



Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier

Biao Wang

► To cite this version:

Biao Wang. Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier. Energie électrique. INSA de Toulouse, 2015. Français. NNT : 2015ISAT0004 . tel-01245149

HAL Id: tel-01245149

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01245149>

Submitted on 16 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Présentée et soutenue par :

Biao WANG

le mercredi 8 avril 2015

Titre :

Les Impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent :
Performance énergétique éolienne à l'échelle du quartier

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :

LMDC - INSA Toulouse et LRA - ENSA Toulouse

Directeur/trice(s) de Thèse :

Luc ADOLPHE - Professeur des universités, INSA Toulouse

Léa D. COT - Maître de Conférences, INSA Toulouse

Jury :

Christian INARD - LEPTIAB-Université de La Rochelle (Rapporteur)

Marjorie MUSY - IRSTV-Ecole Centrale de Nantes (Rapporteur)

Luc ADOLPHE - INSA-Toulouse (Dierecteur de Thèse)

Léa D. COT - INSA-Toulouse (Codierectrice de Thèse)

Sandrine GEOFFROY - INSA-Toulouse, Université paul sabatier

Frédéric BONNEAUD - ENSA-Toulouse

Les Impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent :

Performance énergétique éolienne à l'échelle du quartier

Biao WANG

8 avril 2015

Remerciements

La vie est belle, la thèse est dure.

La difficulté vient de la nouvelle discipline (mécanique des fluides), du sens mathématique perdu au cours de longue ma formation architecturale, de la langue française et des différences culturelles entre la France et la Chine. Sans les aides chaleureuses et désintéressées des personnes suivantes, je n'aurais jamais fini ces travaux.

Profonds remerciements à :

- Luc Adolphe pour avoir encadré cette thèse et pour tous les encouragements, le soutien scientifique, l'accompagnement de la découverte et de la recherche, et l'énorme temps consacré à la correction de la rédaction de cette thèse. Grâce à son exemple, j'ai vu l'essence d'un vrai enseignant - chercheur ;
- Léa D. Cot pour le co-encadrement de thèse et pour toute la confiance sur le chemin de l'apprentissage et de la recherche, les cours de mathématiques, et aussi l'énorme temps consacré à la correction de la rédaction ;
- Sandrine Geoffroy pour tous les enseignements sur la mécanique des fluides, les soutiens sur les logiciels (FLUENT, BUT) et l'accompagnement solide des travaux de l'équipe ;
- Jérôme Morchain pour tous les enseignements sur la mécanique des fluides, les cours sur FLUENT, et l'accompagnement scientifique indispensable à l'avancement du travail ;
- Christian Inard, Majorie Musy et Frédéric Bonneaud pour les bons conseils de la thèse et les questions très intéressantes ;
- Alain Chatelet, Annie Loiseaux, Serge Faraut, Sophie Cordier et Patrice Pillot pour leur accueil chaleureux, soutien de communication de conférence, le partage de tous les bons moments au LRA ;
- Raoul François, Gilles Escadeillas et Anne Gelin pour leurs aides administratives au LMDC et à l'INSA ;
- mes collègues Marion, Tathiane, Duc, Uyen, Djamel, Samia, Zhe, Chen, Maja au LRA pour les discussions intéressantes sur le travail et sur la vie ;
- mes amis étrangers et chinois Luyen, Tatyana, Messaoud, Eric, Bernard, Wen jun, Ran, Jian, Ke, Ming, Shen wei, Yang... pour la joie et pour la tristesse passées ensemble ;
- mes amis chrétiens Jean-luc, Filomina, Tomé, Jean-Frédéric, Jouel, Daniel, Maïté, Eric... pour leur soutien spirituel et les discussions philosophiques ;
- mon cher pays, la Chine, pour le soutien financier et émotionnel ;
- ma famille. Bien qu'ils soient loins, leur soutien affectif est toujours le plus profond.

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 du 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 bibliographie sur les trois domaines : l'énergie éolienne urbaine, la morphologie urbaine et la simulation aéraulique. Les avantages et les inconvénients des éoliennes urbaines sont discutés. Des indicateurs de morphologie urbaine sont ainsi proposés. Les méthodes de simulation CFD (*Mécanique des fluides numérique*) sur l'écoulement du vent autour de bâtiments sont présentées. Des nouvelles technologies et des méthodes d'intégration architecturale de petites éoliennes 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 les simulations sont proposées. Après validation de notre modèle, des simulations de formes simples sont faites. 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 de formes urbaines typiques dans le monde 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 variantes de formes urbaines typiques sont étudiées. 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 existant à Pékin est ensuite évaluée. Des conditions locales (formes physiques, climat, aspects socio-économiques) 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.

Abstract

Impacts of Urban morphology on the wind: Wind power performance at 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 so, 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 wind energy, urban morphology and CFD (*Computational fluid dynamics*) simulation. 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. Indicators of urban morphology are proposed. The methods of CFD simulation of wind flow around buildings 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 configurations 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 urban forms both worldwide typical 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 some 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, social-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

Introduction	13
1. Problématiques	15
2. Objectif du travail	16
3. Méthodologie de la recherche	17
4. Structure de la thèse	19
Partie I	21
1. L'énergie éolienne en ville	23
1.1 L'énergie éolienne	25
1.1.1 Histoire du développement de l'énergie éolienne	25
1.1.2 Caractères généraux de l'énergie éolienne	27
1.2 L'éolienne urbaine	28
1.2.1 Types d'éolienne urbaine	28
1.2.2 Exemples d'éoliennes urbaines	29
1.2.3 Challenges de l'éolienne urbaine	32
1.3 Développement de l'énergie éolienne en ville dans le futur	37
1.3.1 Evaluation énergétique d'une éolienne	37
1.3.2 Recherche de l'implantation adaptée	43
1.3.3 Choix d'une éolienne adaptée	46
1.3.4 Règles de l'art pour mettre en œuvre une éolienne urbaine	47
1.4 Conclusion	52
2. Morphologie urbaine	53
2.1 Définition et contenu	55
2.1.1 Historique	55
2.1.2 Définition et objet d'étude	55
2.2 Classement de formes urbaines	58
2.3 Paramètres de forme urbaine	66
2.3.1 Trois catégories d'indicateurs	66
2.3.2 Choix des indicateurs	67
2.4 Environnement aéraulique et morphologie urbaine	69
2.4.1 Aérodynamique urbaine	69
2.4.2 Climat et forme urbaine	72
2.4.3 Ecoulement du vent autour de bâtiments	73
2.5 Conclusion	80
3. Modélisation du vent autour de bâtiments	81
3.1 Introduction : simulation de l'écoulement du vent par les méthodes CFD	83
3.2 Processus de modélisation par les méthodes CFD	85
3.2.1 Equations et principes de résolution	85
3.2.2 Méthodes de résolution et modèles de turbulence	86
3.2.3 Définition des conditions limites	89
3.2.4 Vérification et validation de la simulation CFD	90
3.2.5 Protocoles pour adapter les simulations aux pratiques	93
3.3 Bibliographie : simulation CFD du vent autour de bâtiments	95
3.3.1 Identification des emplacements favorables	95
3.3.2 Augmentation d'énergie éolienne par modification des bâti	97
3.4 Conclusion	103
Partie II	105
4. Méthode de validation et vérification	107
4.1 Validation du modèle paramétrique retenu	108
4.2 Vérification des simulations CFD	108
5. Simulation de modèles simplifiés de bâtiments	109
5.1 Indicateurs du potentiel éolien à l'échelle du bâtiment	111
5.1.1 Définitions des indicateurs	111

5.1.2 Indicateur équivalent	112
5.1.3 Evaluation de l'indicateur M	113
5.2 Simulation et potentiel éolien d'un bâtiment isolé	114
5.2.1 Impact du plan du bâtiment	114
5.2.2 Impact de la longueur du bâtiment	116
5.2.3 Impact de la largeur du bâtiment	117
5.2.4 Impact de la forme de la toiture	117
5.2.5 Impact de la forme du coin du bâtiment	120
5.2.6 Impact de la présence d'une cour	122
5.2.7 Impact du passage du vent	123
5.2.8 Impact de l'angle d'incidence du vent	126
5.2.9 Impact de la forme du bâtiment sur les vents à l'arrière du bâtiment	127
5.3 Simulation et potentiel éolien de deux bâtiments	130
5.3.1 Potentiel éolien de deux bâtiments en ligne par rapport au vent	130
5.3.2 Potentiel éolien de deux bâtiments parallèles	132
5.3.3 Potentiel éolien de deux bâtiments décalés	135
5.3.4 Potentiel éolien de deux bâtiments identiques perpendiculaires	137
5.3.5 Potentiel éolien de deux bâtiments identiques positionnés avec des angles variés	138
5.4 Simulation et potentiel éolien de trois bâtiments décalés	140
5.5 Conclusion	142
6. Simulation de modèles morphologiques complexes	149
6.1 Choix des indicateurs de forme urbaine pour évaluer le potentiel éolien	151
6.2 Impact des indicateurs sur le potentiel éolien	155
6.2.1. Impact de la porosité sur le vent	155
6.2.2 Impact de la densité sur le vent	158
6.3 Simulation préliminaire de six formes urbaines à l'échelle du quartier	161
6.3.1 Condition et exigences de simulation CFD pour les modèles de quartier	161
6.3.2 Description des indicateurs morphologiques de six quartiers réels	162
6.3.3 Résultats sur le rendement énergétique éolien des quartiers réels	165
6.3.4 Cohérence entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques	171
6.4 Simulations des modèles d'unité de forme urbaine	174
6.4.1 Description des indicateurs morphologiques des modèles d'unité urbaine	174
6.4.2 Résultats sur le rendement énergétique éolien des modèles d'unité urbaine	177
6.5 Conclusion	182
7. Développement et application de l'énergie éolienne en ville	185
7.1 Simulation et analyse du potentiel éolien du quartier Jinsong	187
7.1.1 Etat de lieu du quartier Jinsong	187
7.1.2 Conditions de simulation aédraulique	189
7.1.3 Description des paramètres morphologiques du modèle de Jinsong	191
7.1.4 Analyse des résultats	193
7.2 Proposition d'emplacement d'éoliennes et évaluation énergétique	196
7.2.1 Choix d'éoliennes adaptées et leur emplacement	196
7.2.2 Evaluation énergétique et faisabilité économique	197
7.3 Méthode mathématique pour prévoir l'impact de la morphologie urbaine sur le vent	200
7.3.1 Méthode mathématique pour évaluer l'impact d'obstacles au vent	200
7.3.2 Application et évaluation de la méthode mathématique	202
7.4 Conclusion	207
8. Conclusion générale	209
8.1 Résumé et conclusion	211
8.2 Evaluation de notre travail	215
8.3 Perspectives	216
Bibliographie	217
1. Livres, thèses et mémoires	217
2. Articles scientifiques	220
2.1 Les articles sur la morphologie urbaine et le climat du vent	220
2.2 Articles sur la modélisation CFD	223
2.3 Articles sur l'énergie éolienne en ville	226

3. Sites web	229
Table des figures	230
Table des tableaux	236
Annexe	238
Annexe 1. Sur l'énergie éolienne urbaine	238
Annexe 1.1 Comparaison de trois sources d'énergie renouvelable	238
Annexe 1.2 Composants d'une éolienne	239
Annexe 1.3 Classement des éoliennes	240
Annexe 2. Sur la morphologie urbaine	245
Annexe 2.1 Notions voisines de morphologie urbaine	245
Annexe 2.2 Classement de formes urbaines	246
Annexe 2.3 Résumé des indicateurs de la morphologie urbaine	251
Annexe 2.4 Formes urbaines adaptées aux différents types de climats	252
Annexe 3. Sur la modélisation CFD	253
Annexe 3.1 Modèles de turbulence de RANS	253
Annexe 3.2 Estimation de l'épaisseur de la première couche de maille	256
Annexe 4. Sur la méthode de validation et vérification	257
Annexe 4.1 Etude des paramètres CFD dans le modèle de validation	257
Annexe 4.2 Vérification des simulations CFD	261
Annexe 5. Sur la simulation des modèles simples	266
Annexe 5.1 Impact de la hauteur du bâtiment sur le vent à l'arrière	266
Annexe 5.2 Impacts morphologiques sur les vents au-dessus du toit d'une grande tour	268
Annexe 6. Sur la simulation des modèles de quartier	274
Annexe 6.1 Résultats du coefficient C_v et de l'indicateur M' pour les modèles de quartier	274
Annexe 6.2 Résultats du coefficient C_v et de l'indicateur M' pour les modèles d'unité	276
Annexe 7. Sur l'application et l'évaluation d'un quartier réel	279
Annexe 7.1 Evaluation de l'impact de la simplification du modèle	279

Nomenclature

C_v	[-]	Coefficient d'augmentation de la 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 CFD)
α	[-]	Exposant 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	[$^\circ$]	Angle d'incidence du vent
λ_a	[-]	Coefficient d'occupation des sols (COS)
λ_c	[-]	Prospect moyen
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 , représentatif de l'impact d'obstacle dans l'écoulement
\bar{V}_b	[m^3]	Volume moyen de construction
H	[m]	Hauteur du bâtiment
\bar{H}	[m]	Hauteur moyenne des bâtiments
L	[m]	Longueur du bâtiment, taille de la maille du bâtiment (pour le maillage)
\bar{L}	[m]	Longueur moyenne des bâtiments
W	[m]	Largeur du bâtiment
\bar{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
N_p	[-]	Nombre de changements d'ordre entre séquences
E_a	[/]	Erreurs absolue
E_r	[%]	Erreurs relatives
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_g	[m]	Hauteur de la couche limite de terrain (couches de surface)
Z	[m]	Altitude d'évaluation au-dessus du toit

Introduction

Dans l'introduction, le cadre général de thèse est présenté : les problématiques, l'objectif du travail, la méthodologie de la recherche et la structure de la thèse.

1. Problématiques

En écho à des situations internationales et locales fréquentes aujourd'hui, 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 de l'air et l'effet de serre, sont parmi les causes principales du changement climatique auquel nous sommes confrontés. L'influence du 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 diminue actuellement de 13,3 % par décennie, par rapport à la moyenne entre 1981 et 2010¹. Compte tenu des autres sources de l'évolution du climat 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, connaît donc une croissance importante.

2) Les inconvénients et les restrictions sur le développement des parcs éoliens

Aujourd'hui, on construit principalement des fermes éoliennes de grande puissance et d'efficacité élevée. Depuis le premier parc 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 parcs sont souvent placés dans les zones rurales, sur les côtes ou en « off-shore » où l'on peut profiter au mieux d'espaces ouverts et ventés. Pourtant, il y a peu d'habitants et peu de consommation d'électricité là-bas. Donc les problèmes de transport de l'électricité sur une longue distance deviennent très prégnants. On a besoin de grand investissement pour les câbles, les pylônes, et la perte durant le transport est relativement importante, voir 7 à 10 % (Burton 2001, Manwell 2002). De plus, jusqu'à présent on n'a pas trouvé de moyen efficace pour stocker cette électricité, notamment sur le long terme. Il existe un risque de surproduction importante alors que la demande énergétique dans les zones concernées est assez faible. 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 localement et les modèles de production polyénergies moins centralisés. Dans ce contexte, il est utile de considérer la possibilité de développer des petites éoliennes urbaines proches des usagers. De plus, l'existence de grandes tours et les effets du vent provoqués par les bâtiments offrent des conditions favorables pour installer des petites éoliennes en ville.

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

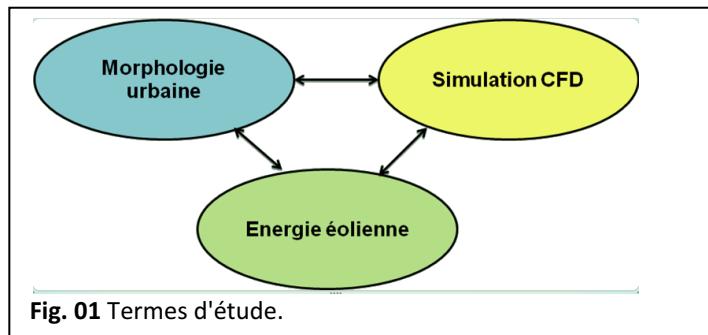
² Kayla Friedman, Alison Cooke. *City versus national energy use: implications for urban energy policy and strategies*. Procedia Engineering 21 (2011) 464-472.

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, *Éoliennes en milieu urbain - Etat de l'art*. ARENE Ile-de-France, janvier 2006, p8.

