dans le quartier, nous devons savoir que les potentiels éoliens sur les toits des autres tours du quartier sont assez faibles et ne sont peut-être jamais rentables.

7.3 Méthode mathématique pour prévoir l'impact de morphologie urbaine sur le vent

Le temps de calcul pour un modèle de quartier est très important. Par exemple, pour chaque direction du vent, le modèle du quartier de Jinsong demande environ 40 h de calcul sur la machine actuellement utilisée (les paramètres voir [Annexe 4.2.3](#)) pour que le calcul converge avec un niveau acceptable. Lorsqu'il y a souvent 8 ou 16 directions de vent ou plusieurs quartiers à simuler, le temps devient une contrainte essentielle. Dans ce contexte, nous souhaitons définir une méthode mathématique simple pour prévoir le choix d'une position favorable au milieu d'un quartier complexe pour développer l'énergie éolienne.

7.3.1 Méthode mathématique pour évaluer l'impact d'obstacle au vent

Dans le [Chapitre 5.2.9](#) nous avons présenté les impacts des paramètres géométriques sur les vents en arrière de la géométrie d'étude. On remarque que les vents à l'arrière d'un bâtiment sont ralentis avec l'augmentation de la hauteur et de la longueur du bâtiment, alors qu'ils sont renforcés par l'augmentation de la distance à partir du bâtiment en amont. L'impact du paramètre de la largeur est insignifiant. A une altitude $Z < 1,25H$, l'impact du paramètre D est le plus important, puis viennent ensuite les paramètres H et L . A une altitude $Z > 2,5H$, les impacts des paramètres L , W et D sont insignifiants.

Lorsque l'espace au-dessus du toit est l'objet principal d'étude pour exploiter le potentiel éolien, les vents au-dessus du toit d'une tour de $H = 80$ m sont évalués en changeant la forme et la distance d'obstacle en amont. Les paramètres analysés pour le bâtiment en amont sont : la hauteur (H), la longueur (L), la distance à la ligne centrale (d) et la distance entre l'obstacle et le bâtiment d'étude (D) ([Annexe 5.2](#)). Les résultats les plus importants peuvent être résumés ainsi.

1) A partir d'une distance de $6H$, pour deux tours en ligne dans la direction du vent, les vents au-dessus du toit de la tour en aval sont indépendants de la distance entre les deux tours. Comparé au modèle de tour isolée, les modèles correspondant à une distance importante entre les deux tours, $D > 4H$, ont des vents plus forts au-dessus du toit de la tour en aval. Lorsque les tours sont assez proches ($D = H$), les vents à une altitude élevée sur le toit ($Z = 20$ m) peuvent être très forts ([Annexe 5.2.1](#)).

2) La valeur du coefficient C_v diminue généralement avec l'augmentation de la hauteur et de la longueur du bâtiment en amont, à une altitude relativement élevée ($Z > 10$ m) ([Annexes 5.2.2, 5.2.3](#)).

3) Tous les modèles avec décalage de la tour en amont produisent une concentration importante des vents au-dessus du toit de la tour en aval. Les différences entre modèles pour différents décalages sont faibles ([Annexe 5.2.4](#)).

4) L'impact d'ajout d'un bâtiment bas (sa hauteur $h < H/4$) est faible (< 5 %) pour les vents dessus la tour en aval, lorsque la distance entre les deux tours sont assez importante ($D > 4H$) ([Annexe 5.2.5](#)).

Dans ce cas, l'impact d'obstacle (I_o) peut être défini en fonction des paramètres morphologiques ci-dessus :

$$I_o = f(H, L, d, D) \quad (\text{Equation 7-7})$$

Selon les résultats du [Chapitre 5.2.9](#), la fonction peut être simplifiée comme :

$$I_o = \begin{cases} f(H, L, d, D), & Z < 2,5H \\ f(H, d), & Z > 2,5H \end{cases} \quad (\text{Equation 7-8})$$

où Z est l'altitude d'évaluation à partir du sol.

Selon les résultats de l'[Annexe 5.2](#), les relations entre le coefficient C_v et les paramètres de l'obstacle sont décrites comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{v(H)} = 1,3 \cos\left(\frac{(HH_0-2400)}{6440}\right) + 0,1 \\ C_{v(L)} = \cos\left(\frac{LL_0}{3600}\right) + 0,4 \\ C_{v(d)} = 1,8 \cos\left(\frac{\beta-28}{39}\right) - 0,34, \beta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{D}\right) \\ C_{v(D)} = 1,31 \cos\left[\frac{(DH_0+20560)}{10400}\right] + 1,97, \quad D < 3H_0 \\ C_{v(D)} = 9 * 10^{-6}(DH_0 - 19200) + 0,92, \quad D \geq 3H_0 \end{array} \right. \quad \text{(Equations 7-9)}$$

où $0^\circ < \beta < 30^\circ$. Si $\beta > 30^\circ$, $C_{v(d)} = 1,42$. H_0 et L_0 sont respectivement la hauteur et la longueur du bâtiment d'étude (pour exploiter l'énergie éolienne au-dessus de son toit). Généralement, le coefficient calculé correspond au vent à 10 m au-dessus du toit. Il faut aussi savoir que les **Equations 7-9** ne peuvent être valables que dans des cas particuliers. Nous les utilisons pour représenter la relation entre le coefficient C_v et les paramètres morphologiques des obstacles.

Lorsque le coefficient C_v est utilisé pour évaluer l'effet d'augmentation de la vitesse du vent, l'impact d'obstacle I_o peut être présenté comme :

$$I_o = \begin{cases} \frac{1}{C_{v(H,L,d,D)}}, & Z < 2,5H \\ \frac{1}{C_{v(H,d)}}, & Z > 2,5H \end{cases} \quad \text{(Equation 7-10)}$$

Le rôle de chaque paramètre morphologique (H , L , d , D) sur l'indicateur I_o sont respectivement définis par K_H , K_L , K_d et K_D . Alors l'**Equation 7-10** peut être écrit par :

$$I_o = \begin{cases} \frac{1}{(C_{v(H)})^{K_H} (C_{v(L)})^{K_L} (C_{v(d)})^{K_d} (C_{v(D)})^{K_D}}, & Z < 2,5H \\ \frac{1}{(C_{v(H)})^{K_H} (C_{v(L)réf})^{K_L} (C_{v(d)})^{K_d} (C_{v(D)réf})^{K_D}}, & Z > 2,5H \end{cases} \quad \text{(Equation 7-11)}$$

où $C_{v(L)réf}$ et $C_{v(D)réf}$ représentent les valeurs des coefficients $C_{v(L)}$ et $C_{v(D)}$ dans les cas de référence (bâtiment isolé sans obstacle), $C_{v(L)réf} = C_{v(D)réf} = 1,42$. Selon les résultats du **Chapitre 5.2.9**, si $Z < 1,25H$, on peut proposer les valeurs suivantes pour ces exposants : $K_H = 1,06$, $K_L = 1,11$, $K_D = 1,28$. Les amplitudes de variation du coefficient C_v pour chaque paramètre sont données dans l'**Annexe 5.2** : 0,6 pour le paramètre D ; 0,4 pour le paramètre H ; 0,23 pour le paramètre L ; 0,45 pour le paramètre d . Selon les proportions parmi eux, on peut donc proposer que $K_d = 1,13$.

Lorsque plusieurs obstacles sont présents, l'impact d'obstacle total peut être calculé par :

$$I_o = \sum(I_{oi}\eta_i) \quad \text{(Equation 7-12)}$$

où I_{oi} correspond à l'impact du i ème obstacle et η_i le coefficient de pondération correspondant. Suite à de nombreux essais, nous proposons comme valeurs des coefficients de pondération :

$$\eta_i = \left(\frac{I_{oi}+0,1}{0,7}\right)^6 \quad \text{(Equation 7-13)}$$

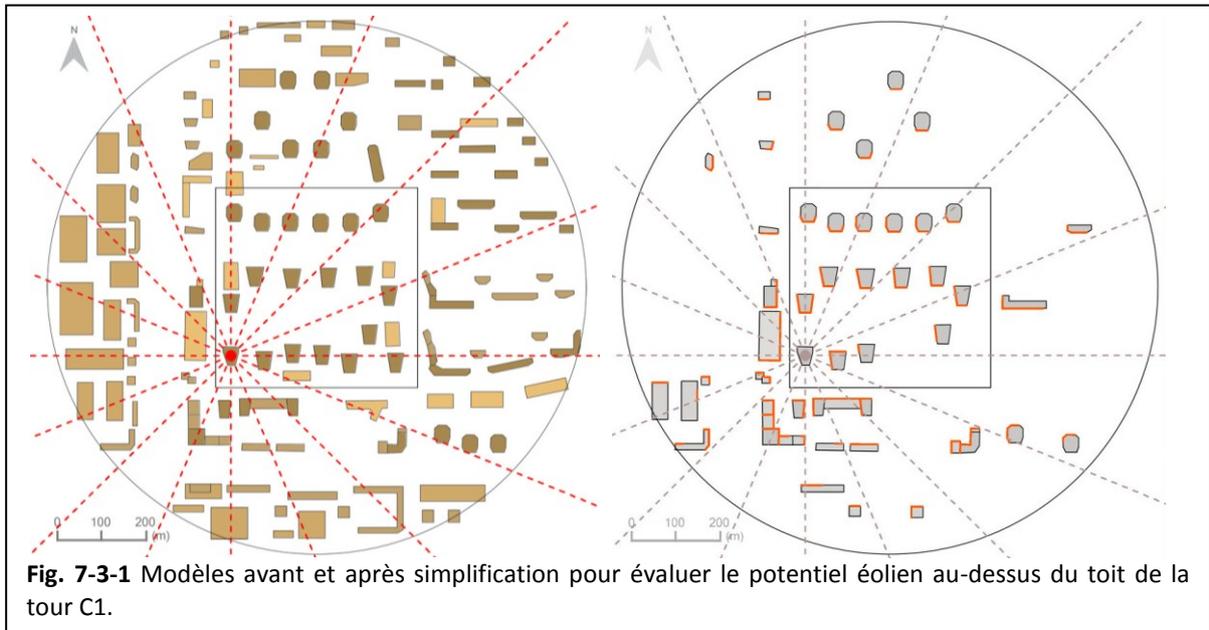
7.3.2 Application et évaluation de la méthode mathématique

L'énergie éolienne au-dessus du toit de la tour C1 dans le quartier de Jinsong sera évaluée avec la méthode mathématique proposée. Lorsque le nombre des obstacles autour d'un point d'évaluation est trop important, une simplification particulière (limitée au point d'évaluation) du modèle de quartier est proposée. Selon les résultats trouvés ci-dessus et ceux de Sharag-Eldin (1998, p70), les conditions principales de simplification sont les suivantes.

1) A partir du rayonnement de la tour C1, les bâtiments du deuxième rang sont conservés s'ils sont plus élevés que ceux du premier rang. Si non, ils sont supprimés. Cette étape peut être répétée s'il y a plusieurs rangs.

2) Les bâtiments ayant une vue directe sur la tour C1 sont conservés.

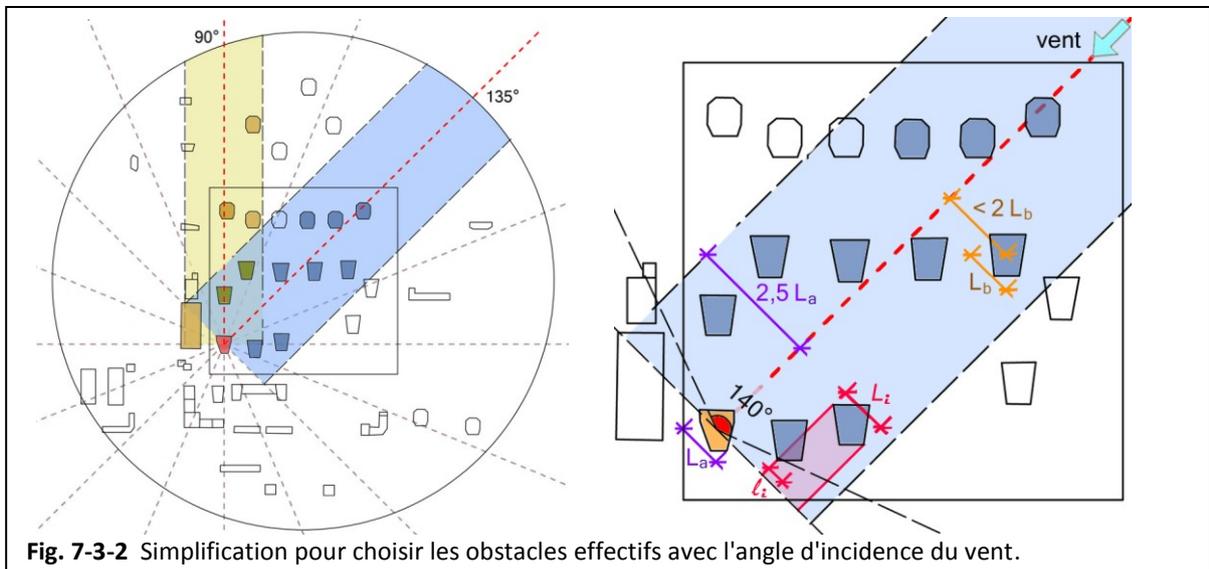
Les modèles du quartier avant et après la simplification spécialement pour l'évaluation du potentiel éolien de la tour C1 sont présentés (**Fig. 7-3-1**). Les parties des façades des bâtiments alentour ayant une vue directe sur la tour sont figurées en rouge dans le plan.



Pour chaque angle d'incidence du vent, une simplification complémentaire est considérée :

- 1) Une bande de largeur $2,5L_a$ (longueur de la tour C1 face au vent) à partir de la ligne centrale est considérée. Tous les bâtiments en amont mais hors de cette bande sont supprimés.
- 2) Seuls les obstacles placés avec un décalage $d < 2L_b$ (longueur de l'obstacle face au vent) à la ligne centrale sont considérés comme des obstacles effectifs.
- 3) Seuls les obstacles ayant un angle de 140° d'ouverture face au vent de la tour C1 sont considérés (Sharag-Eldin 1998, p90).

Les exemples aux angles d'incidence de 90° et de 135° sont données (Fig. 7-3-2). Ensuite, à chaque angle d'incidence, l'impact de chaque obstacle effectif est calculé selon l'Equation 7-9 et 7-11.



En raison d'interaction entre les obstacles, nous proposons une correction sur l'impact d'obstacle donnée par :

$$I'_o = I_o \left(1 - \frac{l_i I_{0a}}{L_i I_o} \right) \quad (\text{Equation 7-14})$$

où I'_o est l'impact d'obstacle corrigé du bâtiment i qui a une partie de sa longueur (L_i , face au vent) bloquée en projection par la tour C1 dans la direction du vent, l_i est la partie de la longueur bloquée, I_{0a} est l'impact d'obstacle du bâtiment qui bloque le bâtiment en évaluation (Fig. 7-3-2). S'il y a plusieurs blocages sans superposition (plusieurs blocages sur une même partie de longueur bloquée) devant un bâtiment, la correction est répétée. S'il y a des superposition, seul le plus grand blocage (avec une valeur de $l_i I_{0a}$ la plus importante) est considéré.

Les valeurs sur l'impact d'obstacle général pour les 16 directions du vent sont calculées pour la tour C1. Lorsque la valeur du coefficient C_v augmente avec la diminution de la valeur de l'impact d'obstacle I_0 , nous proposons un autre indicateur correspondant à l'impact d'obstacle, appelé V , afin de mieux le comparer à C_v :

$$V = \left(\left(\frac{1}{I_0 + 10} \right)^{0,2} - 0,4 \right)^8 \quad (\text{Equation 7-15})$$

Les résultats sur le coefficient C_v dans la simulation CFD et sur V sont présentés (Fig. 7-3-3).

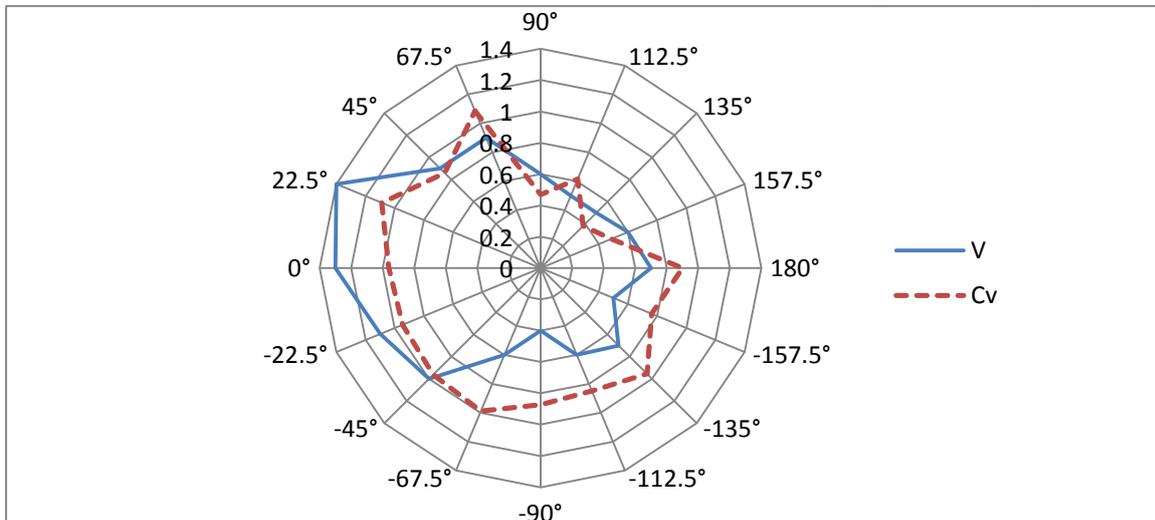


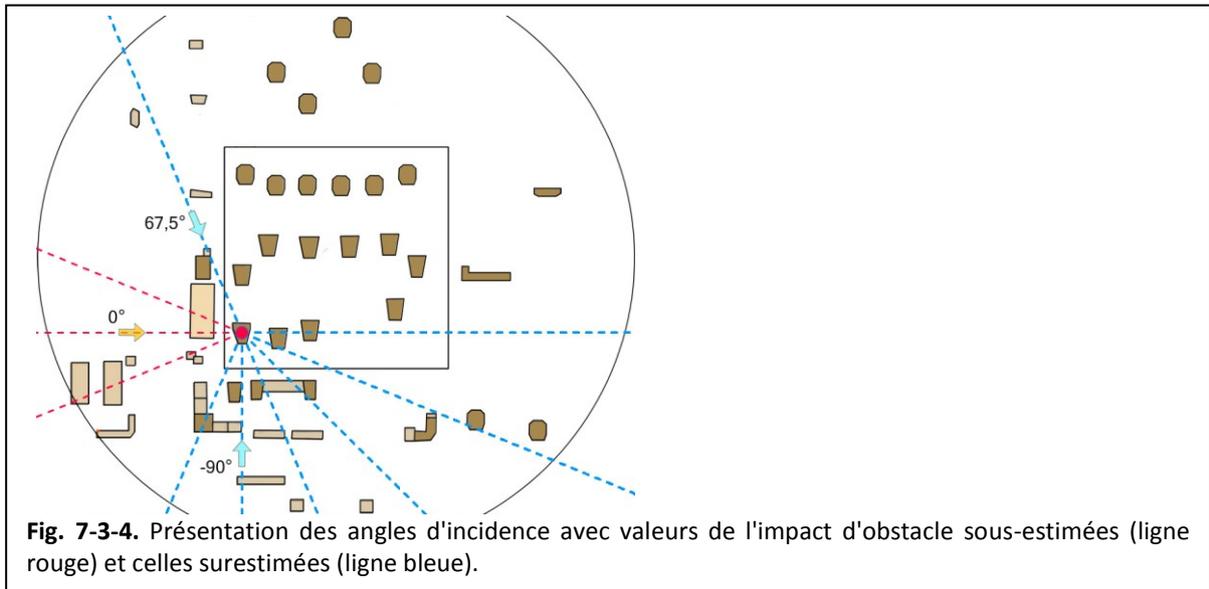
Fig. 7-3-3 Comparaison entre les valeurs du coefficient C_v en CFD et les valeurs de l'indicateur V calculé par la méthode mathématique simplifiée (pour un vent au-dessus du toit de la tour C1).

Les remarques suivantes peuvent être ajoutées :

- 1) Les variations entre les deux indicateurs pour différents angles d'incidence ont une certaine cohérence, principalement pour les angles -45° , 45° , $67,5^\circ$, 90° , $112,5^\circ$, 135° , $157,5^\circ$.
- 2) Les valeurs de l'indicateur V pour les angles $-22,5^\circ$, 0° et $22,5^\circ$ sont surestimées. Autrement dit, les valeurs sur l'indicateur I_0 pour ces angles sont sous-estimées.
- 3) Les valeurs de l'indicateur V pour les angles $67,5^\circ$, $-67,5^\circ$, -90° , $-112,5^\circ$, -135° , $-157,5^\circ$ et 180° sont sous-estimées. Autrement dit, les valeurs sur l'indicateur I_0 pour ces angles sont surestimées.

Une des causes de la surestimation de l'impact I_0 peut être liée à la simplification du modèle. Lorsque plusieurs rangées d'obstacles sont ramenées à une seule, l'impact d'obstacle peut être réduit.

Une des cause de la sous-estimation de l'impact I_0 peut être liée à l'interaction entre des obstacles qui accélèrent l'écoulement au lieu de le bloquer. Par exemple, avec les angles d'incidence de $67,5^\circ$ et de -90° , il y a des bâtiments en amont qui forment un passage du vent dans le parcours de l'écoulement. Il faut noter que l'effet de concentration du vent est notamment important lorsque l'angle d'incidence du vent est favorable et qu'il y a moins de turbulence. C'est pourquoi avec l'angle d'incidence de $112,5^\circ$ ou de 135° , même s'il y a aussi des passages du vent devant la tour C1, l'impact d'obstacle est moins influencé par l'effet de concentration (Fig. 7-3-4).



Pour confirmer l'application de la méthode mathématique, un autre test a été considéré. La tour D5 est située au milieu des grandes tours du quartier, l'environnement est très différent de celui de la tour C1. Les modèles avant et après la première simplification sont présentés (Fig. 7-3-5).

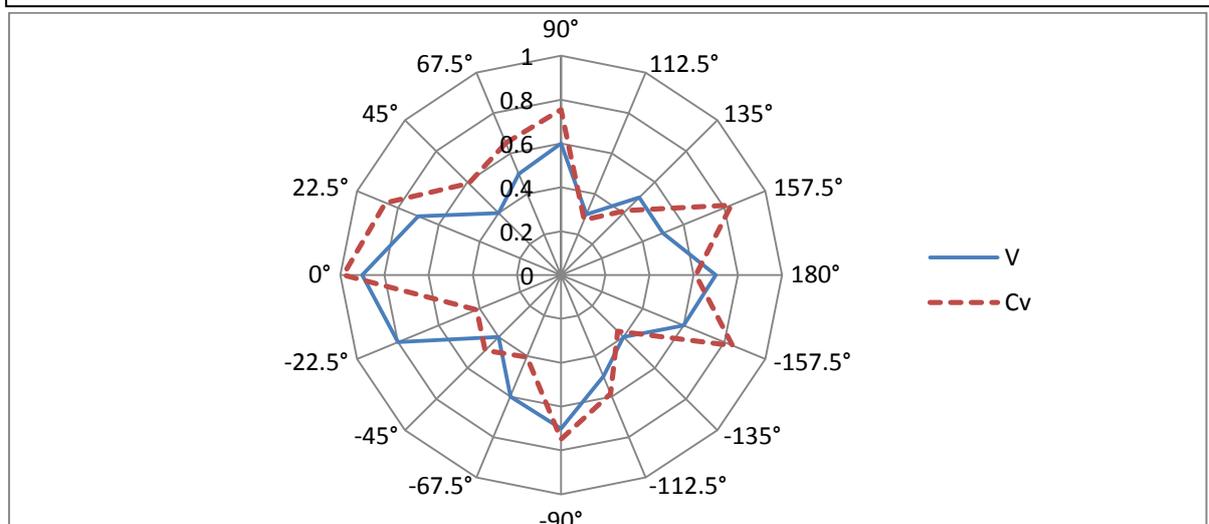
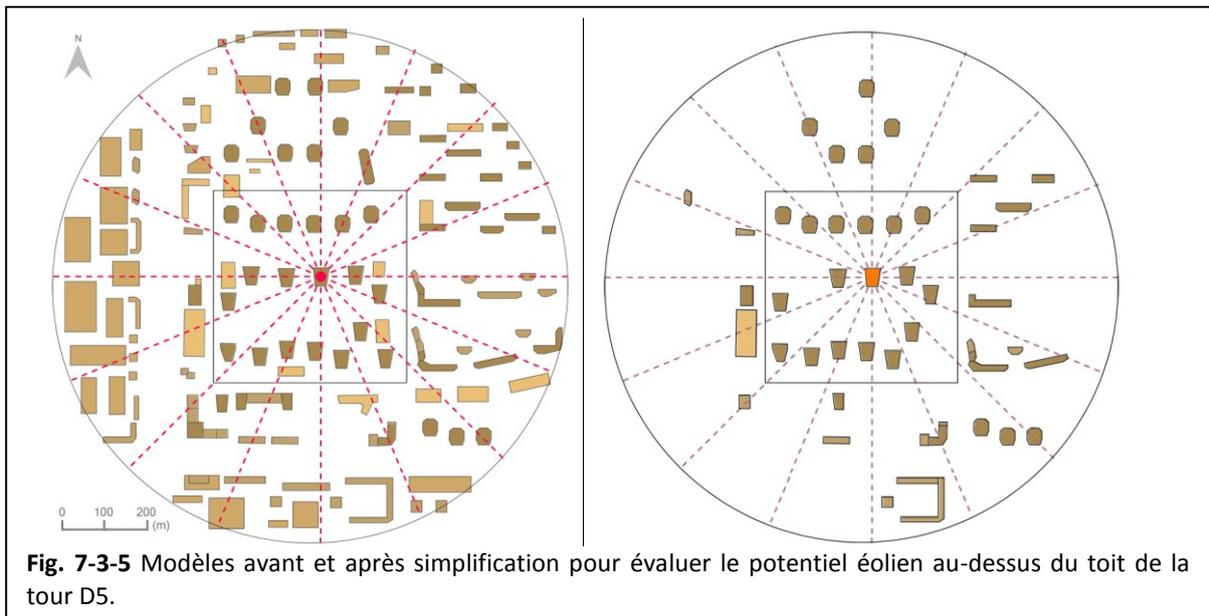


Fig. 7-3-6 Comparaison entre les valeurs du coefficient C_v en CFD et les valeurs de l'indicateur V calculé par la méthode mathématique simplifiée (pour un vent au-dessus du toit de la tour D5).

Les remarques suivantes peuvent être ajoutées :

1) Les variations entre les deux indicateurs pour les différents angles ont une certaine cohérence, principalement avec les angles -135° , $-112,5^\circ$, -90° , -45° , 0° , $112,5^\circ$, 135° , 180° .

2) Les valeurs de l'indicateur V pour les angles $-67,5^\circ$ et $22,5^\circ$ sont surestimées, alors que celles pour les angles $-157,5^\circ$, $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, 90° et $157,5^\circ$ sont sous-estimées.

En générale, la prédiction de l'impact d'obstacle I_0 du vent au-dessus du toit de la tour D5 est proche de la prédiction de l'impact d'obstacle pour la tour C1. L'écart moyen entre les résultats en CFD et en méthode mathématique dans le cas de la tour D5 est de 0,15 sur 0,57, alors que dans le cas de la tour C1 l'écart moyen est de 0,21 sur 0,77. En autre terme, un écart moyen de 27 % présente.

La méthode mathématique simplifiée ainsi définie, comprenant les équations, les procédures de simplification et les règles de calcul, peut être encore améliorée. Les modifications suivantes peuvent être faites :

1) La correction de l'effet de concentration par le passage du vent. Nous pouvons ajouter un coefficient pour intégrer cet effet. Un essai individuel sur l'évaluation de l'effet est nécessaire. Une fonction entre l'effet du vent et les paramètres morphologiques du passage peut être déterminée.

2) La correction sur les processus de simplification. Il faut évaluer l'influence des obstacles qui n'ont pas une vue directe sur la tour d'étude, par ajout d'un coefficient pour décrire la présence de plusieurs rangs d'obstacles de même hauteur.

3) La modification de l'altitude d'évaluation. Le modèle présenté correspond à l'évaluation des vents à 10 m dessus le toit ; d'autres altitudes peuvent être considérées. Les paramètres correspondants dans les équations peuvent ainsi être modifiés.

7.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode d'évaluation du potentiel éolien dans un quartier réel. Une méthode mathématique simplifiée pour prévoir la distribution du potentiel éolien au-dessus du toit est développée.

L'application à un cas réel, intégrant certains facteurs socio-économiques, ainsi certaines caractéristiques du climat local, notamment la distribution du vent, a été entreprise. Le quartier de Jinsong qui est choisi, se situe au centre ville de Pékin, a une densité bâtie très élevée et correspond à un niveau économique et à un niveau de vie assez développé. Les problèmes environnementaux y sont assez importants. Ces conditions favorisent le développement d'une énergie renouvelable comme l'énergie éolienne. La présence de plusieurs grandes tours dans le quartier favorise la mise en œuvre des éoliennes sur les toits.

Pour la simulation CFD, afin d'offrir une précision plus élevée, le modèle du quartier choisi est plus étendu que celui utilisé pour analyser et comparer les impacts de morphologie urbaine des différents quartiers sur le vent. En raison du temps de calcul important, une simplification du modèle a été proposée. Les modèles avant et après la simplification sont comparés et évalués. Les paramètres du code CFD, notamment les conditions initiales comme le profil du vent local, sont analysés.

Concernant les paramètres morphologiques, des comparaisons sont effectuées entre le modèle du centre et le modèle étendu, ainsi qu'entre les modèles avant et après la simplification. Selon la distribution du vent local, le coefficient C_v et l'indicateur M sur les vents au-dessus des toits sont calculés pour le quartier ensemble et pour chaque grande tour de hauteur importante. Des tours qui ont un potentiel éolien important sont déterminées. Le potentiel éolien à 5 m à partir des murs extérieurs des tours reste souvent faible (avec une vitesse inférieure à 3,25 m/s).

Ensuite, plusieurs types des éoliennes adaptées sont proposés. L'éolienne Beijio Bdp-600/250 a été choisie en raison de son efficacité et de son coût faible. L'exemple d'implantation des éoliennes sur le toit d'une des tours les plus ventées a été proposé. L'énergie éolienne aux différentes positions d'implantation est évaluée. Des positions favorables et exploitables sont proposées. Selon les résultats de simulation et les conditions locales et réelles, la rentabilité de l'éolienne choisie sur le toit de la tour choisie est de 25 ans à 33 ans. Le potentiel éolien dans le quartier de Jinsong est exploitable et faisable, mais une évaluation pour trouver les toitures les plus ventées est indispensable.

Enfin, une méthode mathématique basée sur des paramètres morphologiques simples est présentée pour évaluer le potentiel éolien au-dessus du toit dans un quartier complexe. L'indicateur de l'impact d'obstacle en amont de la tour d'étude est défini. De nombreux essais de simulation sont effectués pour analyser l'impact de différents paramètres morphologiques. Ce sont principalement la hauteur de l'obstacle, sa longueur face au vent, la distance entre l'obstacle et la tour d'étude, et le décalage à la ligne centrale. Des fonctions provisoires sont trouvées pour présenter la relation entre le coefficient C_v et les paramètres. Une certaine cohérence est mise en évidence entre les résultats de la méthode mathématique et ceux de la simulation CFD. Deux exemples d'application de la méthode démontrent un écart moyen de 27 %. Pour améliorer cette méthode, la correction sur l'effet du passage du vent, la correction sur les processus de simplification et l'évaluation pour d'autres altitudes devront être mis en œuvre.

8. Conclusion générale

8.1 Résumé et conclusion

Au travers des nombreuses thématiques abordées dans cette thèse, un certain nombre de conclusions générales peuvent être tirées :

- Sur la morphologie urbaine

La morphologie urbaine renvoie à l'étude des formes urbaines. Elle est multidisciplinaire car elle est un moyen utile pour analyser l'aménagement urbain en abordant plusieurs domaines comme l'évolution et le développement de la ville, l'efficacité des systèmes de transport, le bilan de l'énergie consommée, l'environnement thermique, la qualité de l'air, etc.. En effet, la forme du tissu urbain est complexe et le vent circulant en ville est turbulent et éminemment variable dans le temps en vitesse et direction. Pour rendre notre approche plus exploitable sur des cas réels, l'échelle géographique est choisie est celle du quartier, car il est plus adapté que la ville entière pour définir des caractéristiques morphologiques fines et suffisamment pour exécuter des simulations complexes et rendre les résultats fiables.

Différents critères pour classer les formes urbaines ont été présentés. Dans le cadre de notre travail, les critères d'analyse de la morphologie urbaine correspondent à une combinaison de sites dans la ville, la nature de l'utilisation du sol en aménagement, et des différentes formes de villes archétypales. En ce sens, 17 exemples dans 14 types de tissus sont proposés. Leurs caractéristiques morphologiques, les caractéristiques de l'environnement aérodynamique et les évaluations prévisionnelles sur l'installation des éoliennes ont été discutées. Pour les paramètres de la morphologie urbaine, nous nous intéressons à ce qui lie la forme physique et les interactions entre les bâtiments et le vent. En outre, les effets du vent dans l'environnement bâti sont analysés en terme de développement du potentiel éolien.

- Sur la simulation CFD de l'écoulement autour de bâtiments

Les modélisations CFD sont des outils très utiles pour évaluer l'écoulement du vent. Il sont appliqués dans des domaines de plus en plus nombreux, grâce au développement de la technologie informatique en offrant plusieurs choix de solutions et de modèles de turbulence. Lorsque des bonnes conditions initiales et des méthodes adaptées sont choisies, les résultats sont généralement approximatifs par rapport à l'essai en soufflerie ou la mesure sur site. Dans notre cas, c'est le premier choix qui est adapté, car les modèles de bâtiments et de tissus urbains sont assez nombreux et assez exigeant sur les changements de conditions initiales. Suite aux comparaisons parmi les méthodes numériques de CFD les plus utilisés dans notre domaine, les modèles de RANS sont retenus pour notre étude, en raison d'un équilibre entre leur efficacité, leur précision et la capacité de calcul requise. Compte tenu du manque de validation directe par l'expérimentation en soufflerie, les processus d'évaluation et les lignes directrices sont très importants pour nous.

Dans la bibliographie on voit que les modèles de recherche sont plutôt génériques, ou de configurations géométriques. Il y a des cas réels et complexes mais l'évaluation des paramètres de code CFD et leur validation sont toujours difficiles à aborder. Des résultats sur l'interaction entre le vent et les bâtiments sont intéressantes pour nous : la forme de l'obstacle, l'effet du vent, les mesures pour concentrer le vent, le sillage et la turbulence. La relation entre le vent et plusieurs bâtiments est moins claire, tandis que les facteurs d'influence sont très nombreux.

- Sur l'énergie éolienne en ville

Dans la dernière vingtaine d'années, l'énergie éolienne a connu un développement très important dans le monde entier. Des essais commencent à naître autour de l'application de petites éoliennes installées en milieu bâti. Les éoliennes urbaines possèdent des avantages pour la ville durable.

Pourtant, jusqu'à nos jours, le marché de l'éolienne urbaine est au début de son développement. Les problèmes et les challenges auxquels nous sommes confronté sont très nombreux.

Comparé au système photovoltaïque et au système biogaz, l'énergie éolienne possède les avantages suivants : 1) une technologie simple, 2) un coût compétitif sur un terrain venté et 3) un marché de plus en plus développé. De même, l'éolienne à petite ou moyenne échelles est préférée pour la ville. On remarque que la technologie de l'éolienne urbaine est peu développée et son rendement reste relativement faible, comparée à celles de grandes éoliennes classiques. Aucune norme ni standard ont été établis pour assurer la qualité technique de l'éolienne urbaine. L'avis du public sur l'éolienne urbaine est positif mais l'application réelle est limitée aux fonctions éducatives ou à la présentation d'une image associée à l'écologie. Les coûts d'investissement sont trop élevés. Les évaluations au cas par cas rendent les procédures très longues et découragent les propriétaires. L'urbanisme, la législation sur les nuisances sonores et la difficulté de se raccorder au réseau restent de grands obstacles pour installer une éolienne urbaine. Des éoliennes de mauvaise performance sont souvent placées à des endroits défavorables où les vents sont faibles et turbulents.

Des propositions d'implantation, des nouvelles technologies d'éoliennes adaptées au milieu urbain et des conceptions architecturales innovantes avec des éoliennes intégrées sont présentées. Suite à un résumé de littérature autour de ce sujet, des lignes directrices pour développer l'énergie éolienne urbaine à l'avenir sont ainsi proposés.

Dans le quatrième chapitre, les méthodes de validation et vérification sont présentées. La conteneur principale a été présentée dans l'article attaché. Un modèle d'expérimentation en soufflerie basé sur l'étude de l'écoulement autour d'un bâtiment est choisi comme référence pour valider notre paramétrage du code Ansys (FLUENT). De nombreux essais sont exécutés et les meilleures valeurs sont choisies et proposées pour les futures simulations. Les écarts entre le meilleur cas de simulation CFD et l'expérimentation en soufflerie sont acceptables (12 % en moyenne). Il existe une grande incertitude sur la pertinence de choix de valeur des paramètres de code CFD, et un risque important de validation d'un seul cas en raison de la faible portée quand à l'application dans des conditions réelles. Ainsi les méthodes de simulation CFD sont problématiques. Nous proposons des choix adaptés des valeurs pour nos futures simulations similaires, mais pour les modèles avec des grandes modifications de la taille géométrique, il faut faire vérifier la robustesse du modèle avant et après la simulation. Sur les méthodes de vérification de simulation CFD, des exemples sont donnés sur l'analyse de la cohérence du flux, de la sensibilité de taille du domaine et du maillage. Pour faire un certain nombre d'itérations, le temps de calcul semble avoir une relation linéaire avec le nombre d'éléments du maillage. En plus, le maillage le plus fin a besoin généralement de plus d'itérations avant de converger. Nous présentons également un exemple pour éviter des erreurs fortuites. Des simulations répétées avec des modifications significatives et des simulations des modèles symétriques peuvent aider à assurer la pertinence de la simulation numérique. Des erreurs fortuites dans un groupe de modèles en évaluant un paramètre peuvent être facilement évitées.

Dans le cinquième chapitre, l'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés est simulé et discuté. Des indicateurs sont proposés pour évaluer l'énergie éolienne dans l'environnement bâti. L'indicateur M est défini pour évaluer le potentiel éolien total dans une surface. L'indicateur C_v est défini comme le coefficient d'augmentation de la vitesse pour évaluer l'effet de concentration du vent. L'utilisation directe de la vitesse moyenne pondérée par la surface de l'élément dans le code FLUENT inclut une marge erreur moyenne de 3 à 7 % sur les espaces d'étude. En comparaison, l'indicateur M donne un résultat précis mais prend plus de temps pour traiter des images de contours de vitesse. Les résultats montrent que l'influence de la précision de classe de vitesse est assez faible ou insignifiante (moins de 0,5 %). Ceci nous permet donc d'utiliser une classe un peu plus large qui nous fait gagner du temps de calcul. Avec les indicateurs proposés, différentes

formes d'un bâtiment isolé et différentes configurations à deux et trois bâtiments sont simulées et analysées. En raison de la taille et de la position variée de zone du vent exploitable à côté d'un bâtiment en plan, la comparaison du potentiel éolien à proximité de murs n'est pas facile à effectuer. De plus, les vents à proximité des côtés du mur sont généralement moins forts qu'au-dessus des toits simplement à cause de sa hauteur inférieure. Les résultats de simulations de modèles simplifiés permettent de comparer le potentiel éolien des différentes formes simples avec des conditions simplifiées. Ces résultats constituent une base de connaissances sur l'évaluation de l'énergie éolienne en fonction de l'écoulement autour de bâtiments et permet aussi d'offrir une référence pour des études précises dans les simulations à l'échelle de quartier.

Dans le sixième chapitre, des modèles complexes à l'échelle de quartier sont étudiés. Treize indicateurs potentiellement utiles pour identifier l'impact de la morphologie urbaine sur le vent ont été choisis. Les indicateurs de porosité et de densité sont analysés particulièrement. Six quartiers typiques dans des différentes villes sont modélisés : à Paris, à Toulouse, à Bombay, à Barcelone, à New York et à Pékin. Afin de les comparer, les conditions initiales ont été choisies identiques sans prendre en compte le climat local ou l'environnement socio-économique dans cette phase d'étude. Les résultats montrent que, la majorité des modèles de quartier n'ont pas un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit. Les grandes tours ont des vents très faibles à une petite altitude sur le toit, mais des vents peut-être très forts à une altitude élevée. La hauteur du bâtiment est un élément décisif pour l'effet d'augmentation de la vitesse du vent. Les modèles avec des grandes tours qui ont des hauteurs variées montrent une amplitude plus grande de variation de l'effet du vent. Sur le potentiel éolien total au-dessus du toit (M'), la surface totale des toits exploitable pour installer des éoliennes et la hauteur moyenne des bâtiments les plus hauts du modèle sont parmi les impacts les plus importants. Une grande variation de la hauteur des bâtiments pourrait augmenter le potentiel total du quartier.

De plus, sur la base de modèles de quartier réel, six modèles d'unité avec des bâtiments simplifiés ou avec des petites modifications sont testés. Les résultats montrent que le modèle avec des bâtiments en forme de points est moins sensible pour différents angles d'incidence du vent que le modèle avec des bâtiments en forme de barre. A une altitude faible sur les toits, les bâtiments en forme de barre récolte un potentiel éolien plus important que les bâtiments en forme de point, mais à une altitude élevée ils récoltent moins que les autres. L'enlèvement d'un ou plusieurs bâtiments dans un modèle peut augmenter la vitesse du vent moyenne au-dessus du toit, mais il n'assure pas une augmentation de l'énergie éolienne totale du quartier à cause de la perte de surface de toits exploitables. Pour développer l'énergie éolienne au-dessus des toits, sur les prototypes de forme urbaine, nous proposons un tissu urbain avec des tours en forme de points avec des coins tronqués ou arrondis en plan, et un tissu avec des tours en forme de barres quand le vent dominant est parallèle à la longueur de la barre. Du côté des indicateurs morphologiques, nous trouvons que deux indicateurs sont très cohérents avec le potentiel éolien au-dessus des toits : le coefficient de variation de la hauteur des bâtiments σ_h/\bar{H} et l'indicateur de rugosité relative R_r . Avec une même densité (CES), une grande valeur de ces deux indicateurs correspond à un potentiel éolien important sur les toits.

Dans le septième chapitre, la méthode d'évaluation du potentiel éolien dans un quartier réel est présentée. Sur l'application du cas réel, les facteurs socio-économiques ainsi les climats locaux, notamment la distribution du vent, sont intégrés. Le quartier de Jinsong est choisi en analysant les conditions sociales et les problèmes environnementaux, ainsi que sa forme typique de grandes tours favorables pour le développement de l'énergie éolienne. L'éolienne Beijio Bdp-600/250 est proposée pour ce quartier en raison de sa grande efficacité et son faible coût. L'exemple d'implantation des éoliennes sur le toit d'une des tours les plus ventées est donné. L'énergie éolienne en différentes positions d'implantation est évaluée. Des positions favorables et exploitables sont proposées. Selon

les résultats de simulation et les conditions locales et réelles, la rentabilité de l'éolienne choisie sur le toit de la tour la plus ventée est de 25 ans à 33 ans. Le potentiel éolien dans le quartier de Jinsong est donc exploitable et faisable, mais une évaluation détaillée pour déterminer les tours les plus ventées reste indispensable.

En outre, une méthode mathématique pour prévoir la distribution du potentiel éolien au-dessus des toits est proposée. L'indicateur de l'impact d'obstacle en amont de la tour d'étude est défini. De nombreuses simulations sont effectuées pour analyser l'impact des différents paramètres morphologiques. Des fonctions sont établies pour définir la relation entre le coefficient C_v et les paramètres morphologiques. Une certaine cohérence entre les résultats de la méthode mathématique simplifiée proposée et ceux de la simulation CFD est présentée. Pour améliorer cette méthode, la correction sur l'effet du passage du vent, la correction sur les processus de simplification et l'évaluation à plusieurs d'autres altitudes sont des pistes de développement possibles.

8.2 Evaluation de notre travail

Concernant les travaux faits, une auto-évaluation peut être réalisée. Des contributions et des limites de la thèse sont présentées en suivant.

1) Contributions

Concernant la morphologie urbaine, notre contribution est principalement sur la cohérence entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques éoliens. Deux indicateurs morphologiques sont trouvés d'avoir une cohérence très élevée. Plusieurs autres montrent une certaine de cohérence mais pas assez pour prévoir la capacité de production éolienne. De plus, des règles sur les formes urbaines pour optimiser l'exploitation d'énergie éolienne sont données.

Concernant le développement d'énergie éolienne urbaine, nous définissons l'indicateur du potentiel éolien (M). Il correspond à la puissance d'éolienne et est plus adapté à l'évaluation d'énergie éolienne que le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent (C_v) qui est largement utilisé au présent dans la littérature sur l'écoulement du vent.

Concernant la simulation CFD, nous arrivons de trouver un groupe de valeurs validées pour des paramètres importants du code ANSYS. Celui-là permet de valider des modèles simples et similaires.

En outre, lorsque le modèle est très complexe, la proche mathématique proposée permet d'évaluer, avec une certaine précision (70 %), le potentiel éolien au-dessus du toit d'une tour au milieu d'un quartier complexe.

2) Limites

Lorsque les configurations des bâtiments existent de nombreux variantes, les travaux sont présentés pour montrer la méthode d'analyse. Les résultats ne peuvent être pas suffisants pour montrer une tendance claire et correcte. Les simulations de modèles simples peut-être donnent un sens un peu superficiel.

De plus, en raison du temps de temps de calcul, le nombre de modèles de quartier ou d'unité est limité. Des formes urbaines potentiellement favorables pour développer l'énergie éolienne peuvent être manquées. Lorsque nous manquons de simulations de nombreux types de formes urbaines, des règles générales sur le choix d'une telle forme urbaine favorable pour développer le potentiel éolien sont difficiles à donner dans le cadre d'urbanisme.

8.3 Perspectives

Pour l'avenir et les chercheurs sur le sujet en commun, les travaux suivants peuvent être intéressants.

1) Sur des formes simples

On peut continuer la recherche sur des formes simples et chercher les règles de variation (ou fonctions) entre les paramètres morphologiques et les indicateurs énergétiques. Par exemple, sur le

passage du vent au-dessus du toit avec une casquette, plusieurs des variantes peuvent être considérées pour trouver une casquette qui capte le plus potentiel éolien pour un bâtiment donné.

En outre, lorsque les modèles simples peuvent adopter les valeurs des paramètres du code dans le modèle de validation, les résultats des simulations des modèles simples sont normalement peuvent être validés et précises.

2) Sur des formes complexes

On peut développer et chercher plus des indicateurs de la morphologie urbaine et évaluer ses cohérences aux indicateurs énergétiques éoliens. Des autres indicateurs morphologiques qui sont très cohérent peuvent être trouvés et aident au choix d'une forme urbaine avec un potentiel éolien important.

3) Sur la méthode mathématique

Nous pouvons améliorer la proche mathématique d'évaluation du potentiel éolien. Des autres aspects d'influence peuvent être considérés et évaluer. L'interaction entre deux bâtiments, notamment l'effet du vent sur les passages, de côtés d'une grand tour, peut être analysé.

1. Livres, thèses et mémoires

Allain, R.. *Morphologie urbaine : géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand coliin, 2004.

AIAA. *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*. AIAA-G-077-1998, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Teston, VA, 1998.

Alexander, C., *The Nature of Order : An Essay on the Art of Building and the Nature of the Universe*. Oxford University Press, 2004.

ANSYS, ANSYS Meshing User's Guide. SAS IP, inc. Nov. 2013.

Beller, C., *Urban Wind Energy - State of the Art 2009*. Risø-R-Report. National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, 2009.

Beller, C., *Urban Wind Energy*. PhD thesis, Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, 2011.

Beranek, W.J., Wind environment around single buildings of rectangular shape, Heron 29-1, 1984a.

Beranek, W.J., Wind environment around building configuration, Heron 29-1, 1984b.

Benzerzour, M., *Transformations urbaines et variations du microclimat : Application au centre ancien de nantes et proposition d'un indicateur « morpho-climatique »*. Thèse de doctorat, Université de Nantes. 2004.

Bonneaud, F., *Ventilation naturelle de L'habitat dans les villes tropicales : Contribution à l'élaboration d'outils d'aide à la conception*. Thèse de doctorat, L'Ecole d'Architecture de Nantes. Février 2004.

Bottema, M., *Wind Climate and Urban Geometry*. PhD thesis. Technology University of Eindhoven (Netherlands). 1993.

Burgess, E.W., *The Growth of the City*. In 'The trend of population', Publications of the American Sociological Society, vol XVIII, pp. 85-97, 1925.

Bürklin, T. et Peterek M., *Basics morphologie urbaine*. Birkhauser (Basel Boston Berlin). 2008.

Burton, T., Sharpe, S., Jenkins, N., Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2001.

Campos-Arriaga, L., *Wind Energy in the Built Environment : A Design Analysis Using CFD and Wind Tunnel Modelling Approach*, PhD thesis, University of Nottingham, 2009.

Casey, M., Wintergerste, T., *Best Practice Guidelines*, ERCOFTAC Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD, ERCOFTAC, Brussels, 2000,

Chatelet A., Pierre Fernandez, Pierre Lavigne. *Architecture Climatique—Une contribution au développement durable. TOME 2 : concepts et dispositifs*. Edisud, 1998.

Cook, N.J., *The designer's guide to wind loading of building structures : Part 1 : Background, Damage Survey, Wind Data&Structural Classification*. Butterworths. 1985.

Denis, D., et Jean, L.R.A., *Encyclopédie Ou Dictionnaire Raisonné Des Sciences, Des Arts Et Des Métiers*, vol. 15, Samuel Faulche, 1765.

Dutton, A. G., Hqlliday, J. A., Blanch, M. J., Energy Research Unit, CCLRC, *The Feasibility of Building Mounted/Integrated Wind Turbines (BUWTs) : Achieving their potential for carbon emission reductions*. Final report, under contract of Carbon Trust (2002-07-028-1-6), 4 May 2005.

Edussuriya, P. S., *Urban morphology and air quality : a study of street level air pollution in dense residential environments of Hong Kong*. PhD thesis, University of Hong Kong. 2006.

Emelianoff, C.. *La ville durable, un modèle émergent : géoscopie du réseau européen des villes durables (Porto, Strasbourg, Gdansk)*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans. 1999.

- Ferrigno, K., *Challenges and strategies for increasing adoption of small wind turbines in urban areas*. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology. 2010,
- FNAU (Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme) et les agences d'urbanismes de France. Habitat - formes urbaines - Densités comparées et tendances d'évolution en France. Octobre 2006.
- Fraenkel P.L., *Les machines élévatoires*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, 1994.
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüs, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N.G.. *Recommendations on the use of CFD in wind engineering*. In : van Beeck, J.P.A.J. (Ed.), Proc. Int. Conf. Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics. COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment, von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium 5-7 May 2004.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B.. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. COST 732 : Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 2007.
- Gauthiez, B.. *Espace urbain - Vocabulaire et morphologie*. Editions du patrimoine. 2003.
- GB50009-2012, *Load code for the design of building structures*. République Populaire de Chine Norme nationale, Réalisé à partir du 1 oct. 2012.
- Hillier, B., *Space is the Machine : A Configurational Theory of Architecture*. Cambridge University Press. 1998.
- Hladik, J., Adam, H., Bernard, J., Bonnelle, D., Brossé, R., Girtan, M., Guignard, J.C., Hladik, C.M., Maunoury, B., Robieux, J., Stevance, V., Walchli, C., *Les énergies renouvelables aujourd'hui et demain*. Ellipses, 2011.
- Hussain. M., *A study of the wind forces on low rise buildings and their application to natural ventilation methods*, PhD Thesis, University of Sheffield. 1978.
- Kasbadji Merzouk, N., Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 2006.
- Ikhwan, M., *Investigation of the Flow and Pressure Characteristics Around Pyramidal Buildings*, PhD thesis, Universitätsverlag Karlsruhe, June 2005
- Izaguirre, P. D., *Urban Wind Power : Installation of an Urban Wind Power turbine in Polhemsskolan in Gävle*. Master's Thesis, University of Gävle. 2008.
- Launder, B. E. and Spalding, D. B., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.
- Laporte, L., *Application d'un code de CFD atmosphérique à l'estimation du productible éolien en terrain complexe*. Thèse de doctorat. Paris Est. 2008.
- Lawson, T., *Building aerodynamics*. London : Imperial College Press, 2001.
- Lhomme, J.C., *Les énergies renouvelables : histoire, état des lieux et perspectives*. Delachaux et Niestlé S.A., Lausanne - Paris, 2001.
- Lynch, K., *L'image de la Cité*, traduit par Marie-Françoise Vénard et Jean-Louis Vénard de *The Image of the City* (1960), Paris, Dunod, 1999.
- Lynch, K., *A Theory of Good City Form*. Cambridge, MA : MIT Press, 1981.
- Manwell, J.F., MoGowan, J.G. and Rogers, A.L., *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*. John Willey & Sons, Ltd. 2002.
- Merlin, P. (éditeur), associés avec Ernesto D'Alfonso et Françoise Choay. *Morphologie urbaine et parcellaire*. Espaces : Colloque d'Arc-et-Senans, Presses Universitaires de Vincennes. 1988.
- Mertens, S., *Wind energy in the built environment : Concentrator Effects of Buildings*. PhD thesis, Technology University of Delft, published by Multi-Science, 2006.

- Millot, M., Développement urbain et insécurité routière : l'influence complexe des formes urbaines. Thèse de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, France. décembre 2003.
- Mo, X.R., *Design and Experimental Research on Small Low Wind Speed Startup Vertical Axis Wind Turbine*. MSc thesis, Kunming University of Science and Technology, 2011. (Original en chinois : 莫晓聃, 小型低风速垂直轴风力机的设计与实验研究.[D] 昆明理工大学硕士学位论文. 2011.01.)
- Moffett, F., Fazio, M. and Wodehouse, L., *A World History of Architecture*. McGraw-Hill Publishing Co., 2008.
- Moreno, D., Charreron, D., *Urban Wind Energy : Case Study Wind Turbine at LÄKEROL Arena*. Published by VDM Verlag Dr. Müller. July 2011.
- Moriarty, M., *Feasibility of Small-Scale Urban Wind Energy Generation*. Master's Thesis, University of Pittsburgh. 2009.
- Norte Pinto, N., *Technologies for urban and spatial planning : virtual cities and territories*. Hershey : Information Science Reference, 2014.
- Panerai, p., Castex, J., Charles Depaule, J., *Fromes urbaines : de l'îlot à la barre*. Edition Parenthèses, 1997.
- Panerai, p., Charles Depaule, J., Demorgon, M., *Analyse urbaine*. Edition Parenthèses. 1999.
- Panerai, P., Castex, J., Charles Depaule, J., Samuels, I., *Urban forms : the death and life of the urban block*. Architectural Press, 2004.
- Peker. Z., *Integrating renewable energy technologies into cities through urban planning : In the case of geothermal and wind energy*. Ph. D. Izmir Institute of Technology. 2005
- Phillips, R., Blackmore, P., Anderson, J., Clift, M., Aguiló-Rullán, A., Pester, S., *Micro-wind Turbines in Urban Environments : An assessment (FB17)*. IHS - BRE Press. November 2007.
- Pinol, J.L, Fouchier, V., Levy, J. et Beaucire, F.. *La forme des villes -- Caractériser l'étalement urbain et réfléchir à de nouvelles modalités d'actions*. Edition de CERTU (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les construction publiques, Ministère de l'équipement, de transport et du logement). 2000,
- Salat, S., *Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable*. Hermann & CSTB, 2011.
- Schlichting, H., and K. Gersten, *Boundary Layer Theory*, 8th ed. Springer-Verlag, Berlin. 2000,
- Sharag-Eldin, A. M. K., *Predicting natural ventilation in residential buildings in the context of urban environments*. PhD thesis, University of California, Berkeley. 1998.
- Shi, S., *The Applied Research of Urban High-Rise Buildings Wind Energy and for Designing of Hybrid Energy Storage System*. Master's thesis, Hebei University of Science and Technology, 2011. (Original en chinois : 史松, 高层建筑屋顶风能利用研究.[D] 华侨大学硕士学位论文. 2011.04.)
- Stankovic, S., Campbell, N., Harries, A., *Urban Wind Energy*. Published by Earthscan, 2009.
- Turesson, J., *Potential for Renewable Energy Sources (RES) in Grenoble, Delft*. Master's Thesis, KTH Industrial Engineering and Management. 2011.
- Whaley, D. M., *Low-cost small-scale wind power generation*. PhD thesis, University of Adelaide, 2009.
- Wilcox, D. C., *Turbulence modeling for CFD*, 2nd edition ; DCW Industries, Inc., La Canada CA, 1998.
- Yang, R., *Wind Energy Utilization on the Roof of the High-rise Building*, MSc thesis, Huaqiao University, 2011b. (Original en chinois : 杨蓉, 城市高层建筑群风能转换与储能技术研究.[D] 河北科技大学硕士学位论文. 2011.05.)
- Yang, T., *CFD and Testing of a naturally ventilated full-scale building*, PhD thesis, University of Nottingham, May 2004,
- Yu, W. K., *Current progress and future development of wind energy in Hong Kong*. Master's thesis, University of Hong Kong. 2011.

Zeng, H.S., *Integration of renewable energy with urban design : based on the examples of the solar photovoltaics and micro wind turbines*. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology. 2011.

Zhang, D.F., *Wind Energy Effective Utilization in the Built Environment*, MSc thesis, Shandong Jianzhu University, 2010, (Original en chinois : 张东方,建筑环境中的有效风能利用研究.[D] 山东建筑大学硕士论文. 2010,04.)

Zhang, Y., *Wind-Energy Efficiency Study and Structural Analysis of Building Integrated / Mounted Wind Turbines*, MSc thesis, Zhejiang University, 2011. (Original en chinois : 张玉, 风能利用建筑的风能利用效能研究.[D] 浙江大学硕士论文. 2011.01.)

2. Articles scientifiques

2.1 Les articles sur la morphologie urbaine et le climat du vent

Adolphe, L.. *A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities*. Environment and Planning B : Planning and Design 2001, bolume 28, pp. 183-200,

Adolphe, L. (en partenariat avec le TMU, le groupe ABC, l'IRPHE, et le laboratoire de Psychologie de l'Environnement –Paris V). SAGACités : *Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances Urbaines*. Rapport final, SAGACités. Ecoles d'Architecture de Toulouse et de Bordeaux. Fév. 2002.

Balocco, C., et Grazzini, G., *Thermodynamic parameters for energy sustainability of urban area*. Solar Energy, Volume 69, Issue 4, 2000, Pp. 351–356.

Bardhan, Ronita, H. Kurisu, Kiyoo & Hanaki, Keisuke, *Linking Urban Form and Quality of Life in Kolkata*, India, 47th ISOCARP Congress 2011.

Batty, M., *Cities as Complex Systems : scaling, interactions, networks, dynamics*. In Meyers, R.C. (ed.), *The Encyclopedia of Complexity & System Science*, Springer, Berlin, 2009.

and Urban Morphologies

Bernié-Boissard, Catherine et Chevalier, Dominique. *Développement durable : discours consensuels et pratiques discordantes. Montpellier et Nîmes. Quelle ville durable ?* Espaces et Sociétés. 147 N° 4/2011.

Bordes-Pagès. E., Nicolas Mémmi, Lionel Pénisson, Sylvie Castano et Gérard Abadia, *Référentiel de densités et de formes urbaines*. Rapport de IAURIF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile de France), Août 1995.

Cailleux, A., *L'énergie éolienne en France et dans le monde*. Annales de Géographie. 1965, t. 74, n°403. pp. 257-270,

Colaninno. N., Cladera. J.R., Pfeffer. K.. *An automatic classification of urban texture : form and compactness of morphological homogeneous structures in Barcelona*. ERSAs Congress 2011, Barcelona, Spain.

Cionco, R.M., Ellefsen, R.. *High resolution urban morphology data for urban wind flow modeling*. Atmospheric Environment Vol. 32. No. 1, pp. 7-17. 1998.

Davenport, A.G., Grimmond, S.B., Oke, T.R., Wieringa, J., *Estimating the roughness of cities and sheltered country*. In : Proc. 12th AMS Conf. on Applied Climatology, Asheville, North Carolina. 2000,

Duan, J. and Qiu, G.C., *The emergence and development of overseas morphology studies*. Urban planning forum, Issue 05, 2008. (Original en chinois : 段进,邱国潮, 国外城市形态学研究的兴起与发展.[J] 城市规划学刊. 2008 (5).)

Edussuriya, P., Chan, A., Ye, A.. *Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I : District-level analysis*. Atmospheric Environment, Volume 45, Issue 27, September 2011, pp. 4789-4803.

Gao. Y.F., Yao. R.M., Li. B.Zh., Turkbeyler. E., Luo. Q., Short. A.. *Field studies on the effect of built forms on urban wind environments*. Renewable Energy 46 (2012) pp. 148-154

Gauthiez, B.. *Espace urbain - Vocabulaire et morphologie*. Editions du patrimoine. 2003.

Golany, G.S., *Urban design morphology and thermal performance*. Atmospheric Environment Vol. 30, No. 3, 1996. pp45-65.

Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R.. *Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form*, J. Appl. Meteorol. 38 (1999), 1262–1292.

Grosso, M., *Urban form and renewable energy potential*. Renewable Energy 15 (1998) pp. 331-336.

[Guide du PLH](#), fiche 7. Communauté d'agglomération de Grand Avignon: FORMES URBAINES? Mai 2009.

[Hang](#), J., Li, Y.G., Sandberg, M., Claesson, L.. *Wind conditions and ventilation in high-rise long street models*, Building and Environment, Volume 45, Issue 6, June 2010, pp. 1353-1365,

[Hankey](#). S., Marshall. J.D.. *Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions*. Energy Policy 38 (2010) pp4880–4887.

[Huang](#). Chih-Hong, Pham. Xuan-Na. *The Influence of Community Planning on Urban Thermal Environment*, 2012 International Conference on Environment Science and Engineering, IPCBEE vol.3 2(2012).

[Hunt](#), J.C.R., Poulton, E.C. et Mumfod, J.C., *The effects of wind on people, New criteria based on wind tunnel experiments*, Building and Environment 11, 1976, pp. 15-28.

[IAURIF](#) (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'île-de-France). Apprendre la densité. Note rapide sur l'occupation du sol, N° 383, juin 2005.

[Kastner-Klein](#). P., and Rotach. M.W.. *Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer*. Boundary-Layer Meteorology 111 (2004), pp. 55-84.

[Kitous](#), S., Bensalem, R., Adolphe, L.. *Airflow patterns within a complex urban topography under hot and dry climate in the Algerian Sahara*, Building and Environment, Volume 56, October 2012, pp. 162-175.

[Knidiri](#) F, A. Laouina, M. Fabre et A. Wyatt, « L'énergie éolienne au Maroc ». Rapport interne au CDER, 1986.

[Kutzbach](#), J. *Investigations of the modification of wind profiles by artificially controlled surface roughness*. Studies of the three dimensional structure of the planetary boundary layer, Annual Report 1963, Department of Meteorology, University of Wisconsin, Madison, 1961, pp. 37-96.

[Lawson](#), T.V. and Penwarden, A.D., *The effects of wind on people in the vicinity of buildings*. Proc. 4th Int. Conf. on Buildings and Structures, Heathrow, UK, 1975, pp. 605-622.

[Leene](#), J.A., *Building wake effects in complex situations*, in Proc. 8th Int. Conf. on Wind Engineering, London, Ontario, Canada. 1991.

[Lettau](#), H., *Note on aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description*. Journal of Applied Meteorology 8 (1969), pp. 828-832.

[Levy](#) A., , « La composition urbaine : un savoir-faire en crise », dans Vers un nouvel urbanisme, Faire la ville, comment ? Pour qui ? - Vers un nouvel urbanisme, édité par Genestier P., Champs sur marne : France. 1996.

[Liu](#). Ch., Shen. Q.. *An empirical analysis of the influence of urban form on household travel and energy consumption*. Computers, Environment and Urban Systems 35 (2011) pp. 347–357.

[Nfaoui](#) H., J. Bahraoui Buret et A.A.M. Sayigh, *Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Morocco*, Solar Energy, N°1, pp 51-60, 1998.

[Ng](#), Edward, Yuan, C., Chen, L., Ren C., Fung, J.C.H.. *Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness : A study in Hong Kong*, Landscape and Urban Planning, Volume 101, Issue 1, 15 May 2011, pp. 59-74.

[Oke](#), TR. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. Instruments and observing methods report no. 81. World Meteorological Organization. 2006.

[Observatoire de L'habitat](#) (Ministère du Logement, le Gouvernement du Grand-Duché du Luxembourg) en collaboration avec le CEPS INSTEAD, Densité résidentielle dans la construction au Grand-Duché de Luxembourg entre 2004 et 2010 --Etude comparative sur les terrains consommés et habités ainsi que sur les terrains reconstruits et habités. DossierThematique, septembre 2013.

[Plate](#), E. J., *Urban Climates and Urban Climate Modelling : An Introduction*, in J. E. Cermak et al. (eds.), Wind Climate in Cities, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht, 1995. pp. 23–29.