2. Objectif du travail

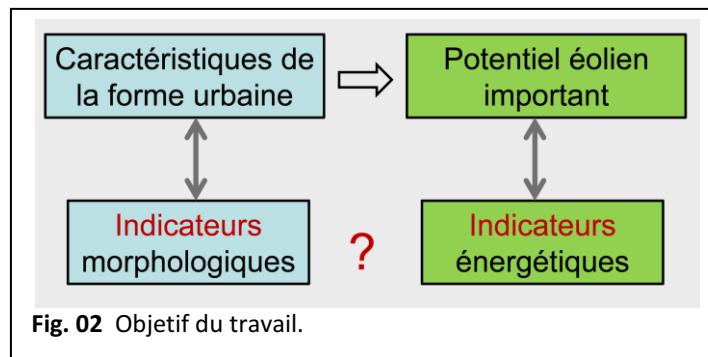
Comme le montre la [Fig. 01¹](#), la thèse se focalise autour de trois termes : la morphologie urbaine, la simulation CFD et l'énergie éolienne. En fait, la morphologie urbaine peut être considérée comme la condition, la condition initiale qui définit quelle forme des villes sont capables d'accumuler un potentiel éolien important et où sont les lieux adaptés pour exploiter l'énergie éolienne. L'énergie éolienne est l'objectif. La simulation CFD est la méthode principale du travail. Elle permet de faire le lien entre la condition et le résultat. Dans le cadre de l'urbanisme, nous allons proposer des recommandations pour le choix d'éoliennes et pour leur mise en œuvre en milieu urbain.



Notre travail 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 dans la ville ?

Donc, notre objectif du travail, c'est d'analyser les caractéristiques des formes urbaines et leurs rendements énergétiques éoliens. C'est-à-dire, les conditions et les résultats. Pour rendre le travail plus précis et plus pratique, nous adoptons deux groupes des indicateurs, indicateurs morphologiques et indicateurs énergétiques éoliens. Et on va voir quelle est la relation entre les deux, quel niveau de cohérence entre un indicateur morphologique et un indicateur énergétique éolien ([Fig. 02](#)).



¹ Source : l'auteur. Toutes les figures qui suivent sans indications de sources sont de l'auteur.

3. Méthodologie de la recherche

En premier lieu, notre travail a débuté par une étude bibliographique exhaustive qui a permis la structuration 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 comme l'utilisation des logiciels et les méthodes d'évaluation du potentiel éolien.

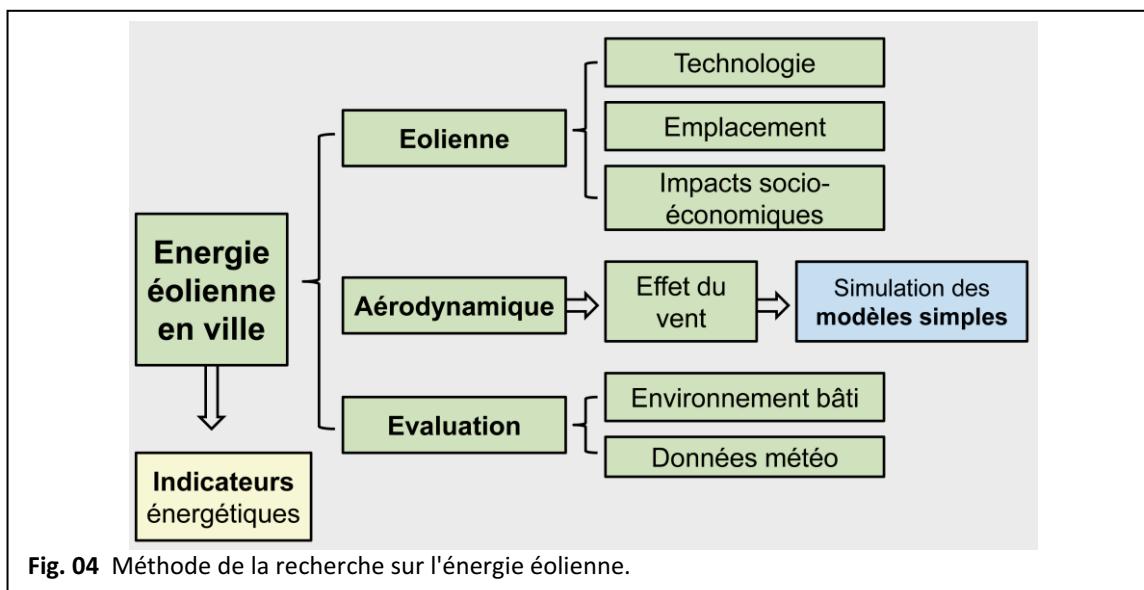
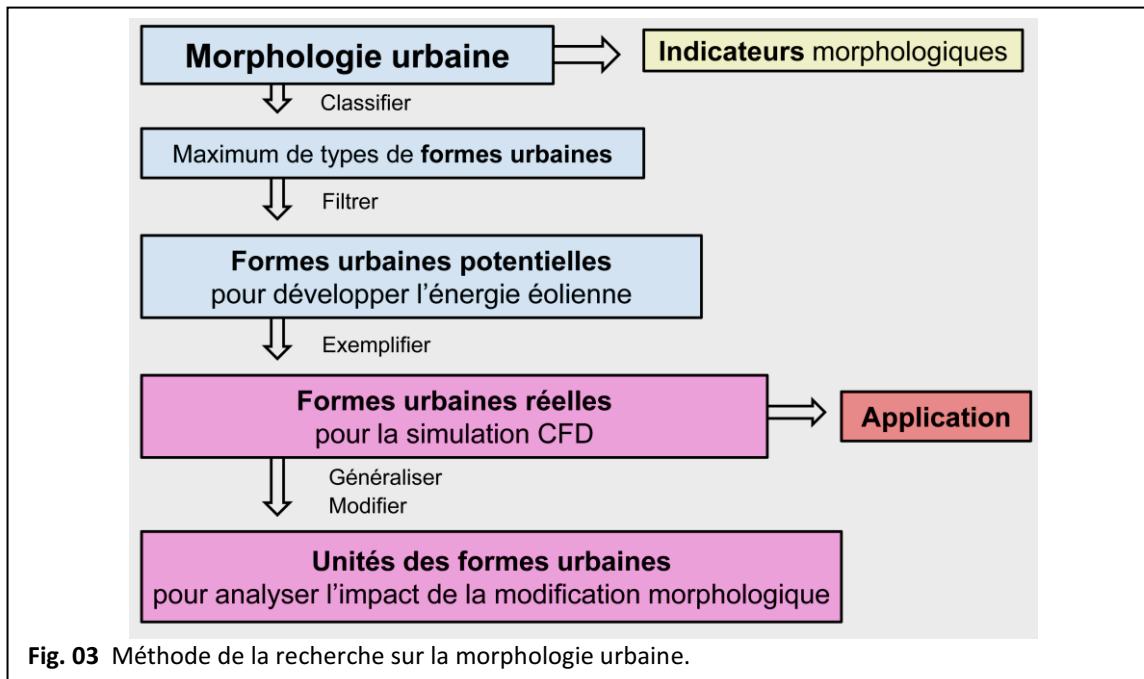
La modélisation numérique, liée à l'analyse théorique, est la seconde méthode de recherche principalement utilisée dans cette thèse. La modélisation est prévue en deux étapes :

- la première étape associée au développement des modèles basés sur des formes simples (un ou deux bâtiments) qui fourniront une base de connaissance sur l'impact de la morphologie urbaine sur le vent et sur des comparaisons entre des différents paramètres,
- la seconde étape basée sur l'analyse d'îlots réels dans des villes à l'échelle du quartier (environ 450 m × 450 m). Grâce à leur simulation, les caractéristiques des formes urbaines favorables pour développer l'énergie éolienne et les meilleurs endroits pour l'implantation des éoliennes sont déterminés.

Concernant les outils de simulation, nous utilisons principalement le logiciel FLUENT qui a déjà été intégré dans un plateau « Benchwork » du code Ansys et nous utilisons les fonctions de modélisation, de maillage, de calcul et d'analyse des résultats. Cependant, d'autres logiciels comme Autocad, Photoshop, Excel et Matlab sont aussi utilisés pour dessiner et analyser des données.

Concernant la méthode de recherche sur la morphologie urbaine, un schéma de processus de travail est donné (Fig. 03). Au début, différents classements de la morphologie urbaine peuvent être trouvés dans la littérature, et nous regroupons le maximum des types de formes urbaines présents aujourd'hui. Ensuite, nous filtrons les types qui sont potentiellement favorables pour développer l'énergie éolienne. Et après, parmi ces types potentiels, nous choisissons des exemples, des formes urbaines réelles à l'échelle du quartier (environ 450 m × 450 m), pour la simulation CFD. Ensuite, nous trouvons des unités des formes urbaines, qui peuvent être utilisées dans une ville moderne du monde. Nous cherchons leurs différences sur le rendement énergétique éolien. Nous faisons aussi des petites modifications sur les unités afin de trouver une action positive pour augmenter le potentiel éolien. Enfin, un exemple sur l'application d'évaluation du potentiel éolien en milieu urbain est donné sur un quartier réel.

Pour la méthode de la recherche sur l'énergie éolienne en ville, un schéma de termes liés de ce domaine est illustrée (Fig. 04). D'abord, nous étudions les aspects sur les éoliennes : la technologie, l'emplacement, les problèmes socio-économiques. Ceux-ci nous permettent d'avoir l'état de l'art sur les éoliennes qui peuvent s'adapter à l'environnement urbain. De plus, c'est la théorie aérodynamique. Elle est importante pour comprendre la mécanique d'une éolienne, le problème de la couche limite dans la simulation. Et surtout, elle concerne les effets du vent autours de bâtiments. Basé sur les effets de concentration du vent, les modèles simples pour la première étape de simulation CFD peuvent être choisis et testés. Ensuite, sur l'évaluation de l'énergie éolienne, nous devons bien analyser les impacts de l'environnement bâti, et avoir les données météos sur la distribution du vent local.



4. Structure de la thèse

Cette thèse est structurée en deux parties. La première partie est centrée sur la synthèse bibliographique qui porte sur 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 présente l'utilisation de l'énergie éolienne et l'application des éoliennes en ville. Trois thèmes sont abordées : l'énergie éolienne, l'éolienne urbaine et le développement de l'énergie éolienne en ville dans le futur. Les challenges et les problèmes liés à l'utilisation d'une éolienne urbaine sont présentés. L'évaluation de l'énergie éolienne est discutée. Des propositions de nouvelles technologies d'éolienne et des conceptions innovantes de l'intégration architecturale sont présentées.

Le deuxième chapitre est centré sur la morphologie urbaine. L'historique, la définition et les différentes classifications sont présentés. Des paramètres et des indicateurs de forme urbaine sont analysés. En outre, concernant la relation entre l'environnement aéraulique 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 troisième chapitre concerne les travaux sur la simulation CFD de l'écoulement du vent dans un environnement bâti. Différentes méthodes numériques CFD et différents modèles de turbulence sont présentés et comparés. La littérature sur les processus de validation ainsi que les lignes directrices pour adapter les simulations aux cas pratiques sont présentées. 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 proposés.

Le quatrième chapitre concerne la validation et la vérification de notre modèle de simulation 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 faits pour trouver les meilleures valeurs des paramètres du code CFD. Pour la vérification, des approches pratiques comme l'étude de la cohérence du flux 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 déterminer le potentiel éolien. Différentes formes de bâtiment isolé, différentes configurations à deux bâtiments et à trois bâtiments sont étudiées.

Le sixième chapitre présente la simulation de modèles complexes. Des indicateurs de forme urbaine sont choisis et définis. Six modèles de quartiers réels sont simulés et analysés. Les performances du vent dans ces modèles sont discutées et comparées en cherchant les relations entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques. En outre, des modèles d'unité avec des bâtiments simplifiés avec ou sans variantes sont testés. Des prototypes d'unité à l'échelle du quartier favorables pour l'exploitation d'énergie éolienne sont proposés.

Le dernier chapitre présente la méthode d'évaluation détaillée de l'énergie éolienne dans un quartier réel. Des facteurs socio-économiques ainsi que les climats locaux 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 de l'évaluation de l'énergie éolienne dans différentes positions est présenté.

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 choisi et défini. La cohérence entre les résultats de la méthode mathématique et ceux de la simulation CFD est également analysée.

Partie I

Approche théorique et synthèse bibliographique

Dans cette partie, les approches théoriques sont introduites selon trois axes : l'énergie éolienne en ville, la morphologie urbaine et la modélisation du vent. Les points de vue importants et les résultats intéressants pour notre sujet sont présentés dans la synthèse bibliographique. C'est sur la base de cette partie que les objectifs de recherche ont été définis et que les simulations numériques ont été définies.

1. L'énergie éolienne en ville

Dans ce chapitre, nous présentons 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.

Au début, une brève introduction sur le développement de l'énergie éolienne et ses caractéristiques ouvre ce chapitre. Ensuite, à propos de l'éolienne urbaine, ses composantes, ses différentes types et des exemples sont présentés. Les challenges et les problèmes techniques et socio-économiques de cette application sont abordés. Ensuite, les termes techniques liés à la physique et à la mécanique de l'éolienne sont 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'éoliennes et des conceptions architecturales innovantes sont présentées. Enfin, suite à un résumé de littérature dans ce domaine, des règles de l'art pour développer l'énergie éolienne urbaine dans l'avenir sont proposées.

1.1 L'énergie éolienne

Le vent est un phénomène naturel, globalement provoqué par un réchauffement inégal 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 à $2,74 \times 10^9$ MW, dont 2×10^7 MW pourrait être exploitée, ce qui représente 10 fois la puissance d'énergie exploitable de l'eau sur Terre (Zhang 2010). En tant qu'énergie renouvelable, l'énergie éolienne a été connue et utilisée depuis longtemps et la technologie est bien développée aujourd'hui.

1.1.1 Histoire du développement de l'énergie éolienne

Il y a longtemps que l'homme a commencé à utiliser 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 utilisé 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 utilisant une roue entraînée par le vent pour jouer de l'orgue¹. Vers 700 - 900, on trouve en Perse l'utilisation de roues rudimentaires à axe vertical à énergie éolienne servant à l'irrigation et pour écraser du grain². 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 Castelnau-d'Oléron (Fig. 1-1-1) est un des derniers exemples de moulins fariniers et a fonctionné jusqu'en 1921³.

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 puissance de 12 kW⁴. Une 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 année⁵. 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.

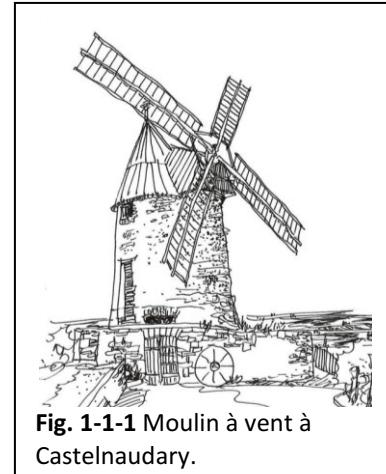


Fig. 1-1-1 Moulin à vent à Castelnau-d'Oléron.

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, redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne. Le Tableau 1-1 montre clairement les étapes de développement d'éolienne dans différents pays et la croissance mondiale. On voit que dans les dernières dizaines d'années, la puissance éolienne cumulée dans le monde a connu une croissance moyenne de 24 %

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power

² http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne

³ <http://www.castelnau-d'oleron-tourisme.com/html/1-15203-Le-moulin-de-Cugarel.php>

⁴ http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne

⁵ <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>

chaque année. Comparée avec les autres énergies renouvelables, l'énergie éolienne est marquée par une puissance et une croissance très importante dans les dernières années (Fig. 1-1-2¹).

Tableau 1-1

Puissance éolienne cumulée dans le monde (en MW) Croissance en %

Pays Fin d'année	France*	Allemagne	Espagne	États- Unis	Chine	Inde	Monde	Croissan ce en %
2000	61	6 097	2 235	2 568	302	1 150	17 684	31,5
2005	756	18 390	10 027	9 150	1 250	4 400	59 467	25,2
2006	1 736	20 579	11 623	11 600	2 594	6 270	74 390	25,1
2007	2 456	22 194	15 145	16 820	6 000	8 000	93 908	26,2
2008	3 486	23 826	16 689	25 240	12 100	9 600	121 003	28,9
2009	4 574	25 703	19 149	35 100	25 800	10 900	158 920	31,3
2010	5 660	27 191	20 759	40 298	44 733	13 065	197 731	24,4
2011	6 792	29 075	21 673	46 919	62 364	16 084	237 891	20,3
2012	7 513	31 424	22 796	60 007	75 324	18 421	283 400	19,1
2013	8 143	34 633	22 959	61 091	91 424	20 150	318 576	12,4
2014	9 296	40 468	22 987	65 879	114 763	22 465	370 329	16,2

Source : Euroserver'ER 2000-2014 (Europe), WSEA 2015, AWEA 2014 (Etat-Unis), GWEC2013 (autres pays).