- [Raupach](#), M. R.. *A Wind-Tunnel Study of Turbulent Flow Close to Regularly Arrayed Roughness elements*, *Boundary-Layer Meteorol.* 18 (1980), pp. 373–397.
- [Raupach](#), M. R., Antonia R. A., and Rajagopalan S.: *Rough-Wall Turbulent Boundary Layers*, *Appl. Mech. Rev.* 44(1991), pp. 1–25.
- [Ratti](#), C., Baker, N., Steemers, K., *Energy consumption and urban texture*, *Energy and Buildings* 37 (2005) pp. 762–776,
- [Rochel](#), X.. *La Morphologie Urbaine*, Université de Nancy II, Foxit Software Company, 2007.
- [Rotach](#), M. W., R. Vogt, C. Bernhofer, E. Batchvarova, A. Christen, A. Clappier, B. Feddersen, S.-E. Gryning, G. Martucci, H. Mayer, V. Mitev, T. R. Oke, E. Parlow, H. Richner, M. Roth, Y.-A. Roulet D. Ruffieux, J. A. Salmond, M. Schatzmann, and J. A. Voogt., *BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project*. *Theor. Appl. Climatol.* 81(2005), pp. 231–261.
- [Sunderland](#), K. M., Mills, G., and Conlon, M. F., *Estimating the wind resource in an urban area : A case study of micro-wind generation potential in Dublin, Ireland*. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.118 (2013), pp. 44-53.
- [Shashua-Bar](#). L., Hoffman. M.E., Tzimir. Y.. *Integrated thermal effects of generic built forms and vegetation on the UCL microclimate*. *Building and Environment* 41 (2006) pp. 343–354.
- [Steiniger](#), S., Lange. T., Burghardt. D., Weibel. R.. *An approach for the classification of urban building structures based on discriminant analysis techniques*. *Transactions in GIS* 12 (1) 2007, pp31-59.
- [Steemers](#), K., *The characterisation of urban microclimates, urban form and the environmental factors affecting energy use*. EnerBuild RTD Thematic Network, 22-23 Oct 2002, Lyon.
- [Stewart](#), I., & Oke, T. *Classifying Urban Climate Field Sites by Local Climate Zones*. *International Association for Urban Climate* 34 (2009). pp. 8-11.
- [Sun](#), L., Anders Nottrott, Jan Kleissl. *Effect of hilly urban morphology on dispersion in the urban boundary layer*, *Building and Environment*, Volume 48, February 2012, pp. 195-205.
- [Tang](#), U.W., Wang, Z.S.. *Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution : Results from a modelling system*, *Environmental Modelling & Software*, Volume 22, Issue 12, December 2007, pp. 1750-1764.
- [Weber](#), C, Hirsch, J, Schnell, L., Perron, G., Kleinpeter, J., and Ranchin T.. *Urban fabric and measures of variability ; Neighborhood effects on proximity pollution*, In 12th world clean air and environment congress, Greening the new millennium, August 2001, Seoul, Korea.
- [Weber](#), S., Klaus Kordowski. *Comparison of atmospheric turbulence characteristics and turbulent fluxes from two urban sites in Essen, Germany*. *Theoretical and Applied. Climatology*.Volume 102, Numbers 1-2, 2010, pp. 61-74.
- [Wieringa](#), J., Davenport, A. G., Oke, T.R., *New revision of Davenport roughness classification*. In the proceedings of the 3rd European & African Conference on Wind Engineering, Eindhoven, Netherlands, July 2001.
- [Yoshida](#), H., Omae, M., *An approach for analysis of urban morphology : methods to derive morphological properties of city blocks by using an urban landscape model and their interpretations*. *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 2005, pp. 223 – 247.
- [Yuan](#), C., Ng, Edward., *Building porosity for better urban ventilation in high-density cities : A computational parametric study*. *Building and Environment* 50 (2012) pp. 176 - 189.
- [Zahabia](#). S. A. H., Miranda-Moreno. L., Patterson. Z., Barla. P., Harding. C., *Transportation Greenhouse Gas Emissions and its Relationship with Urban Form, Transit Accessibility and Emerging Green Technologies : A Montreal case study*. EWGT 2012, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 54 (2012) pp. 966–978.

Zhao, C.J., Fu, G.B., Liu, X.M., Fu, F.. *Urban planning indicators, morphology and climate indicators : A case study for a north-south transect of Beijing, China*. Building and Environment 46 (2011) pp. 1174-1183.

2.2 Articles sur la modélisation CFD

Ariff, M., Sali m, S. M. and Cheah, S. C., *Wall y+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube : part 2 – high reynolds number*. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, 2009.

Baskaran, A., Kashef, A., *Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques*. Engineering Structures, Volume 18, Issue 11, November 1996, pp. 861–873, 875.

Beller, C. , *Development of a Simulation Tool to Predict Urban Wind Potential*. Sustainability in Energy and Buildings. Volume 7, 2011, pp. 111-120.

Blocken, B., Carmeliet, J., and Stathopoulos, T., *CFD evaluation of the wind speed conditions in passages between buildings – effect of wall-function roughness modifications on the atmospheric boundary layer flow*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95(9-11), 2007a, pp. 941-962.

Blocken, B., Stathopoulos, T., and Carmeliet, J.. *CFD simulation of the atmospheric boundary layer : wall function problems*. Atmos. Environ., 41(2), 2007b, pp. 238-252.

Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., and Hensen, J., *Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment : an overview*. Journal of Building Performance Simulation, Vol. 4, No. 2, June 2011, pp.157–184.

Blocken, B., Gualtieri, C., *Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics*. Environmental Modelling & Software 33, 2012. pp. 1-22.

Blocken, B., Janssen, W.D., Hooff, T.V.. *CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas : General decision framework and case study for the Eindhoven University campus*. Environmental Modelling & Software 30 (2012), pp. 15-34.

Boussinesq, J., *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Compte rendu des séances de l'Académie des Sciences, Paris. 75 : (1872), pp. 1011 - 1015.

Coleman, H. W. and Stern, F., *Uncertainties and CFD Code Validation*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, 1997. pp. 795-803.

Davidson, L. and Nielsen, P., *Large Eddy Simulations of the Flow in a Three-Dimensional Ventilated Room*, 5th Int. Conf. on Air Distributions in Rooms, ROOMVENT'96, Ed : S. Murakami, Vol. 2, pp. 161-168, Yokohama, Japan, July 1996.

Easo m, G., *Improved turbulence models for computational fluid dynamics*. School of Civil engineering, University of Nottingha m, UK. 2002. Http : [//www.nottingham.ac.uk/~evzngw/download.htm](http://www.nottingham.ac.uk/~evzngw/download.htm).

Fluent 6.3, User's guide. Fluent Inc. 2006. [http : //aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug](http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug). Accès à 2014-06-26.

Fluent Inc., *Fluent 6.2 User's Guide*. Fluent Inc., Lebanon. 2005.

FNAU (Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme) et les agences d'urbanismes de France. *Habitat - formes urbaines - Densités comparées et tendances d'évolution en France*. Octobre 2006.

Fothergill, C.E., Roberts, P.T. and Packwood, A.R., *Flow and dispersion around storage tanks. A comparison between numerical and wind tunnel simulations*, Wind & Structures, Vol. 5, No. 2-4, pp. 89-100, 2002.

Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krü s, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N.G., *Recommendations on the use of CFD in wind engineering*. In : Proceedings

of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics. In : van Beeck JPAJ (Ed.), COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment. von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 5 – 7 May 2004.

[Frei, W.](#), Which Turbulence Model Should I Choose for my CFD Application ? *COMSOL Blog*. www.comsol.com. Sep. 16, 2013. Accessed à 10 oct.2014.

[Harlow, F. H.](#) and Nakayama, P. *Transport of turbulence energy decay rate*, Los Alamos Science Lab., University California Report LA-3854, 1968.

[Hanna, Steven R.](#), Michael J. Brown, Fernando E. Camelli, Stevens T. Chan, William J. Coirier, Olav R. Hansen, Alan H. Huber, Sura Kim, and R. Michael Reynolds. *Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan- an application of five computational fluid dynamics models*. American Meteorological Society, 2006, pp. 1713-1726.

[Houda, S.](#), Zemmouri, N., Athmani, R., Belarbi, R.. *Effect of urban morphology on wind flow distribution in dense urban areas*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1, 2011, pp. 85 – 94.

[IAURIF](#) (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France). Apprendre la densité. Note rapide sur l'occupation du sol, N° 383, juin 2005.

[Karthik, T. S. D.](#). *Turbulence models and their applications*. 10 th Indo - German winter academy 2011, Surajkund, Delhi, Dec. 11-17, 2011.

[Jones, W. P.](#), and Launder, B. E. *The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15, 1972, pp. 301-314.

[Launder, B. E.](#) and Spalding, D. B. *The numerical computation of turbulent flow*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 3, 1974, pp. 269 - 289.

[Leitl, B.M.](#), *Validation data for microscale dispersion modeling*. Eurotrac newsletter, 22(2000), pp. 28-32.

[Lin, G.M.](#), Hu, Y.S., *The analysis of pedestrian comfort to the urban street---A wind tunnel study*. <http://www.paper.edu.cn>, 2009. (Original en chinois : 林官明, 胡永生. 北京市金融街街区行人风环境的风洞模拟研究. 中国科技论文在线. 2009.)

[Lu, L.](#), LP, K.Y., *Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2009, pp. 450–461.

[Lu, L.](#), Sun, K., *Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area*. Energy and Buildings 68, 2014, pp. 339-350.

[Menter, F.](#), B. Hemstrom, M. Henriksson, R. Karlsson, A. Latrobe, A. Martin, P. Muhlbauer, M. Scheuerer, B. Smith, T. Takacs, and S. Willemssen, CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications, Report EVOLECOR - D01, Contract No. FIKS-CT-2001-00154, 2002.

[Melbourne, W. H.](#) *Criteria for Environmental Wind Conditions*. Journal of Industrial Aerodynamics, Vol.3, 1987. pp. 241-249.

[Meroney RN](#), Leitl B M, Rafailidis S, Schatzmann et c M. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 81, 1999, pp. 333–45.

[Miao, S.G.](#), Wang, X.Y, Jiang, W.M., Wang, Y.W. and Chen, X.Y., Impact on atmospheric environment by green space layout in urban planning : A case study on green space planning of Chengdu. Planning Studies. (2013) 06-0041-06. (Original en chinois : 苗世光, 王晓云, 蒋维楣, 王咏薇, 陈鲜艳. 城市规划中绿地布局对气象环境的影响--以成都城市绿地规划方案为例. [J]城市研究 (2013) 06-0041-06.)

[Observatoire de l'Habitat](#) (Ministère du Logement, le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg) en collaboration avec le CEPS INSTEAD, Densité résidentielle dans la construction au

Grand-Duché de Luxembourg entre 2004 et 2010 --Etude comparative sur les terrains consommés et habités ainsi que sur les terrains reconstruits et habités. Dossier Thématique, septembre 2013.

[Pallabazzer](#), R.. *Evaluation of wind-generator potentiality*. Solar Energy vol. 55 issue 1 July, 1995. pp. 49-59.

[Pallabazzer](#), R.. *Parametric analysis of wind siting efficiency*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics vol. 91 issue 11 November, 2003. pp. 1329-1352.

[Ramponi](#), R., Blocken, B.. *CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building : Impact of computational parameters*. Building and Environment 53 (2012), pp. 34-48.

[Raupach](#), M.R., *Drag and drag partition on rough surfaces*. Boundary-Layer Meteorology 60, 1992, pp. 375-395.

[Razak](#), A.A., Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanimoto, J., *Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment*. Building and Environment, Volume 59 (2012), pp. 56-65.

[Reiter](#), S., *Validation Process for CFD Simulations of Wind Around Buildings*. European built environment CAE conference, 2008.

[Richards](#), P.J., Hoxey, R.P., *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k - \epsilon$ turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46&47, 1993. pp. 145 - 153.

[Roache](#), P.J., *Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics*. Annu. Rev. Fluid. Mech. 29 (1997), pp. 123-160.

[White](#), Robert F., *Effects of Landscape Development on the Natural Ventilation of Buildings and their Adjacent Areas*. Research Report No. 45, Texas Engineering Experiment Station, College Station, TX. 1954.

[Sali m](#), S. M., Ong, K. C., Cheah, S. C., *Comparison of RANS, URANS and LES in the prediction of airflow and pollutant dispersion*. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011 Vol II WCECS 2011, October 19-21, 2011, San Francisco, USA.

[Spalart](#), P. R. and Allmaras, S. R., *A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flow*. *Recherche Aerospaciale*. No. 1, 1994, pp. 5-21.

[Stathopoulos](#), T., Wu, H., Bédard, C., *Wind environment around buildings: a knowledge-based approach*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 41-44, 1992. pp. 2377-2388.

[To](#), A.P., La m, K.M., *Evaluation of pedestrian-level wind environment around a row of tall buildings using a quartile-level wind speed descriptor*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54-55, 1995. pp. 527-541.

[Tominaga](#), Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T.. *All guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008), pp. 1749-1761.

[van Hooff](#), T., Blocken, B., Aanen, L., Bronsema, B., *A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings : wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations*. Build.Environ. 46(9), 2011. pp. 1797-1807.

[Wang](#), B., Cot, L.D., Adolphe, L., Geoffroy, S., Morchain, J., *Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings*. Energy and Buildings 88 (2015) pp. 57-67.

[Yang](#), Y., *Relationship between urban morphology and wind conditions in ideal wind model*. The 18th International Seminar on Urban Form, Montréal. 2011a.

[Yuan](#), C. and Ng, E., *Building porosity for better urban ventilation in high-density cities -- A computational parametric study*. Building and Environment 50 (2012) pp. 176-189.

[Yoshie](#), R., A. Mochida, Y. Tominaga, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu, T. Shirasawa. *Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95 (2007), pp. 1551 - 1578.

2.3 Articles sur l'énergie éolienne en ville

Abohela, I., Hamza, N., Dudek, S., Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. *Renewable Energy* 50 (2013). pp. 1106-1118.

Acosta, J.L., Djokic, S.Z., Assessment of renewable wind resources in UK urban areas. 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. 2010 , pp. 1439 – 1444.

ADEME, *Une énergie dans l'air du temps, les éoliennes*. Guide pratique, L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. 2004.

AFPPE, *Petit éolien et zones bâties, « éoliennes de Pignon » : Mise au point de l'AFPPE*. 2ème Colloque National du Petit Eolien, 13-14 février 2013.

Allen, S. R., G. P Hammond, M. C. McManus, *Energy Analysis and Environmental Life Cycle Assessment of a Micro-wind Turbine*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Journal of Power and Energy 222.7, 2008, pp.669-684,

Ayhan, D., Sağla m, S., *A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 1, January 2012, pp. 1040–1049.

Axenne, S., *Wind energy integration in the urban environment*. Publishable Result-Oriented Report. Grant agreement no. EIE/04/130/S07.38591. Project WINEUR, April 2007.

Balduzzi^a, F., Bianchini, A., Ferrari, L., *Microeolic turbines in the built environment : Influence of the installation site on the potential energy yield*. *Renewable Energy*, Volume 45, September 2012, pp. 163–174.

Balduzzi^b, F., Bianchini, A., Carnevale, E.A., Ferrari, L., Magnani, L., *Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building*. *Applied Energy*, Volume 97, September 2012, pp. 921–929.

Bayeul-Laine, A.C., Simonet, S., Bois, G., *VAWT with controlled blades : inuence of wake of one turbine on power coefficient on the next turbine*. 5th IC-EpsMsO, Jul 2013, Greece. IC-EpsMsO, pp.1-8. <hal-00854049>.

Beller, C. , *Development of a Simulation Tool to Predict Urban Wind Potential*. *Sustainability in Energy and Buildings*. Volume 7, 2011, pp. 111-120,

Blackmore, P., *Siting micro-wind turbines on house roofs*, IHS - BRE Press, May 2008.

Cace, J., Emil ter Horst, Katerina Syngellakis, Maite Niel, Patrick Clement, Renate Heppener, Eric Peirano, *Urban wind turbines--Guidelines for small wind turbines in the built environment*. Project WINEUR, February 2007.

Campbell, N. and Stankovic, S., *Wind energy for the built environment (project WEB), Assessment of Wind Energy Utilisation Potential in Moderately Windy Built-up Areas*. Contract JOR3-CT98-0270, Publishable final report, updated 06 July, 2001.

Campbell, N., Stankovic, S., Graha m, M., Parkin P., van Duijvendijk, M., Gruiter, T.d., Behling, S., Hieber, J., Blanch, M., *Wind energy for the built environment (project WEB)*, PF4.11, Procs. European Wind Energy Conference & Exhibition, Copenhagen, 2-6 July 2001.

Chong, W.T., Fazlizan, A., Poh, S.C., Pan, K.C., Ping, H.W., *Early development of an innovative building integrated wind, solar and rain water harvester for urban high rise application*. *Energy and Buildings*, Volume 47, April 2012a, pp. 201–207.

Chong, W.T., Poh, S.C., Fazlizan, A., Pan, K.C., *Vertical axis wind turbine with omni-directional-guide-vane for urban high-rise buildings*. *Journal of Central South University*. (03)2012b.

Dabiri, J.O., Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of renewable and sustainable energy* 3, 043104 (2011).

- [DEHLG](#), Statutory instruments - planning and development regulations 2007. Department of Environment, Heritage and Local Government, 2007.
- [Dekker](#), R.W.A., Ferraro, R.M., Suma, A.B. and Moonen, S.P.G., Interdisciplinary Design Study of a High-rise Integrated Roof Wind Energy System. EPJ Web of Conferences 33 03001, 2012.
- [Degrassi](#), S., Castelli, M.R. and Benini, E., *A Retrospective of Wind Turbine Architectural Integration in the Built Environment*. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol:7, No.6, 2013.
- [Durrani](#), N. and Qin, N., *2D Numerical analysis of a VAWT wind farm for different configurations*. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January 2011, Orlando, Florida.
- [Energy Task Force](#). *Windmill Power for City People : A Documentation of the First Urban*. ARENE Ile-de-France, janvier 2006.
- [Grant](#), A., Johnstone, C., Kelly, Nick., *Urban wind energy conversion : The potential of ducted turbines*, Renewable Energy 33 (2008) 1157–1163.
- [Grignoux](#), T., Gibert, R., Neau, P., Buthion, C.. *Eoliennes en milieu urbain - Etat de l'art*. ARENE Ile-de-France. janvier 2006.
- [Guyot](#) A.. *LE VENT - L'ARCHITECTURE ET L'AMENAGEMENT URBAIN*. Conférence de l'école d'architecture de Marseille Luminy, 2010,
- [Kalmikov](#), A., Dupont, G., Dykes, K., Chan, C., *Wind power resource assessment in complex urban environments : MIT campus case-study using CFD Analysis*. AWEA 2010 WINDPOWER Conference. May 23-26, 2010,
- [Ledo](#), L., Kosasih, P.B., Cooper, P., *Roof mounting site analysis for micro-wind turbines*. Renewable Energy, Volume 36, Issue 5, May 2011, pp. 1379–1391.
- [Li](#), Z., Boyle, F., Reynolds, A., *Domestic application of micro wind turbines in Ireland : Investigation of their economic viability*. Renewable Energy 41 : 64-74. 2012.
- [Lu](#), L., Ip, K.Y., *Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 2, February 2009, pp. 450–461.
- [McIntyre](#), J.H., Lubitz, W.D., Stiver, W.H., *Local wind-energy potential for the city of Guelph, Ontario (Canada)*. Renewable Energy, Volume 36, Issue 5, May 2011, pp. 1437–1446.
- [Mithraratne](#), N.. *Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand*. Energy and Buildings 41 (2009) 1013–1018.
- [Mohamed](#), M.H., *Impacts of solidity and hybrid system in a small wind turbines performance*. Energy 57, 2013, pp. 495 - 504.
- [MoS](#) (Museum of Science, US), Boreal Renewable Energy Development, Richard C. Gross, P.E., Inc., Paul Phelan, P.E., AeroVironment Inc., Feasibility Study for Wind Turbine Installations at Museum of Science, Boston, MA. 2006.
- [Müller](#), G., Jentsch, M.F., Stoddart, E., *Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings*, Renewable Energy 34 (5) (2009) 1407 - 1412.
- [New Energy Huseu m](#), *Small Wind World Report 2014*. Published by World Wind Energy Association, March 2014.
- [Oh](#), K.Y., Kim, J.Y., Lee, J.K., Ryu, M. S., Lee, J. S., *An assessment of wind energy potential at the demonstration offshore wind farm in Korea*. Energy, Volume 46, Issue 1, October 2012, pp. 555–563.
- [RenewableUK](#), *Small and Medium Wind*. UK Market Report, April 2012.
- [Sharpe](#), T., Provenb. G., *Crossflex : Concept and early development of a true building integrated wind turbine*, Energy and Buildings 42 (2010) pp. 2365–2375.

Walker, S.L., *Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale—A review of methods of estimating urban wind resource*. Energy and Buildings, Volume 43, Issue 8, August 2011, pp. 1852–1862.

Wang, B., Adolphe, L., Cot, L.D., *New building typology for solar chimney electricity*. In Cavallo R, Komossa S, Marzot N, Pont MB, Kuijper J (Eds), *New urban configurations* (pp293-298). IOS Press : Amsterdam. 2014.

WINEUR, *Wind energy integration in the urban environment*. Deliverable 1.1, Technology inventory report. EIE/04/130/SO7.38591, Project WINEUR, 2005.

WINEUR, *Petite éolienne en milieux urbain*. EIE/04/130/SO7.38591, Project WINEUR, 2006.

WINEUR, *Aspects socio-économiques et acceptabilité des éoliennes en milieu urbain -- France*. EIE/04/130/SO7.38591, Project WINEUR, 2007.

Zhao, H., Gao, H., Li, J.W., *Integrated Architectural Design with Wind Turbines in Urban Environment*. New Architecture (Chinese), 2011(03).

Shawn, S., *Progress report on small wind energy development projects receiving funds from the Massachusetts Technology Collaborative (MTC)*. The CADMUS.Group.Inc. 2008.

IT Power, *Small wind turbines for the urban environment--State of the art, case studies & economic analysis*. EIE/04/130/SO7.38591, Project WINEUR, 2005.

3. Sites web

1) Petites Eoliennes : <http://www.allsmallwindturbines.com/>

VAWT : <http://www.windside.com/>

2) Projet

WINEUR : <http://www.urbanwind.net>

Task 27 IEA pour les petites éolienne

http://www.ieawind.org/task_27_home_page.html

3) l'énergie éolienne

www.windpower.org

<http://www.windwandler.de>

<http://www.energies-renouvelables.org>

<http://www.urban-wind.org>

<http://www.espace-eolien.fr>

<http://www.awea.org>

L'Association européenne de l'énergie éolienne (EWEA) : <http://www.ewea.org>

L'Association américaine de l'énergie éolienne (AWEA) : <http://www.awea.org>

L'énergie éolienne de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) : <http://www.ieawind.org>

L'Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA) : <http://www.wwindea.org>

Plateforme de petite éolienne de WWEA : <http://small-wind.org>

Pour connaissance : <http://www.solacity.com/smallwindtruth.htm>

Annexe 1. Sur la morphologie urbaine

Annexe 1.1 Notions voisines de morphologie urbaine

La morphologie urbaine se croise avec plusieurs termes proches comme ci-dessous.

1) Typologie urbaine

Ce terme a commencé à être utilisé au sujet des approches structurelles et linguistiques de l'étude des formes urbaines (par Giulio Carlo Argan, Saverio Muratori et Aldo Rossi). Son objectif serait de réduire à quelques grandes catégories la multiplicité et la variété des formes urbaines existantes (par Albert Lévy). Plusieurs typologies sont possibles mais étant une branche de la morphologie, elle se situerait à un niveau plus élevé de détail que l'analyse des tissus urbains.

2) Composition urbaine

C'est la partie de l'urbanisme qui traite de la forme urbaine et qui s'occupe plus particulièrement de la mise en forme de l'espace public, des pratiques qu'il sous-tend, et de son rapport avec l'espace privé (Lévy 1996).

3) Syntaxe spatiale

Ce terme englobe un ensemble de théories et de techniques pour l'analyse des configurations spatiales. Il fournissait un outil pour aider les architectes à simuler les impacts sociaux de l'organisation spatiale de leurs bâtiments comme l'accessibilité des lieux ou leurs configurations (Hillier 1998).

4) Design urbain

C'est un processus de conception et de mise en forme des villes, des groupes de bâtiments, des rues, des espaces publics et des quartiers. Il s'agit de faire des liens entre les gens et les lieux, le mouvement et la forme urbaine, la nature et le tissu bâti⁶⁸.

5) Structure urbaine

Comme la planification de l'utilisation des terres dans les zones urbaines, l'étude de la structure urbaine a été entreprise essentiellement en termes économiques, sociaux et démographiques avec plusieurs modèles en expliquant où les différentes classes sociales et les différentes industries ont tendance à exister dans le milieu urbain.

6) Tissu urbain

C'est une superposition ou une imbrication de trois ensembles : le réseau des voies, les découpages fonciers et les constructions (Fig. 1-1). Il s'agit d'une composition cohérente de la morphologie (espaces ouverts, bâtiments) et les fonctions (activités humaines) de quartier. Les quartiers présentent des motifs reconnaissables dans l'ordre des bâtiments, espaces et fonctions (thèmes), au sein desquels la variation a renforcé un ensemble de principes d'organisation. (Stephen Kendall⁶⁹)

7) Forme urbaine

Pierre Merlin définit la forme urbaine dans le Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement comme « l'ensemble des éléments du cadre urbain qui constituent un tout homogène ». Selon Albert Lévy, il y a trois niveaux pour la forme urbaine : a) la forme urbaine comme dispositif topologique : la distribution urbaine qui « cristallise un modèle idéologique de cité », b) la forme urbaine comme configuration géométrique : la conformation urbaine (axialités, tracés, trames, figures, etc. qui régularisent et soutiennent l'implantation urbaine, c) la forme comme expression physique : le tissu urbain, qui serait un système dont les éléments (réseaux) physiques constitutifs sont le réseau viaire,

⁶⁸ <http://www.urbandesign.org>

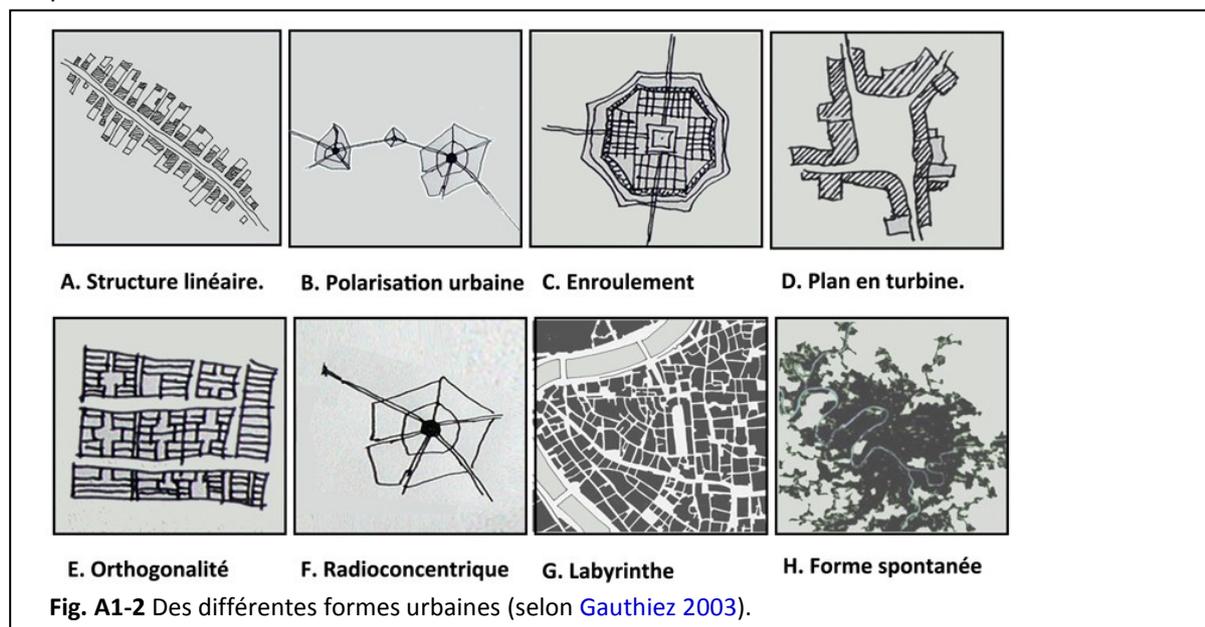
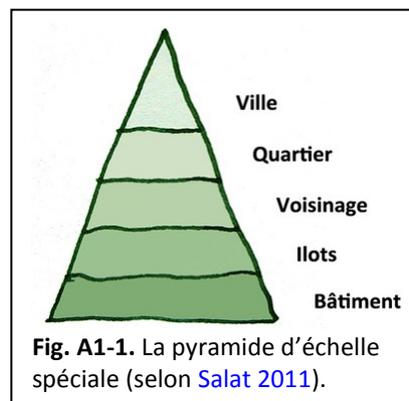
⁶⁹ Voir webste: open-building.org/gloss/unb.html.

le parcellaire, le bâti, l'espace libre et le site (orographie, hydrographie, couverture végétale). (Merlin 1988, pp. 14-26)

Annexe 1.2 Classement de formes urbaines

1) Classement par la configuration et la structure d'espace

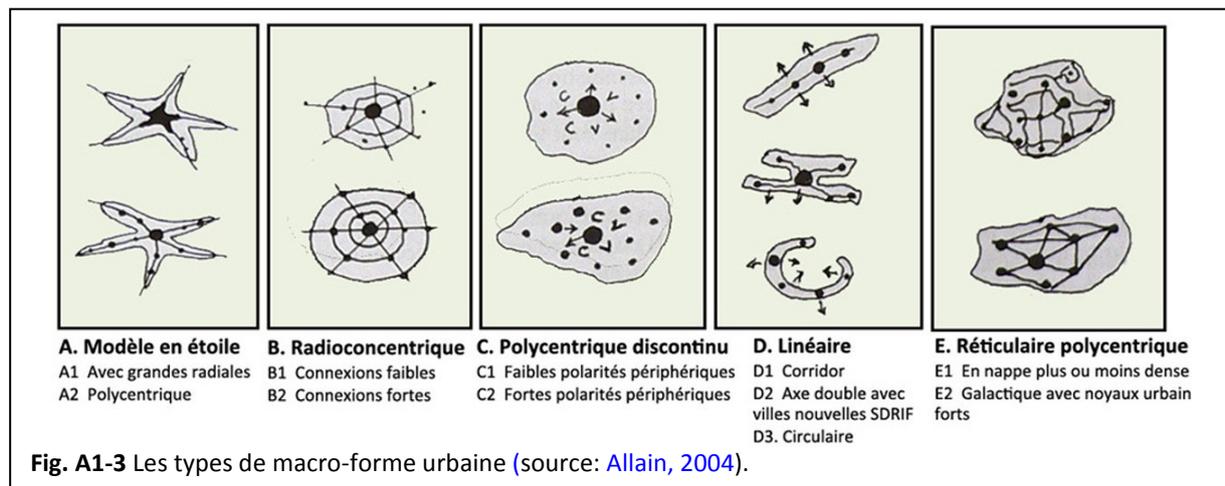
Tout d'abord S. Salat (2011) donne une échelle de séquence entre ville et bâtiment (Fig. A1-1). Edussuriya (2007) fait ses recherches sur la dispersion des polluants dans la rue avec une échelle de 200 m × 200 m. C. Weber *et al.* (2001) a adopté une échelle de 1 km de rayon pour observer la distribution de polluant dans la ville. Dans cette thèse, une échelle de quartier est choisie comme L. Adolphe (2001) dans ses études de formes urbaines avec un maillage de 400 m × 500 m. Cette échelle intermédiaire entre la ville et le bâtiment considère : l'îlot urbain ou quartier, l'espace public, le design urbain et la relation entre l'espace extérieur et intérieur.



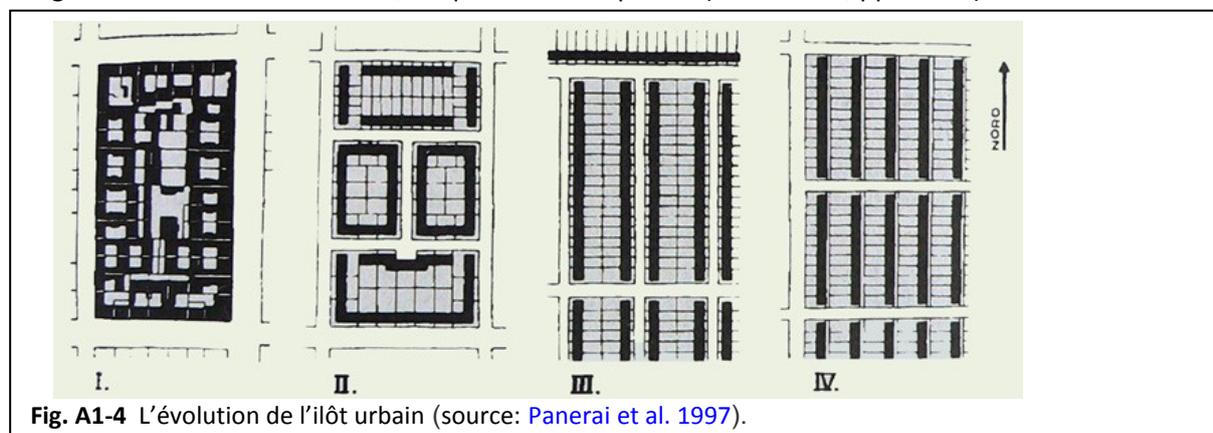
Dans le livre « Espace urbain : vocabulaire et morphologie » on peut trouver des définitions de différentes formes urbaines (Gauthiez 2003, pp. 198-202) (Fig. A1-2).