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

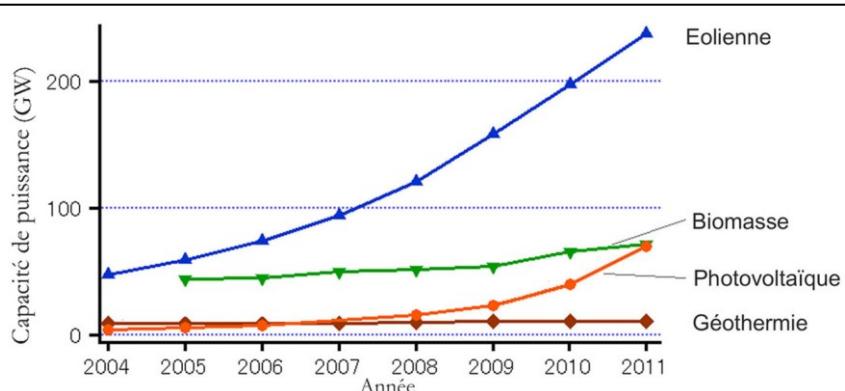


Fig. 1-1-2 Comparaison de la puissance (GW) des énergies renouvelables entre 2006-2012 (source de data : REN21, Renewable Global Status Report).

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 la capacité mondiale de puissance installée atteinte 678 MW (806 000 éoliennes), soit 18 % 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 ont des puissances installées très faible (moins de 3 %) 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 s'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](#)).

¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/File:GlobalREPowerCapacity-exHydro-Eng.png>

1.1.2 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 donnés (Tableau 1-2). 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 pour 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 de développer 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 1-2

Comparaison entre la production centralisée et décentralisée d'énergie (selon Wikipedia¹)

	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 nuisances 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 1.1). La section « énergie éolienne » correspond principalement aux grandes éoliennes. Pourtant, de nombreux avantages en faveur du système de l'énergie éolienne sont remarqués : 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.

¹ [http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_décentralisée_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_décentralisée_(énergie))

1.2 L'éolienne urbaine

1.2.1 Types d'éolienne urbaine

L'éolienne urbaine est définie comme une éolienne située en milieu urbain et qui 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 1.2).

Selon la puissance du générateur, on peut définir quatre types d'éoliennes : 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)¹. Les éoliennes en ville sont plutôt des petites ou micro-éoliennes, mais parfois des éoliennes moyennes peuvent être adaptées dans les zones industrielles ou dans 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 identifier une éolienne 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 mono-pale, 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 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 1-3 propose une comparaison entre les deux types pour mieux comprendre leurs avantages et inconvénients.

Tableau 1-3

Comparaison entre l'HAWT et la VAWT (source : IT Power 2005, Stankovic et al. 2009, Beller 2009,²)

	Éolienne à axe horizontal (HAWT)	Éolienne à axe vertical (VAWT)
Avantages	--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 balayée.	--Peu encombrante. --Peu bruyante ³ . --Démarrer 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	--Faible rendement en milieu urbain à cause des turbulences. --Plus bruyante. --Dépendance à la direction du vent d'entrée.	--Faible rendement général. --Couple sinusoïdal non constant. --Problème d'auto-démarrage pour le type Darrieus.

¹ 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.

² http://www.newenergywatch.com/2006/11/vawt_vs_haw.html

³ Parce qu'elle ne produit pas le bruit conique et souvent fonctionne à une petite TSR (Equation 3zz-3).

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 des éoliennes sont de type terrestre, mais les éoliennes en mer ont un grand potentiel et sont en train de connaître une croissance importante grâce au développement de la technologie. En outre, selon la direction relative du vent, les éoliennes peuvent être subdivisées en éolienne face au vent et éolienne dos au 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 (l'éolienne fait partie de l'architecture).

Pour mieux comprendre les différences entre les éoliennes selon ces différents types, un tableau des éoliennes, notamment celles adaptées aux milieux bâties, est proposé. A partir de ces informations limitées, principalement celles données par les fournisseurs d'éolienne, on peut donner des conseils simples et prévisionnels sur la mise en place d'une éolienne en milieu urbain ([Annexe 1.3](#)).

1.2.2 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.

1.2.2.1 Eoliennes urbaines indépendantes

Les éoliennes urbaines indépendantes se trouvent souvent le long des avenues, les voies rapides, dans un espace ouvert, sur 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, ou réverbère. La [Fig. 1-1-3a](#) 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 de l'effet de coin autour les bâtiments. La [Fig. 1-1-3b](#) 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 être 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. 1-1-3c](#) montre des éoliennes classiques à axe horizontal dans le parc de La Villette à Paris. En outre, en 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 les gouvernaux ([Fig. 1-1-3d](#)¹). Plus intéressantes, des éoliennes de Quietrevolution ont des pales où sont installées des LED colorées et offrent des effets plaisants dans la nuit, lorsque l'intensité de couleurs change avec l'intensité du vent ([Fig. 1-1-3e](#)) ([MoS et al. 2006](#)).

¹ <http://www.jasonbruges.com/projects/uk-projects/wind-to-light>

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

1.2.2.2 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 la contre rotation des deux moitiés du générateur¹. Sur le toit du Musée de la Science à Boston aux États-Unis, plusieurs types d'éoliennes ont été installés en 2003, et leurs performances et leurs impacts pendant 3 ans ont été étudiés. La [Fig. 1-1-4a](#) montre des éoliennes AeroVironment (AVX400) qui sont spécialement conçues pour les bords de parapet de toit. En fait, ce type d'éolienne a 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, peut être intéressant pour l'environnement urbain par sa compacité et son esthétique ([Fig. 1-1-4b](#)). En plus, une éolienne notamment VAWT peut être installée à côté d'un coin de tour pour profiter de 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. 1-1-4c](#)) ([Degrass et al. 2013](#)).

¹ http://www.earthtoys.com/emagazine.php?issue_number=07.04.01&article=contra

		
Fig. 1-1-4a Eoliennes sur le toit du bâtiment de Musé de la Science à Boston (source : MoS et al. 2006).	Fig. 1-1-4b NGUp Windwall à la Haye, aux Pays-Bas (source : horisun.nl).	Fig. 1-1-4c Immeuble Kinetica à Londres (source : Degrass et al. 2013).

1.2.2.3 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 WEB¹ (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. 1-1-5a](#)). Dans ce modèle, on a considéré simultanément les effets d'accélération du vent et la forme aérodynamique du bâtiment. En même temps, des 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 que les différentes performances entre les VAWTs et les 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, réalisée en 2008) ([Fig. 1-1-5b²](#)) ou la Tour de la Rivière des Perles (Guangzhou, Chine, réalisée en 2011) ([Fig. 1-1-5c³](#)). 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 de leur hauteur. L'immeuble COR à Miami, réalisé en 2009, intègre des éoliennes sur le toit ([Fig. 1-1-5d⁴](#)). 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 se compose de cinq pales et peut produire 50 MWh d'électricité chaque année ([Zhang 2010](#)) ([Fig. 1-1-5e⁵](#)). La tour de Shanghai en cours de construction (sera

¹ Il est sous le Programme Sans Energie Nucléaire (JOULE III) pour la Commission Européenne.

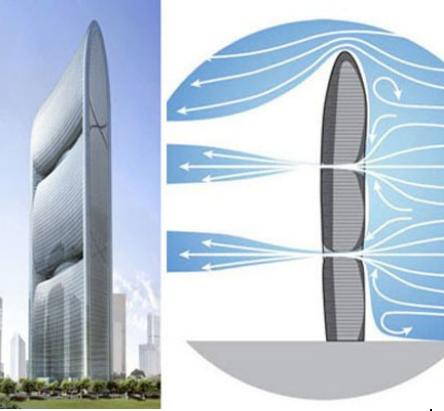
² <http://mosticonicskyscrapers.blogspot.fr/2012/08/13-bahrain-world-trade-center-manama.html>

³ <http://www.51abcd.com/forum/ dispbbs.asp?boardid=5&id=1719&authorid=4865&page=0&star=138>

⁴ <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=59311813>

⁵ http://bermondseymum.blogspot.fr/2010_05_01_archive.html

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. 1-1-5f)¹.

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

1.2.3 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.

1.2.3.1 Aspects techniques de l'éolienne urbaine

Les éoliennes urbaines rencontrent de nombreux problèmes techniques. Principalement, il y a 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 d'énergie éolienne à une hauteur de 10 m en 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 du vent 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

¹ http://www.shanghaitower.com.cn/enversion/show_news.asp?c_id=211

urbain. Une éolienne HAWT de 600 W peut produire 250 à 1500 kWh d'énergie en milieu rural, mais de 50 à 250 kWh en milieu urbain (Allen *et al.* 2008, Moriarty 2009, pp. 20). Donc le vent faible et la turbulence importante rendent une éolienne urbaine peu productive. 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 sont 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 le 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'évaluations indépendantes 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 (p. ex. 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 minimisé grâce à l'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 gênant 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 d'installation moins sensibles, poser des écrans entre l'éolienne et l'habitant, et concevoir des carénages pour les éoliennes.

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 de l'éolienne à axe vertical, comparé avec l'éolienne à axe horizontal (Grignoux *et al.* 2006, pp. 41-53).

1.2.3.2 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 liées au corps de l'éolienne, les accessoires, la mesure et de l'évaluation du potentiel (très coûteux en temps et en argent), administratives (permis de construire, enquête publique), l'installation, l'entretien, le 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 se trouve environ 1000 €/kW ([Cace et al. 2007](#)). De même, la [Fig. 1-1-6](#) 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 pour l'énergie éolienne générale. Celle-ci est toute fois beaucoup moins élevée que celles des énergies fossiles (p. ex. charbon : 800 à 1300 g, gaz : 400 à 800 g) ([Mithraratne 2009](#)).

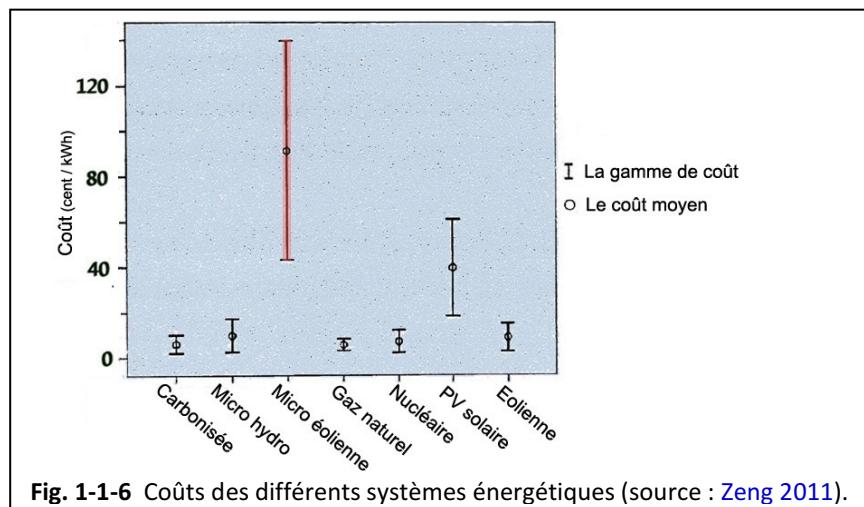


Fig. 1-1-6 Coûts des différents systèmes énergétiques (source : [Zeng 2011](#)).

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 d'électricité ([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, discréption (position, couleur), profil aérodynamique, etc...

3) La perception du public

Pour analyser la perception du public sur l'éolienne urbaine, le projet WINEUR¹ 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 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 % qui les ont déjà vu. Pourtant, tous les architectes et les organismes publics interrogés ont porté un avis favorable sur les éoliennes urbaines (WINEUR 2007).

1.2.3.3 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 pas reçu 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 nuit². 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 supérieure 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. La procédure prend beaucoup de temps et est différente 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, les agences de distribution de l'électricité ne portent pas de grande volonté à intégrer les petites éoliennes au réseau.

Même si des lois sont sorties pour en favoriser le développement comme l'obligation d'achat d'électricité 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

¹ 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>

² Circulaire interministérielle du 27 février 1996.

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 éoliennes¹.

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 son efficacité est moins intéressante que celles 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 important 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 normes et de standards) 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'installation de l'éolienne urbaine. Des éoliennes sont souvent placées trop bas, où le vent est faible et turbulent, pour éviter une demande de permis de construire ou un contrôle administratif. En attendant l'établissement de standards ou de normes, ainsi que l'épanouissement du marché de l'éolienne urbaine, nous avons besoin 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.

¹ Nous avons rencontré plusieurs entreprises de petite éolienne en faillite, p. ex. WindTronics.

1.3 Développement de l'énergie éolienne en ville dans le futur

Avec le développement de la technologie et la croissance de la conscience environnementale du public et du gouvernement, l'énergie éolienne devrait jouer un rôle important dans la ville du futur, malgré de nombreux challenges et problèmes à résoudre aujourd'hui. Principalement, il y a des motivations suivantes pour installer des éoliennes urbaines :

- l'économie de CO₂,
- la production d'électricité verte,
- la réduction 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 de service à l'exportation ([WINEUR 2007](#)).

1.3.1 Evaluation énergétique d'une éolienne

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

Sur le plan technique, quelques termes essentiels sont nécessaires à connaître quant à la physique et au mécanisme 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 :

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

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

Généralement, en raison de la façon dont on capte le vent, la limite du coefficient de puissance est donnée par : $C_{p,max} = 16/27 \approx 0,5926$, appelée la limite de Betz. Toutefois, selon les conditions d'utilisation d'un carénage qui a un effet de concentration, la valeur maximale du coefficient peut dépasser la limite de Betz. En effet, mis à part les contraintes physiques pour capter 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 des pertes mécaniques et électroniques dans le processus de transition. La puissance globale d'une éolienne peut être calculée par :

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

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 : $0,85 < \eta_d < 0,98$,

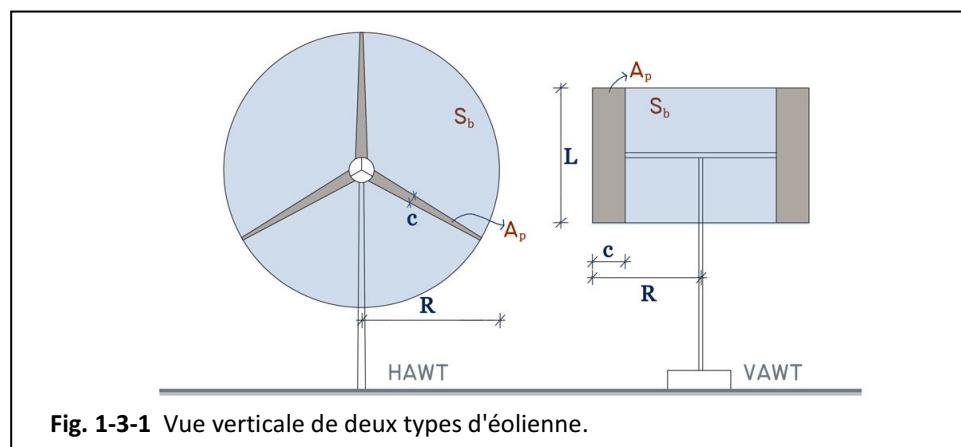
η_e représente l'efficacité du redresseur : $0,9 < \eta_e < 0,98$,

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 multi-pales a une conversion plus faible. Pour une VAWT de type Savonius, le coefficient de puissance maximale peut atteindre 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 VAWT¹. 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. 1-3-1). La vitesse du vent est la vitesse instantanée, souvent utilisée dans les données 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.



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

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

$$TSR = \frac{\nu}{U} = \frac{\omega R}{U} \quad (\text{Equation 1-3})$$

où ν 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 TSR égal à 20, alors qu'une éolienne moyenne classique (tripale) a un TSR entre 6 et 7.²

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 de bruit. Comme l'émission de bruit est proportionnelle à $(TSR)^5$ (Burton *et al.* 2001), le bruit augmente rapidement avec TSR pour des niveaux inacceptables. Donc, une vitesse spécifique de rapidité $TSR \approx 3$ peut être une bonne référence pour une éolienne urbaine (Mertens 2006, pp. 144).

¹ http://www.newenergywatch.com/2006/11/vawt_versus_hawt.html

² http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design

3) Solidité du rotor

La solidité du rotor δ est une grandeur représentante 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 sur un plan normal à la direction du vent S_p à la surface pleine balayée du rotor S_b .

$$\text{Pour HAWT : } \delta = \frac{S_p}{S_b} = \frac{nA_p}{S_b} = \frac{ncR}{\pi R^2} = \frac{nc}{\pi R} \quad (\text{Equation 1-4a})$$

$$\text{Pour VAWT : } \delta = \frac{S_p}{S_b} = \frac{nA_p}{S_b} = \frac{ncL}{2RL} = \frac{nc}{2R} \quad (\text{Equation 1-4b})$$

où A_p est la surface d'une pale sur un plan normal à 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 moyenne (distance mesurée du bord d'attaque au bord de fuite) ou la largeur moyenne de la pale, selon le type d'éolienne (Fig. 1-3-1).

En testant 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 atteinte 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 fonctionnante à pleine puissance à plein temps (soit 8 760 heures dans une année). Par exemple, pour une éolienne de 5 kW produisante 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 %¹.

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

1.3.1.2 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 proches de la terre et le profil vertical de vitesse du vent sont expliqués dans le [Chapitre 2.6.1](#). 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 :

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

où k est le facteur de forme et c est le facteur d'échelle. Le facteur k définit la forme de la distribution et dépend principalement de la régularité du régime du vent. Le facteur c est une mesure de la vitesse moyenne du vent. Lorsque les deux paramètres sont fixés, la distribution est établie. Un exemple de données météo sur la distribution du potentiel éolien en Maine-et-Loire

¹ http://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique

correspond à une fonction de Weibull (Fig. 1-3-2). 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)).

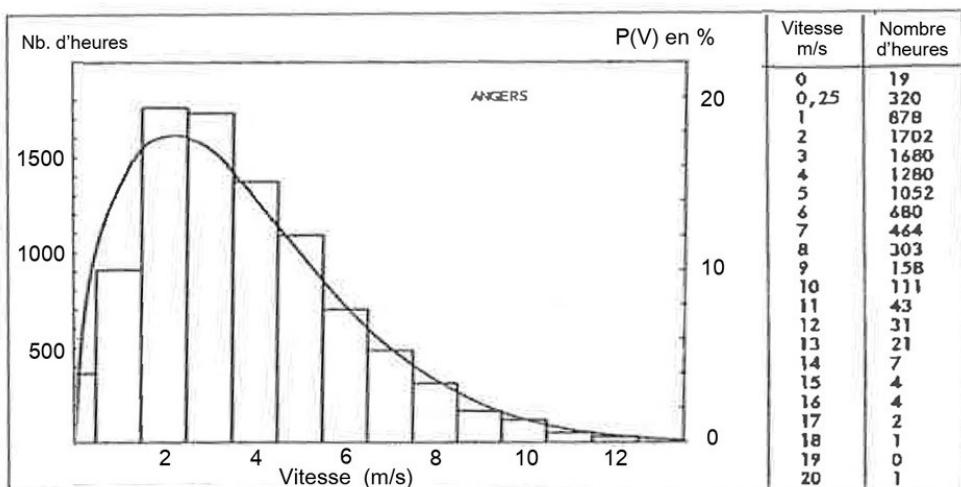


Fig. 1-3-2 Distribution des vitesses de Weibull et distribution de vitesses moyennes de vent mesuré (en Maine-et-Loire, 1952-1975) (source : Hladik *et al.* 2011, pp. 352).

En général, une distribution du potentiel éolien au cours d'une période, au lieu d'une seule vitesse moyenne globale du vent, est indispensable pour évaluer correctement l'énergie éolienne durant cette période. Car la puissance est une fonction du cube de la vitesse du vent, l'application d'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 éolienne si les données météo sont lacunaires¹.

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 plusieurs sites dans deux régions différentes, il a trouvé que le seuil de vitesses 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, comme 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 k de la distribution Weibull est très variable non seulement d'un site à l'autre, mais aussi dans un même site selon les saisons, la direction du vent et les 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 indiquant la fréquence des vents selon leurs directions. La Fig. 1-3-3 montre la rose des vents à Toulouse pour le 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 correspondante à différentes gammes de vitesse est ainsi donnée.

¹ <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>

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 pour 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 vents globales.

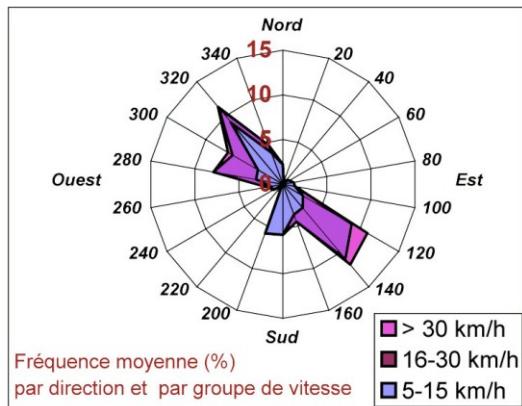


Fig. 1-3-3 Rose des vents à Toulouse (source : [Météo France](#)).

1.3.1.3 Courbe caractéristique de puissance et rendement instantané

Selon la distribution du vent pendant une période donnée, l'éolienne peut atteindre 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.

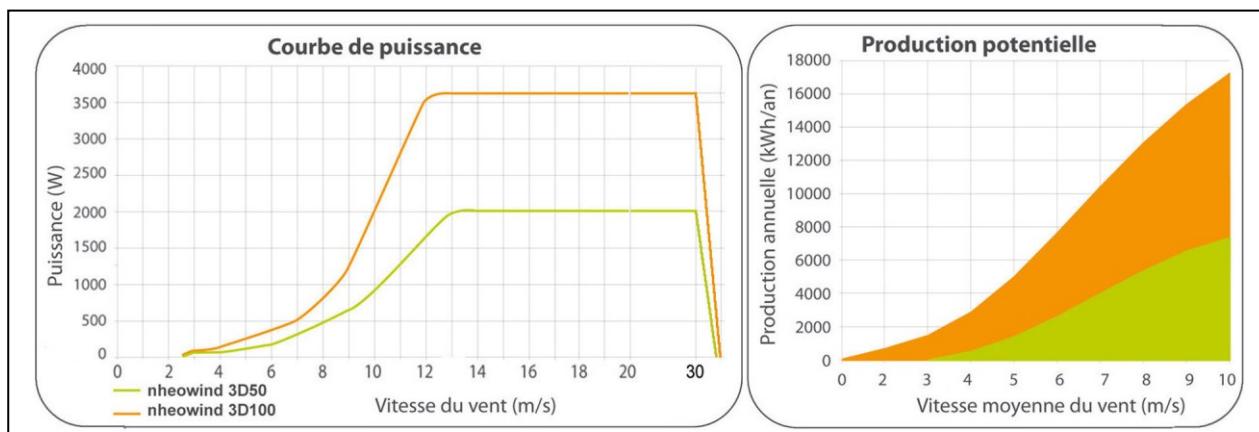


Fig. 1-3-4 Courbes de puissance et schémas de production potentielle annuelle de deux éoliennes (source : [Nheohis](#)).

La Fig. 1-3-4 montre un exemple de courbe de puissances de deux éoliennes de Nheohis¹. Selon la distribution du vent annuelle, la courbe de la production potentielle annuelle correspondante peut être dessiné. Dans le schéma de la courbe de puissance, on peut voir que la vitesse minimale exploitable² pour les deux types d'éolienne est de 2,5 m/s, la vitesse maximale³ pour les deux

¹ <http://www.nheolis.com/index.php?lang=fr>

² « Cut-in speed » en anglais, qui correspond à la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à produire une puissance utile. Celle doit être distinguée de la vitesse de démarrage, « start-up speed » en anglais, à laquelle l'éolienne commence à tourner mais ne fabrique pas d'électricité.

³ « Cut-out speed » en anglais, qui correspond à la vitesse maximale acceptable par l'éolienne à laquelle elle sera arrêtée pour protection.

éoliennes est de 30 m/s et la puissance nominale¹ 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 meilleure efficacité de l'éolienne, en fait ceci n'apporte pas de grand avantage et nécessite un coût supplémentaire pour améliorer cette efficacité (Ferrigno 2010, pp. 75).

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

Y. Zhang (2011) et Y. Zhang (2014) ont proposé des indicateurs pour évaluer le potentiel éolien d'un site pour installer une éolienne.

1) Le coefficient d'augmentation de la vitesse :

$$C_v = \frac{U}{U_0} \quad (\text{Equation 1-6})$$

où U est la vitesse réelle du vent d'un point et U_0 est la vitesse à la même hauteur du point dans un vent libre (dans un champ sans bâtiment). U_0 peut être calculée directement avec l'[Equation 2](#).

2. C_v est utilisé pour évaluer l'effet de concentration du vent.

2) Le coefficient d'augmentation de l'énergie éolienne :

$$C_u = \left(\frac{U}{U_0} \right)^3 \quad (\text{Equation 1-7})$$

3) L'angle d'incidence du vent Θ_1 dans la zone où il y a l'effet de concentration du vent ($C_v > 1$).

4) L'intensité de turbulence I , qui vaut moins de 25 % pour les champs d'éoliennes.

5) 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.

6) La vitesse réelle U au point de l'installation.

7) 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 .

8) 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).

9) La vitesse réelle à la hauteur des piétons (1,5 à 2 m) U_p , qui permet d'évaluer le confort de l'environnement aéraulique autour de bâtiments.

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 à celle d'une éolienne isolée à la même hauteur en vent libre. En fait, cet indicateur est la combinaison de deux propriétés de concentration : l'accélération de la 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 correspondante à une gamme de vitesse 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 permettent d'évaluer l'effet de concentration du vent ($U > U_0$) et de comparer

¹ « Rated power » en anglais, qui est souvent égale à la puissance électrique maximale qu'une éolienne peut produire.

l'efficacité entre deux sites mais ne permettent pas d'évaluer l'énergie exploitable d'un site, car un vent avec $U < U_0$ peut être assez fort pour produire de l'électricité.

3) L'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 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) Les indicateurs de la morphologie de terrain : la rugosité, la porosité, la densité, la hauteur moyenne de bâtiments, etc...

1.3.2 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. 1-3-5). Beller (2011) a aussi donné des idées pour intégrer les éoliennes dans la ville, notamment les petites VAWTs : a) sur un abribus ou un abri-vélo, b) au milieu d'un fleuve ou d'une rivière et c,d) intégrée à la structure d'un pont (Fig. 1-3-6). Pour intégrer l'éolienne dans une architecture, l'architecte américain Michael Jantzen a fait plusieurs conceptions innovantes. Parmi elles, la passerelle éolienne (qui peut être posée en travers d'un boulevard ou un fleuve) peut générer de l'électricité quand le vent fait tourner ses rouleaux et parmi les cinq rouleaux, trois tournent dans une direction et les deux autres dans l'autre (pour générer plus d'électricité et que la structure soit plus stable) (Fig. 1-3-7¹). Il a également conçu un toit de piscine ouverte ombragée avec des éoliennes qui peuvent aussi générer de l'électricité (Fig. 1-3-8²).

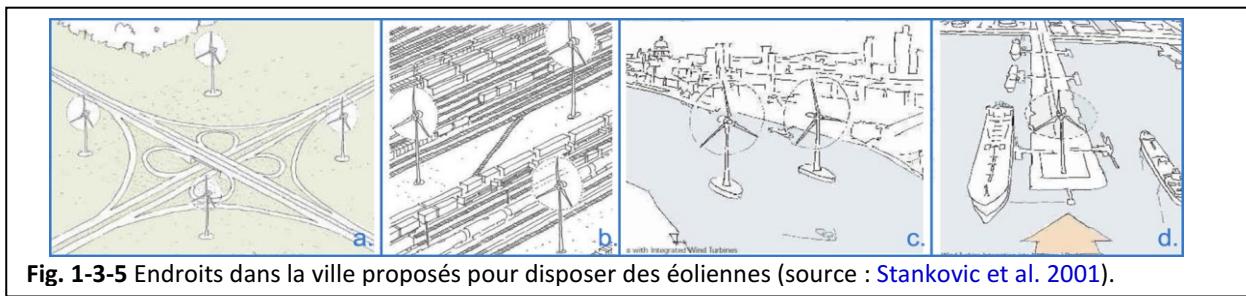


Fig. 1-3-5 Endroits dans la ville proposés pour disposer des éoliennes (source : Stankovic et al. 2001).

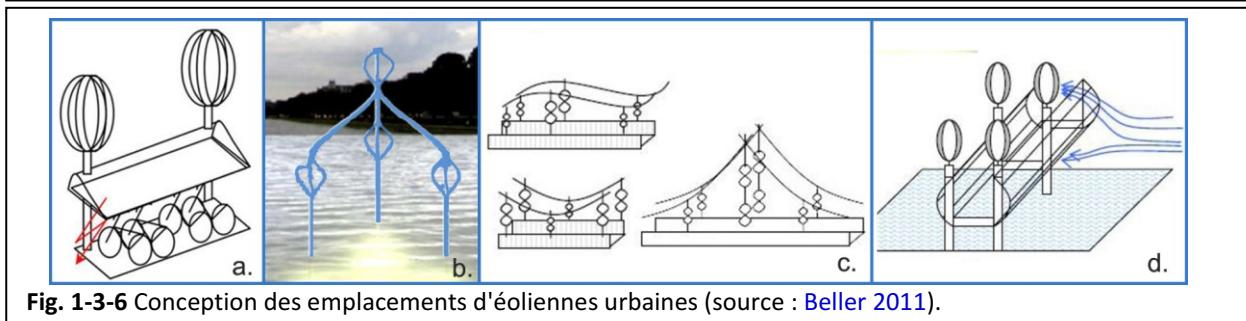


Fig. 1-3-6 Conception des emplacements d'éoliennes urbaines (source : Beller 2011).

¹ <http://www.michaeljantzen.com>

² <http://www.michaeljantzen.com>



Fig. 1-3-7 Passerelle éolienne (source : michaeljantzen.com).

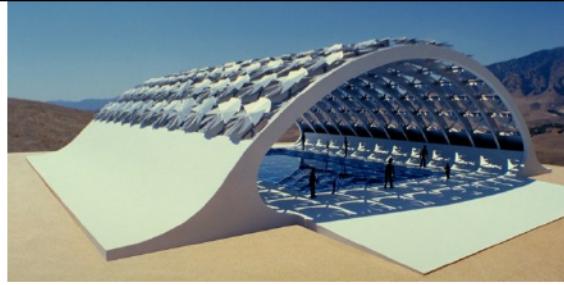


Fig. 1-3-8 Toiture ombragée avec des éoliennes (source : michaeljantzen.com).

Techniquement, [Grant et al. \(2008\)](#) ont discuté la praticabilité et les avantages d'installer une éolienne carénée sur les toits de bâtiments existants. Le coefficient global de production d'énergie de l'éolienne guidée a été calculé par un modèle mathématique et peut atteindre 0,7. En fait, il est deux fois plus grand que celui d'une éolienne conventionnelle. Ce type d'éolienne a aussi l'avantage d'éviter l'influence de la turbulence et offre moins d'impact visuel. En fait, elle nécessite une petite taille, diamètre de 1 m par exemple, et doit s'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. 1-3-9a](#) ([Grant et al. 2008](#)).

De même, Altechnica Aeolian Planar Concentrator intègre des panneaux solaires et des éoliennes sur le toit. En fait, la pente de la toiture et la forme du faîte sont conçus afin de concentrer le vent ([Fig. 1-3-9b](#)) ([Dutton et al. 2005](#)). On propose une éolienne plus discrète intégrée au faîte d'une coupole en forme de dôme avec une double-qutoiture et des volets ([Fig. 1-3-9c](#)) ([Dekker et al. 2012](#)). En fait, comparé aux autres géométries, le 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. 1-3-9d](#)). 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 intégré à une tour, qui a été associé à deux autres technologies écologiques : panneaux photovoltaïques et collecte d'eau de pluie ([Fig. 1-3-9e](#)). 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 de changements fréquents et des mauvaises conditions de 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 qui circule le long de la surface du toit en pente et le vent aspiré ascendant par effet de serre ([Fig. 1-3-9f](#)) ([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. 1-3-9g](#)).

Fig. 1-3-9a Eolienne conduite sur le toit (selon Grant et al. 2008).	Fig. 1-3-9b Altechnica Aeolian Planar Concentrator (source : Dutton et al. 2005).	Fig. 1-3-9c Concept de turbine de toit (source : Dekker et al. 2012).
Fig. 1-3-9d Eolienne Sistan (source : Müller et al. 2009).	Fig. 1-3-9e Eolienne PAGV : prototype (à gauche) et intégration imaginée dans une tour (à droite) (source : Chong et al. 2012a).	
Fig. 1-3-9f Concept de turbine de toit de Roberston et Leaman (source : Dutton et al. 2005).	Fig. 1-3-9g Concept de cheminée solaire qui intègre à des éoliennes pour l'électricité et la ventilation (selon Wang et al. 2014).	