- Structure linéaire : unité de plan composée d'une figure linéaire (A).
- Polarisation urbaine : structuration urbaine autour d'un ou plusieurs nœuds ou lignes nodales (B).
- Enroulement : disposition concentrique du tissu urbain, généralement, autour d'une éminence du relief ou d'un quartier plus ancien, pouvant être matérialisée par une fortification (C).
- Plan en turbine : disposition des rues reproduisant la spirale de pales d'une turbine, par exemple autour d'une place (D).
- Orthogonalité : disposition d'une trace urbaine issue d'une planification dont les voies suivent des lignes parallèles et forment des angles droit entre elles (E).
- Radioconcentrique ou plan en étoile : se dit d'une trace urbaine où des principales voies rayonnent d'un même point et sont reliées entre elles par des voies concentriques à ce même point (F).
- Labyrinthe ou dédale : trace urbaine ; issue d'une planification ou non, aux parcours complexes et aux dispositions architecturales ne ménageant aucun repère (G).

- Forme spontanée : se dit des agglomérations ou des tissu urbains où les aménagements de l'espace ne sont pas planifiés à une échelle plus grande que celle des édifices ou des petits lotissements (H).



R. Allain a expliqué ce terme « Morphologie urbaine » de façons pédagogique dans le contexte de la géographie, l'aménagement et l'architecture. Il a indiqué cinq types de macro-forme urbaine : modèle en étoile, radioconcentrique, polycentrique discontinu, linéaire et réticulaire polycentrique (Fig. A1-3). Pour l'échelle de quartier, il a aussi résumé cinq types de forme urbaine : 1) les plans quadrillés orthogonaux qui sont les plus nombreux, 2) les plans circulaires volontaires : rares, avec une fascination pour le cercle, symbole de la perfection, 3) les plans linéaires : réalité ancienne souvent spontanée résultant des effets de site ou de facilité de transport, 4) les plans réticulaires distendus : les voies sont très espacées, sinueuses et les interstices occupés par des parcs ou de vastes espaces naturels ou agricoles, 5) les plans introvertis : caractéristiques des villes islamiques traditionnelles, ils sont caractérisés par des formes fermées, une organisation arborescente, irrégularité et sinuosité des rues, fréquence des impasses (Allain 2004, pp. 72-76).



Dans le livre « Formes urbaines » les auteurs ont discuté les différents types d'îlot à partir d'exemples de villes (Paris, Londres, Amsterdam, etc.). Ils ont aussi indiqué des stratégies pour mieux planifier la ville avec une forme de l'îlot adaptée. La Fig. A1-4 montre le schéma illustrant l'évolution de l'îlot urbain par Ernst May (Panerai et al. 1997, pp. 109).

2) Classement par la densité et les formes de bâtiment

La densité est souvent considérée comme un indicateur important pour identifier la forme urbaine. En effet il y a plusieurs définitions de la densité dans le cadre de l'urbanisme (Fig. A1-5). Parmi eux, la densité résidentielle (ou la densité de logements) est utilisée. Par exemple, les échelles peuvent être 0~5, 10-20, 20-30, 30-50, 50-150, 80-180 logements par hectare (Guide du PLH, 2009), ou <15, 15-25, 25-35, 35-55, >55 logements par hectare (Observatoire de L'habitat 2013).

Un rapport de [Bordes-Pagès et al. \(1995\)](#) a étudié la densité de 25 îlots de différentes formes urbaines en région d'Île de France. Ici la densité est la densité nette (D), qui égale à la surface de plancher bâtis par la surface de l'îlot. De plus, le coefficient d'emprise au sol (CES) et la hauteur moyenne du bâti (H, pondée) sont également calculés. Les résultats montrent que la densité nette ne permet pas de classer de façon précise un « échantillon » dans l'une ou l'autre des catégories d'habitat, à cause des grandes variations des valeurs des 3 indicateurs dans les mêmes catégories d'habitat ([Fig. A1-6](#)).

Définitions	
Densité de population = $\frac{\text{nombre d'habitants}}{\text{surface (kilomètres carrés ou hectares)}}$	Densité d'emplois = $\frac{\text{nombre d'emplois}}{\text{surface (hectares)}}$
Densité résidentielle = $\frac{\text{nombre de logements}}{\text{surface (hectares)}}$	Densité d'activité humaine = $\frac{\text{nombre d'habitants} + \text{nombre d'emplois}}{\text{surface (hectares)}}$

Fig. A1-5 Des définitions de la densité (source: [IAURIF 2005](#)).

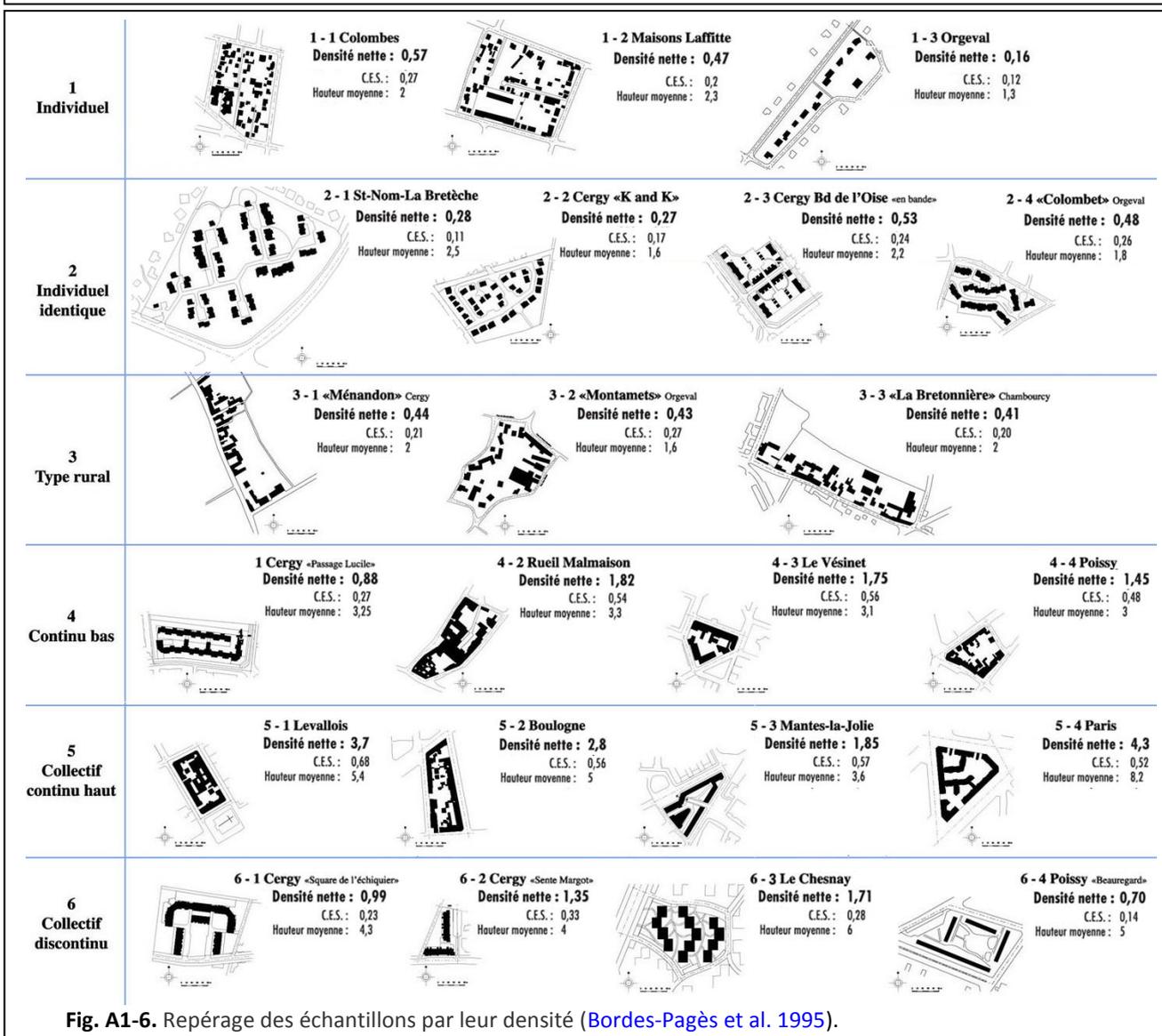
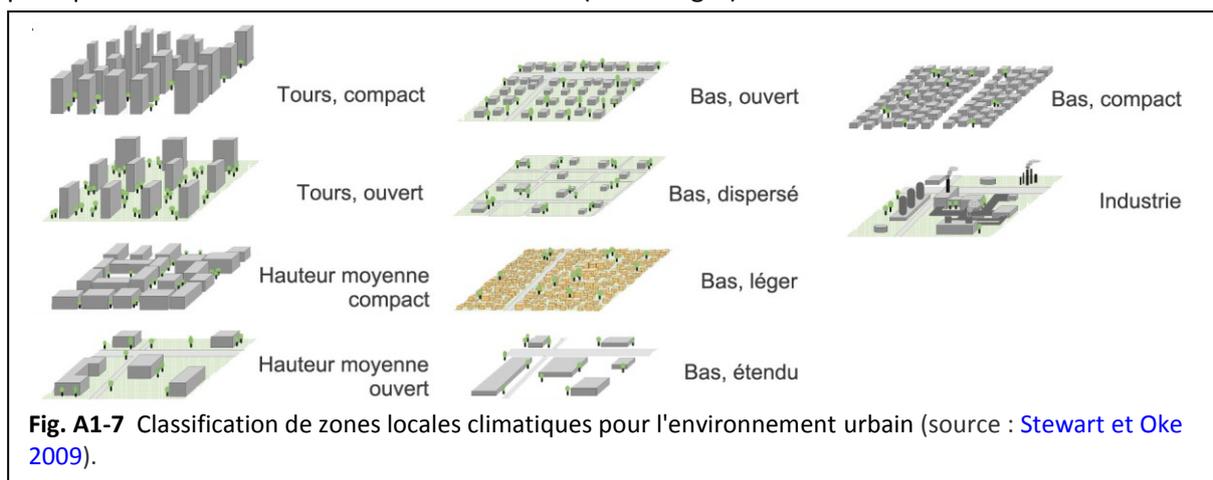


Fig. A1-6. Repérage des échantillons par leur densité ([Bordes-Pagès et al. 1995](#)).

Donc, au lieu de classer les formes bâties uniquement par l'indicateur de densité, des recherches ([Stewart et Oke, 2009](#)) ont été faites pour classer les formes urbaines par les hauteurs⁷⁰ ainsi que la densité de bâtiments comme dans la [Fig. A1-7](#). Pourtant, les auteurs à la fois concentrés

⁷⁰ Selon les Normes de base prévention incendie (AR 19/12/1997 et modification), on distingue : les bâtiments bas dont la hauteur h < 10 m, les bâtiments moyens avec 10 m < h < 25 m et les bâtiments hauts avec h > 25 m.

sur les formes différentes de bâtiments, rajoutent le critère de consommation d'énergie. Il est pourquoi ils ont défini les formes de bidonvilles (bas et léger) et de zones industrielles.



3) Classements par le cadre de la vie sociale

Dans le cadre de la vie sociale, les résidences sont divisées comme suivants ([FNAU et al. 2006](#)) :

- l'habitat collectif discontinu qui correspond à des immeubles collectifs mitoyens et linéaires alignés le long de l'espace public et généralement regroupés sous formes d'îlots fermés,
- l'habitat collectif continu et discontinu, qui désigne des ensembles d'immeubles collectifs prenant la forme de plots, barres ou tours, plus ou moins déconnectés des espaces publics,
- l'habitat individuel continu qui regroupe les ensembles de maisons de ville ou en bandes, linéaires et mitoyennes, alignées le long de l'espace public,
- l'habitat individuel discontinu qui correspond principalement aux lotissements et constructions individuelles implantées librement sur des parcelles et qui comprend également des maisons individuelles regroupées en petit nombre que l'on trouve dans certaines cités-jardins ou quartiers de villes nouvelles notamment,
- l'habitat intermédiaire, qui correspond à des ensembles "semi-collectifs" d'habitats superposés ou semi-superposés disposant chacun d'une entrée individuelle accessible directement depuis l'espace extérieur,
- le tissu "mix", qui rassemble plusieurs typologies d'habitat collectif et individuel, continu ou discontinu, au sein de la même opération,

4) Classements par la méthode de diachronique

Dans la méthode de diachronique, la morphologie urbaine est identifiée par les évolutions au fil du temps. Généralement, les quatre périodes sont remarquées ([Rochel 2007](#)) :

- au moyen âge : compacte, dense, fine (petite taille), hauteur moyenne (12~15 m), grande rugosité, peu d'espaces libres étendus, avec des rues souvent étroites et peu d'ordre, caractère distinctif,
- entre XVIII^e et XIX^e siècle : compacte, dense, hauteur moyenne (12~20 m), avec des rues structurés et plutôt rectilignes et un peu plus grandes qu'au moyen âge, avec des trames géométriques, caractère lisible,
- après la guerre : grande taille (grand bâtiment, grand espace libre, grande rue), résidences collectives ou tours de bureaux, formes très structurées et géométriques, urbanisme destiné à l'image, les fonctions et l'efficacité, caractère peu lisible ;
- contemporaine : formes variées, denses mais dispersés, grandes ou moyennes hauteurs et tailles (20-50 m), structurées, ordonnées et dessinées avec humanité, caractère lisible.

5) Classements selon la culture et région

On peut aussi identifier les formes urbaines selon les catégories de culture et région de territoire (Allain 2004, pp. 36-37) :

- ville islamique : maillage spécifique fait de rues étroites et de maisons basses avec patio, « serrées comme des grains de grenade » et organisées autour des points de convergence,
- ville européenne : densité du bâti élevée, compacité relative et centralité associée à la monumentalité religieuse, économique et politique, souvent limitée au centre historique, îlots délimités par les façades en formant des « rues-corridors »,
- ville nord-américaine : marquées par la prédominance des processus économiques, uniformité des maillages en damier, constructions de caractère éphémère, moindre place de la centralité sauf du point de vue des affaires symbolisées,
- ville sud-américaine : densité élevée, compacte, immeubles élevés, rue-corridors, plazas mayors bordées d'arcades, monuments, dualité récente marquée de verticalisation des centres, étalement périphérique, et forts contrastes entre de riches « communautés » et de bidonvilles,
- ville africaine : précoloniales et même pré-islamiques, souvent polynucléaires, basses, faites d'argile, sans monuments, ports développés, centre d'origine coloniale autour par des lotissements en mosaïque,
- ville asiatique : basse, à plan quadrillé et une faible d'espace public en tradition, villes politiques avec des caractéristiques socialistes marqués par des larges avenues de parades, places immenses et maisons du peuple, villes dynamiques avec des grandes tours, des habitats structurés, des grandes zones industrielles.

6) Classements d'un tissu par sa position dans la ville

On peut distinguer la forme urbaine par rapport à la position dans la ville :

- centre ville (noyau ancien, zone de centre commercial ou bidonvilles) ;
- zone urbaine (espace pour les établissements, bureaux, résidences plutôt denses et collectives, parcs) ;
- périphérie (grand espace vert, espace industriel et d'activité, résidences individuelles).

7) Classements par l'usage des sols

On peut distinguer la forme urbaine par rapport à l'usage des sols en aménagement :

- terre d'habitations ;
- terre d'installations publiques ;
- terre d'industries ;
- terre d'entrepôts ;
- terre de transports ;
- terre verdure publique, etc.

Annexe 1.3 Résumé des indicateurs de la morphologie urbaine

Un résumé des indicateurs de la morphologie urbaine est donnée par [Edussuriya et al. 2011](#).

Affect variables	Independent variables	
	Development factors	Built form factors
1 Regional factors <ul style="list-style-type: none"> - Topography/urban terrain (Cionco and Ellefsen, 1998; Givoni, 1998; Newton, 2000; Santamouris, 2000; Hawkes et al., 2002) - Altitude (Santamouris, 2000; Hawkes et al., 2002) - Distance from water body (Golany, 1996; Hawkes et al., 2002) 	1 Land coverage/utilisation <ul style="list-style-type: none"> - Plot ratio, packing ratio (Theurer, 1999) - Mineralisation factor/percentage of impervious surface (Cionco and Ellefsen, 1998; Adolphe, 2001) 	1 Street and building dimensions <ul style="list-style-type: none"> - Canyon aspect ratio (Grimmond and Oke, 1998; Oke, 1988; Chan et al., 2002; 2003) - Street aspect ratio (Golany, 1996; Oke, 1988; Theurer, 1999; Santamouris, 2000 Adolphe, 2001; Chan et al., 2003) - Canopy breadth ratio (Theurer, 1999; Chan et al., 2003) - Street block ratio - Mean building height (Golany, 1996; Cionco and Ellefsen, 1998; Givoni, 1998; Theurer, 1999; Santamouris, 2000; Adolphe, 2001; Ratti et al., 2001; Hawkes et al., 2002; Yoshida and Omae, 2005) - Mean canyon width (Golany, 1996; Theurer, 1999; Santamouris, 2000; Adolphe, 2001; Hawkes et al., 2002)
2 City-level factors <ul style="list-style-type: none"> - Urban layout: layout, development, street form, open spaces, roof (Cionco and Ellefsen, 1998; Givoni, 1998; Theurer, 1999) - City size/quotient (Givoni, 1998; Theurer, 1999) - Proximity to pollution sources and sinks 	2 Land-use intensity <ul style="list-style-type: none"> - Compacity factor (Adolphe, 2001) - complete aspect ratio (Grimmond and Oke, 1998) - Mean contiguity factor (Adolphe, 2001; Long et al., 2003) - Frontal area density (Grimmond and Oke, 1998; Ratti et al., 2001) 	2 Canyon/building orientation <ul style="list-style-type: none"> - Wind angle to longer-street axis of buildings (Golany 1996; Cionco and Ellefsen, 1998; Theurer, 1999; Santamouris, 2000)
3 Site composition/locality factors <ul style="list-style-type: none"> - Population density quotient - Urban land-use - Traffic load - Location 	3 Roughness related intensity <ul style="list-style-type: none"> - Urban density, rugosity or floor area ratio (Adolphe, 2001; Hawkes et al., 1996; Hawkes et al., 2002; Yoshida and Omae, 2005) - Roughness height (Givoni, 1998; Grimmond and Oke, 1998; Ratti et al., 2001; Long et al., 2003) - Zero-plane displacement height (Grimmond and Oke, 1998; Ratti et al., 2001) - Mean built volume (Yoshida and Omae, 2005) - Urban porosity (Adolphe, 2001) - Sinuosity (Adolphe, 2001) - Occlusivity (Adolphe, 2001) 	

Annexe 1.4 Configurations typiques de bâtiments allemands

Les formes urbaines adaptées aux différents types de climats sont analysés par [Golany \(1996\)](#).

Type de climat	Profil principal	Type de forme urbaine proposée	Pour l'éolienne
<i>Chaud-humide (e.g. Zone équatoriale)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Chaleur diurne et saisonnière avec faible amplitude de température ; ● Pluie importante ; ● Plus agréable en haute altitude 	<i>Ouvert, dispersé</i>	Non adapté
<i>Froid-humide (e.g. sud Canada)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Neigeux ; ● Venteux en condition de tempête de neige ; ● Soirs très froids 	<i>Mélange de forme ouvertes et fermées</i>	Adapté
<i>Chaud-sec (e.g. Moyen-Orient et Afrique du Nord)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Fort rayonnement solaire ; ● Grand amplitude de température entre le jour et la nuit ; ● Tempêtes et pluies torrentielles ; ● Nuages bas ; ● Déshydratation intense ; ● Salinisation élevée ; ● L'évaporation dépasse les précipitations. 	<i>Forme compacte</i>	Adapté
<i>Froid-sec (plaires intérieures)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Stressant ; ● Inconfortable ; ● Fort vent froid et sec. 	<i>Forme compacte, forme en cluster.</i>	Adapté
<i>Côtés (d'une rivière, d'un désert)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Venteux et orageux ; ● Brise systématique ; ● Humidité élevée ; ● Erosif. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Pour les régions humides : <i>Forme moyenne dispersée.</i> ● Pour les régions sèches : <i>Ouvert à la mer, forme compacte et protégée vers intérieur.</i> 	Adapté
<i>Montagne</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Venteux et circulation importante de l'air ; ● Humidité relative plus élevée que les basses terres ; ● Climat sain et modéré 	<i>Forme semi-compacte</i>	Adapté

Annexe 2.1 Modèles de turbulence de RANS

1) Modèle de Spalart-Allmaras

Comme un modèle d'une équation de transport de viscosité turbulente, correspondant à un nombre de Reynolds petit, ce modèle est assez simple, stable et a été développé à l'origine pour applications en aérodynamique (Spalart et Allmaras 1994). Pourtant, le choix de l'échelle de longueur est empirique et l'extension au cas tridimensionnel reste difficile. L'expérience montre que ce modèle ne calcule pas correctement les champs qui présentent des flux de cisaillement, des écoulements séparés, ou des turbulences en décomposition (Frei 2013).

2a) Modèle k – ε Standard

Initialement proposé par Harlow et Nakayama (1968), ce modèle k – ε a été développé par Jones et Launder (1972) et Launder et Spalding (1972). Ainsi, comme modèle semi-empirique, il est devenu très populaire de par sa robustesse, son économie, et une précision raisonnable pour une large gamme d'écoulements turbulents de flux et de simulations des transferts de chaleur. Il intègre deux équations de transport aux dérivées partielles en plus des équations de Navier Stokes pour la description de la turbulence, respectivement, une sur l'énergie cinétique (k) et l'autre sur le taux de dissipation de la turbulence (ε). Comme la différence de température dans le domaine n'est pas grande, l'approximation de Boussinesq (1872) est appliquée. Elle suppose que la viscosité turbulente est isotrope, en d'autres mots, le rapport entre Reynolds stress et le taux de déformations moyenne est la même dans toutes les directions. La relation peut être décrite (pour le flux incompressible) comme suit :

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{Equation 2-4})$$

où μ_t est la viscosité turbulente, calculée par $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$,

k est l'énergie cinétique turbulente définie par :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}) \quad (\text{Equation 2-5})$$

ε est le taux de dissipation de l'énergie cinétique k, donné par :

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i \partial u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{Equation 2-6})$$

Dans le modèle k – ε Standard, l'énergie cinétique (k) et le taux de dissipation de la turbulence (ε) sont décrits comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Equation 2-7})$$

et

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{Equation 2-8})$$

où G_k représente l'énergie cinétique générée par les gradients de vitesse moyenne, et est défini par $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$;

G_b représente l'énergie cinétique générée par la flottabilité, défini par $G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$ (pour u air idéal, g_i est la composante du vecteur gravitationnel dans la i ème direction. Pr_t est le nombre de Prandtl : par défaut $Pr_t = 0.85$) ;

Y_M représente la dilatation produite par la fluctuation de la turbulence compressible pour un taux de dissipation global. Elle est défini par $Y_M = \rho \varepsilon \left(\frac{k}{a^2} \right)$ où a est ici la vitesse du son ;

σ_k et σ_ε sont les nombres de Prandtl de k et ε : par défaut $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$;

S_k et S_ε sont les termes sources définis par l'utilisateur pour adapté aux conditions spéciales ;

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ sont des constantes de modèle, et sont données par défaut comme suit : $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$. (Launder et Spalding, 1972, 1974, Fluent 6.3, 2006).

Les avantages et les limites du modèle $k - \varepsilon$ Standard sont indiqués par Karthik (2011) dans le Tableau ci-dessous :

Tableau A2-2

Avantages et inconvénients du modèle $k - \varepsilon$ Standard

Avantages	Inconvénients
1. Relativement simples à mettre en œuvre ; 2. Conduisant à des calculs stables qui convergent relativement facilement ; 3. Prévisions raisonnables pour de nombreux flux.	1. Valable uniquement pour le flux turbulent ; 2. Mauvaises prévisions pour les cas suivants : -- Tourbillonnement et flux tournant ; -- Flux avec forte séparation ; -- Jets axisymétriques ; -- Certains flux non confinés ; -- Flux entièrement développés dans des conduits non-circulaires. 3. Nécessite la mise en œuvre de la loi de paroi (Wall Function) ; 4. Modifications pour le flux avec des lignes de courant à forte courbure ; 5. La turbulence produite par des flux très tendus est surestimée.

Pour le flux autour de bâtiments, le modèle $k - \varepsilon$ Standard se pose un certain nombre de problèmes comme : la surestimation de l'énergie cinétique turbulente près d'un angle frontal, la sous-estimation résultant de la taille de la séparation et les régions de recirculation sur le toit et les faces latérales, et la sous-estimation de l'énergie cinétique turbulente dans le sillage entraînant une surestimation de la taille de la zone de cavité et de sillage (Jones et Launder 1972).

Dans ce cas-là, sur la base du modèle $k - \varepsilon$ Standard, d'autres modèles sont développés, comme par exemple, le modèle $k - \varepsilon$ RNG, le modèle $k - \varepsilon$ Réalisable, et le modèle $k - \omega$.

2b) $k - \varepsilon$ RNG (Re-Normalisation Group)

Ce modèle a été calculé à l'aide d'une technique statistique, appelée la théorie des groupes de renormalisation. Comparé avec le modèle $k - \varepsilon$ Standard, le modèle $k - \varepsilon$ RNG améliore la précision dans les cas de :

- Courbure aérodynamique élevée et de taux de déformation important ;
- Flux transitoires et flux séparés ;
- Transfert de chaleur et masse proches de la paroi ;
- Flux dépendant du temps avec des mouvements à grande échelle (vortex) .

À l'instant des conclusions des études faites par Easom (2002), on remarque que le modèle $k - \varepsilon$ RNG est capable de prévoir la séparation et le rattachement de flux au-dessus du toit d'un cube (un maquette d'étude, 6 m par l'arrêt) avec une meilleure répartition des pressions sur le toit que le modèle $k - \varepsilon$ Standard (Yang 2004, pp. 112).

2c) $k - \varepsilon$ Réalisable

Le terme " réalisable" signifie que le modèle satisfait à certaines contraintes mathématiques sur le Reynolds, conformes à la physique des écoulements turbulents. Comparé au modèle $k - \varepsilon$ Standard, ce modèle améliore la précision dans le cas de :

- Les jets plans et ronds ;
- Les couches limites sous fortes gradients de pression négative ;
- Les rotations et recirculations ;
- Les courbures aérodynamiques élevées (Karthik 2011).

Une limitation de ce modèle est qu'il produit des viscosités turbulentes non-physiques dans des situations où le domaine de calcul contient à la fois des zones de fluide en rotation et stationnaires (Fluent 6.3, 2006).

Pour simuler l'écoulement du vent autour de bâtiments, Bonneaud (2004, pp. 196) a mis en avant les inconvénients communs à tous les types de modèle $k - \varepsilon$: ils ne permettent pas, du fait qu'il s'agisse de calculs d'écoulement moyen, de recréer des recollements le long des façades ; en plus, ils génèrent une énergie cinétique turbulente trop importante au niveau des bords d'attaque constitués par les arêtes vives des bâtiments.

3a) modèle Wilcox $k - \omega$

Ce modèle adopte une équation modifiée de l'énergie cinétique turbulente k par rapport au modèle $k - \varepsilon$ Standard, et introduit une nouvelle équation pour ω , qui est défini par : $\nu_i = \frac{k}{\omega}$ où ν_i est la viscosité turbulente.

Proposé par Wilcox (1998), le modèle $k - \omega$ Standard dans le code FLUENT intègre les modifications pour les effets à faible nombre de Reynolds, la compressibilité et la propagation de flux de cisaillement. Les taux de propagation de flux de cisaillement libre sont en accord étroit avec les mesures pour les sillages lointains, les couches de mélange, et les jets plans, ronds et radiaux. Donc il est applicable aux flux limités par des parois et des flux de cisaillement libre.

3b) modèle SST (shear stress transport) $k - \omega$

Le modèle de transport de la contrainte de cisaillement $k - \omega$ est un modèle de coefficient de viscosité turbulente à deux équations. Il utilise le modèle Wilcox $k - \omega$ dans les parties intérieures de la couche limite qui rend le modèle directement utilisable tout au long de la paroi dans la sous-couche visqueuse, mais adopte le comportement du modèle $k - \varepsilon$ dans les autres couches et dans le flux libre. Il permet donc d'éviter le problème commun du modèle $k - \omega$: un modèle trop sensible aux propriétés turbulentes du flux libre. Ce modèle présente souvent un bon comportement pour les gradients de pression indésirables et les flux de séparation. Il peut produire des niveaux de turbulence élevés dans les régions comme les régions de stagnation, ou les régions avec une forte accélération, mais la tendance est beaucoup moins prononcée que pour un modèle $k - \varepsilon$ normal (Menter 1993, Yang 2011a).

4) modèle de Reynolds Stress (RSM)

Abandonnant l'hypothèse de Boussinesq, ce modèle complète les équations RANS par la résolution des équations de transport pour le tenseur de Reynolds et le taux de dissipation. Le modèle RSM peut prendre en compte des effets de courbures aérodynamiques, des tourbillons, des rotations et des changements rapides de la vitesse de déformation, cela d'une manière plus rigoureuse que les modèles à une équation ou deux ; il a un plus grand potentiel à donner des prévisions précises des flux complexes.

Néanmoins, la fidélité des prédictions de ce modèle est encore limitée par les hypothèses de complétude utilisés pour modéliser différents termes (e.g. pression-déformation, taux de dissipation) dans les équations de transport pour les tenseurs de Reynolds. En tous les cas, l'utilisation de modèle RSM est indispensable lorsque les caractéristiques des flux correspondant à une anisotropie des contraintes de Reynolds, par exemple, des flux cycloniques, des flux très tourbillonnants dans les chambres de combustion, les passages d'écoulement rotatif, et les écoulements secondaires induits par le stress dans les conduits (Meroney *et al.* 1999 ; Fluent 6.3, 2006).

Annexe 2.2 Estimation de l'épaisseur de la première couche de maille

Dans le code ANSYS Fluent, l'épaisseur de la première couche de maille est défini par : $D = 2y_p$ où y_p est la distance entre le point central de la cellule de paroi adjacent et le paroi. Plusieurs étapes de calcul peuvent être faites pour estimer y_p :

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{\rho U^*} \quad \text{Equation A-1}$$

y^+ est la distance de paroi non-dimensionnelle pour un flux de paroi délimitée. Flux de Couche Limite Atmosphérique (ABL) sur un terrain rugueux est considéré comme un flux entièrement rugueux, qui doit satisfaire à la condition $30 < y^+ < 500 \sim 1000$ pour arriver un flux du profil de la loi logarithmique (Blocken *et al.* 2007). μ est la viscosité dynamique, pour l'air au niveau de la mer à 20°C , $\mu = 1,82 \times 10^{-5}$ (kg/m·s) et la masse volumique de l'air $\rho = 1,205$ (kg/m³). U^* est la vitesse de frottement, qui est défini par :

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_f \frac{1}{2} \rho U_\infty^2}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_f}{2}} U_\infty \quad \text{Equation A-2}$$

τ_w est la contrainte de cisaillement de paroi, U_∞ est la vitesse en amont (assez loin) sans l'interférence d'obstacle. C_f est le coefficient de frottement de la peau, pour le flux extérieur, on utilise l'estimation empirique $C_f = 0,058 Re^{-0,2}$ (connu comme la loi puissance 1/7, dérivé par Theodore von Karman) si $5 \times 10^5 < Re < 10^7$. Re est le nombre de Reynolds, on le définit comme :

$$Re = \frac{\rho U_\infty L_{BL}}{\mu} \quad \text{Equation A-3}$$

L_{BL} est la longueur caractéristique, pour un bâtiment c'est sa hauteur, pour le terrain rugueux c'est l'épaisseur de la couche limite.

Donc, pour un terrain de ville dense où l'épaisseur de la couche limite (qui est égale l'épaisseur de la couche de surface de terrain) $Z_g = 550$ m et le vitesse du vent libre (stabilisé comme dans la couche laminaire) $U_g = U_\infty = 10$ m/s (alors que $U_0 = 3$ m/s à 10 m), avec les Equations A-1, A-2, A-3 et la condition $30 < y^+ < 500 \sim 1000$ ainsi les valeurs de μ , ρ mentionnées, on trouve :

$$0,0032 \text{ m} < D_{ter} < 0,054 \sim 0,11 \text{ m}$$

A la même façon, pour un bâtiment d'une hauteur de 20 m dans cette ville ($U_0 = 4$ m/s à 20 m) :

$$0,003 \text{ m} < D_{bât} < 0,05 \sim 0,1 \text{ m}.$$

Annexe 3. Sur l'énergie éolienne urbaine

Annexe 3.1 Comparaison de trois sources d'énergie renouvelable

Trois sources d'énergie renouvelable principales sont évaluées et comparées par Peker (2005).