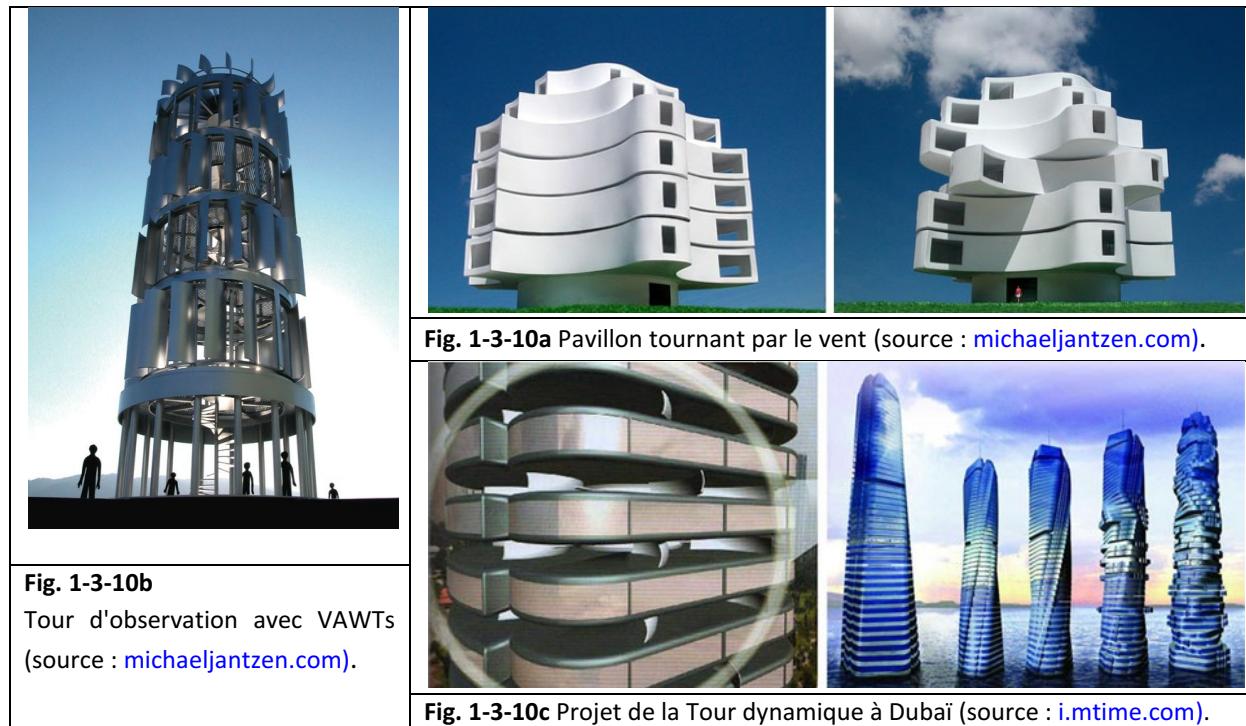
D'ailleurs, des architectures entières peuvent être conçues comme des éoliennes. La conception de pavillon tournant par le vent (Wind shaped pavilion) est donnée par Michael Jantzen : les habitants des différents étages avec des balcons concaves dans le pavillon peuvent changer l'orientation de leurs appartements grâce à la force du vent naturel et la rotation peut générer de l'électricité pour les besoins le soir (Fig. 1-3-10a¹). En outre, cet architecte a proposé également une tour des VAWTs qui peut être installée dans un parc pour l'observation de visiteurs (Fig. 1-3-10b²). De même, la Tour dynamique prévue à Dubaï (Fig. 1-3-10c³) par l'architecte italien David Fisher peut elle aussi tourner à 360° à chaque étage, par la force de turbines cachées sous chaque appartement. Elle

¹ <http://www.michaeljantzen.com>

² <http://www.michaeljantzen.com>

³ <http://i.mtime.com/funpage/blog/1260146/>

est considérée comme le premier gratte-ciel vraiment dynamique du monde, même sa construction n'a pas encore vu le jour depuis 2008.



1.3.3 Choix d'une éolienne adaptée

Pour répondre à plusieurs problèmes concernant l'application d'éoliennes urbaines comme le bruit, la sécurité, l'efficacité du rendement ainsi que l'esthétique, la recherche technique et le choix d'une éolienne urbaine adaptée sont essentiels. Les résultats des chercheurs dans ce domaine sont utiles pour aider à bien choisir les éoliennes adaptées à la ville. Des exemples d'éoliennes commerciales sont présentés dans l'[Annexe 1-3](#). Ci-dessous des nouvelles technologies d'éolienne en cours de recherche sont 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 en cycle de vie. Il a étudié l'environnement aéraulique de la ville de Pittsburgh et la faisabilité d'utiliser l'AEH dans cette ville. En fait, très différente d'une HAWT ou d'une VAWT, l'AEH est une technologie dans laquelle 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 zone turbulente, il est proposé qu'elle doive profiter des tourbillons. Pourtant, jusqu'à présent cette technologie est loin d'être mûre pour le marché, car le coût qu'elle génère sur la fabrication est beaucoup plus élevé 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. 1-3-11](#)). 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. 1-3-12¹](#)).

¹ <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/flapping-leaf-generator-for-wind-energy-harvesting-00001791.asp>

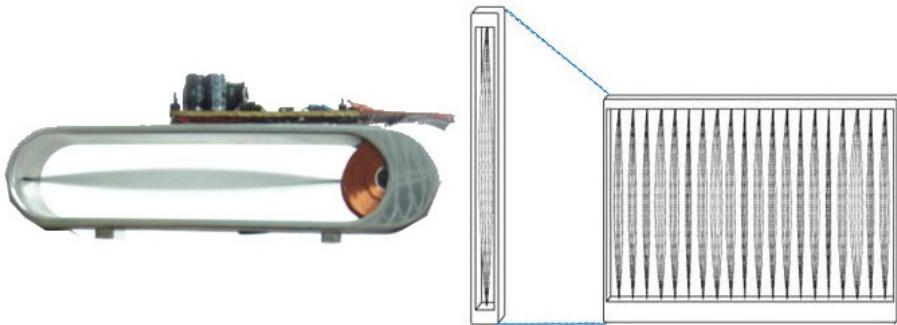


Fig. 1-3-11 Micro-éolienne Windbelt (à gauche) et version qui peut être installée comme un garde-corps sur le toit (à droite) (source : Humdinger.com).

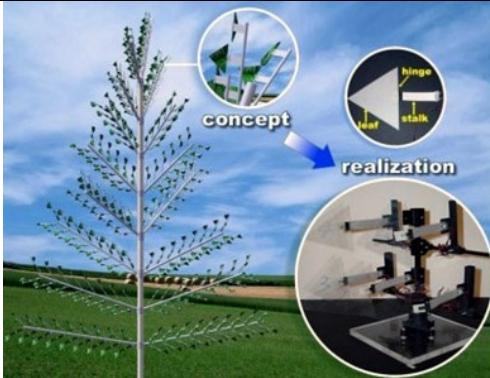


Fig. 1-3-12 Piezo-tree (source : energyharvestingjournal.com).

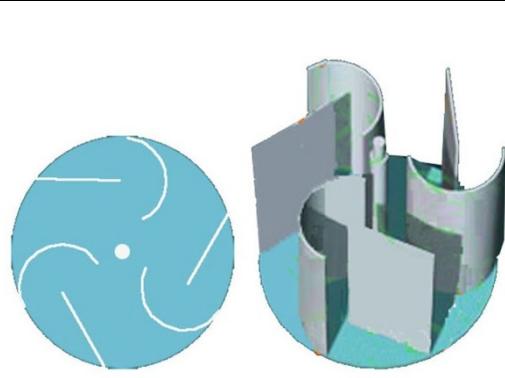


Fig. 1-3-13 Eolienne Sénégal (source : Mo 2011).

Nugyen vinh et Hourmair ont inventé un type de VAWT Sénégal, modifié sur la base du type Savonius mais utilisant moins de matériaux pour avoir une même puissance (Fig. 1-3-13) (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. 1-3-14) (Sharpe et al. 2010).



Fig. 1-3-14 L'éolienne Crossflex (source : Sharp et al. 2010).

1.3.4 Règles de l'art pour mettre en œuvre une éolienne urbaine

Compte tenu des nombreux problèmes et contraintes auxquels les éoliennes urbaines doivent faire face, des conseils et des règles de l'art sont résumés dans la littérature.

1.3.4.1 Résumé de la littérature

Les documents concernants le 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, car 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 premiers études sur l'intégration de petites éoliennes en milieu urbain et a développé un prototype de technologie 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 ont été 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 sur 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 Energies (ARENE) en Ile-de-France a fait en 2004 des études générales sur les contraintes techniques, économiques et réglementaires liées aux 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).

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 géothermale) avec aménagement urbain en Europe et en Turquie. Le principal intérêt réside sur la planification, la législation et l'impact de l'environnement sur l'utilisation 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 les toits 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, dans 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 utilisé des paramètres des grandes HAWTs de plus de 100 m de 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 des 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 des énergies renouvelables dans le cadre de l'urbanisme. Dans un cadre plus technique, D.M.Whaley (2009) se concentre sur un 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 citadin*) (Energy Task Force, 1977) donne un point de vue historique sur le premier système d'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 des expériences 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 FB17* » (*Micro--éoliennes en milieu urbain FB17*) (Phillips et al. 2007) publie des travaux sur l'évaluation du potentiel éolien dans trois villes anglaises. L'impact des éoliennes installées en ville sur l'environnement tel 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 FB18*) (Blackmore 2008) s'est concentré sur des essais en soufflerie et a proposé un outil simple pour optimiser l'implantation d'une éolienne sur les toits.

Les articles sur ce sujet sont aussi nombreux. Kalmikov et al. (2010) ont évalué le potentiel éolien à 20 m de 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 adapté 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 des 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 des petites éoliennes sur les toits en ville. Abohela et al. (2013) ont analysé les impacts de différentes formes de toitures et de différentes hauteurs des bâtiments sur la production énergétique éolienne.

1.3.4.2 Règles de l'art 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, sensibles du point de vue des nuisances sonores, sensibles du point de vue de l'impact esthétique et aux coins de murs extérieurs des bâtiments (Axenner 2007, Stankovic 2009).
- Comparée à la VAWT, l'HAWT est plus efficace dans les lieux où les vents sont plutôt stables. Elle est également moins coûteuse et possède une technologie plus développée dans le monde (Axenner 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'il ne puisse pas démarrer tout seul 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, Axenner 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 demande moins d'entretien et offre moins de risques de dommage (p. ex. 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 s'il 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 (p. ex., 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 avoir 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 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 des 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 s'élargir (Beller 2011).
- La courbe de puissance de l'éolienne doit correspondre au vent local (p. ex., 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 de moins de 10 % du bâtiment conduit à une efficacité maximale (Jha 2011¹, Zeng 2011).
- Une éolienne carénée est proposée en raison de la concentration du vent afin de diminuer la turbulence, d'isoler le 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).

1.3.4.3 Règles de l'art 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 en 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 au 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 inclinée 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

¹ Jha, A. R. Wind turbine technology. Boca Raton, FL, CRC Press. 2011.

- 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 s'adapter aux différents lieux et être modulaire pour être plus économique (Sharpe *et al.* 2010).
- Il faut respecter l'aspect esthétique de l'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 en parallèle avec des 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 de 200 à 400 kW/m²/an (Axenne 2007).
- Les installations auxiliaires (sécurité d'ancrage, isolation de vibration) sont importantes quant aux considérations d'esthétique, de vibration et de sécurité lorsqu'on pose une éolienne sur un bâtiment existant (Dutton *et al.* 2005).
- La fiabilité tout au long de la durée de vie opérationnelle du système de l'éolienne doit être évaluée avec l'entretien et la mise à niveau facile (Dutton *et al.* 2005).

1.4 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 ce jour, le marché de l'éolienne urbaine est au début de son développement. Les problèmes et les challenges auxquels nous nous sommes confrontés sont nombreux.

Dans ce chapitre, trois sections ont été abordées : l'énergie éolienne, l'éolienne urbaine et les règles de l'art pour le développement de l'énergie éolienne de 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 dizaines d'années, 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 de différents types d'éolienne (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 sa technologie est moins développée et son rendement est moins intéressant, comparés à ceux de grandes éoliennes classiques. Aucune norme ni standard n'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, les règlements acoustiques et la difficulté de se raccorder aux réseaux sont des grands obstacles pour installer une éolienne urbaine. Des éoliennes de 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, la distribution du vent et la courbe caractéristique de puissance d'éolienne sont expliquées. Des indicateurs d'évaluation de l'énergie éolienne sont également discutés et initialement choisis 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 de ce sujet, des règles de l'art pour développer l'énergie éolienne urbaine à l'avenir sont proposées.

2. Morphologie urbaine

Dans ce chapitre, on examine tout d'abord brièvement l'historique du développement de la morphologie urbaine. On présente les objectifs majeurs sur lesquels elle se focalise. Ensuite, différents classements de formes urbaines sont présentés. Ils sont utilisés pour créer un classement complet adapté à notre sujet de recherche. Des évaluations prévisionnelles sur les critères de classement sont données afin de trouver les formes urbaines typiques de la recherche pour faire ensuite les simulations CFD. Après cela, nous étudions les paramètres de forme urbaine et nous 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 considérés.

Dans le chapitre de l'environnement aéraulique et de la morphologie urbaine, on présente d'abord la théorie d'écoulement du vent en 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 d'apporter des éléments pour améliorer l'environnement aéraulique urbain.

2.1 Définition et contenu

2.1.1 Historique

La recherche sur la morphologie urbaine a commencé au début du 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 la ville ([Gauthiez 2004](#)). En 1899, le *livre* d'Otto Schlüter « *Über den Grundriss der Städte* » (*sur la disposition de communes*) marque la naissance de la discipline de la morphologie urbaine en le caractérisant, dans le domaine de la géographie, comme la géographie humaine et la morphologie du paysage culturel. Pourtant, la première fois que la notion de 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 à partir 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](#)).

Autour de ces trois théories d'écoles, de nombreux chercheurs travaillent dans la discipline 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 soit un processus similaire à celui de la croissance des cellules dans un organisme et que le déroulement de ces processus produise 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 tels que la vitalité, la sensation, l'aptitude, l'accessibilité, le contrôle de la 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 secondaires comme le réseau portugais et le réseau chinois.

2.1.2 Définition et objet d'étude

La morphologie urbaine est l'étude des formes urbaines. La forme urbaine est 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 partage avec d'autres disciplines plusieurs termes proches : typologie urbaine, composition urbaine, syntaxe spatiale, structure urbaine, tissu urbain, forme urbaine, etc... (voir [Annexe 2.1](#)). La [Fig. 2-1-1](#) montre trois niveaux d'études sur un même tissu urbain : les voies, les parcelles et les bâtiments.

Le premier objectif de recherche sur la morphologie urbaine est de permettre une "lecture" de la ville c'est-à-dire « 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 fait l'objet de critiques et de doutes ([Merlin, 1988](#), pp. 48-49).

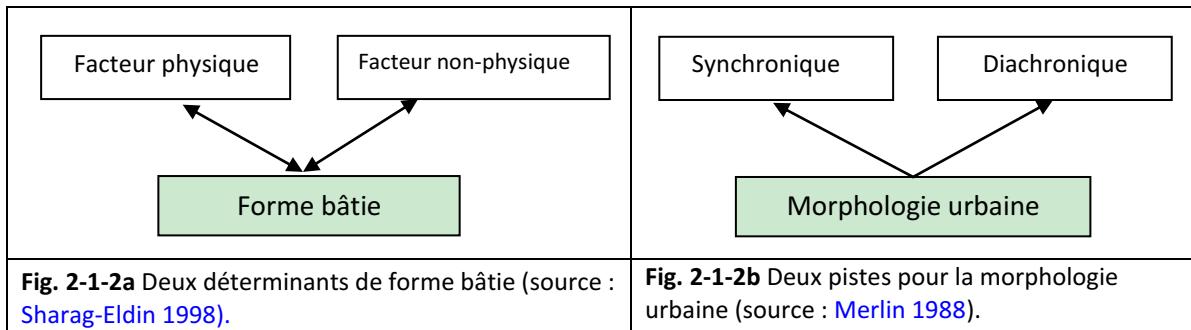


Fig. 2-1-1 Tissu du centre ancien du Caire (source : [Panerai et al. 1999](#)).