	Système photovoltaïque	Système de l'énergie éolienne	Biogaz
Facteurs technologiques	<ul style="list-style-type: none"> --Coûts élevés de R & D (Recherche & Développement). --Configuration technologique simple. --Conditions climatiques importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> --Coût de la technologie dépendant de la vitesse du vent. --Technologie assez simple. 	<ul style="list-style-type: none"> --Coûts de R & D acceptables. --Technologie largement disponible. --Compatibilité technique avec les stations d'épuration et les centres de traitement des déchets. --Rôle stratégique pour la gestion intégrée des déchets.
Facteurs organisationnels	<ul style="list-style-type: none"> --Coût réduit des appareils. --Faibles coûts de maintenance. --Périodes longues de remboursement. --Participation financière des usagers non-bénéficiaires. --Programmes insuffisants de subventions nationales. 	<ul style="list-style-type: none"> --Coûts initiaux élevés pour les terrains, les turbines et le raccordement au réseau. --Faibles coûts de maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> --Temps de retour relativement faible. --Coût élevé lié à la mise en œuvre initiale.
Facteurs financiers	<ul style="list-style-type: none"> --Forte volonté politique pour supporter des coûts élevés. --Marché contrôlé. --Faible coût de gestion. 	<ul style="list-style-type: none"> --Marché de plus en plus concurrentiel. --Petite et moyenne échelles plus appropriées. --Faibles coûts de gestion. 	<ul style="list-style-type: none"> --Problèmes de coopération organisationnelle si trop d'acteurs concernés. --Problèmes lorsque les producteurs d'énergie sont aussi les gestionnaires de déchets.
Facteurs liés aux utilisateurs	<ul style="list-style-type: none"> --Sauvegarde des sources fossiles. --Réduction des émissions de carbone. --Impact visuel. --Rôle important de l'orientation et de la nature de la structure spatiale sur l'efficacité du système. --Disponibilité des terrains ou d'espace pour les installations de petite taille. 	<ul style="list-style-type: none"> --Sauvegarde des sources fossiles. --Réduction des émissions de carbone. --Résistance du public en raison des impacts environnementaux. --Disponibilité des terres. --Compatibilité des parcs éoliens avec les autres utilisations des terres. 	<ul style="list-style-type: none"> --Synergies avec gestion intégrée des déchets (e.g. en termes de réduction des mauvaises odeurs) pas encore perçus comme importants par le public. --Les activités d'élimination traitantes sont irritantes.
Facteurs environnementaux et sociaux	<ul style="list-style-type: none"> --Un nombre massif d'utilisateurs difficile à atteindre. --Haute fiabilité technique pour les panneaux à raccorder au réseau électrique installés sur les toits ou les murs. 	<ul style="list-style-type: none"> --Fiabilité du système mise en valeur par la discontinuité de la source. 	<ul style="list-style-type: none"> --Succès dépendant de l'attitude du public à l'égard de tri des déchets et leur volonté de changer leurs habitudes.

L'éolienne urbaine est définie comme une éolienne située en milieu urbain et pourrait être installée sur ou autour d'un bâtiment (WINEUR 2007).

Généralement, une éolienne est composée de quatre parties principales : le rotor, la nacelle, le mât et l'équipement de service, comme le contrôleur de réseau. La Fig. A3-1⁷¹ montre les composantes d'une petite éolienne à axe horizontal (HAWT) indépendante.

1) Le rotor

Pour une éolienne à axe horizontal, il est constitué des pales et du nez (moyeu et commande de rotor). Pour une éolienne à axe vertical (VAWT), il contient des pales et un cadre de support. Des études ont été faites en soufflerie et sur simulations numériques, afin de déterminer le nombre, le profil, la taille de pales et la forme du cadre pour optimiser le rendement et pour éviter les inconvénients comme les problèmes de vibration et de bruit.

2) La nacelle

La nacelle comprend tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique. A l'intérieur se trouvent la boîte de vitesse (certaines VAWTs n'ont pas besoin), la génératrice, les systèmes de contrôles, le capteur de température, le capteur de vibrations et le capteur de vitesse. La nacelle d'une HAWT se trouve en haut avec le rotor et possède souvent un gouvernail (une girouette sur une grande HAWT) pour indiquer la direction du vent, alors que celle d'une VAWT souvent se trouve au pied du mât.

3) Le mât

Le mât, comme le support avec les fils et parfois l'arbre mécanique, doit être assez robuste pour résister à une éventuelle surcharge due au givre ou à un vent trop fort. Des VAWTs notamment de type Darrius ont besoin d'un haubanage pour le fixer.

4) l'équipement de service

Il comprend tous les outils indispensables au point terminal pour stocker, contrôler, convertir et injecter l'énergie produite, notamment le convertisseur, les piles, la cabine de dispersion et le système de contrôleur. La cabine de dispersion, qui est située à la base de l'éolienne, permet de se connecter au réseau électrique, afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus⁷².

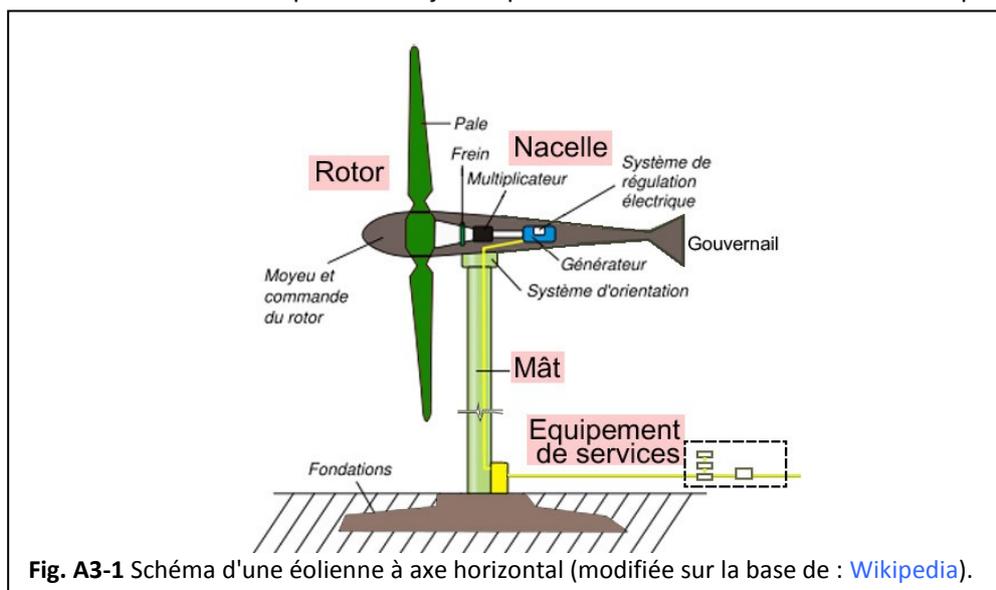
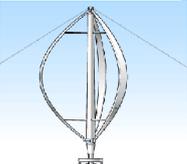


Fig. A3-1 Schéma d'une éolienne à axe horizontal (modifiée sur la base de : Wikipedia).

⁷¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>

⁷² <http://www.info-eolien.com/energie-eolienne-composants.html>

Annexe 3.3 Classement des éoliennes

Type d'éoliennes		Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple	
Éolienne à axe horizontal	Monopale	Assez rare ⁷³ car l'axe de rotation est déséquilibré et les vibrations du vent altèrent leur durée de vie ⁷⁴ , plutôt moyennes ou grandes éoliennes comme les éolienne pendulaire ⁷⁵ .	Non	 (source : ⁷⁶)	
	Bipales	Normalement moins légère, moins chère, mais aussi moins équilibrée et moins de rendement que celle à 3 pales, technique compliquée, rare au marché ⁷⁷ .	Peu adaptée	 (source : ⁷⁸)	
	Classique, tripales	La courante et le plus de retour d'expériences, technique simple, face au vent, besoin d'un mécanisme d'orientation (le gouvernail), bien équilibrée, bon rendement à partir d'un vent moyen, avec les pales profilées ⁷⁹ .	Neutre : Il faut bien choisir le type	 (source : ⁸⁰)	
	Multi-pales	Plus équilibrée mais aussi plus lourde, souvent utilisée pour pompage (fermes américaines), très sensible au moindre vent mais le rendement chute vite avec la vitesse car chaque pale est dans les turbulences de la précédente (Fraenkel 1994).	Peu adaptée	 (source : ⁸¹)	
	Pales semi-coniques (Nheolis)	Sous le vent, calme, performante, robuste, pale unique profitant l'effet de pincement qui accélère le fluide et augmente la pression sur l'autre pale. ⁸²	Adaptée	 (source : ⁸³)	
Éolienne à axe vertical	Darrieus rotor	Darrieus originale	Génératrice pouvant être placée au sol, peu encombrante et peu bruyante, pas de contraintes sur la direction du vent, démarrage difficile à cause du poids du rotor sur son socle, faible rendement, couple élevé au démarrage et non constant. ⁸⁴	Adaptée à une hauteur importante	 (source : ⁸⁵)

⁷³ <http://terminalf.scicog.fr/cfm/fich-1.php?IDChercher=7365&numtable=&NomBase=bd1.mdb>

⁷⁴ <http://www.info-eolien.com/autres-eoliennes.html>

⁷⁵ <http://www.ades.tv/fr/produits/eolienne-pendulaire/id/24>

⁷⁶ <http://spmeoliennes.toile-libre.org/fonctionnement.html>

⁷⁷ http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/fr/tour/design/concepts.htm

⁷⁸ http://www.eoltec.com/Fr/scirocco_fr.htm

⁷⁹ http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/fr/tour/design/concepts.htm

⁸⁰ <http://www.helico-modelisme.com/eolienne.php>

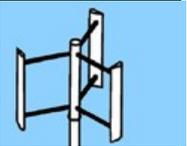
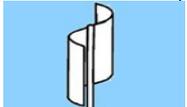
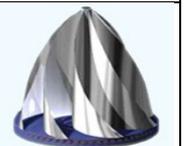
⁸¹ <http://www.echolalie.org/wiki/index.php/ListedEoliennes>

⁸² <http://www.nheolis.com/innovation-3-1.php?lang=fr>

⁸³ <http://www.cleantechrepublic.com/2009/01/08/nheolis-leolienne-en-3d-pour-tous/>

⁸⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

⁸⁵ <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power2.htm>

Type d'éoliennes		Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple
	Darrieus Hélicoïdale (Turby)	Comme la Darrieus originale, mais intégrable au bâtiment grâce à sa plus petite taille et plus équilibrée sans haubannage, pouvant éviter les pulsations destructeur lors d'un orage. ⁸⁶	Proposée	 (source : ⁸⁷)
	Darrieus horizontale	Comme la Darrieus originale mais avec démarrage et installation moins difficile, moins bon rendement (20-50 % de moins) car il ne s'oriente pas au vent.	Adaptée	 (source : ⁸⁸)
	Darrieus-H (Giromill)	Avec 2 ou 3 pales verticales, moins chère, moins simple à fabriquer, moins efficace et moins stable que la Darrieus originale, normalement ne pouvant pas démarrer seule, sauf des variantes améliorées (e.g. Cycloturbine). ⁸⁹	Adaptée	 (source : ⁹⁰)
	Savonius rotor	Savonius originale	Deux ou plusieurs godets demi cylindriques légèrement désaxés, génératrice pouvant être placée au sol, peu encombrante et peu bruyante, fonctionnante par vent faible, pas de contraintes sur la direction du vent, démarrage facile mais non-constante, simple à fabriquer, peu chère, moins efficace mais plus fiable que le type Darrieus, correspond à la plupart des anémomètres en usage, peu adaptée à un parc éolien. ⁹¹	Adaptée
 (source : ⁹³)				
 (source : ⁹⁴)				
	Savonius hélicoïdale	Vrillée hélicoïdalement autour de l'axe, pouvant avoir une meilleure prise au vent de façon continue par rapport de Savonius originale, taille très compacte, intégrée facilement aux bâtiments.	Adaptée	 (source : ⁹⁵)
Maglev rotor		Environ 20 % de plus de rendement que normale grâce à moins de friction ⁹⁶ , très calme, une vitesse minimale de démarrage comme 2,2 m/s ⁹⁷ , technologie applicable aux autres éoliennes à axe vertical.	Adaptée	 (source : ⁹⁸)

⁸⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

⁸⁷ <http://home-designswallpaper.blogspot.fr/2013/08/vertical-axis-wind-turbine-generator.html>

⁸⁸ <http://www.urbanwindenergy.org.uk/index.asp?PageID=84>

⁸⁹ <http://www.reuk.co.uk/Giromill-Darrieus-Wind-Turbines.htm>

⁹⁰ http://green-engineering.blogspot.fr/2008_05_01_archive.html

⁹¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Rotor_de_Savonius

⁹² http://en.wikipedia.org/wiki/File:Savonius_turbine.gif

⁹³ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Savonius_turbine.gif

⁹⁴ <http://home-designswallpaper.blogspot.fr/2013/08/vertical-axis-wind-turbine-generator.html>

⁹⁵ http://www.arkitekto.net/P2_aeraulique.htm

⁹⁶ <http://www.treehugger.com/renewable-energy/chinese-maglev-wind-turbines-enter-mass-production.html>

⁹⁷ <http://www.greengeek.ca/magnetic-levitation-residential-wind-turbines/>

⁹⁸ <http://www.greengeek.ca/magnetic-levitation-residential-wind-turbines/>

Type d'éoliennes	Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple
Turboliennes	Petite, silencieuse, performante, installation discrète, un carénage accélère le flux d'air interne en créant une dépression à l'arrière avec deux rotors tournant en sens inverse et pilotés électroniquement, optimise la production, supprime les nuisances sonores produites, permette plus d'énergie produite en accélérant la vitesse et en éliminant la turbulence extérieure, et empêche les oiseaux de se blesser par fixation sur la carène d'une grille. ⁹⁹	Adaptée	 (source : ¹⁰⁰)
WindTronics (sans boîte de vitesse)	Efficace et démarrage par vent faible, système innovant sans multiplicateur (Blade Tip Power System) qui permet d'utiliser une vitesse maximale sur la fin de lame pour produire l'électricité, robuste, très silencieuse, installation simple et moins de risques pour les oiseaux. ¹⁰¹	Adaptée	 (source : ¹⁰²)
Eolienne Energy Ball	Micro éolienne, avec une efficacité aérodynamique plus élevée que la normale, grâce à la structure sphérique qui permet de profiter l'effet de Venturi par concentrer le vent entre les pales, silencieuse, auto-démarrage et fonctionnante par vent faible. ¹⁰³	Adaptée à une famille	 (source : ¹⁰⁴)
Eolienne Archimedes	Un carénage profite de la force de traînée à l'arrière et accélère l'écoulement à l'intérieur, nouvelle technologie qui utilise les formules physiques d'Archimède. ¹⁰⁵	Adaptée	 (source : ¹⁰⁶)
Eolienne à entonnoir de vortex (Vortex wind funnel)	Sous le vent, calme, protection pour les oiseaux, productible à partir de 1,78 m/s (1,2 kW pour un diamètre du rotor de 2,2 m). ¹⁰⁷	Adaptée	 (source : ¹⁰⁸)
Eolienne volante	Avec câble au lieu de mât, captant les vents plus puissants et plus stables en volant à haute altitude (> 300 m), une génératrice pouvant être placée dans l'air ou au sol ¹⁰⁹ , plusieurs types : hélicoptère, cerf-volant, ballon d'hélium, etc., un prototype de 2.4 kW et de 11 m de taille a été testé par la société Altaero Energies aux États-Unis à Limestone en 2012. ¹¹⁰	Non	 (source : ¹¹¹)

⁹⁹ <http://energies-renouvelables.consoneo.com/actualite/2010-08-26/eolienne-elena/2559/>

¹⁰⁰ http://www.dta.be/detail_ps.asp?page=prod_0100_turboliennie&ls=fr

¹⁰¹ <http://toutlesolaire.com/p/Eolienne---axe-horizontal-WindTronics-BTPS6500-2,2-kW--pour-reseau-/697.html>, le website officiel est pourtant fermé depuis jan. 2013. voir : <http://www.windtronics.eu.com/>

¹⁰² <http://toutlesolaire.com/p/Eolienne---axe-horizontal-WindTronics-BTPS6500-2,2-kW--pour-reseau-/697.html>,

¹⁰³ <http://www.home-energy.fr/>

¹⁰⁴ <http://www.cleantechrepublic.com/2009/02/04/des-eoliennes-dans-le-vent/>

¹⁰⁵ <http://www.dearchimedes.nl/>

¹⁰⁶ <http://www.bpo.nl/en/portfolio/archimedes-turbine/>

¹⁰⁷ <http://www.windenergysystemsllc.com/vortex-wind-funnel.aspx>

¹⁰⁸ <http://www.engineeringexchange.com/profile/JerryDesaulniers>

¹⁰⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_wind_turbine

¹¹⁰ Eolienne volante, Le Journal de l'éolien, hors-série N° 11-2012. pp. 6.

¹¹¹ <http://images.sciencedaily.com/2009/06/090615102038.jpg>

Type d'éoliennes		Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple
Tour éolienne		Profitant l'effet de cheminée et l'effet de Venturi, captant l'énergie éolienne dans l'écoulement intérieur à une tour qui est accéléré par la chaleur captée sur la surface forcée extérieure, pouvant être construite indépendamment ou intégrée à un immeuble comme une cage d'escalier (<i>Wang et al. 2014</i>).	A développer	 (source : ¹¹²)
En groupe	Groupe d'éoliennes à axe horizontal	Groupe d'HAWTs dans une structure en arbre ou un cadre de mur, intégrable dans un bâtiment, économisant l'espace et les matériaux.	Neutre : Il faut bien choisir la structure et l'éolienne, une hauteur importante nécessaire.	 (source : ¹¹³)  (source : ¹¹⁴)
	Groupe d'éoliennes à axe vertical	Groupe de VAWTs dans une structure compacte, plus adaptée que HAWT grâce à l'espace compact entre VAWTs, lorsque peu de turbulence générée par les voisins, beaucoup de moyens pour l'intégrer, par exemple, une variante de type Darrieus-H qui peut capter plus de vent par extension verticale, peut être utilisée le long des routes ou des rivières.	Proposée	 (source : ¹⁸)  (source : ¹¹⁵)
	Groupe d'éoliennes Darrieus et Savonius	Intégrée les deux types d'éolienne pour optimiser l'espace et aussi la production d'énergie, pouvant résoudre le problème de démarrage de l'éolienne Darrieus.	Proposée	 (source : ¹¹⁶)
Intégrée avec les autres fonctions	Avec panneaux solaires	Intégrée avec des panneaux solaires (e.g. au poteau d'éclairage urbain) en profitant les avantages de ces deux sources naturelles.	Proposé : bien choisir le type	 (source : ¹¹⁷)

¹¹² <http://quanthomme.free.fr/energieencore/carnet14.htm>

¹¹³ <http://www.ecogeek.org/wind-power/156>

¹¹⁴ <http://wertel.blogspot.fr/2011/02/concurrent-cfd.html>

¹¹⁵ <http://www.gizmag.com/power-flowers-project-aims-to-bring-wind-turbines-closer-to-home/18049/>

¹¹⁶ <http://www.tjskl.org.cn/darrieus-turbines-images>

¹¹⁷ <http://cn.hc360.com/sd/company-59405432/product-4840649.html>

Type d'éoliennes		Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple
	Avec la fonction de capture de l'humidité de l'air	Inventée par la société Eole Water, générant l'électricité et l'eau potable par capture de l'humidité de l'air, bien adaptée aux zones sèches. ¹¹⁸	Proposée	 (source : ¹¹⁹)
	Installée sur les constructions existantes	Adaptée aux milieux bâtis (autour d'un immeuble, un pont, une tour de stockage d'eau, dans un tunnels, etc.), faut considérer avec soin la position d'installation, l'angle du vent d'entrée et le type d'éoliennes avec structures accessoires qui pourraient optimiser l'effet de concentration du vent.	Proposée	 (source : ¹²⁰)
	Intégrée aux nouvelles constructions	Intégrée à une architecture dès l'étape de conception, prise en compte de la forme de la construction qui a un effet aérodynamique pour optimiser la concentration du vent, considérations importantes à l'esthétique, à l'utilisation de l'espace et à la pratique.	Proposée	 (source : ¹²¹)
			Proposée	 (source : ¹²²)

Note :

Les critères d'évaluation des conditions d'implantations provisoires dans la ville sont :

- 1) si la conception de l'éolienne a considéré ou non les caractéristiques du vent en ville (faible, turbulent, instable, nombreuses interactions avec les objets en ville) ;
- 2) si la conception de l'éolienne a considéré ou non les limites de l'espace pour capter l'écoulement du vent, et les contraintes de qualités sonore, visuelle, et esthétique en milieu urbain ;
- 3) si la conception de l'éolienne a considéré ou non les moyens pour optimiser l'efficacité et le rendement, par exemple, l'intégration avec des différents types d'éoliennes différentes, ou des différentes fonctions.

¹¹⁸ <http://www.eolewater.com/>

¹¹⁹ <http://www.eco-bio.info/ecobiainfo57.html>

¹²⁰ <http://www.ubergizmo.com/2008/06/aerovironment-architectural-wind/>

¹²¹ <http://www.telovation.com/articles/turbine-skyscraper.html>

¹²² <http://www.echolalie.org/wiki/index.php?ListedEoliennes>

Annexe 4.1 Processus d'établir les valeurs des paramètres CFD dans le modèle de validation

Le processus de la recherche des meilleures valeurs des paramètres n'est jamais facile. Chaque comparaison est faite afin d'étudier un seul paramètre avec trois ou plus de valeurs proposées. Néanmoins, le modèle de référence établi par la meilleure performance sur un paramètre peut être change l'un à l'autre quand des autres paramètres interviennent. En fait la meilleure valeur d'un nouveau paramètre est souvent renouvelée. Un jugement raisonnable provisoire peut éviter une certaine grande erreurs mais toujours être limité. De nombreux essais ont été faits et trois modèles de références ont été gardés pour montrer la trace complète de cette découverte. Les données du modèle de référence en soufflerie sont toujours la référence de jugement, malgré des désaccords sont apparus. Le **Tableau A4-1a** montre les valeurs des trois modèles de référence (A, B et C) alors que le **Tableau A4-1b** montre des comparaisons des erreurs entre les autres modèles et eux. Pour économiser l'espace et concentrer les informations essentielles, que les paramètres en étude sont listés pour chaque modèle et les autres informations sont les mêmes que le modèle de référence. Dans le tableau les modèles de référence sont marqués par un fond foncé et les meilleures modèles sont marqué en rouge toute la ligne.

Pour les résultats des comparaisons, des remarques suivantes peuvent être trouvées.

1) Pour le domaine à l'échelle un rayon de 200 m peut être un meilleur choix, tandis que l'augmenter à 250 m ou 300 m l'erreur a peu de changement.

2) Pour le maillage :

a. parmi différentes épaisseurs inflation première couche pour la construction ($T_b = 0,06 \text{ m} - 0,1 \text{ m}$), plus petite la taille mieux est le résultat. Cependant, avec l'examen de nombre de cellule de maillage (Q) une valeur équilibrée comme $T_b = 0,08 \text{ m}$ est choisi ;

b. il n'y a pas de meilleur nombre de couches d'inflation, tandis que les tendances de changement ne sont pas cohérentes entre les erreurs moyennes relatives (E/U_0) et les nombres des points de meilleure performance. Par conséquent, nous prenons une valeur équilibrée : $N = 10$;

c. parmi les différentes premières épaisseurs de couche d'inflation du sol ($T_g = 0,2 \text{ m} - 0,5 \text{ m}$), $0,5 \text{ m}$ semble le meilleur choix ;

d. parmi les différents taux de transit d'inflation du sol ($r_g = 1,1 - 1,15$), $1,13$ a la meilleure performance ;

e. parmi les différents taux de transit d'inflation de l'enveloppe du bâtiment ($r_b = 1,15 - 1,25$), $1,25$ a la meilleure performance ;

f. pour l'option de contrôle général du maillage, le moyen centre de pertinence (Relevance Centre, RC) et la petite lissage obtient une meilleure performance, respectivement.

3) Pour la condition limite en fonction de la paroi (wall function), la hauteur de la rugosité K_s et la constante C_s toutes les deux en fait ont peu d'influence sur le résultat final. Toutefois, une plus grande C_s semblablement produit un meilleur résultat et quand $K_s > 0,1 \text{ m}$ le résultat semble arrêter de changer. Nous prenons donc un $K_s = 1 \text{ m}$ et $C_s = 0,99$ comme un meilleur réglage.

4) Parmi les différents modèles de turbulence, k- ϵ standard montre une meilleure performance générale, malgré nombreux de critiques sur ce modèle là.

En outre, pour les détails des comparaisons parmi des différents choix de valeur (ou mode) d'un paramètre, la **Fig. A4-1a** montre la cohérence de différents modèles de turbulence aux résultats d'expérimentation. Le K- ϵ Standard (ligne verte) est trouvé facilement comme le meilleur modèle adapté. Par contre, dans la **Fig. A4-1b** où des modèles de différents taille du domaine sont comparés, il est vraiment difficile de juger qui est mieux que l'autre lorsque les écarts sont très petits. Dans ce

cas-là on a besoin d'une analyse quantitative comme l'application de l'indicateur d'erreur E_a et E_r au lieu de la comparaison visuel.

Tableau A4-1a

Réglages des paramètres des trois modèles de référence pour étudier les paramètres

Modèle	Paramètre	Erreur horizontale		Erreur verticale	
		(E_a)	(E_r)	(E_a)	(E_r)
		a (E_a/U_0)	r (/115)	a (E_a/U_0)	r (/109)
A	R=250 m, L=0,8 m, N=10, $T_g=0,3$ m, $r_g=1,1$, $T_b=0,08$ m, $r_b=1,2$, fonction avancée sur la taille : proximity and curvity (proximité et en courbure), RC : mediu m, Lissage: medium ($Q=1,84 \cdot 10^4$), $K_s=1$ m, $C_s=0,99$, $l=10$ %, $L=1$ m, k- ϵ réalisable, 2 precision, Schème: Simple, Descrétisation: 2 order (pressure), Quick (momentu m, k, e)	0,270	37	0,099	64
B	L=1,25 m, N=10, $T_g=0,5$ m, $r_g=1,13$, $r_b=1,25$, Lissage: bas ($Q=1,146 \cdot 10^4$)	0,252	39	0,082	68
C	L=1,25 m, N=10, $T_g=0,5$ m, $r_g=1,13$, $r_b=1,25$, Lissage: bas ($Q=1,146 \cdot 10^4$), k- ϵ Standard	0,253	46	0,072	70

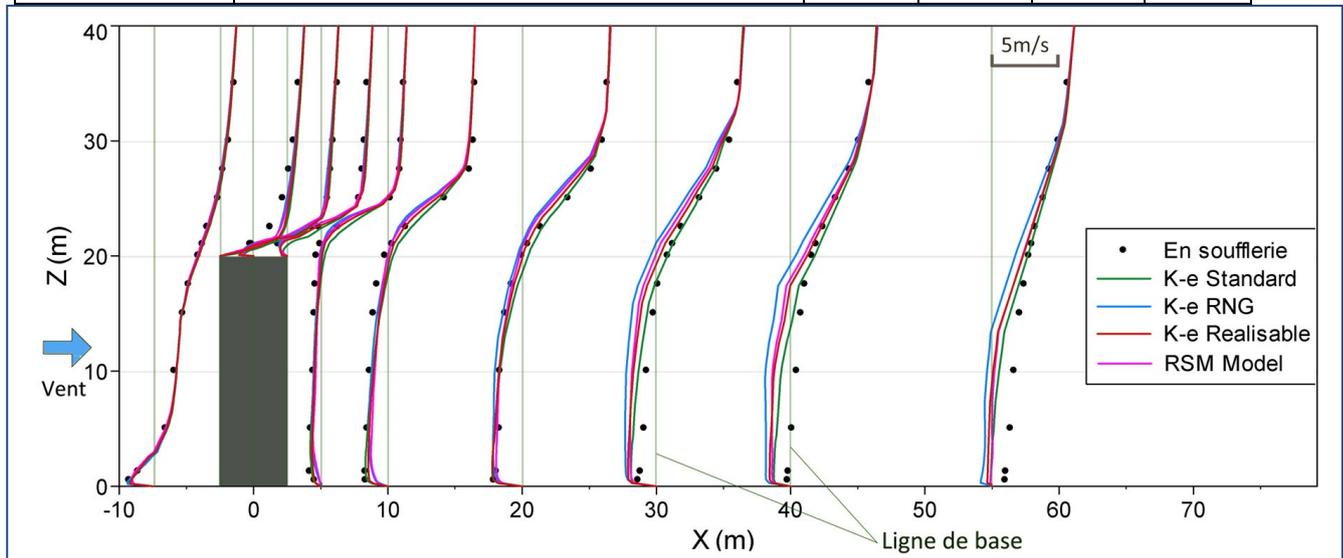


Fig. A4-1a Comparaison de la cohérence des différents modèles de turbulence avec l'expérience en soufflerie

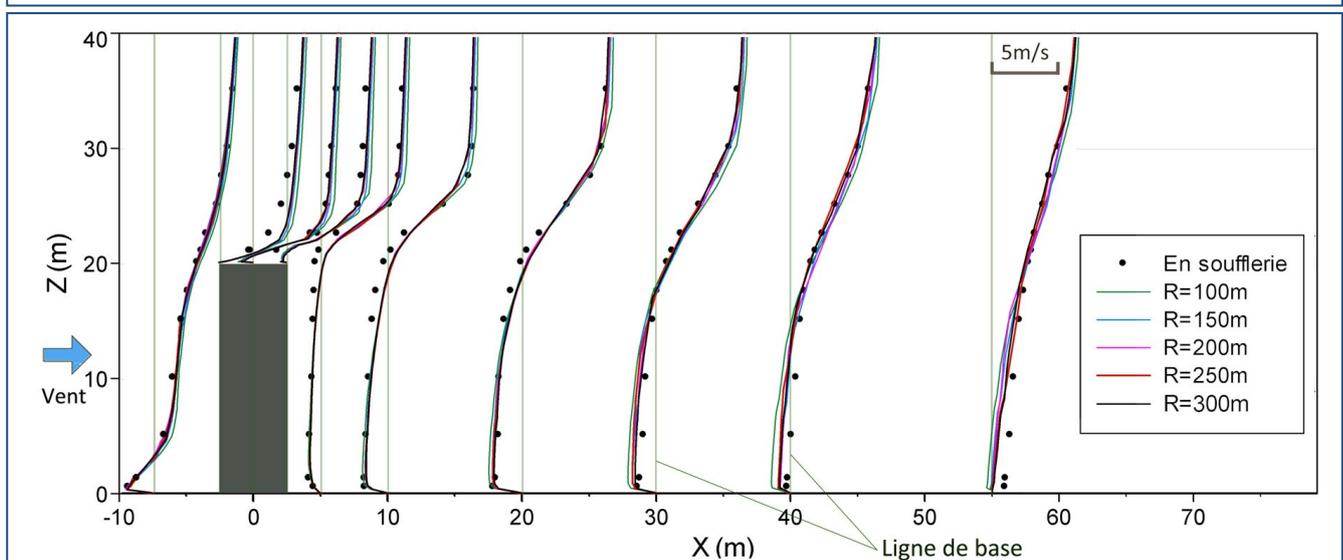


Fig. A4-1b Comparaison de la cohérence des différentes taille de domaine avec l'expérience en soufflerie

Tableau A4-1b

Réglages des modèles et liste des erreurs relatives et des erreurs absolues

Rubrique	Modèle	Paramètre	Erreur horizontale		Erreur verticale	
			(E _a)	(E _r)	(E _a)	(E _r)
			a (E _a /U ₀)	r (/115)	a (E _a /U ₀)	r (/109)
Maillage	A	L=0,8 m, N=10, T _g =0,3 m, r _g =1,1, T _b =0,08 m, r _b =1,2 (Q=1,84*10 ⁴)	0,270	37	0,099	64
	A1a	N=5, r _g =1,2, r _b =1,3 (Q=1,77*10 ⁴)	0,272	37	0,099	63
	A1b	N=8 (Q=1,85*10 ⁴)	0,269	38	0,103	65
	A1c	N=12 Q=1,84*10 ⁴)	0,266	39	0,103	64
	A1d	N=14 (Q=1,85*10 ⁴)	0,270	43	0,093	58
	A1e	N=15, r _b =1,12 (Q=1,99*10 ⁴)	0,256	40	0,096	67
	A2a	r _b =1,1 (Q=1,942*10 ⁴)	0,268	37	0,097	61
	A2b	r _b =1,25 (Q=1,777*10 ⁴)	0,268	38	0,101	65
	A3a	T _g =0,2m (Q=1,87*10 ⁴)	0,277	37	0,106	63
	A3b	T _g =0,4m (Q=1,81*10 ⁴)	0,270	39	0,098	67
	A4a	T _b =0,1m (Q=1,78*10 ⁴)	0,277	38	0,111	57
	A4b	T _b =0,06m (Q=1,91*10 ⁴)	0,267	37	0,098	62
	A5a	L=0,6m (Q=2.26*10 ⁴)	0,263	39	0,095	66
	A5b	L=1m (Q=1,46*10 ⁴)	0,259	43	0,097	66
	A5c	L=1,25 m (Q=1,195*10 ⁴)	0,258	41	0,090	65
	A5d	L=1,5 m (Q=1,076*10 ⁴)	0,268	44	0,096	63
	A6a	RC: fine (Q=2.96*10 ⁴)	0,269	41	0,102	64
	A6b	RC: grosse (Q=1,44*10 ⁴)	0,262	44	0,113	55
	A7a	Lissage: haut (Q=1,836*10 ⁴)	0,267	37	0,103	68
	A7b	Lissage: bas (Q=1,834*10 ⁴)	0,268	40	0,096	64
	B	T _g =0,5 m, r _g =1,13, r _b =1,25 (Q=1,146*10 ⁴)	0,252	39	0,082	68
	B1a	T _g =0,3 m, r _g =1,1, r _b =1,2 (Q=1,193*10 ⁴)	0,258	42	0,093	69
	B1b	T _g =0,4 m, r _g =1,1, r _b =1,2 (Q=1,164*10 ⁴)	0,250	45	0,096	56
	B1c	T _g =0,4 m, r _g =1,15, r _b =1,2 (Q=1,193*10 ⁴)	0,250	43	0,096	63
	B1d	T _g =0,4 m, r _b =1,15 (Q=1,171*10 ⁴)	0,252	42	0,091	63
	B1e	T _g =0,4 m, r _b =1,2 (Q=1,164*10 ⁴)	0,250	43	0,096	69
	B1f	r _b =1,2 (Q=1,146*10 ⁴)	0,252	41	0,084	66
	B1g	r _b =1,15 (Q=1,146*10 ⁴)	0,250	41	0,087	68
Condition de la couche litmite	A	Ks=1 m, Cs=0,99	0,270	37	0,099	64
	Aa	Ks=0 m	0,286	37	0,104	60
	Ab	Ks=0,1m	0,271	37	0,100	63
	Ac	Ks=0,5 m	0,270	37	0,099	64
	Ad	Ks=0,8m	0,270	37	0,099	63
	Ae	Ks=1,2m	0,270	37	0,099	64
	Af	Ks=1,5 m	0,270	37	0,099	64
	Ag	Cs=0,5	0,273	36	0,100	62
Modèle de turbulence et de la solution	A	k-ε réalisable, Quick (momentu m, k, e)	0,270	37	0,099	64
	A1	Descrétisation 2 order (momentu m, k, e)	0,270	37	0,099	64
	A2	k-ε RNG	0,297	37	0,139	46
	A3	RSM	0,255	44	0,105	63
	A4	k-ε Standard	0,260	42	0,079	65
Taille du domaine	C	k-ε Standard (R=250 m)	0,253	46	0,072	70
	Ca	R=100 m	0,266	42	0,095	49
	Cb	R=150 m	0,251	50	0,073	65
	Cc	R=200 m	0,248	54	0,070	71
	Cd	R=300 m	0,257	47	0,069	71

Note :

R : Rayon du domaine ;

L : Taille de la cellule pour la surface de bâti ;

N : Nombre de couches d'inflation pour le sol (le même pour les murs extérieurs de bâtiment) ;

T_g : Epaisseur de premier couche d'inflation à partir du sol ;

r_g : Ratio de transition d'inflation du sol ;

T_b : Epaisseur de la premier couche d'inflation à partir du mur du bâtiment ;

r_b : Ratio de transition d'inflation du bâti ;

Q : Nombre des éléments du modèle ;

K_s : Hauteur de rugosité (m) pour la fonction du mur ;

C_s : Constante de rugosité en fonction du mur ;

E_a : Erreur absolue ;

E_r : Erreur relative.

Annexe 4.2.1 Cohérence du flux au champ de simulation

La cohérence du flux au champ du vent est vitale pour garantir la stabilité et la crédibilité de résultats. Pour évaluer les gradients involontaires du flux, c'est-à-dire l'inhomogénéité horizontale dans le profil vertical de vitesse du vent et les paramètres de turbulence, il est conseillé de faire une analyse de cohérence du flux au champ vide de simulation avant de lancer un calcul avec le projet actuel (Bloken *et al.* 2007a, 2007b, 2008, Ramponi et Blocken 2012). Ci-dessous nous prenons l'exemple du modèle de référence pour la validation des paramètres. Dans la direction d'incidence du vent à la ligne centrale du champ, on pose trois lignes verticales pour évaluer le changement de profil de vitesse du vent : une près de l'entrée (ligne L-a, 6H de distance en amont et H est la hauteur du bâtiment qui sera construit), une à la position provisoire du bâtiment (ligne L-b) et une en aval à une distance de 12H (ligne L-c) (Fig. A4-2-1).

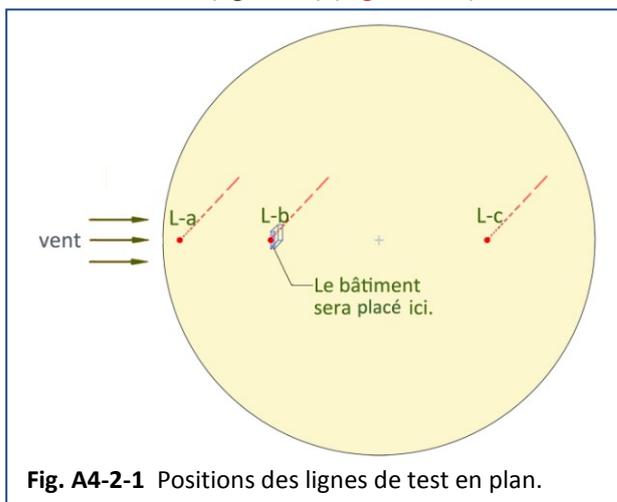


Fig. A4-2-1 Positions des lignes de test en plan.

Les résultats de la simulation CFD montrent que les trois lignes se sont conformées généralement à la profil de puissance théorique (condition initiale), et la ligne la plus proche de l'entrée est la plus conforme (Fig. A4-2-2). Plus précisément, à ligne L-a, nous avons une erreur relative moyenne de 1,0 % (entre 1,9 % et 2,5 %), à ligne L-b nous avons une moyenne de 3,4 % (entre 0,7 % et 11,7 %) et à ligne-c nous avons une moyenne de 4,2 % (entre 0 et 8,8 %) (Fig. A4-2-3). Généralement, dans le champ vide, nous avons une erreur inférieure à 5 % sur la cohérence du maillage. A la position où l'on posera le bâtiment l'erreur est faible et se trouve plutôt proche du sol (< 10 m), où le profil de vitesse du vent n'est jamais clair à cause de la grande rugosité et du problème de la couche limite dans le domaine de CFD.

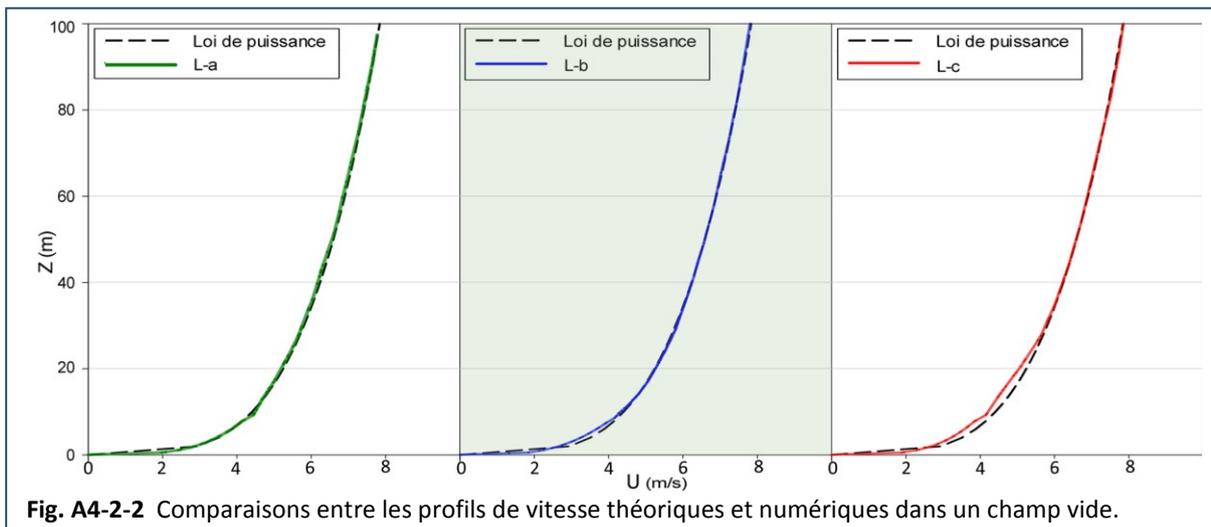


Fig. A4-2-2 Comparaisons entre les profils de vitesse théoriques et numériques dans un champ vide.

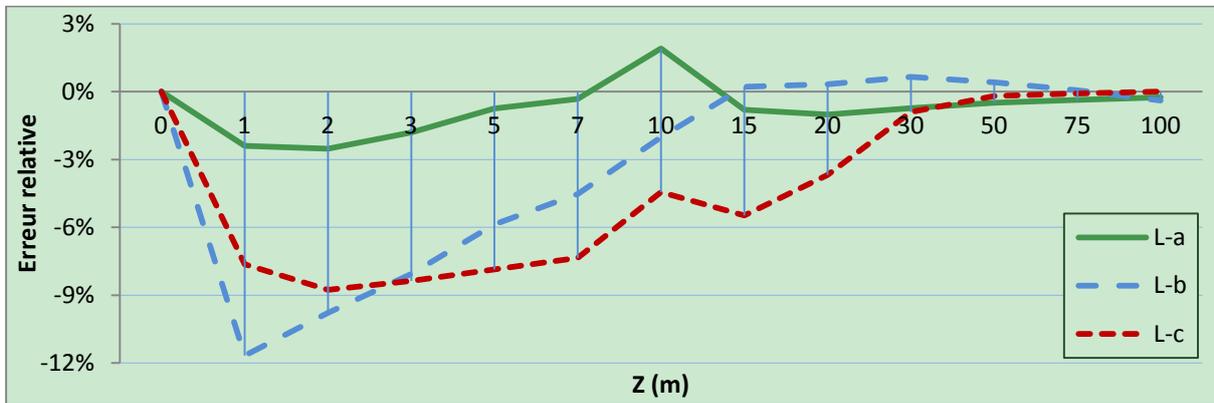


Fig. A4-2-3 Erreurs relatives entre les profils de vitesse théoriques et numériques.

Annexe 4.2.2 Sensibilité de taille du domaine

Lorsqu'on change la configuration et la taille de la géométrie, la dimension du champ du vent doit être elle aussi bien vérifiée. Il est nécessaire de choisir une taille du domaine adaptée qui n'est pas trop grande en dépense trop de temps de calcul, ni trop petite en limitant le développement de la turbulence et nuisant la précision de calcul. Ici nous prenons l'exemple d'un couple de barres perpendiculaires ($W*L*H^{123} = 6m*15m*10m$) séparées d'une distance de $D = 15 m$ dans des différentes tailles du domaine de simulation, d'un rayon (R) de 100 m à 400 m (Fig. A4-2-4). L'énergie éolienne sur les toits des bâtiments est évaluée par l'indicateur m , qui est expliquée dans le [Chapitre 5.1](#). La description détaillée de la simulation du modèle de deux barres perpendiculaires symétriques sont données dans le [Chapitre 5.3.4](#). Pour tester la sensibilité de la taille du domaine, nous appliquons différents angles d'incidence du vent de mode de convergence dans les différentes tailles du domaine pour obtenir des résultats comparables et assurés. Les résultats à deux altitudes sur le toit sont évalués ($Z = 3 m$ et $5 m$).

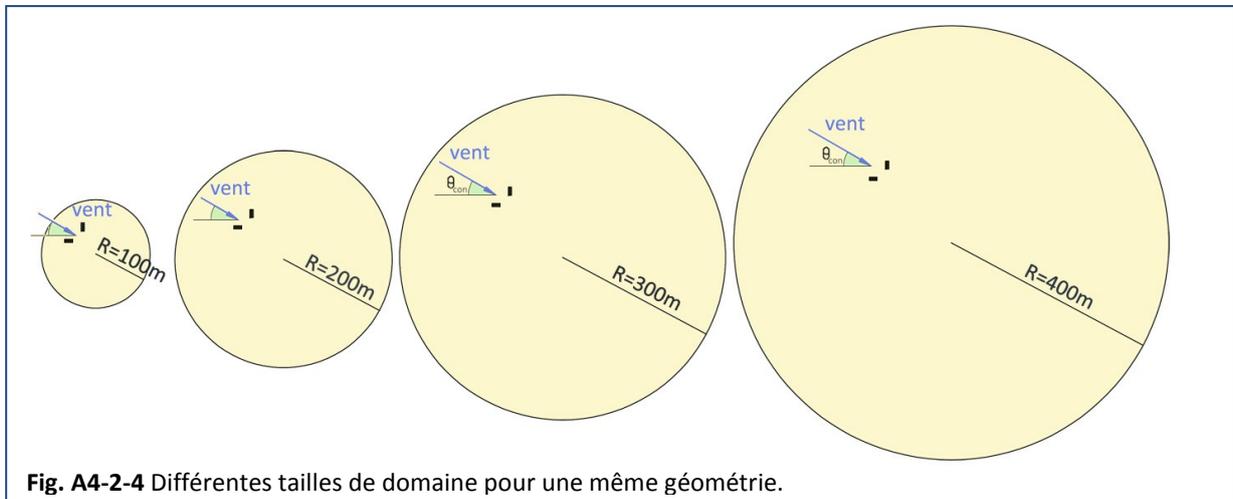


Fig. A4-2-4 Différentes tailles de domaine pour une même géométrie.

Dans la Fig. A4-2-5, on peut voir les variations de l'indicateur M avec la taille du domaine de simulation. Nous remarquons que, lorsque le rayon du domaine s'agrandit et passe de $R = 100 m$ à $R = 400 m$, la valeur M se stabilise progressivement. En partant de $R = 200 m$, les résultats montrent un petit changement avec l'influence de la taille du domaine. Compte tenu de l'économie du nombre de mailles et un certain élargissement de la taille du modèle suite à l'étude de paramètres, nous adoptons enfin l'échelle $R = 300 m$. En fait on a une seule 2 % de différence sur M entre cette échelle et échelle $R = 400 m$. Il faut se marquer que cette taille du domaine est uniquement pour les géométries de taille ressemblante. Toutes les grandes modifications de taille, notamment de la hauteur, nécessitent une nouvelle étude de sensibilité de la taille du domaine.

¹²³ Largeur (W) * Longueur (L) * Hauteur (H), Ci-après le même.

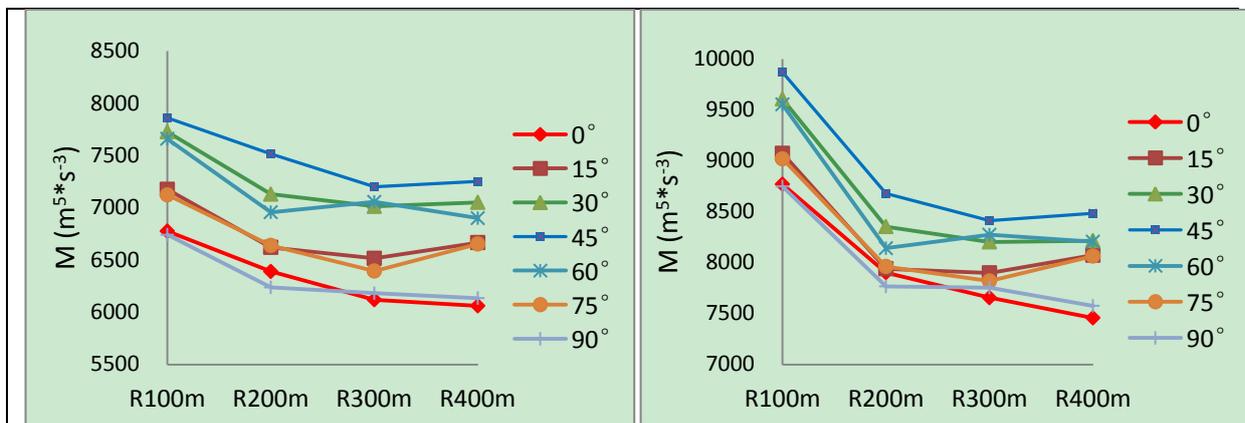


Fig. A4-2-5 Impact de la taille du domaine de simulation sur l'évaluation de l'énergie éolienne au-dessus du toit, l'entrée du vent en mode de convergence (à gauche : $Z = 3$ m, à droite : $Z = 5$ m).

Annexe 4.2.3 Sensibilité du maillage

Selon les lignes directrices, la résolution du maillage doit être basée sur une analyse de sensibilité du maillage sur au moins de trois maillages différents (Casey et Wintergerste 2000, Franke *et al.* 2004, 2007, Tominaga *et al.* 2008, Blocken *et al.* 2012). Ici, nous continuons de prendre l'exemple du modèle du couple de barres perpendiculaires comme présenté ci-dessus. Cinq modèles de différentes tailles de maillages sont testés (Fig. A4-2-6). Les informations sur les maillages et les temps de calcul correspondant (dépend de la puissance de l'ordinateur utilisé¹²⁴) sont donnés dans le Tableau A4-2. On voit que le temps de calcul pour un certain nombre d'itérations semble avoir une relation linéaire avec le nombre d'éléments du maillage. En outre, un maillage plus fin a besoin généralement plus nombreuses d'itérations pour obtenir la convergence. Ce-là donc rend le temps de calcul total beaucoup plus important.

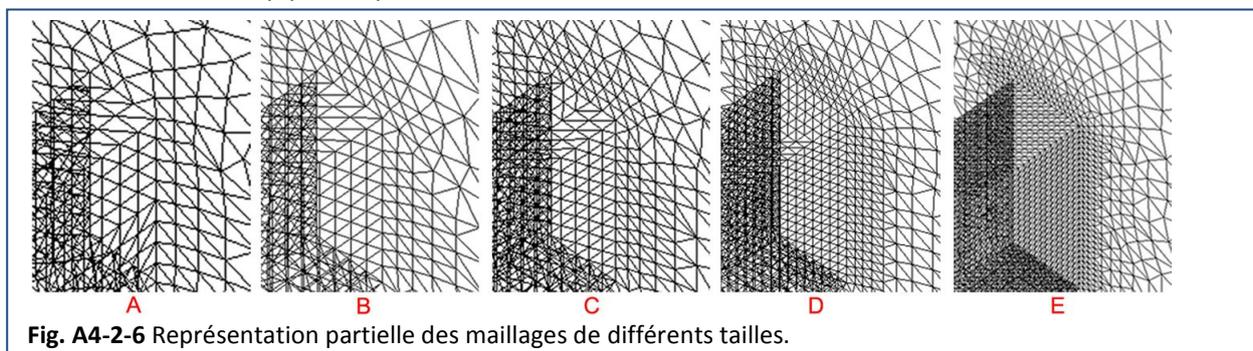


Fig. A4-2-6 Représentation partielle des maillages de différentes tailles.

Tableau A4-2

Modèles de différentes tailles de maillages

Modèle	A	B	C	D	E
Taille de maillage des cotés de bâtiment	L = 2 m	L = 1,5 m	L = 1,25 m	L = 0,8 m	L = 0,5 m
Taille maximale de maillage du domaine	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m
Nombre d'éléments de maillage	56 973	84 607	147 530	289 960	759 734
Qualité moyenne d'éléments	0,57	0,60	0,64	0,66	0,71
Temps de calcul pour 100 itérations	44 s	64 s	105 s	218 s	610 s
Nombre d'itérations avant convergence	900	1200	3500	3500	4200
Temps total de calcul	7 min	13 min	61 min	127 min	427 min

¹²⁴ Sur un ordinateur de portable : CPU en Intel Core i7-4700 mQ / 2.4 GHz, quatre coeurs, 6 Mo Cache, 12 Go RAM (1,600 MHz), Processeur graphique en NVIDIA GeForce GT 740 m - 2 Go.

La Fig. A4-2-7 montre que les changements de vitesse du vent à la ligne centrale à l'altitude $Z = 15$ m (alors que les bâtiments sont de 10 m de haut) à la direction du vent $\Theta = 45^\circ$. Généralement, les écoulements de différents modèles en amont de bâtiment se sont accordés, notamment à proximité du bâtiment. Néanmoins, pour les écoulements en aval les vitesses sont très différentes l'une de l'autre et le modèle d'un maillage plus fin a une vitesse plus faible. Ce phénomène est probablement causé par l'incertitude de la simulation de turbulence à l'arrière du bâtiment et la présentation de la rugosité du sol. En cas de manque de référence d'expérimentation en souffleri, nous ne pouvons pas juger quelle taille de maillage est la plus adaptée à la réalité.

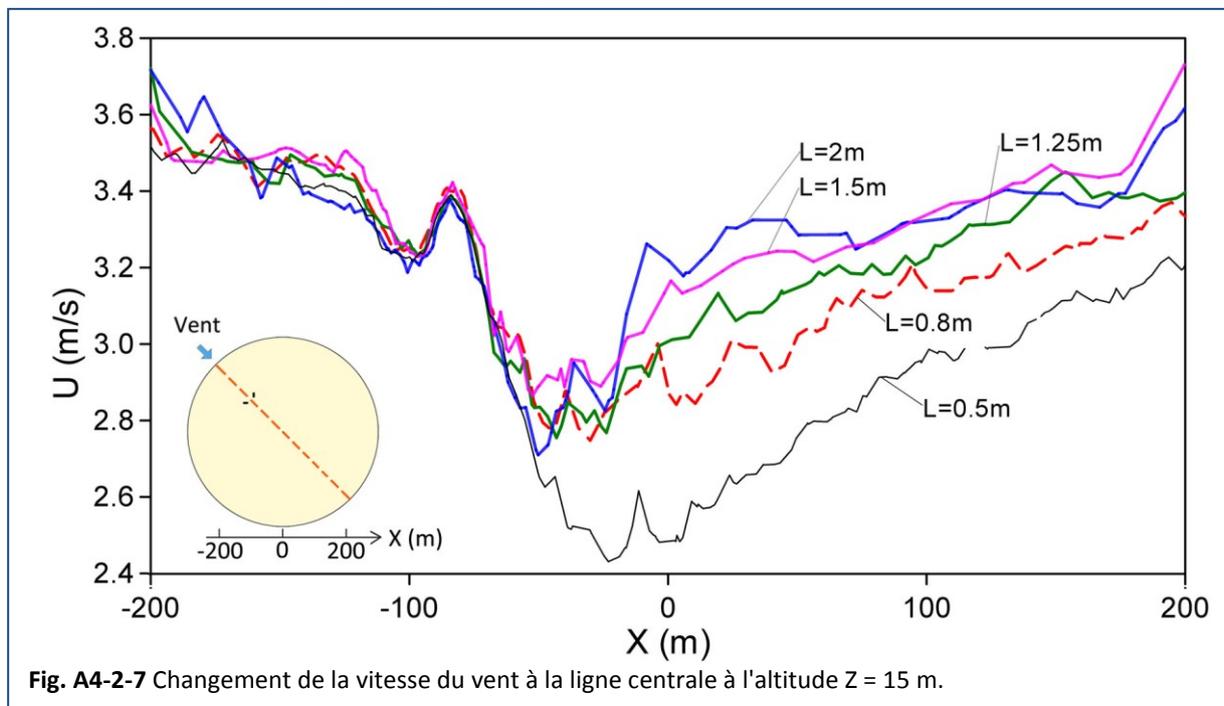


Fig. A4-2-7 Changement de la vitesse du vent à la ligne centrale à l'altitude $Z = 15$ m.

Pourtant, les résultats d'évaluation du potentiel éolien sur toit sont convaincants. La Fig. 4-2-8a nous montre que les valeurs de M sont plutôt stabilisées du modèle C ($L = 1,25$ m) à modèle E ($L = 0,5$ m). Les erreurs relatives sur la base du modèle E montrent que les écarts diminuent avec la taille du maillage réduite (Fig. A4-2-8b). En fait, les résultats de l'indicateur M montrent que l'erreur moyenne entre le modèle C et E est de 1,5 %, alors que pour le modèle B est de 4.0 % et modèle D est de 0,3 %. En considérant le niveau de précision et le temps de calcul envisagé pour un nombre important de modèles pour la simulation suivante, nous retenons la taille de maillage des côtés de bâtiment $L = 1,25$ m appliquée dans le modèle de validation.

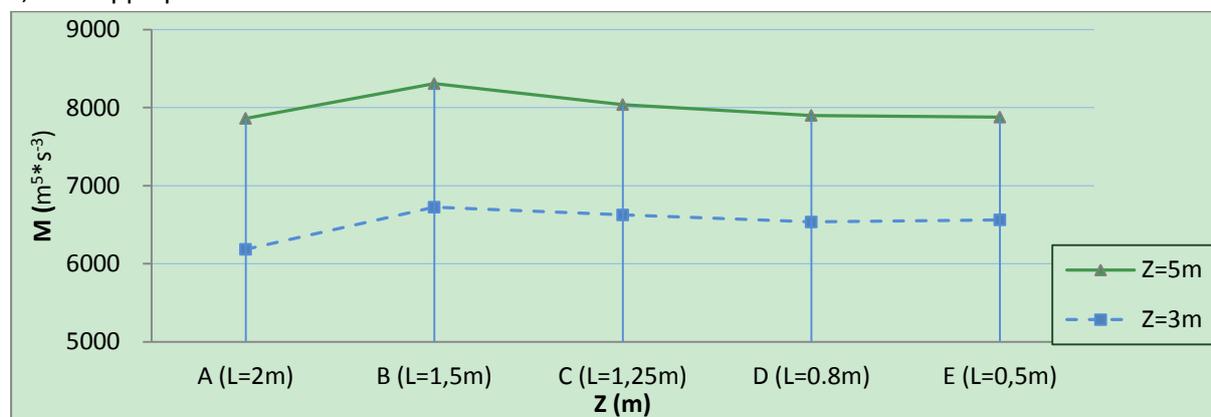


Fig. A4-2-8a Potentiel éolien au-dessus du toit des modèles avec différentes tailles de maillages.

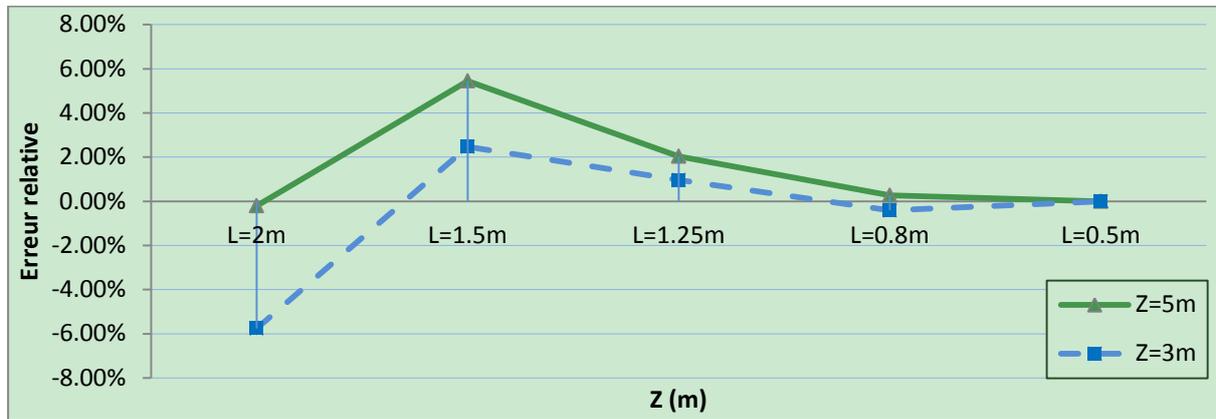


Fig. A4-2-8b Erreurs relatives des comparaisons entre les modèles avec différentes tailles de maillages (modèle E choisi comme la référence).

Annexe 4.2.4 Eviter des erreurs fortuites

Une autre partie de vérifier la pertinence de la simulation CFD, est d'évaluer la stabilité et le sens des résultats trouvés en évitant les erreurs fortuites, e.g. ceux qui causées par l'incertitude de la convergence et les mauvaises manipulations. En général, des simulations répétées avec des modifications significatives et des simulations des modèles symétriques peuvent aider à assurer la pertinence de la simulation numérique.

Ici, nous prenons encore l'exemple du modèle de deux barres perpendiculaires symétriques et faisons des simulations aux deux angles symétriques d'incidence du vent (ex., entre 0° et 90°, 30° et 60°) afin d'évaluer les erreurs fortuites. En théorie, les résultats sont identiques. Les résultats montrent que 95 % des cas (276 cas en somme, a une erreur relative inférieure à 5 % pour les valeur de M entre les cas de deux angles symétriques ([Wang et al. 2015](#)).

Annexe 5. Sur la simulation des modèles simples

Annexe 5.1 Impact de la hauteur du bâtiment sur le vent à l'arrière

Sur la base d'une barre de taille en plan longueur * largeur = 30 m * 12 m, plusieurs hauteurs (H = 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 80 m et 100 m) sont appliquées pour évaluer l'impact sur les vents à l'arrière du bâtiment. Trois lignes horizontales qui traversent par le toit du bâtiment et dans la direction du vent (Y = -15 m, 0 m et 15 m) sont considérées pour capter la variation du vent (Fig. A5-1).

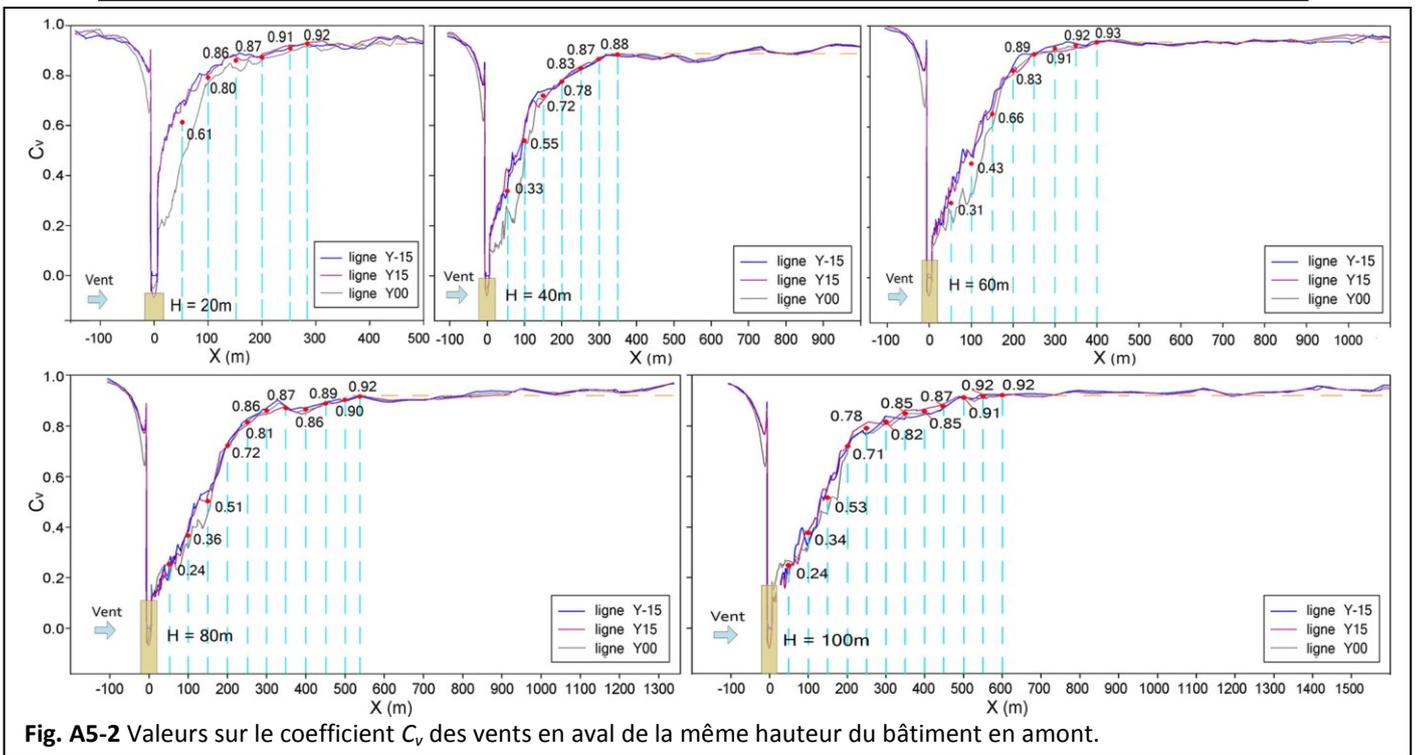
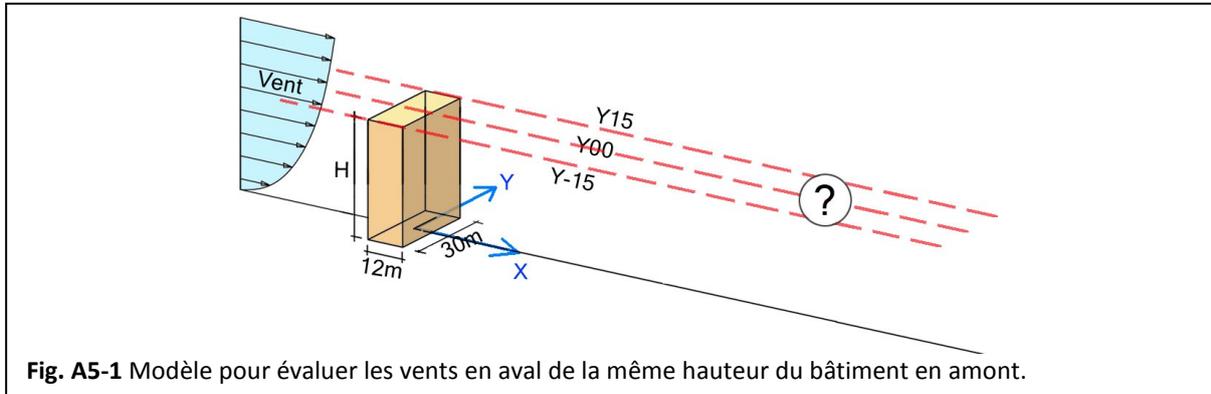


Tableau A5-1

Comparaison parmi les valeurs sur le coefficient C_v des vents à l'arrière des bâtiments de différentes hauteurs.