Concernant la morphologie urbaine orientée sur la forme bâtie, il y a deux facteurs d'influence : les facteurs physiques et les facteurs non-physiques. Les premiers se composent, par exemple, de la topographie, de la géologie et du climat. Leurs effets sont relativement faciles à définir et à évaluer. Les deuxièmes comprennent la religion, la défense du territoire et les facteurs socio-économiques. Ils expliquent notamment les relations avec la forme bâtie à une échelle plus large que celle de la forme physique ([Fig. 2-1-2a](#)) ([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. Or, 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). En d'autres termes, Vittorio Gregotti pense que la morphologie ne concerne pas directement les aspects socio-économiques mais que ceux-ci s'expriment et exercent des influences 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. 2-1-2b](#)). La méthode synchronique s'intéresse à une morphologie urbaine descriptive, à des formes urbaines concrètes, comme un catalogue des réalisations possibles de la ville en vue de construire un répertoire de modèles reproductibles. En revanche, la méthode diachronique, concernant des formes urbaines historiques, est liée à une théorie morphogénétique de l'occupation de l'espace qui précise 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, comme on étudie des formes urbaines existantes ou imaginées dans le futur et des formes urbaines différentes dans le monde, potentiellement favorables pour l'énergie éolienne, la méthode synchronique sera utilisée.



La morphologie urbaine est une méthode couramment utilisée pour les problèmes d'aménagement : l'analyse du 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 la morphologie urbaine appliquée dans le cadre de l'urbanisme, pour évaluer l'énergie éolienne dans la ville doit être simple et holistique. Cela signifie qu'elle se concentre, non seulement sur les formes physiques des villes à l'origine de l'impact principal de l'écoulement du vent, mais aussi qu'elle respecte les facteurs et les conditions socio-économiques pour le développement de l'énergie éolienne.

2.2 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 bâtiments, 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 2.2](#)).

Comme cette thèse s'intéresse aux formes urbaines en général, à l'échelle du quartier, une possibilité de classement peut être la combinaison de critères tels que la position du tissu urbain dans la ville, le style architectural d'une certaine époque ou l'usage des sols pour l'aménagement afin de montrer un maximum de variantes des formes physiques de nos villes actuelles :

- 1) centre ville : noyau urbain ancien,
- 2) centre ville : habitat de la fin du XIX^e siècle 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 actuels,
- 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, zones commerciales,
- 12) périphérie : parc high-tech, campus universitaire,
- 13) périphérie : zones industrielles,
- 14) périphérie normale : faubourgs.

En raison de l'évolution de l'espace de la ville et de ses multi-fonctions, la forme urbaine réelle présente une grande variété dans une même catégorie. Il y a aussi des espaces urbains qui sont en train de se transformer et qui forment un mélange de différentes formes urbaines. Selon le classement de formes urbaines ci-dessus, 17 exemples de tissus urbains sont sélectionnés, auxquelles est associée la description de leurs caractéristiques en termes de morphologie urbaine ([Tableau 2-1](#)).

De nombreux types de formes urbaines relèvent des 14 catégories pré-citées. Toutes ne peuvent pas faire l'objet de simulation CFD et un tri préliminaire doit être effectué. Le critère de choix est basé sur des évaluations prévisionnelles de la capacité d'une catégorie donnée de capter l'énergie éolienne. Les types de formes urbaines sont proposés sans considération du contexte culturel et climatique. En conséquence, l'évaluation de l'environnement aéraulique et du potentiel d'énergie éolienne à partir de la forme physique manque sans doute d'exactitude et de précision. Des analyses intégrant des informations climatiques et socio-économiques locales sont faites sur un cas particulier dans le [Chapitre 7](#). Avant d'analyser ces cas complexes, seuls les facteurs représentatifs de la forme physique, qui influencent directement l'écoulement du vent, sont abordés. Les caractéristiques de l'environnement aéraulique sont ainsi estimées selon les caractéristiques de la morphologie urbaine. Ensuite, pour évaluer la capacité énergétique éolienne, les critères et les considérations suivants peuvent être pris :

- 1) la vitesse moyenne du vent qui est sans doute le critère le plus important,
- 2) la surface des zones caprices potentielles, leur taille,
- 3) la faisabilité du point de vue socio-économique et la difficulté d'installation des éoliennes,
- 4) les impacts environnementaux, leur niveau de conséquence.

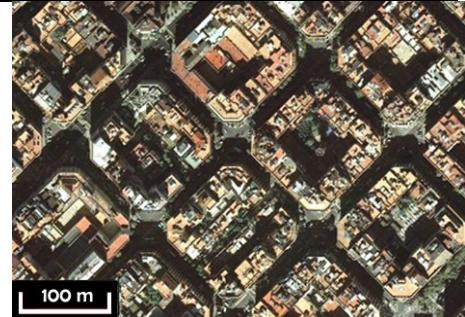
Après avoir évalué approximativement les potentiels d'énergie éolienne de différentes formes urbaines (Tableau 2-1), on peut conclure sur la pertinence des lieux d'installation d'éoliennes.

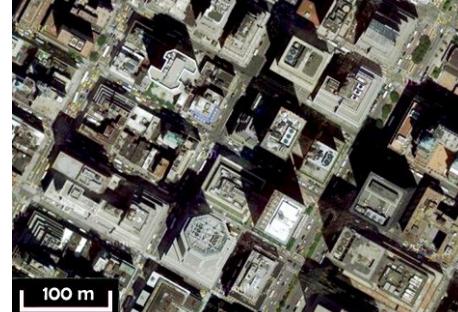
- Lieux peu propices ou peu proposés : les noyaux anciens des centres villes (habitat avant les guerres mondiales). Dans ce cas, le tissu est compact et très rugueux ce qui rend le vent souvent faible. De plus, les impacts liés à l'environnement social (bruit, dérangement visuel, etc...) et à la sécurité des structures (compte tenu 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, dans le cas d'habitats individuels dans la ville ou en périphérie, il est envisageable d'installer une petite éolienne sur le toit ou dans les jardins. Le rendement est souvent peu important à cause de la hauteur limitée du rotor. Les bidonvilles et les grandes zones ouvertes en centre ville peuvent être choisis pour installer une éolienne indépendante avec un mat assez élevé. Pour les grands espaces verts, l'impact visuel du paysage est déterminant ; pour les bidonvilles, c'est une volonté des autorités concernées.
- 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, zones commerciales, zones industrielles et universitaires en périphérie. Les zones publiques modernes, souvent bâties de grandes tours de bureaux, présentent de grands avantages à cause de leur hauteur et de l'effet de concentration du vent. Les habitats collectifs ont des effets de concentration du vent important alors que les espaces portuaires, les rivières et les périphéries ont une rugosité faible et un impact d'environnement moins important.

Sans considération sur les conditions climatiques et les facteurs socio-économiques, les types de formes urbaines ayant un grand potentiel énergétique, comme les zones publiques modernes et les habitats collectifs, sont choisis et comparés dans les simulations CFD et les évaluations qui suivent. Cependant, toutes les formes potentielles pour capter l'énergie éolienne devraient être ré-évaluées dans leurs contextes réels.

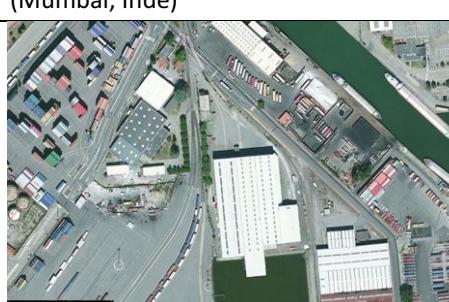
Tableau 2-1

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

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (selon 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 ouverts étendus, rues souvent étroites, non géométriques et sans ordre.	Relativement stable au-dessus des toits mais au-dessous, beaucoup de turbulence et vitesse du vent très faible.	Peu adapté aux éoliennes sauf les grands espaces ouverts comme les places.	 (Toulouse, France)
Centre ville : habitat du début du XX ^e siècle (01)	Compacte, dense, hauteur moyenne (18 ~ 24 m), 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, effet du vent tel que l'effet de canalisation.	Peu adapté aux éoliennes sauf les grands espaces ouverts, les angles qui forment un appel d'air permanent et le long des avenues.	 (Paris, France)
Centre ville : habitat du début du XX ^e siècle (02)	Compacte, hauteur moyenne (15~24 m), quartier divisé par des blocs octogonaux et de taille standard (130 ~ 140 m), chaque bloc entouré d'une grande cour, rues orthogonales, avenues larges (20 m), angles des rues arrondis.	Bonne ventilation, vent faible dans les cours, vent un peu élevé dans les avenues avec moins de turbulence, effets du vent tels que l'effet de coin et l'effet de canalisation.	Lieux potentiels pour installer des éoliennes sur les toits des bâtiments aux angles de rues.	 (Barceone, Espagne)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (selon 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 quartier d'affaires, très compacte et dense, grande taille, beaucoup de tours de hauteur supérieure à 50 m, grande rugosité, peu d'espace ouvert étendu, formes plutôt régulières et ordonnées dans de petits lotissements, rues moyennes, bien structurées et rectangulaires.	Instable, beaucoup de turbulence, vitesse du vent moyenne, effets du vent fréquemment rencontrés : effet de coin, effet de sillage, effet Venturi et effet de pyramide.	Lieux propices pour installer des éoliennes sur les toits ou proche des angles des tours, évaluation d'énergie éolienne obligatoire en raison de la grande influence du bâti voisin.	 (New York, Etats Unies)
Centre ville : zones publiques modernes (02)	Principalement bureaux officiels ou publics, dense, grands blocs de hauteur assez grande (40 ~ 50 m), grandes avenues, formes régulières et ordonnées, grande rugosité, rues bien ordonnées et géométriques.	Plutôt stable et périodique, peu de turbulence, vent fort saisonnier le long des avenues, vitesse du vent moyenne, effets du vent fréquemment rencontrés : effet de sillage, effet Venturi et effet de canalisation.	Lieux propices pour installer des éoliennes sur les toits des tours en respectant l'impact visuel des façades, évaluation d'énergie éolienne obligatoire, éoliennes le long des avenues également proposées.	 (Pékin, Chine)
Centre ville : zones publiques modernes (03)	Essentiellement quartier d'affaires, dense, grande taille, beaucoup de tours, grands espaces ouverts, formes très variées, grande rugosité, grandes rues, bien ordonnées et géométriques.	Instable, beaucoup de turbulence, intensité du vent aussi très variée, vitesse du vent un peu élevée, effets du vent fréquemment rencontrés : effet de coin, effet de sillage, effet Venturi et effet de pyramide.	Lieux très propices pour installer des éoliennes sur les toits ou proche des angles des tours, évaluation d'énergie éolienne proposée, des éoliennes le long des avenues également proposées.	 (Shanghai, Chine)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (selon Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéraulique	Evaluation prévisionnelle 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 (espaces verts et parking), rues rectilignes, structure géométrique, trace de l'ère industrielle très forte.	Peu stable, présence de turbulence, vitesse du vent élevée, effets du vent fréquemment rencontrés : effet de coin, effet de sillage et effet Venturi.	Lieux très propices pour installer des éoliennes sur les toits ou proche des angles des tours, évaluation d'énergie éolienne obligatoire.	 (Toulouse, France)
Centre ville : habitat collectif actuel	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 verts, bien structurée, ordonnée et dessinée avec humanité, caractère distinctif.	Stable et périodique, 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 discrètement pour respecter l'environnement.	 (Guangzhou, Chine)
Centre ville : habitat individuel dense	Zone d'habitat généralement de classe aisée et moyenne, compacte, dense, taille moyenne (200 ~ 600 m ²) et indépendante, hauteur moyenne (8 ~ 20 m), maisons de formes variées mais généralement ordonnées, grande rugosité, peu d'espaces ouverts étendus, rues de taille moyennes et assez régulières.	Plutôt stable et périodique à grande échelle, moins de turbulence au-dessus des toits, vitesse du vent moyenne.	Lieux pouvant être sélectionnés pour installer des éoliennes sur les toits des tours les plus hautes. Evaluation de l'énergie éolienne obligatoire en tenant compte des impacts environnementaux.	 (Mumbai, Inde)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (selon Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéraulique	Evaluation prévisionnelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : habitat pavillonnaire	Peu de densité de population, dispersée, lotissements et bâtiments petits, bas de hauteur inférieure à 12 m, bien ordonnés et monotones, géométriques mais souvent rectangulaires pour des raisons économiques, pas de grands espaces ouverts, peu de rugosité.	Stable et périodique à grande échelle, peu de turbulence, vitesse du vent moyenne, un peu plus forte au-dessus des toits à une hauteur supérieure à 15 m qu'en centre ville avec un noyau ancien.	Faible rentabilité de l'utilisation d'éoliennes en raison de la hauteur d'installation et des impacts environnementaux importants.	 (New York, Etats Unies)
Centre ville : habitat de bidonville	Très compacte et dense en plan, taille petite (< 300 m ²) et enchevêtrée, hauteur faible (2 ~ 8 m), forme et style monotone, rues étroites et désordonnées, faible rugosité, presque sans espaces ouverts étendus.	Stable et périodique à grande échelle, peu de turbulence, vitesse du vent très faible au niveau des piétons, vitesse élevée au-dessus des toits.	Lieux propices pour installer des éoliennes de taille moyen ou grande qui peuvent offrir l'énergie à une grande échelle, option pour les gouvernements et certains développeurs.	 (Mumbai, Inde)
Centre ville : zones portuaires et rivières	Dispersée, taille différente mais pas de grande hauteur (inférieure à 15 m), bandes de verdure, bâtiments temporaires ou de stockage (silos, cuves, entrepôts), formes peu ordonnées, faible rugosité.	Stable et périodique, turbulence moyenne, 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.	 (Lyon, France)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (selon Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéraulique	Evaluation prévisionnelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Centre ville : grandes zones vertes	Collines, montagnes, rivières ou lacs dans la ville, parcs, jardins publics, peu de bâtiments ou des bâtiments de taille petite, grands espaces ouverts, faible rugosité.	Stable et périodique, vitesse du vent élevée et variée selon les endroits considérés.	Lieux très propices pour installer des éoliennes indépendantes, évaluation obligatoire des impacts environnementaux (paysage).	 (New York, Etats Unies)
Périphérie : espaces de loisirs, zones commerciales	Grands espaces ouverts (espaces verts, courts de tennis, piscines, parkings, grandes routes rapides), peu de bâtiments (stades, supermarchés, entrepôts).	Généralement stable et périodique dans un grand espace ouvert, 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.	 (Toulouse, France)
Périphérie : parc high-tech, campus universitaire.	Construite dans les années 1980-90, peu dense, grands espaces ouverts (espaces verts, places ou complexes sportifs), bien planifiée et structurée, caractère distinctif, bâtiments de taille assez grande (30 ~ 100 m), hauteur moyenne (10 ~ 20 m)	Stable et périodique, une vitesse du vent moyenne en zone périurbaine, effets du vent fréquemment rencontrés : effet de coin et effet Venturi selon les endroits et le temps, 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).	 (Pékin, Chine)

Type de morphologie urbaine	Caractéristique de la morphologie urbaine (selon Rochel 2007)	Caractéristique de l'environnement aéraulique	Evaluation prévisionnelle pour capter l'énergie éolienne	Exemple (source : Google map)
Péphérie : zones industrielles	Grande taille des bâtiments et grands espaces ouverts, peu ordonné (espaces verts, places ou parkings), constructions temporaires et entrepôts, à proximité des échangeurs des autoroutes et voies rapides, peu dense, hauteur faible (4 ~ 12 m), style monotone.	Peu stable, une certaine turbulence, vitesse du vent élevée, ambiance aéraulique peu agréable.	Lieux très propices pour installer des éoliennes intégrées avec l'architecture, des éoliennes économiques et pratiques proposées, peu de contraintes.	 (Toulouse, France)
Péphérie normale : faubourgs	Formes linéaires d'urbanisation le long de voies de communications importantes, peu dense, déséquilibrée en développement d'espace, bâtiments de taille petite et de hauteur faible, style monotone, faible rugosité.	Stable et périodique en général, vitesse du vent moyenne en zone périurbaine, 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.	 (Toulouse, France)

2.3 Paramètres de forme urbaine

Concernant les 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)

2.3.1 Trois catégories d'indicateurs

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

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

Pour les indicateurs « morpho-physiques », Groleau *et al.* (1995)⁴² 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)⁴³ a étudié les effets microclimatiques à l'échelle du tissu urbain : densité du bâti, pourcentage de minéralisation, taux de percement horizontal d'un tissu urbain, rugosité, et à l'échelle de l'espace urbain : prospect équivalent d'un espace, longueur équivalente, facteurs d'obstruction minérale, facteur d'ombre portée, fraction de masque, densité minérale, densité végétale, taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace, taux de vitrage de la façade et 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 été faites. 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 bâties 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 la hauteur de bâtiment par la profondeur du dégagement à partir de 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 » qui visent à caractériser ce qui est ressenti par les usagers des espaces urbains, la caractérisation de l'interaction du physique et du bâti ne constituant pas une finalité en soi.*

Ces indicateurs s'appliquent dans 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 supports écrits et médiatiques.* En raison de son opérabilité limitée et de l'objet éloigné de notre recherche, nous ne les détaillons pas ici.