	H = 20 m	H = 30 m	H = 40 m	H = 50 m	H = 60 m	H = 80 m	H = 100 m
D = 50 m	0,61	0,44	0,33	0,24	0,31	0,24	0,24
D = 100 m	0,80	0,73	0,55	0,46	0,43	0,36	0,34
D = 200 m	0,86	0,85	0,78	0,77	0,83	0,72	0,71
D = 300 m	0,92	0,89	0,87	0,87	0,91	0,86	0,82
D = 400 m	0,92	0,91	0,88	0,87	0,93	0,86	0,85
D = 500 m	0,92	0,92	0,88	0,90	0,93	0,90	0,91

Tableau A5-2

Comparaison de la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre une certaine niveau d'effet du vent par rapport à la hauteur du bâtiment.

	H = 20 m	H = 30 m	H = 40 m	H = 50 m	H = 60 m	H = 80 m	H = 100 m
Distance où le vent dont $C_v = 0,2$	0,50H	0,47H	0,66H	0,70H	0,36H	0,36H	0,37H
Distance où le vent dont $C_v = 0,4$	1,05H	1,03H	1,75H	1,78H	1,35H	1,31H	1,16H
Distance où le vent dont $C_v = 0,6$	2,30H	2,43H	2,70H	2,66H	1,92H	2,11H	1,71H
Distance où le vent dont $C_v = 0,8$	4,71H	4,50H	5,47H	4,34H	3,17H	2,95H	2,77H
Distance où le vent stabilise	14H	11H	9H	8H	6,5H	7H	5,5H

Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent C_v sont présentées sur les différentes distances à l'arrière du bâtiment jusqu'à une valeur stable (Fig. A5-1). Les valeurs sont résumées dans le **Tableau A5-1** pour mieux comparer. Par rapport à des certaines valeurs du coefficient, la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre cette niveaux est ainsi présentée pour différents modèles (**Tableau A5-2**). Des remarques suivantes peuvent être apportées.

1) Une valeur d'environ de 0,92 sur le coefficient C_v est démontrée lorsqu'elle devient stable pour les majorité des modèles.

2) Avant que les vents deviennent stables, à une même distance à l'arrière du bâtiment, la valeur du coefficient C_v est plus faible lorsque le bâtiment en amont est plus haute.

3) Si on définit un taux λ avec la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre le vent stable divisée par la hauteur du bâtiment ($\lambda = D/H$), il diminue avec l'augmentation de H . En fait, on peut chercher une fonction de H pour le décrire :

$$D_{stable} = \frac{84}{H^{0,6}} H \quad \text{Equation A5-1}$$

La cohérence entre les résultats de l'**Equation A5-1** et ceux de la simulation dans le **Tableau A5-2** est présentée dans la **Figure A5-3**.

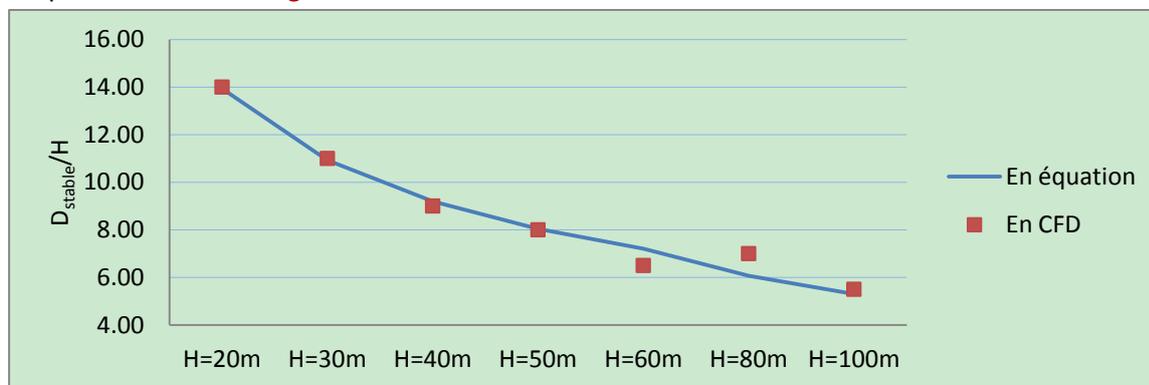


Fig. A5-3 Cohérence entre les résultats théoriques et ceux de simulation du λ_{stable} à $Z = 10$ m.

Annexe 5.2 Impacts morphologiques sur les vents au-dessus du toit d'une grande tour

Dans cette partie, plusieurs géométries simples en différentes tailles devant une tour en taille longueur * largeur * hauteur = 30 m * 12 m * 80 m sont stimulés. Les vents au-dessus du toit de la tour en aval à quatre altitudes ($Z = 5$ m, 10 m, 15 m et 20 m) sont évalués. Un modèle de référence avec la tour en aval isolée est donné.

Annexe 5.2.1 Impact de la distance de séparation entre deux tours

Une tour en même taille que celle en aval est considérée ici. Plusieurs distances entre les deux tours dans la direction du vent sont considérées ($D = 80$ m, 160 m, 320 m, 640 m) (Fig. A5-4).

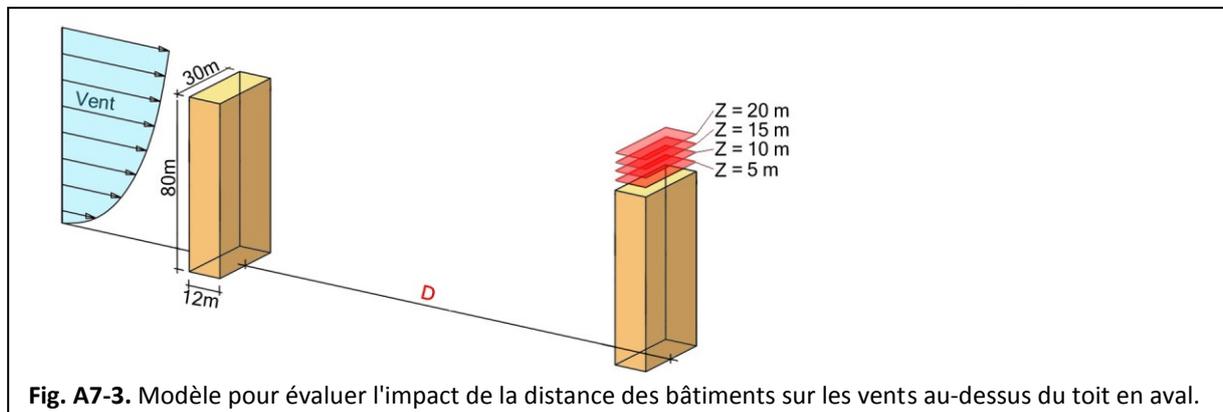


Fig. A7-3. Modèle pour évaluer l'impact de la distance des bâtiments sur les vents au-dessus du toit en aval.

Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés parmi les modèles de différentes distances et le modèle de référence (Fig. A5-5). Des remarques suivantes peuvent être apportées.

1) Lorsque la distance augmente, la valeur du coefficient C_v se stabilise. En fait, entre le modèle de D480 et celui de D640, la variation est inférieure à 5 %. On peut donc dire, à partir d'une distance de 6H, pour deux tours de même hauteur dans la direction du vent, les vents au-dessus du toit de la tour en aval sont indépendants à la distance entre les deux tours.

2). Comparé au modèle de référence, les modèles avec une distance assez importante ($D > 320$ m), dite 4 fois la hauteur de la tour en amont (H), ont des valeurs du coefficient C_v plus élevée.

3) Les vents à une altitude faible sur le toit ($Z = 5$ m, 10 m) sont beaucoup plus influencés par le changement de la distance que ceux à une altitude plus élevée ($Z = 15$ m, 20 m).

4) Lorsque les tours sont assez proches ($D < 80$ m), les vents à une altitude élevée sur le toit ($Z = 20$ m) peuvent être très forts grâce à l'effet de concentration du vent.

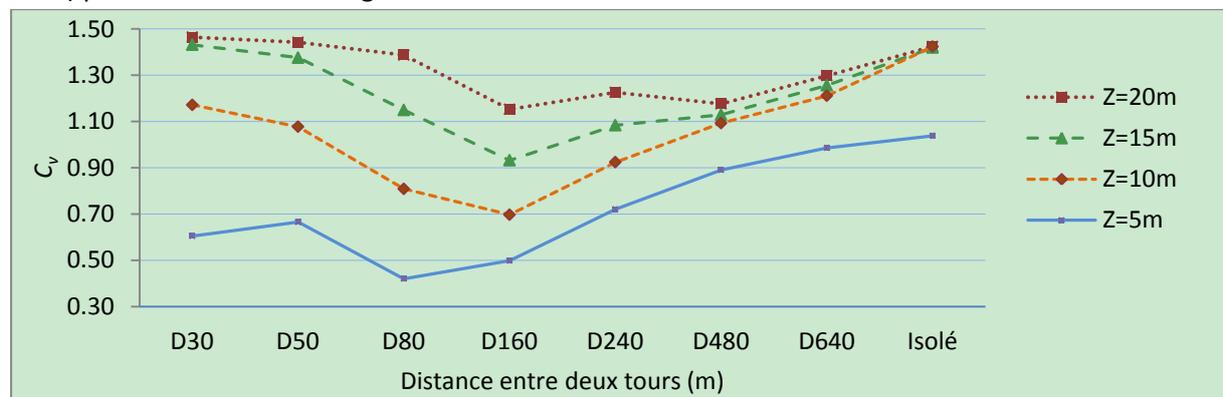


Fig. A5-5 Comparaison sur le coefficient C_v parmi les modèles de différentes distances de séparation entre les deux bâtiments sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Si on cherche la relation entre la valeur du coefficient C_v avec la distance entre les deux tours D , une fonction peut être trouvée :

$$\begin{cases} C_{v(D)} = 1,31 \cos\left[\frac{(DH_0+20560)}{10400}\right] + 1,97, & D < 3H_0 \\ C_{v(D)} = 9 * 10^{-6}(DH_0 - 19200) + 0,92, & D \geq 3H_0 \end{cases} \quad \text{Equation A5-2}$$

où H_0 est la hauteur de la tour d'étude, $H_0 = 80m$ pour le cas ici. La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-2 et ceux de la simulation dans la Fig. A5-5 est présentée dans la Fig. A5-6.

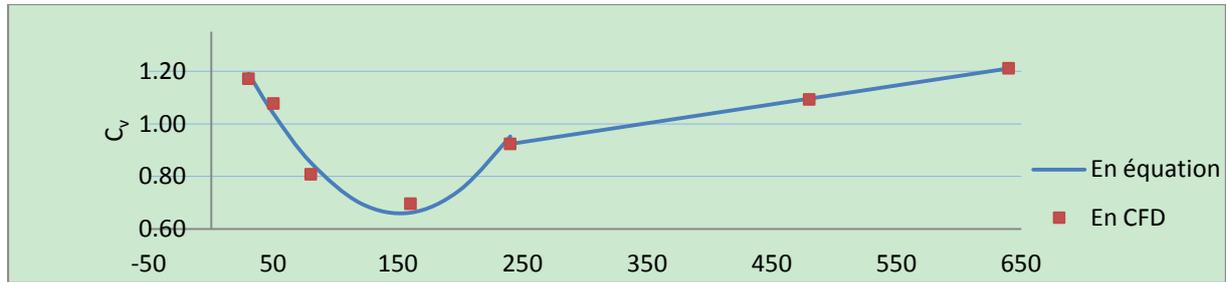
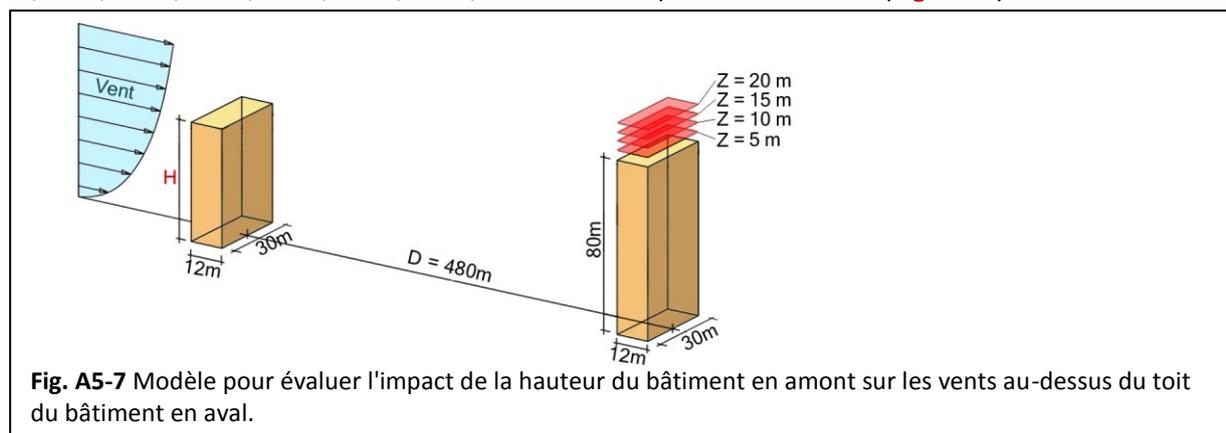


Fig. A5-6 Cohérence entre les résultats théoriques et ceux de simulation du C_v à $Z = 10$ m.

Annexe 5.2.2 Impact de la hauteur du bâtiment en amont

De la même taille en plan que la tour en aval, le bâtiment en amont garde une distance de séparation fixe ($D = 480\text{ m}$) avec la tour en arrière. Plusieurs hauteurs du bâtiment en amont ($H = 20\text{ m}, 30\text{ m}, 40\text{ m}, 50\text{ m}, 60\text{ m}, 70\text{ m}, 80\text{ m}, 90\text{ m}$ et 100 m) sont considérées (Fig. A5-7).



Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés parmi les modèles différents (Fig. A5-8). Des remarques suivantes peuvent être apportées.

- 1) La valeur du coefficient C_v diminue généralement avec l'augmentation de la hauteur du bâtiment en amont, à une altitude relativement élevée ($Z > 10\text{ m}$).
- 2) La descente de la valeur du coefficient C_v s'arrête lorsque la hauteur du bâtiment en amont atteint à une certaine niveau (ici $H = 90\text{ m}$).

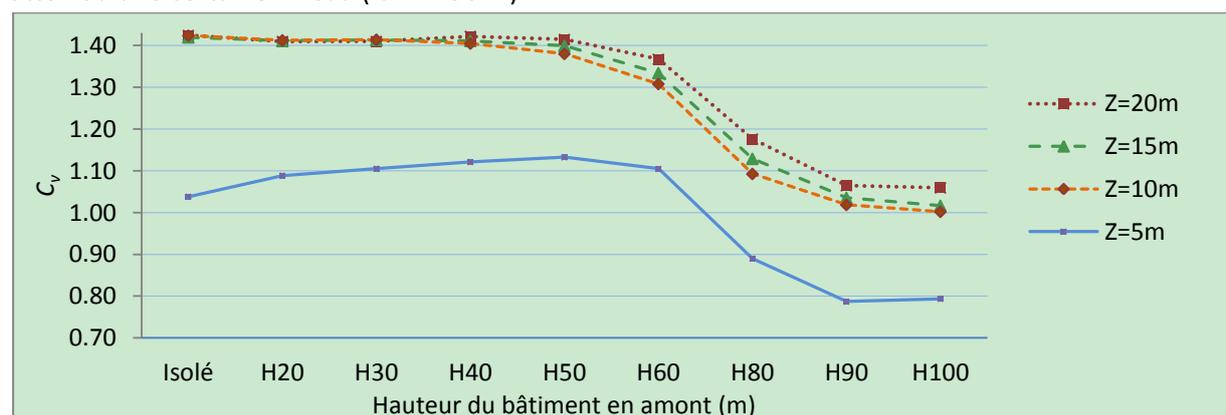


Fig. A5-8 Comparaison sur le coefficient C_v parmi les modèles de différentes hauteurs du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Si on cherche la relation entre la valeur du coefficient C_v avec la hauteur du bâtiment en amont H , une fonction peut être trouvée :

$$C_{v(H)} = 1,3 \cos\left[\frac{(HH_0 - 2400)}{6440}\right] + 0,1 \quad \text{Equation A5-3}$$

où H_0 est la hauteur de la tour d'étude. La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-3 et ceux de la simulation dans la Fig. A5-8 est présentée dans la Figure A5-9.

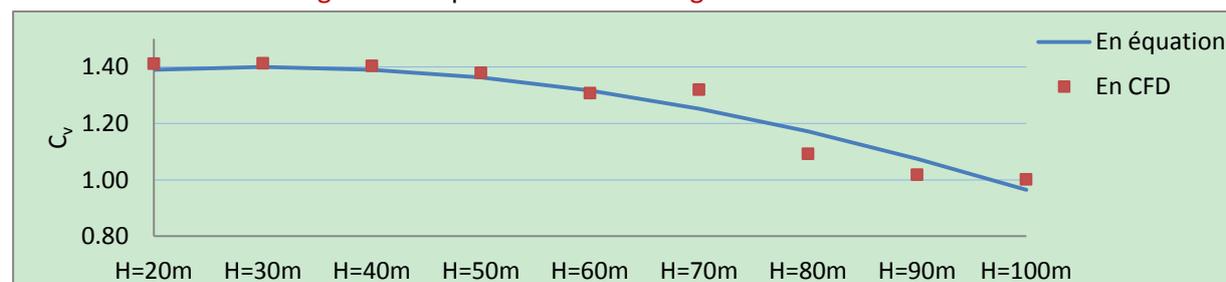


Fig. A5-9 Cohérence entre les résultats théoriques et ceux de simulation du C_v à $Z = 10\text{ m}$.

Annexe 5.2.3 Impact de la longueur du bâtiment en amont

Le bâtiment en amont garde une hauteur fixe ($H = 60\text{ m}$), une largeur fixe ($W = 12\text{ m}$) et une distance de séparation fixe ($D = 160\text{ m}$) avec la tour en arrière. Plusieurs longueurs du bâtiment en amont ($L = 20\text{ m}, 30\text{ m}, 40\text{ m}, 60\text{ m}$ et 90 m) sont considérées (Fig. A5-10).

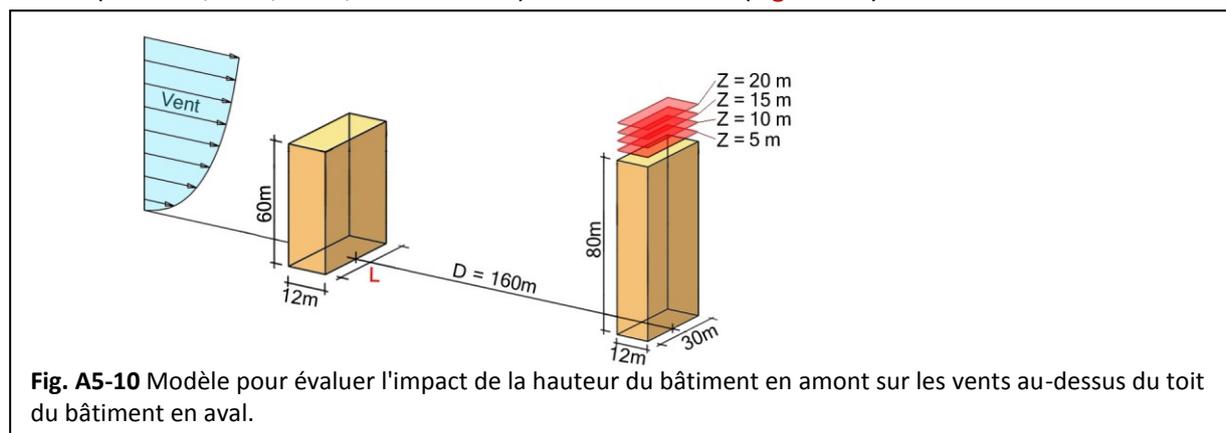


Fig. A5-10 Modèle pour évaluer l'impact de la hauteur du bâtiment en amont sur les vents au-dessus du toit du bâtiment en aval.

Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés parmi les modèles différents (Fig. A5-11). Des remarques suivantes peuvent être apportées.

- 1) La valeur du coefficient C_v diminue généralement avec l'augmentation de la longueur du bâtiment en amont, à une altitude relativement élevée ($Z > 10\text{ m}$).
- 2) L'ajout du bâtiment amont dans ce cas-là, quelle que soit sa longueur, ralentir les vents au-dessus du toit de la tour en aval, à une altitude élevée.

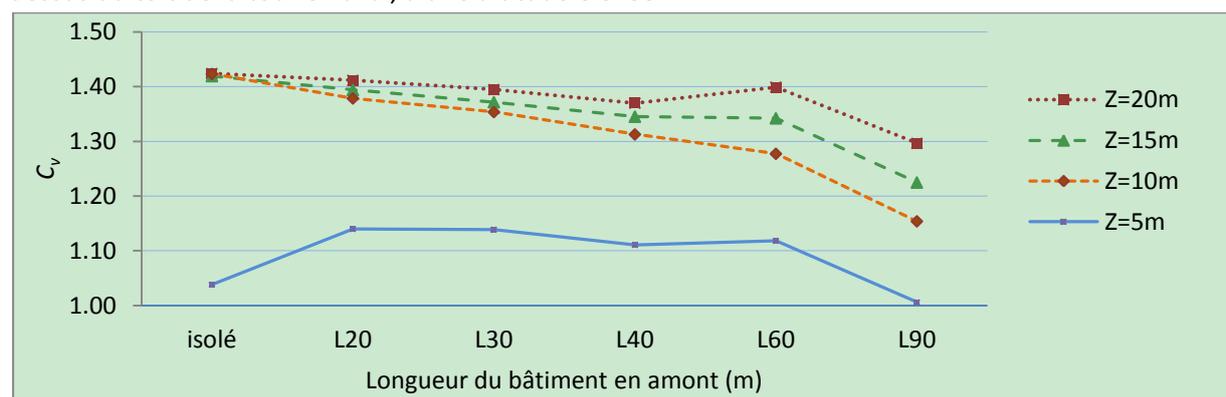


Fig. A5-11 Comparaison sur le coefficient C_v parmi les modèles de différentes longueurs du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Si on cherche la relation entre la valeur du coefficient C_v avec la longueur du bâtiment en amont L , une fonction peut être trouvée :

$$C_{v(L)} = \cos\left(\frac{LL_0}{3600}\right) + 0,4 \quad \text{Equation A5-4}$$

où L_0 est la hauteur de la tour d'étude, $L_0 = 30\text{ m}$. La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-4 et ceux de la simulation dans la Fig. A5-11 est présentée dans la Fig. A5-12.



Fig. A5-12 Cohérence entre les résultats théoriques et ceux de simulation du C_v à $Z = 10\text{ m}$.

Annexe 5.2.4 Impact du décalage de la tour en amont

Le bâtiment en amont garde la même taille que la tour en arrière. Plusieurs distances de décalage de la tour en amont ($d = 15\text{ m}, 30\text{ m}, 60\text{ m}, 90\text{ m}, 120\text{ m}$ et 180 m) et plusieurs distances de séparation entre les deux tours ($D = 160\text{ m}, 320\text{ m}$ et 640 m) sont considérées (Fig. A5-13).

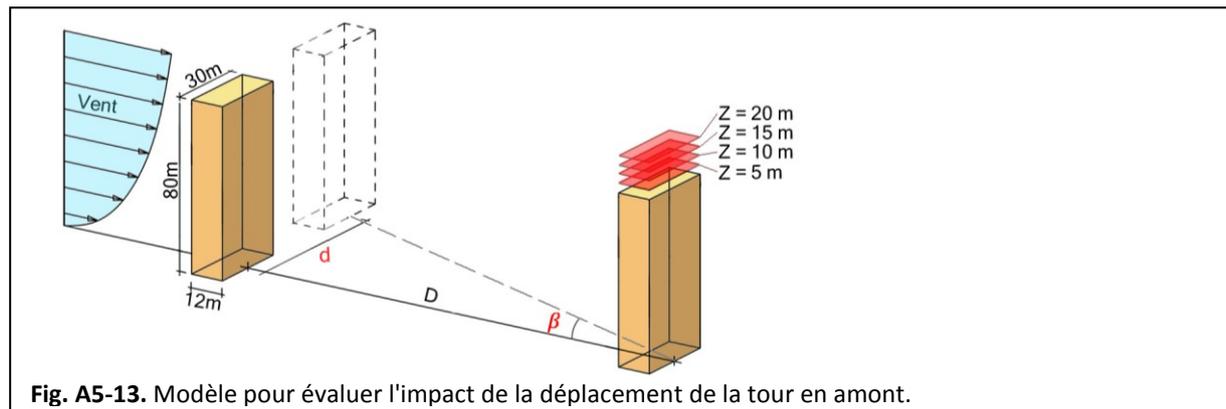


Fig. A5-13. Modèle pour évaluer l'impact de la déplacement de la tour en amont.

Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés parmi les modèles de différentes distances du bâtiment bas par rapport à la tour en amont et le modèle de référence sans le bâtiment bas (Fig. A5-14). Des remarques suivantes peuvent être apportées.

1) Pour les trois groupes de modèles (D160, D320 et D640), la valeur du coefficient C_v généralement augmente avec le décalage jusqu'à une distance de 60 m. Puis elle stabilise comme le cas d'un bâtiment isolé. On peut conclure que l'impact sur la tour en aval est insignifiant lorsque le décalage est supérieur à deux fois la longueur (correspond à la direction du vent) de la tour en amont.

2) A partir d'un décalage de 60 m, lorsque l'écoulement stabilise, les valeurs du coefficient C_v reste 1,4 à plusieurs hauteurs sur le toit.

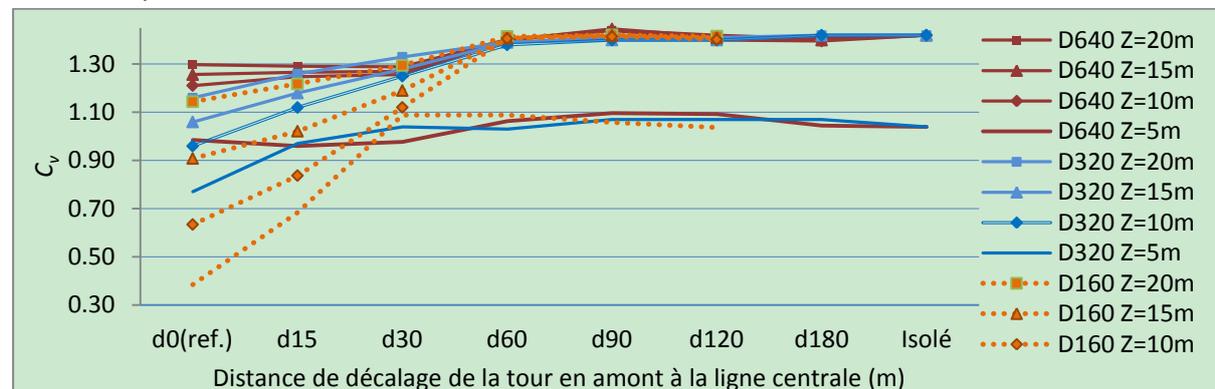


Fig. A5-14 Comparaison sur le coefficient C_v parmi les modèles de différentes décalage du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Si on cherche la relation entre la valeur du coefficient C_v avec le décalage du bâtiment en amont d , une fonction pour le cas de D320 peut être trouvée :

$$C_{v(d)} = 1,8 \cos\left(\frac{\beta - 28}{39}\right) - 0,34 \quad \text{Equation A5-5}$$

où $\beta = \tan^{-1}(d/D)$, $D = 320\text{m}$, $0^\circ < \beta < 30^\circ$. Si $\beta > 30^\circ$, $C_{v(d)} = 1,42$. La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-5 et ceux de la simulation est présentée dans la Figure A5-15.

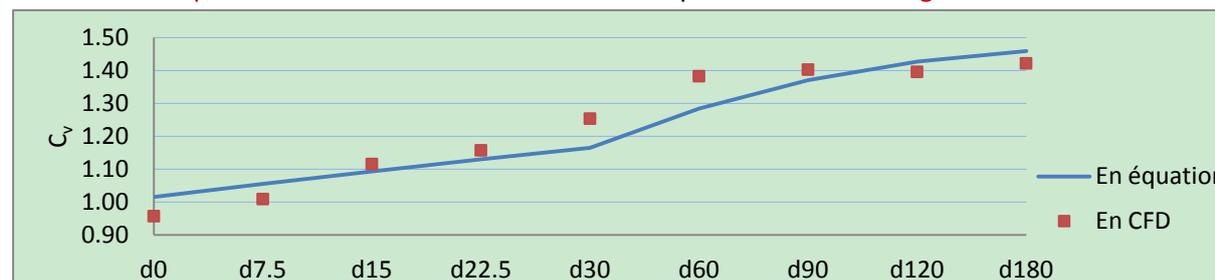


Fig. A5-15 Cohérence entre les résultats théoriques et ceux de simulation du C_v à $Z = 10\text{ m}$.

Annexe 5.2.5 Impact de l'ajout d'un bâtiment bas avant ou entre deux tours

Un groupe de modèles est simulé avec un bâtiment bas (longueur * largeur * hauteur = 30 m * 12m * 20 m) est rajouté au milieu ou avant les deux tours, pour évaluer l'impact d'une petite construction sur les vents au-dessus du toit d'une grande tour. Quatre positions du bâtiment bas (30 m / 80 m avant et après la tour en amont) et trois distances entre les tours (D = 160 m, 320 m et 640 m) seront évalués (Fig. A5-16).

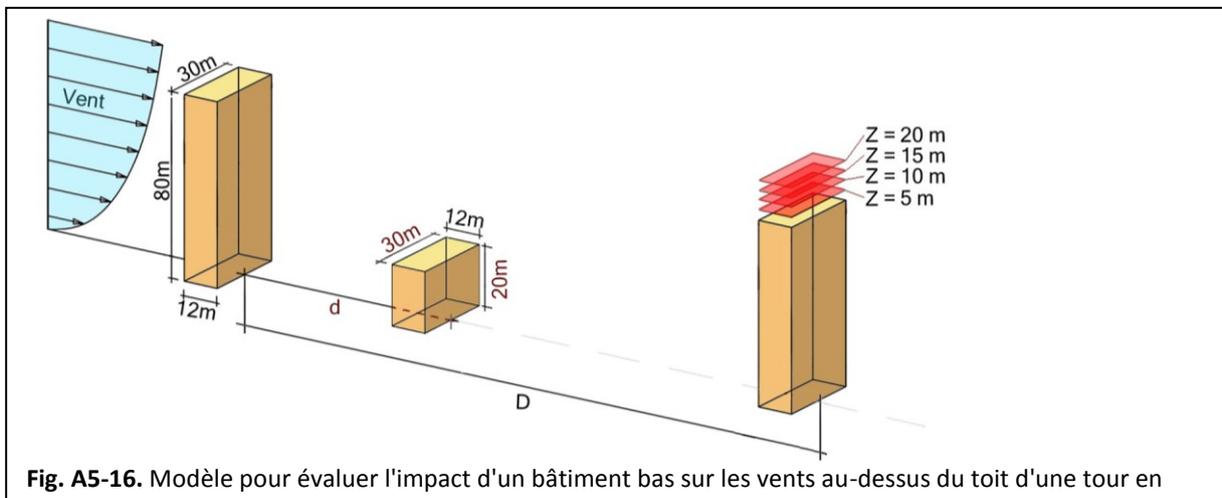


Fig. A5-16. Modèle pour évaluer l'impact d'un bâtiment bas sur les vents au-dessus du toit d'une tour en

Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés parmi les modèles de différentes distances du bâtiment bas par rapport à la tour en amont et le modèle de référence sans le bâtiment bas (Fig. A5-17). Des remarques suivantes peuvent être apportées.

1) La valeur du coefficient C_v présente une faible variation parmi les modèles de différentes positions du bâtiments bas pour tous les trois distances de séparation entre les tours. Pour le groupe de D640 m, le taux de variation moyenne (pondéré à plusieurs altitudes) est de 4,5 %, celui du groupe de D320 m est de 3 % et celui du groupe de D160 m est de 15 %. La variation importante du dernier groupe peut être provoquée par la turbulence élevée lorsque les tours sont proches. On peut donc dire que l'impact du bâtiments bas ($h < H/4$) est faible lorsque la distance de séparation entre les grands tours sont assez importante ($D > 4H$).

2) Dans le groupe D640 m, les valeurs du coefficient C_v du modèles de référence sont toujours la plus faible parmi celles des modèles de différentes positions du bâtiments bas. Pourtant, dans le groupe D160 m, celle-là ne jamais devient la plus faible parmi celles des modèles de différentes positions du bâtiments bas. On peut donc dire que l'ajout d'un bâtiment bas est généralement favorable pour un couple de tours avec une distance de séparation importante, même si l'impact est faible comme présenté ci-dessus.

3) Les modèles de positions du bâtiment bas entre les tours (d30, d80) ont une valeur du coefficient C_v un peu plus élevée que ceux de positions avant la première tour (d-30, d-80).