- *les indicateurs morphologiques graphiques qui visent tout d'abord à décrire la forme urbaine afin d'en communiquer les performances qualitatives (ensoleillement, vue du ciel, etc...).*

⁴² 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.

⁴³ 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 pour 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), la profondeur de vue, l'angle de vue du ciel, l'anisotropie de l'espace (défini par la compacité, l'étalement et l'excentricité de l'espace). L'auteur relève l'insuffisance de ces indicateurs graphiques en raison de leurs applications limitées aux sites de mesures ([Benzerzour 2004](#), pp. 235-245).

De plus, l'auteur propose principalement « l'indice d'ouverture directionnelle du vide urbain » indiquant que plus l'ouverture est importante, plus le point où l'espace est analysé est perméable aux paramètres d'environnement climatique. Il a plusieurs avantages : il est simple, facile à utiliser et adapté à plusieurs échelles. Sa représentation graphique permet de caractériser un ensemble urbain ou de comparer des ensembles urbains complexes avec de multiples possibilités d'applications telles que le vent, le soleil, la lumière, la pollution sonore ou atmosphérique, etc... ([Benzerzour 2004](#), pp. 282-283). Cependant, l'une de ses limitations est d'analyser des points ce qui rend les prévisions de l'impact de l'environnement dans un quartier rarement disponibles. Comparativement, les indicateurs tels que la porosité et l'occlusivité sont plus adaptés à notre sujet.

2.3.2 Choix des indicateurs

Grosso ([1998](#)) a donné des relations entre les paramètres de l'environnement et ceux de la forme, par exemple, la forme et la disposition des bâtiments induisent différents motifs d'ombrage et différents modes de circulation du vent. Steemers ([2002](#)) a présenté dans le projet PRECis la caractérisation de la forme urbaine qui influence le micro-climat et la consommation d'énergie. Le cas de l'environnement aéraulique est présenté dans le [Tableau 2-2](#).

Tableau 2-2

Paramètres de correspondance entre l'environnement aéraulique et la forme urbaine (selon [Steemers 2002](#))

Paramètres de l'environnement aéraulique	Paramètres de la forme urbaine
Orientation des vents	Sens des rues ou de l'espace
Coefficient de traînée et de tension	Silhouette de ville au sens du vent
Dispersion de la pollution	Idem à la porosité et à l'orientement du vent
Vitesse moyenne proche de la terre	Pas de paramètre
Turbulence	Angle, espace entre bâtiments, rugosité de la façade, végétation
Ventilation générée par chaleur	Orientation, ratio H/W

Edussuriya *et al.* ([2011](#)) ont adopté vingt paramètres de morphologie urbaine pour analyser des situations de pollution dans vingt quartiers (200 m × 200 m) de cinq arrondissements de Hong Kong. La liste des paramètres de morphologie urbaine assez détaillée et résumée dans une importante bibliographie ([Annexe 2.3](#)) nous intéresse pour notre étude. En effet, il est donné un classement clair de différentes variables dans différents domaines. Parmi les nombreuses variables, six seulement sont utilisées car elles sont adaptées à notre sujet de recherche et à l'étude à l'échelle du quartier. Il s'agit du prospect moyen, de l'occlusivité, de la hauteur de rugosité, du nombre de bâtiments et de la déviation régulière de la hauteur.

Cionco et Ellefsen ([1998](#)) ont donné une méthode pour créer une base de données de morphologie urbaine avec une haute résolution (40 m - 400 m) pour la simulation numérique du flux aéraulique dans la ville (échelle de 2 Km × 2 Km à 20 Km × 20 Km). Ils donnent une liste de propriétés physiques, dont les plus intéressantes pour nous sont le type de zone urbaine, la densité de construction, la hauteur du bâtiment, l'orientation du bâtiment, la pente du toit, la réflectivité du toit, la surface imperméable, la réflectivité de la surface de la terre, le pourcentage de terrain ombragé par les arbres. L'attention est portée sur l'usage des sols pour analyser des fragments de la ville en intégrant des considérations économiques et sociales qui apparaîtront dans notre liste des indicateurs morphologiques urbains. En effet, l'indicateur « pourcentage de terrain ombragé » peut

être intéressant pour notre étude car l'influence des arbres sur la ventilation de ville ne peut pas être ignorée. C'est pourtant souvent le cas aussi bien dans les simulations numériques que pour les essais en soufflerie.

Pour notre recherche, nous n'avons choisi que des paramètres proposés dans l'article de Colaninno *et al.* (2011) et utiles dans son cas d'étude. Dans le cadre de la simulation du vent dans la ville, notamment à des hauteurs assez importantes où l'énergie éolienne est généralement importante, la classification de la forme urbaine est plutôt concentrée sur la forme physique et les interactions entre les différents éléments et le vent. A partir de nombreuses variables et d'indicateurs de morphologie urbaine, nous pouvons déduire ceux qui sont adaptés à notre sujet. Nous proposons des indicateurs d'évaluation différents (Tableau 2-3) en fonction des quatre modèles de simulation choisis pour notre recherche : modèle simple, modèle idéal, modèle de quartier typique et modèle de quartier réel.

Tableau 2-3

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, angle et taille (hauteur, longueur et largeur) de bâtiment • Type de toiture et angle d'inclinaison • Plan et taille de la cour • Séparation, angle de position, plan du 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 la construction, prospect moyen. • 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 la construction, prospect moyen. • CES, COS, densité de la végétation, nature d'utilisation des terres • Porosité, rugosité, occlusivité, densité de surface frontale

2.4 Environnement aéraulique et morphologie urbaine

De nombreuses disciplines scientifiques s'intéressent aux problèmes de l'écoulement du vent dans la ville : pollution de l'air, ventilation naturelle des bâtiments, pluie sur les bâtiments, transfert de chaleur par convection, érosion éolienne, énergie éolienne, condition de l'écoulement au niveau 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, par exemple, les différentes zones de vent autour d'un bâtiment, les différents effets du vent autour d'un ou de plusieurs bâtiments, les différentes formes urbaines proposées pour différents types de climat.

2.4.1 Aérodynamique urbaine

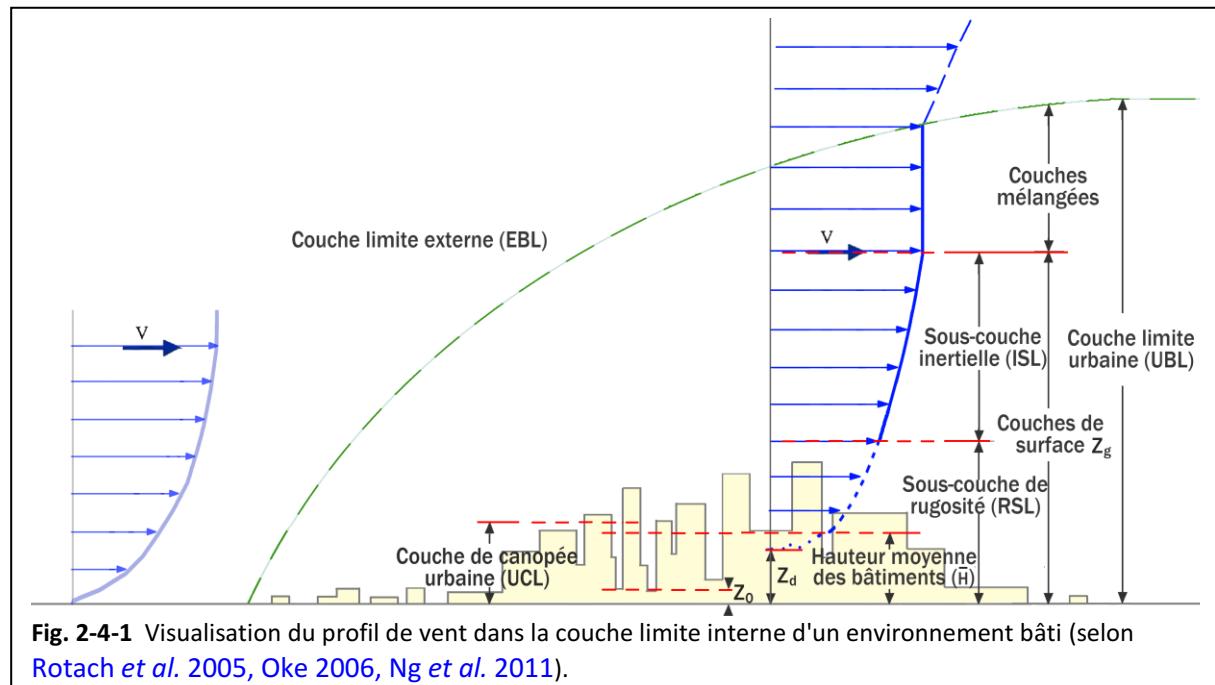
Pour les données d'entrée du vent dans la couche limite atmosphérique, il existe deux méthodes usuelles pour définir la vitesse moyenne du vent u_z à la hauteur z : une loi logarithmique et une loi puissance.

(1) Loi logarithmique

$$u_z = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (\text{Equation 2 - 1})$$

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

La Fig. 2-4-1 montre le profil vertical de vitesse du vent dans un contexte urbain selon la loi logarithmique.



Comme la couche limite atmosphérique (CLA), la couche limite urbaine (Urban Boundary Layer, UBL), aussi appelée 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 qui correspond à la surface

de forçage. Elle est sans doute en grande partie déterminée 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 2-1](#), à l'intérieur de laquelle les flux turbulents sont à peu près constants et où 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 pour lequel l'homogénéité de l'écoulement horizontal est atteinte. Cela se produit à une hauteur de 2 à 5 fois la hauteur moyenne des obstacles (Raupach et al. 1991, Sanderland et al. 2013).

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

Le profil logarithmique ([Equation 2-1](#)) modélise correctement la sous-couche inertielle mais il est moins représentatif dans la sous-couche de rugosité (Sanderland et al. 2013). Sous la hauteur moyenne des bâtiments \bar{H} , aucun profil de la vitesse du vent ne peut être évalué (Lawson 2001).

Tableau 2-4

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, entrepôts, petites industries, peu d'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 à 2-3 étages peu espacées, jumelées et en lignes, grands arbres, blocs de moins de cinq étages avec des appartements dans un environnement ouvert, maisons mélangées avec des magasins, petites industries, églises, écoles.	7 - 14	3.5 - 8	0,7 - 1.5	0,55 - 0,7	0,08 - 0,16
Haute densité -- Ecoulement turbulent Résidences peu espacées, en lignes, de moins de six étages, bâtiments en forme de blocs, grandes installations (usines, campus universitaires, etc...), centre-ville.	11 - 20	7 - 15	0,8 - 1.5	0,60 - 0,85	0,07 - 0,12
Grandes tours ⁴⁴ -- Flux chaotique ou mixte Noyau urbain ou centralités de banlieue avec des tours dans un environnement urbain dense, complexes institutionnels majeurs.	> 20	> 12	> 2.0	0,50 - 0,70	0,10 - 0,20

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 dans les contextes de petite rugosité (λ_a ou λ_f). A partir de 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 à tous les niveaux de densité. Mais les variables supplémentaires introduites rend ce modèle difficile à utiliser. Pour simplifier le calcul et le rendre plus opérationnel, Grimmond et Oke (1999) ont introduit une hypothèse sur la relation entre la hauteur moyenne des bâtiments \bar{H} , z_0 et z_d ($z_0 = f_0\bar{H}$, $z_d = f_d\bar{H}$). Les valeurs de référence

⁴⁴ Il n'y a presque pas de valeurs mesurées dans cette classe ; par conséquent, les valeurs sont moins assurées.

correspondant à des propriétés aérodynamiques dans la ville sont proposées dans le **Tableau 2-4**. 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) $0,2 \leq \lambda_a < 0,8$.

Par ailleurs, Kastner-Klein et Rotach (2004) ont développé un modèle de profil vertical de vitesse du vent dans la sous-couche de rugosité plus précis que l'**Equation 2-1** et mieux validé :

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

Cependant, comme la vitesse de fraction u^* est souvent obtenue par des mesures sur le terrain, la loi logarithmique rend complexe la prédition du profil vertical du vent.

(2) Loi puissance

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

où u_h est la vitesse de référence ou d'observation météorologique à la hauteur h et α est un coefficient appelé 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 est entre 0,25 et 0,4.

En raison de sa simplicité, la loi puissance est choisie par de nombreuses réglementations pour évaluer les calculs de charges auxquelles sont soumises les structures bâties (Chine : GB50009-2012, Etats-Unis : ASCE7-10, Japon : AIJ2004). Selon GB50009-2012, dans une ville moyenne ou petite (groupe C où il y a des bâtiments denses dont la hauteur moyenne dans un rayon de 2 Km est $18 \text{ m} > \bar{H} > 9 \text{ m}$), le coefficient $\alpha = 0,22$ et la hauteur de la couche limite (où la vitesse du vent stabilise, voir **Fig. 2-4-1**) $Z_g = 450 \text{ m}$. Au centre d'une grande ville (groupe D où il y a des grandes tours et des bâtiments denses avec $\bar{H} \geq 18 \text{ m}$), $\alpha = 0,3$ et $Z_g = 550 \text{ m}$. En même temps, comme pour 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 : $H_i = 15 \text{ m}$ et pour une grande ville : $H_i = 20 \text{ m}$.

Plus précisément, des travaux sur le potentiel éolien pour établir un atlas marocain ont conduit à proposer un modèle pour représenter le coefficient α par rapport au vent de référence (vitesse U_h à la hauteur h) et la rugosité de terrain (z_0) :

$$\alpha = \frac{x - 0,0881 \ln(U_h)}{1 - 0,0881 \ln(h/10)} \quad (\text{Equation 2-3})$$

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 donnée dans le **Tableau 2-4**, 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 selon l'équation suivante :

$$I_z = I_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \quad (\text{Equation 2-4})$$

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 validées par les résultats de mesures in situ pour des cas correspondant à une hauteur entre 20 m et 100 m à partir du sol.

Pour une hauteur de plus de 100 m et dans la couche limite urbaine, la loi puissance donne une meilleure prédiction de la vitesse moyenne du vent (Cook 1985). Cependant, pour différentes régions ou villes, les rugosités sont variées et difficiles à estimer. Aujourd’hui, on utilise encore souvent des valeurs empiriques. En considérant la hauteur d'espace étudié dans notre modèle où les bâtiments peuvent atteindre plus de 100 m, la loi puissance est choisie pour évaluer le profil de vitesse du vent.

2.4.2 Climat et forme urbaine

Pour bien analyser les relations entre climats et formes urbaines, on peut les classer en trois groupes correspondant aux quatre échelles spatiales définies par T.R.Oke⁴⁵ : l'échelle macroscopique, l'échelle mésoscopique, l'échelle locale et échelle microscopique.

A l'échelle macroscopique et mésoscopique ($d > 10$ Km), on travaille plutôt sur la météorologie. Par exemple, on considère la turbulence atmosphérique dans les villes (Weber et al, 2010) et la dispersion d'air en périphérie qui ont une influence importante sur la couche limite urbaine (Sun et al. 2012).

A l'échelle locale ($0,1$ Km $< d < 5-10$ 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 sur la performance thermique. On peut en déduire la description des types de climats et des formes urbaines (Annexe 2.4). De même, Cailleux (1965) a indiqué que l'énergie éolienne est exploitabile 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. Au contraire, 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 venteuses sauf les régions de climat « chaud - humide ». Golany (1996) a aussi indiqué des relations simples entre le vent et la morphologie urbaine. Par exemple, pour l'orientation des rues, on constate que les rues droites et parallèles « accompagnent » le mouvement de l'air dans la ville ; au contraire, les rues perpendiculaires les unes aux autres peuvent abaisser la vitesse du vent.

Ratti et al. (2005) ont utilisé un modèle numérique d'altitude DEMs (Digital Elevation Models) et le modèle Eclairage et Thermique LT (Lighting & Thermal) pour analyser trois îlots de différentes villes et il a montré la relation entre la forme urbaine et la consommation d'énergie. La méthode de comparaison entre les fragments d'une ville (ou de différentes villes) à l'échelle appropriée nous intéresse. En comparant 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 portant sur quatre zones (évaluées à partir de paramètres de forme urbaine tels que hauteur de bâtiment, la 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 la ville. Ils ont montré l'importance de la perméabilité du vent au niveau de la couche de base des 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.

⁴⁵ OKE, T.R. (1987). Boundary layer climates. London et New-York : Methun, Second edition (first edition 1978), pp3.