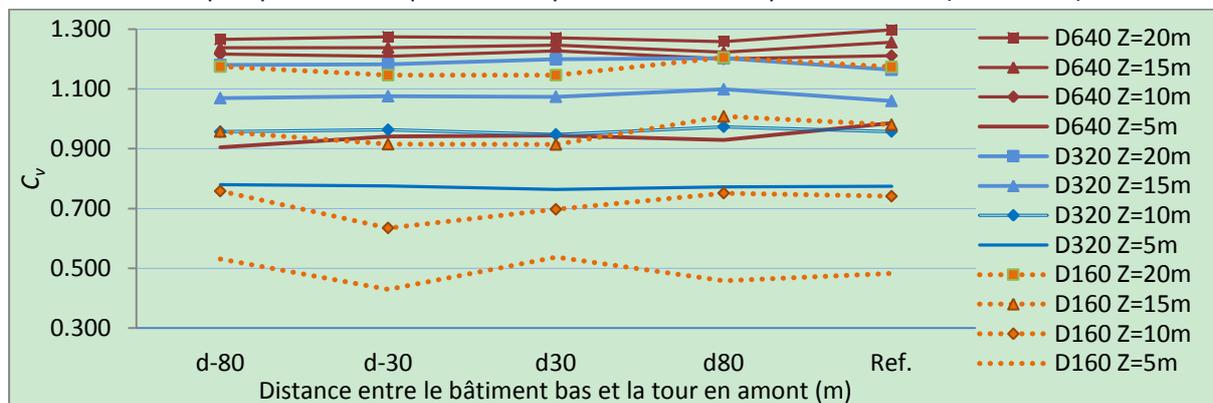


Fig. A5-17 Comparaison sur le coefficient C_v parmi les modèles de différentes positions d'un bâtiment bas sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Annexe 6.1 Résultats sur C_v et M' pour les modèles de quartier et les modèles d'unité

Les valeurs sur l'indicateur M' de modèles de quartier avec différents angles d'incidence du vent sont donnés dans les Fig. A4-1 a à f.

Les valeurs sur l'indicateur C_v de modèles d'unité avec différents angles d'incidence du vent sont donnés dans les Fig. A4-2 a à f.

Les valeurs sur l'indicateur M' de modèles d'unité avec différents angles d'incidence du vent sont donnés dans les Fig. A4-3 a à f.

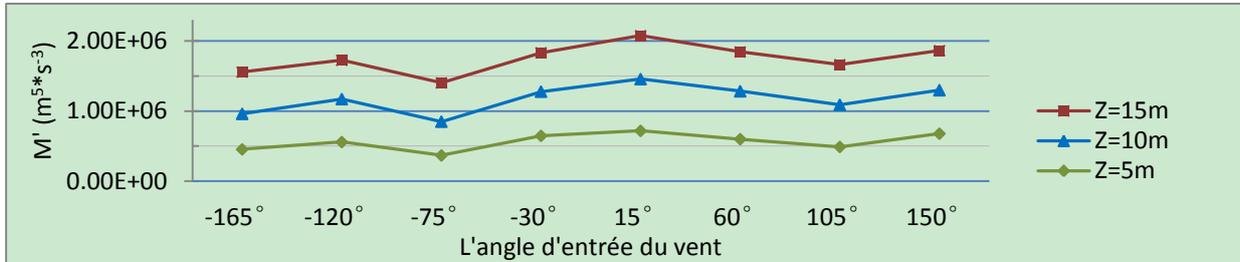


Fig. A4-1a Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Paris).

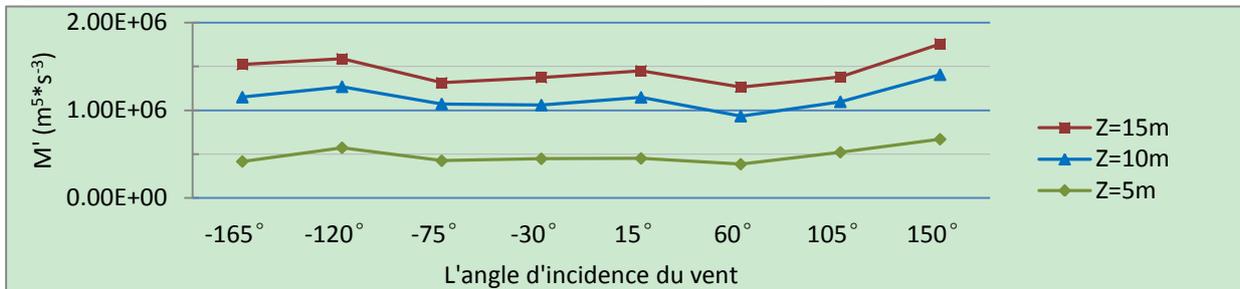


Fig. A4-1b Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Toulouse).

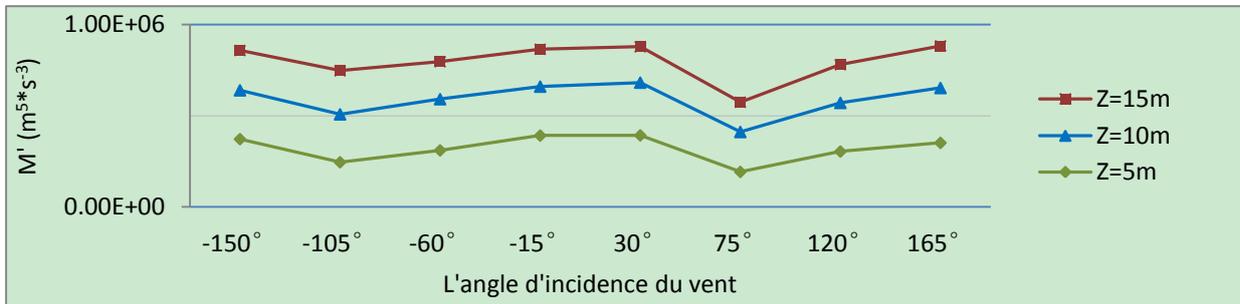


Fig. A4-1c Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Bombay).

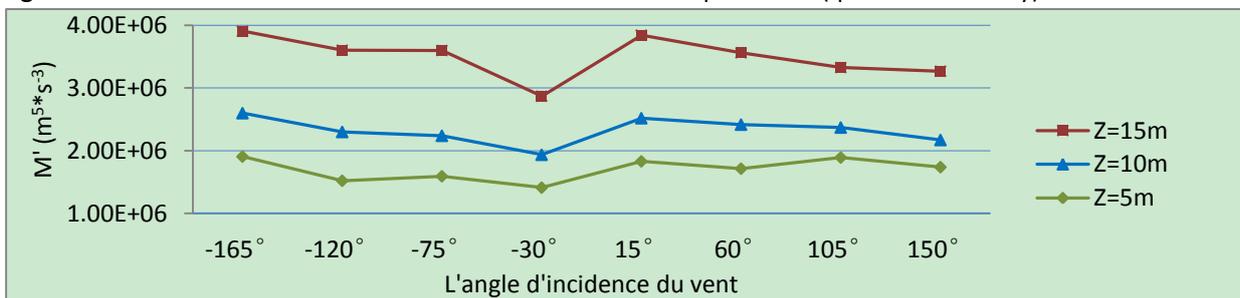


Fig. A4-1d Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Barcelone).

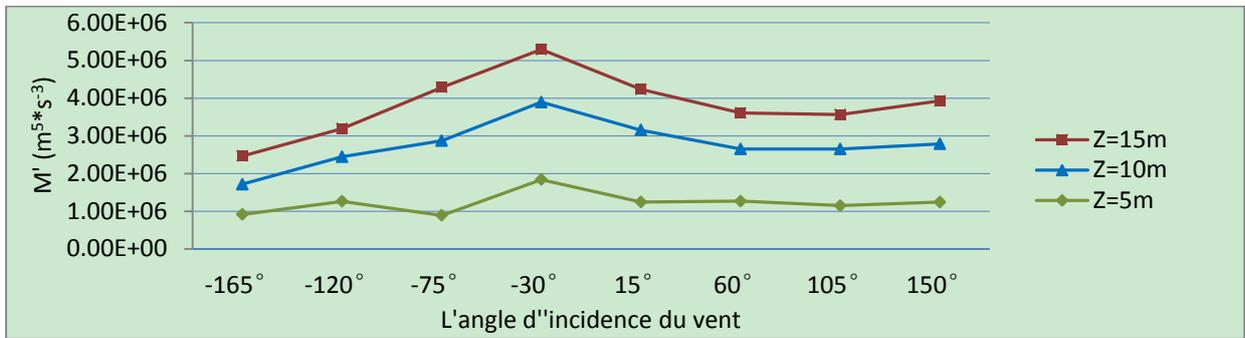


Fig. A4-1e Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à New York).

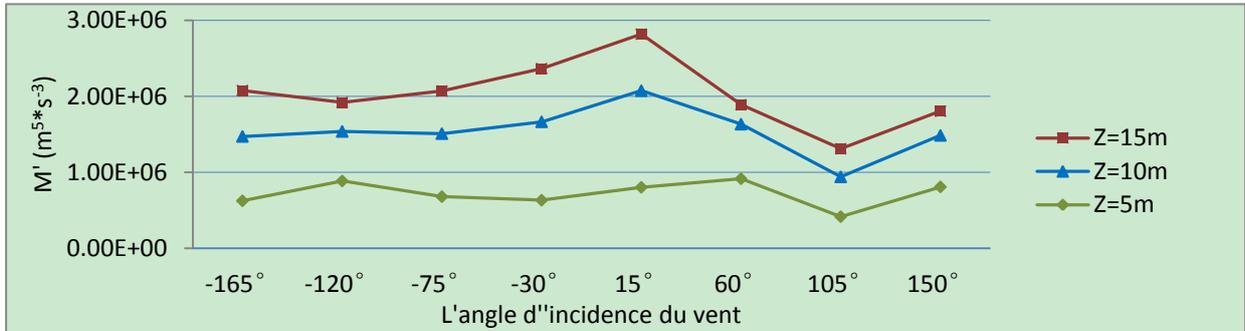


Fig. A4-1f Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Pékin).

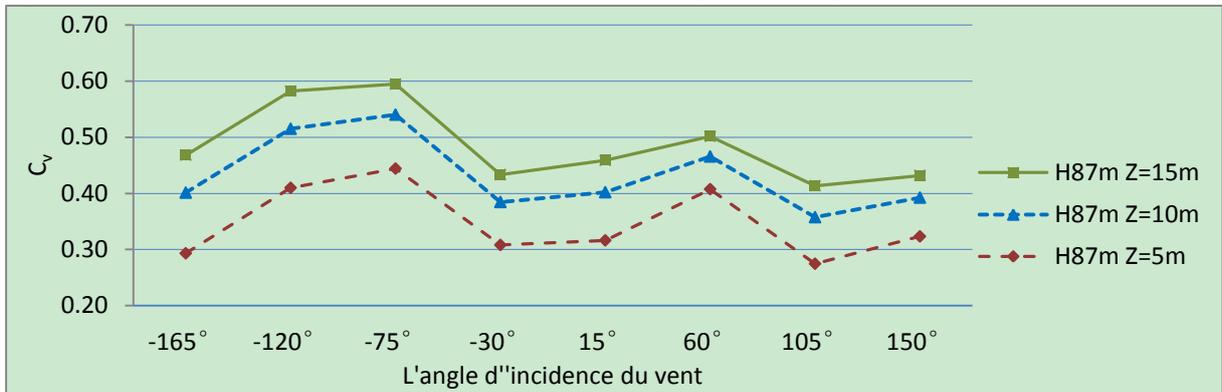


Fig. A4-2a Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 01, Pékin).

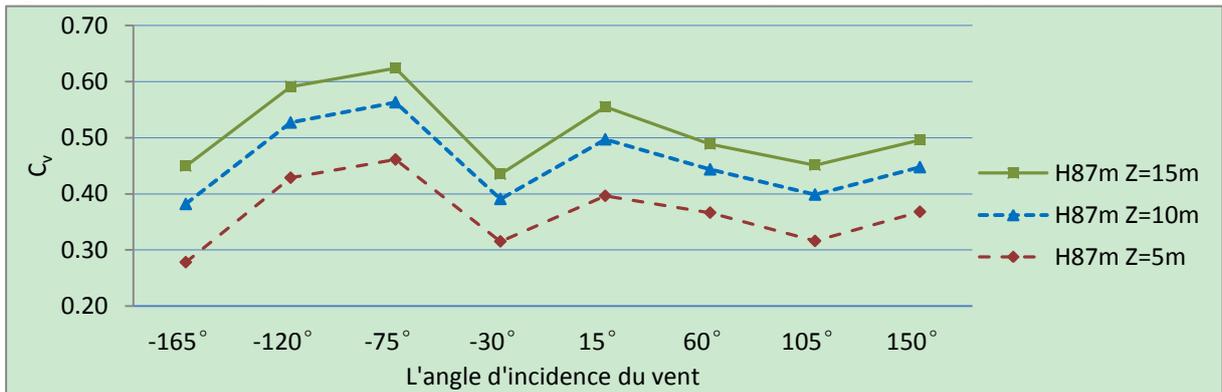


Fig. A4-2b Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 01b, Pékin).

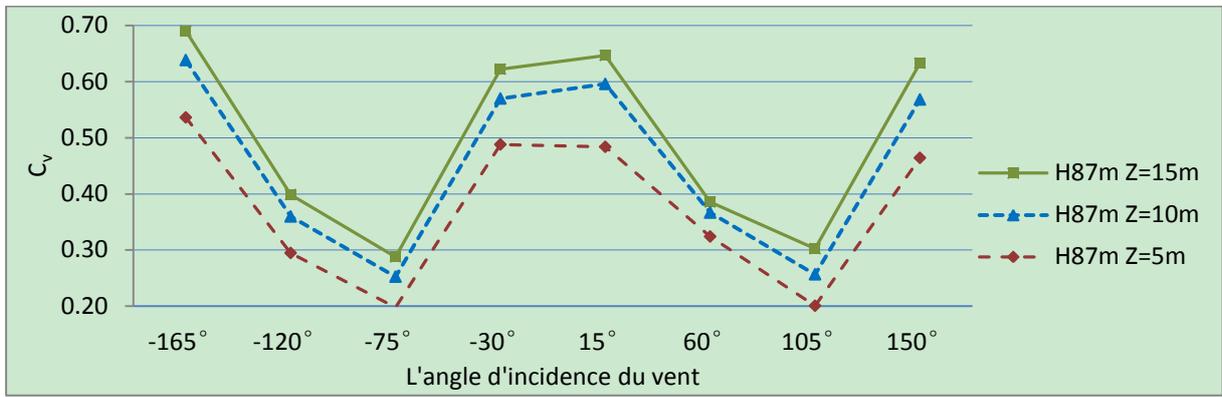


Fig. A4-2c Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 02, Pékin).

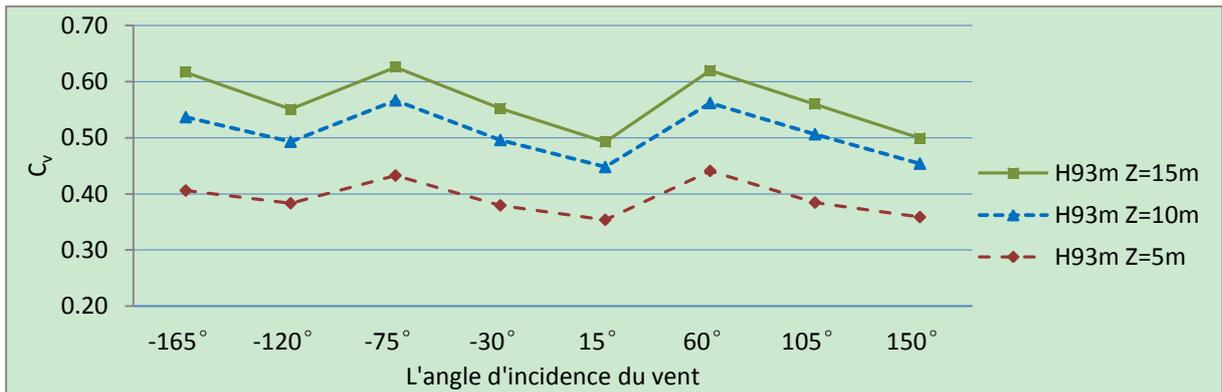


Fig. A4-2d Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 03, Pékin).

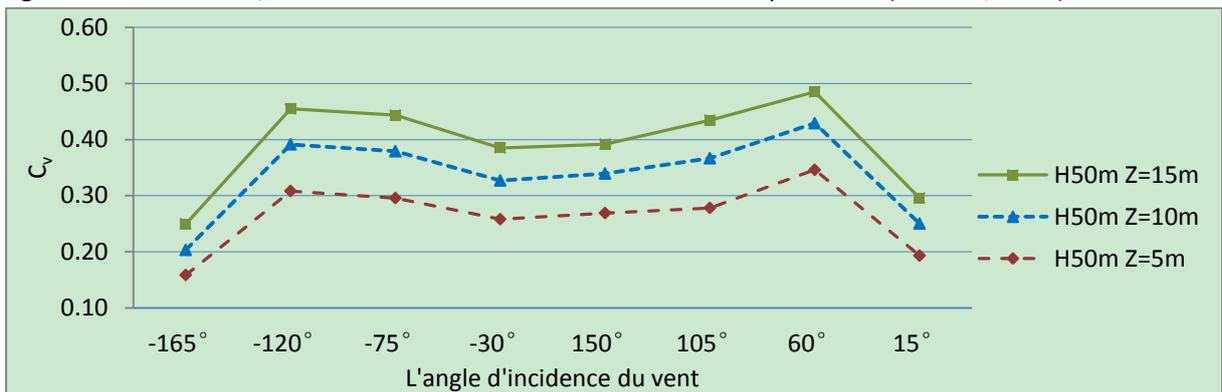


Fig. A4-2e Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 04, Hong Kong).

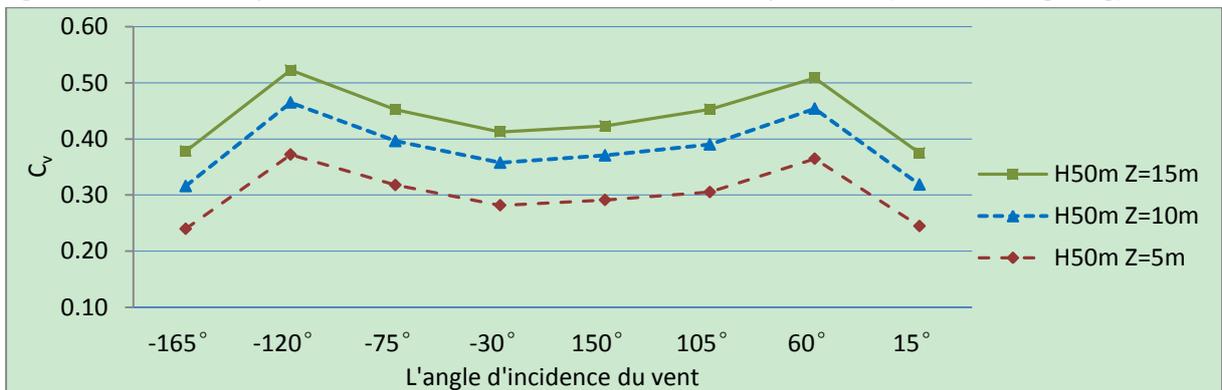


Fig. A4-2f Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 04b, Hong Kong).

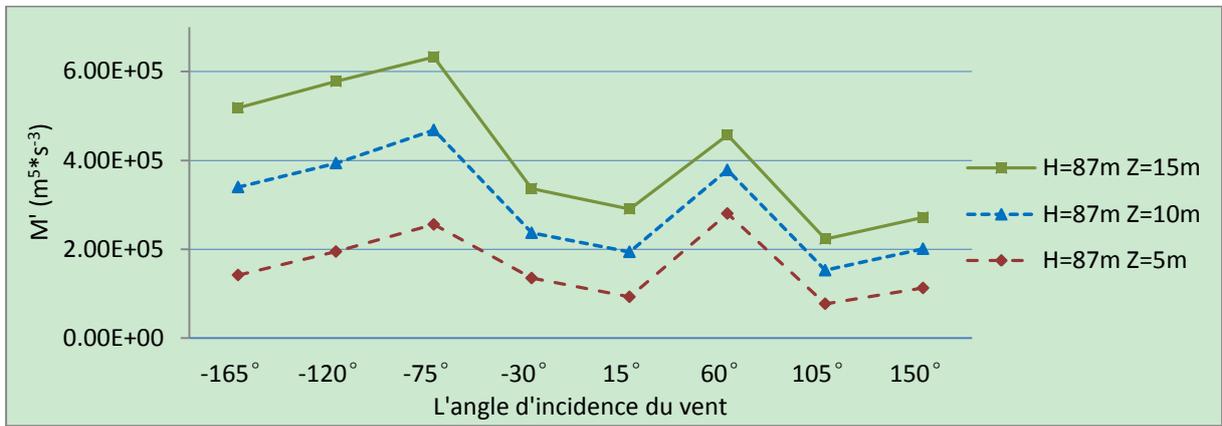


Fig. A4-3a Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 01, Pékin).

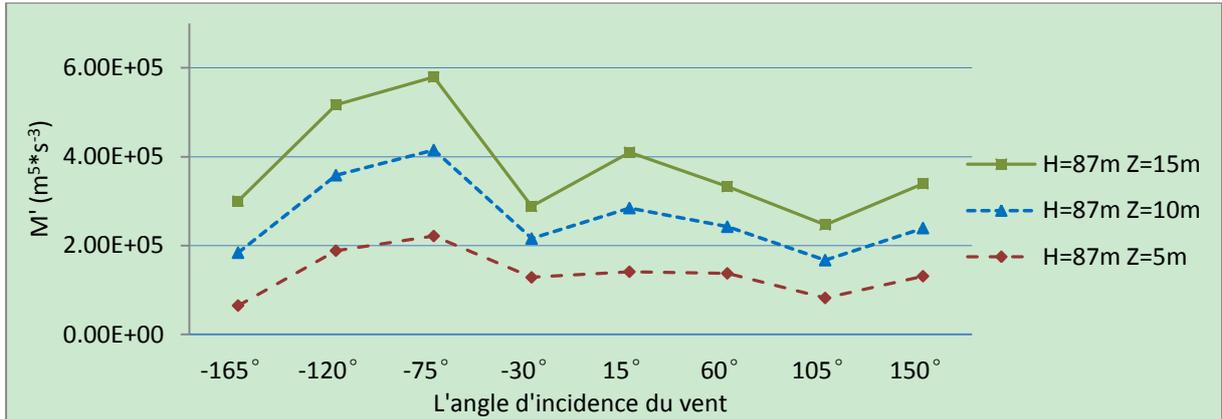


Fig. A4-3b Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 01b, Pékin).

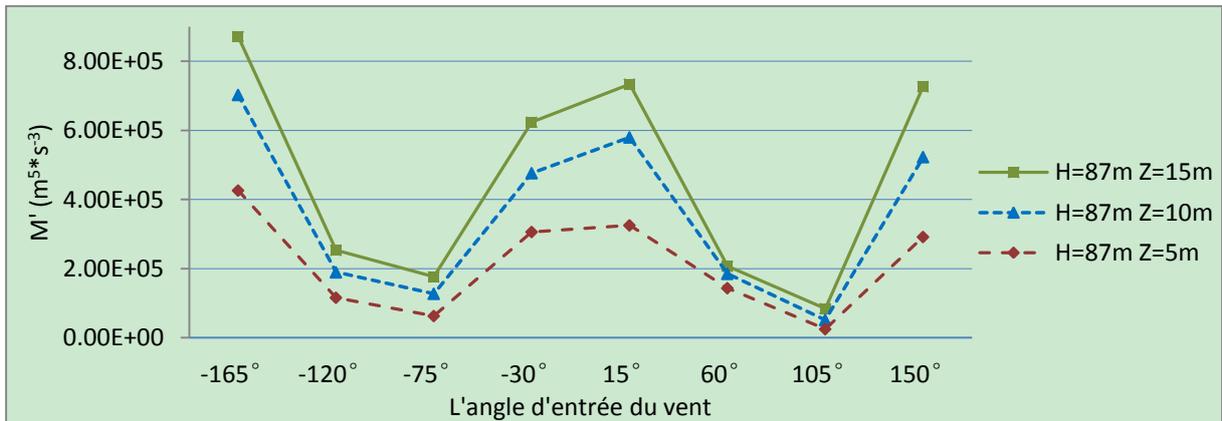


Fig. A4-3c Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 02, Pékin).

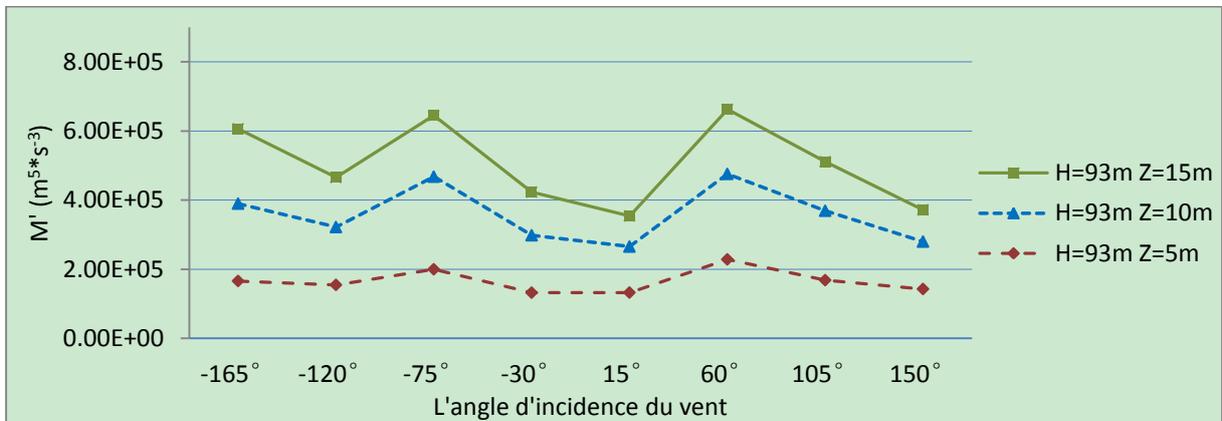


Fig. A4-3d Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 03, Pékin).

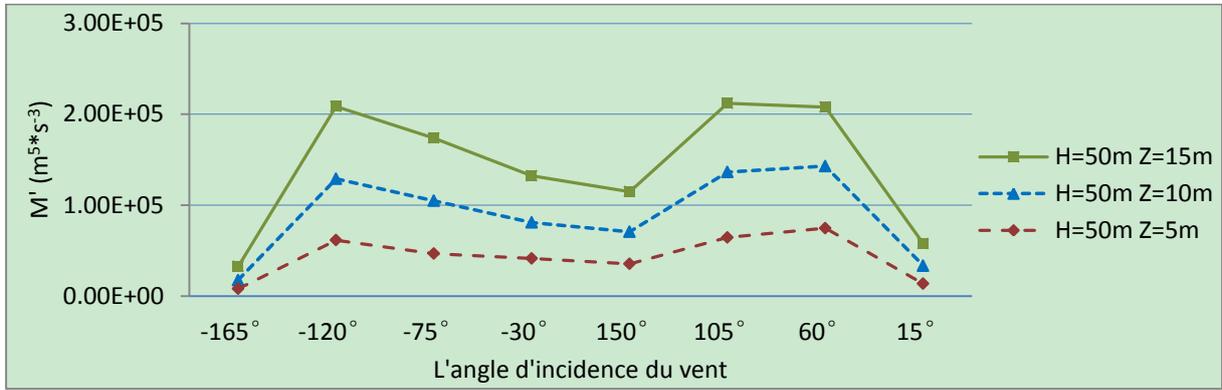


Fig. A4-3e Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 04, Hong Kong).

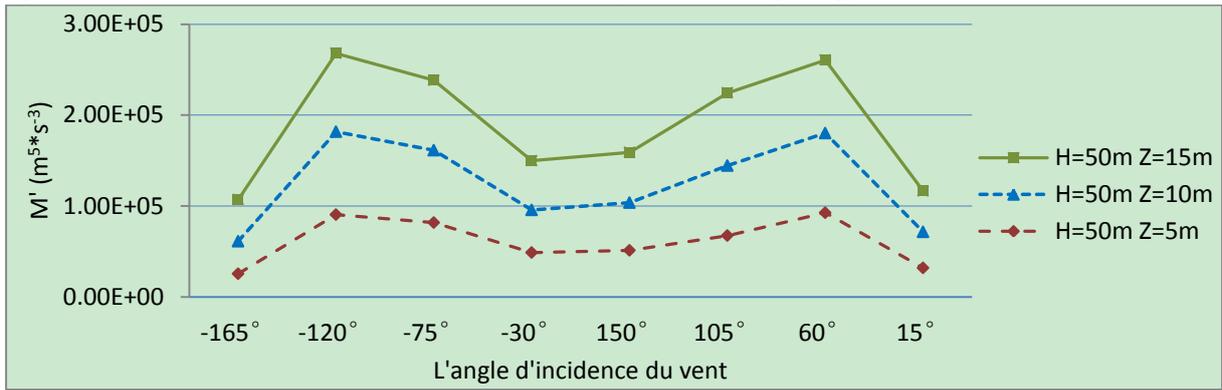
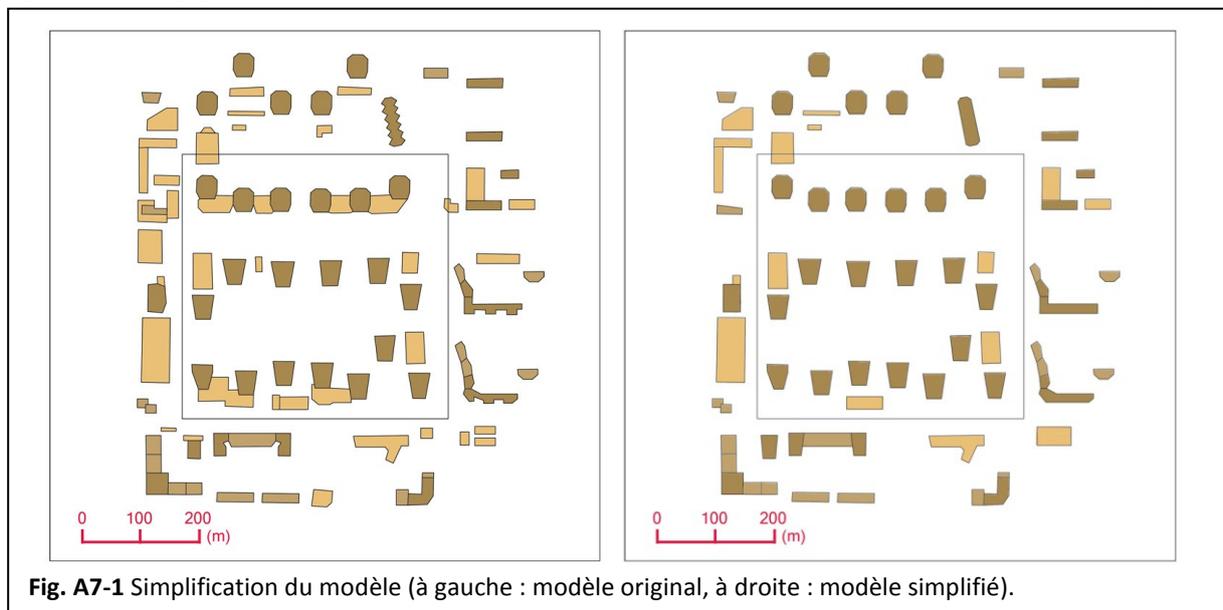


Fig. A4-3f Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 04b, Hong Kong).

Annexe 7.1 Evaluation de l'impact de la simplification du modèle

Afin d'économiser le temps de calcul, la simplification du modèle est nécessaire pour un modèle à l'échelle de quartier. Sur la base du modèle de quartier de Pékin présenté dans le chapitre 6, un modèle simplifié est proposé avec les mêmes paramètres. Tous les bâtiments inférieurs à 10 m dans le modèle original sont négligés. Les petites variations sur les volumes des bâtiments sont également négligés. Une comparaison en plan entre les deux modèles est présentée dans la Fig. A7-1.



Une comparaison statistique entre les maillages des deux modèles est donnée dans le Tableau A7-1. Nous pouvons voir que le nombre de maille du modèle simplifié est 24 % inférieure au nombre de mailles du modèle original. Les autres trois indicateurs montrent que la qualité générale du maillage est améliorée généralement. Notez que pour les indicateurs de qualité des éléments et de qualité orthogonale, une valeur plus élevée représente une meilleure qualité de maillage, alors que pour l'indicateur d'asymétrie, une valeur faible représente une meilleure qualité. Les écarts sur la vitesse du vent et l'indicateur M entre les deux modèles sont présentés dans le Tableau A7-2 et la Figure A7-2.

Tableau A7-1

Comparaison de statistiques de maillage entre le modèle original et le modèle simplifié

	Modèle original	Modèle simplifié	Ecart		Modèle original	Modèle simplifié	Ecart
Nombre de maille	2 796 897	2 124 931	-24.03 %				
Qualité moyenne des éléments	0,5706	0,5742	0,63 %	Ecart-type	0,3463	0,3538	2,17 %
Asymétrie moyenne	0,2971	0,2870	-3,40 %	Ecart-type	0,1423	0,1380	-3,02 %
Qualité orthogonale moyenne	0,8049	0,8084	0,43 %	Ecart-type	0,1504	0,1562	3,86 %

Tableau A7-2

Comparaison des résultats de simulation entre les deux modèles

	Z = 5 m	Z = 10 m	Z = 15 m	Moyenne
Vitesse du vent	7,22 %	7,04 %	7,17 %	7,14 %
Indicateur de l'énergie éolienne M	7,36 %	5,54 %	3,46 %	4,73 %



Fig. A7-2 Ecart de l'indicateur M entre les modèles du quartier de Pékin avant et après simplification.