A l'échelle microscopique ($10^{-2} \text{ m} < d < 10^3 \text{ m}$), on se concentre 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 essais en soufflerie et par l'analyse CFD. Ils ont démontré que, pour les longues rues à l'échelle du quartier ($50W < L < 80W$)⁴⁶, l'effet de ventilation de la rue avec des immeubles hauts, est plus important que celui qui est obtenu avec des rues ayant des immeubles bas. Le même résultat est obtenu avec des rues réelles ($8W < L < 34W$) par Kitous et al. (2012). Gao et al. (2012) ont analysé les situations de ventilation d'un ensemble de bâtiments sur le campus de l'Université de Reading par une méthode de mesure sur site et une méthode statistique. En comparant les deux facteurs les plus importants, la disposition des bâtiments et la météorologie, ils ont mis en évidence des effets variés sur la vitesse du vent aux six points observés. Kitous et al. (2012) ont évalué les données du vent en faisant des mesures sur site dans une ville du sud de l'Algérie, en climat chaud et sec et ils ont 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 ne travaille sur la production d'énergie éolienne, les études réalisées sur le sujet de la forme urbaine et de l'environnement du vent peuvent être intéressantes pour notre recherche, par exemple, sur la prise en compte du type de climat, des relations entre le vent et la morphologie urbaine, d'une échelle appropriée ou de l'impact des bâtiments sur la ventilation, etc...

2.4.3 Ecoulement du vent autour de bâtiments

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

La recherche sur l'aérodynamique de bâtiments est essentielle pour le confort et la ventilation dans l'environnement bâti. A cause de la complexité de la 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 produits au cours des dernières décennies.

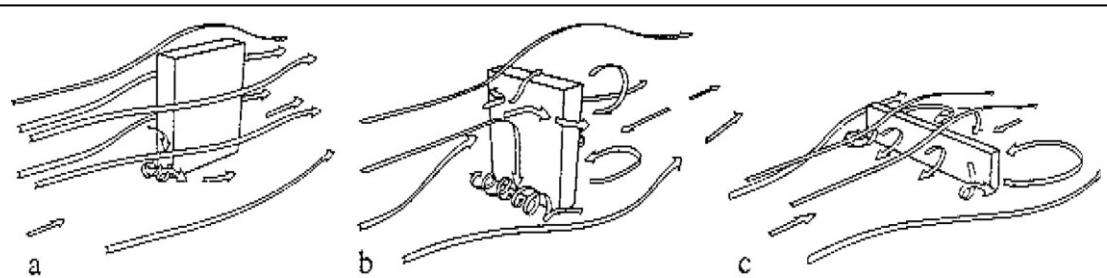


Fig. 2-4-2 Trois types d'écoulement du vent autour d'un bâtiment (source : Beranek 1984a).

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

On voit que les zones de flux autour du bâtiment sont variées. Bottema (1993) nous montre les zones typiques autour d'un bâtiment en barre (Fig. 2-4-3). Dans la figure on voit que le flux en 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 du fluide ne peuvent pas suivre un

⁴⁶ W : largeur de la rue ; L : longueur de la rue.

brusque changement de direction, le flux se sépare de la surface à l'angle du bâtiment en amont. L'endroit de la séparation est fixe pour les angles droits mais pas pour les angles arrondis (Bottema 1993, pp. 23-24). Le flux à l'angle 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. 2-4-4). Dans le cas du flux résistant (cas a, ratio de l'écartement S_x par la hauteur moyenne des bâtiments h inférieur ou égale à 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. 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 qui se produit entre des bâtiments isolés. En outre, il conclut que les rues courtes avec $S_x/h < 4$ sont les plus agréables pour le confort aéraulique (Bottema 1993, pp. 180).

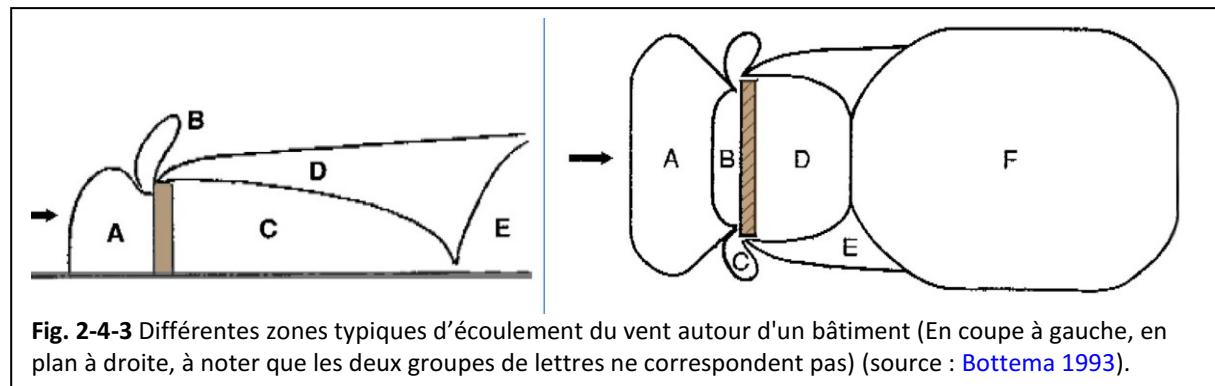


Fig. 2-4-3 Différentes zones typiques d'écoulement du vent autour d'un bâtiment (En coupe à gauche, en plan à droite, à noter que les deux groupes de lettres ne correspondent pas) (source : Bottema 1993).

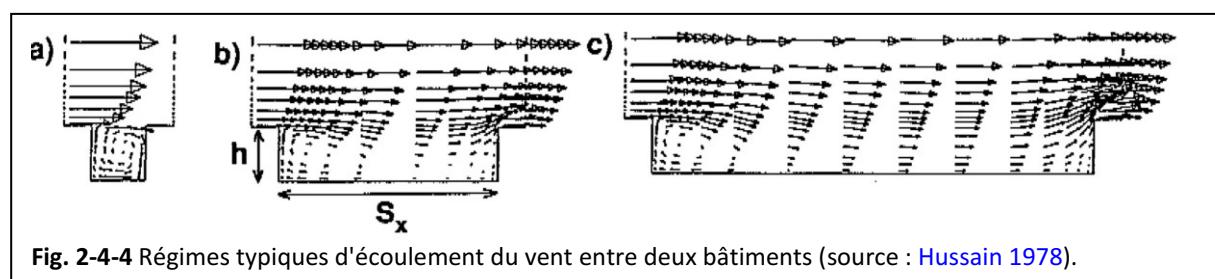


Fig. 2-4-4 Régimes typiques d'écoulement du vent entre deux bâtiments (source : Hussain 1978).

Par rapport à l'effet thermique sur la ventilation, l'expérimentation faite par Yang (2004, pp. 210) indique que l'effet thermique ne contribue que de 2 % à la vitesse moyenne de ventilation. 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 produit peut devenir dominant (Bottema 1993, pp. 28). Autrement dit, pour des vents de vitesse moyenne ou grande, p. ex. 5,0 m/s, l'influence de l'effet thermique sera faible. Pour cette raison, afin de simplifier les conditions initiales des simulations futures, nous ne considérons pas l'effet thermique.

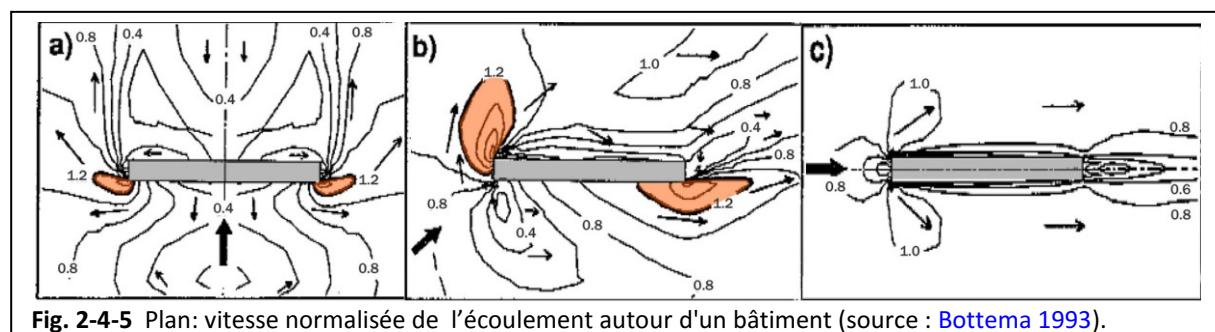


Fig. 2-4-5 Plan: vitesse normalisée de l'écoulement autour d'un bâtiment (source : Bottema 1993).

Quelques exemples de simulations. La Fig. 2-4-5 nous montre des résultats de vitesse normalisée d'un écoulement autour d'un bâtiment (largeur \times longueur \times hauteur = 15 m \times 150 m \times 50 m) avec

une rugosité $z_0 = 0,03$ m. On peut voir que la surface de flux de coin sous un 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 d'un bâtiment (corner stream radius en anglais, voir le plan dans la Fig. 2-4-6) où $U/U_0 > 1,2$ (en orange dans la Fig. 2-4-5)⁴⁷ pour au moins une orientation du vent. La Fig. 2-4-6 (A) nous donne les différentes valeurs de R en fonction de la largeur des bâtiments W et de leur hauteur H . Les résultats d'expériences montrent que R est environ $1,4H$ pour le cas $W > H$ et peut atteindre $2,3W$ quand $H > W$. De 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 davantage si U/U_0 est proche de sa valeur maximale (Bottema 1993, pp. 87).

De plus, les vitesses maximales dans les zones des angles d'une même forme de bâtiment sont comparées dans plusieurs études en soufflerie : $U/U_{H0(max)} = 0,95$ par Lawson et Penwarden (1975), $U/U_{H0(max)} = 0,99 \pm 0,10$ par J.A. Leene (1991) en soufflerie et $U/U_{H0(max)} = 1,1$ par Bottema (1993) en CFD. La Fig. 2-4-6 (B) nous montre que pour un flux normal (0°), U/U_{H0} augmente jusqu'à 0,9 lorsque $W/H > 2$. Au contraire, 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 de 1,12 lorsque $W/H = 5$. De 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. 2-4-7). 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 une vitesse $U > 0,9U_{H0}$ apparaît sur la plus grande surface du passage en flux oblique (-45°), et que la U est environ 20 % plus importante que dans le cas d'un 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. Dans ce cas, on trouve que l'indicateur U/U_{H0} est plus approprié que U/U_0 (Bottema 1993, pp. 96-101).

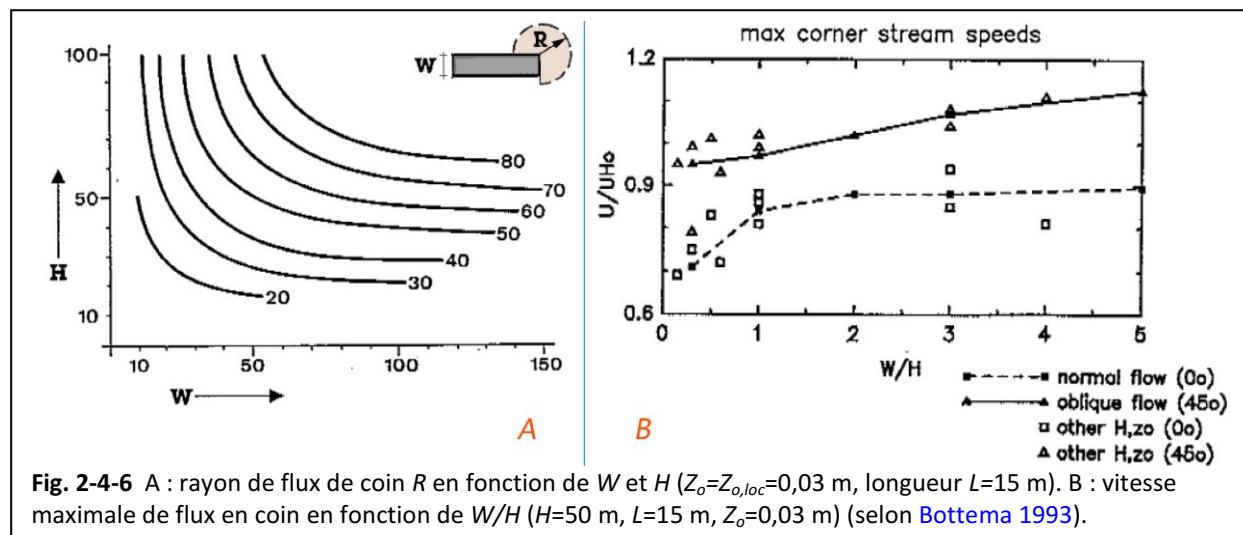


Fig. 2-4-6 A : rayon de flux de coin R en fonction de W et H ($Z_0 = Z_{0,loc} = 0,03$ m, longueur $L = 15$ m). B : vitesse maximale de flux en coin en fonction de W/H ($H = 50$ m, $L = 15$ m, $Z_0 = 0,03$ m) (selon Bottema 1993).

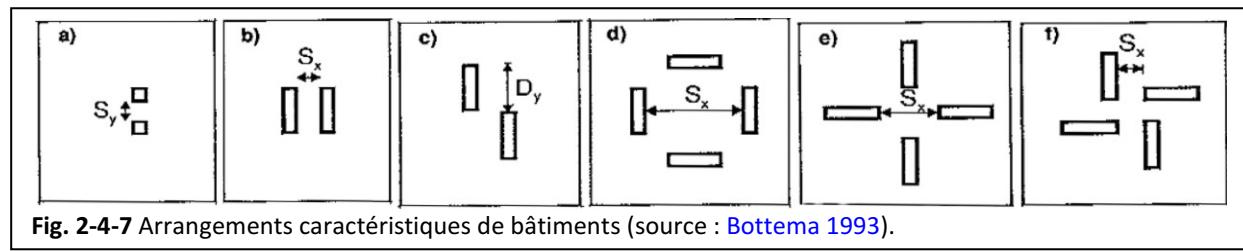


Fig. 2-4-7 Arrangements caractéristiques de bâtiments (source : Bottema 1993).

⁴⁷ U est la vitesse moyenne du vent autour de bâtiments à la hauteur des piétons (1,75 m).

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

U_{H0} est la vitesse du vent donné à la hauteur de bâtiment H .

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 afin de 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 (p. ex., les résultats empiriques ou d'expériences des chercheurs) avant de faire une simulation CFD. On peut aussi les considérer comme des références de comparaison par rapport aux simulations CFD.

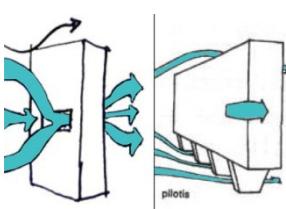
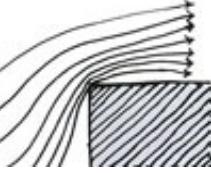
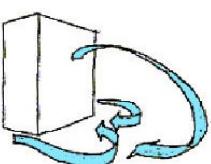
2.4.3.2 Types d'effet du vent autour de bâtiments

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 2-5 tous les effets aérodynamiques et nous rajoutons une colonne sur l'évaluation prévisionnelle du potentiel éolien. Les critères d'évaluation correspondent à :

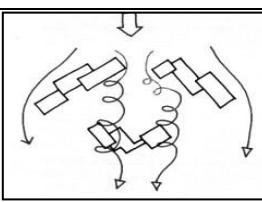
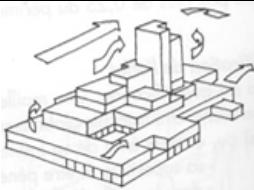
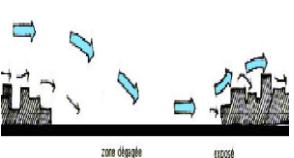
- 1) l'amplitude de l'effet, il est sans doute le critère le plus important,
- 2) la difficulté, par exemple, la difficulté d'installation des éoliennes,
- 3) la valeur raisonnable, par exemple, il ne faut pas sacrifier trop d'espace architectural pour une éolienne, comme parfois les trous en façade,
- 4) la faisabilité, par exemple, 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 2-5

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	Effet de trou 	Phénomène d'écoulement dans les trous frontaux ou dans les passages sous les immeubles.	Les valeurs de la sur-vitesse évoluent entre 1,2 et 1,5 pour une hauteur construite variant de 20 à 50 m.	Oui
2	Effet de coin 	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 étages à des tours de grande hauteur (30 étages plus).	Oui
3	Effet de sillage et de rouleau aval 	Phénomène de tourbillonnement à l'arrière d'une construction en présence d'une circulation fluide.	Le phénomène est proportionnel à la surface du bâtiment qui s'oppose à l'écoulement principal du vent et la vitesse est faible au centre.	Non

	Effet aérodynamique et légende	Description	Evaluation de l'effet	Intérêt sur potentiel éolien
4	Effet Wise / Effet de rouleau tourbillonnaire aux pieds des immeubles	Phénomène de tourbillonnement à composante verticale au pied des bâtiments face au vent lorsqu'une circulation fluide traverse un ensemble de bâtiments de tailles différentes et implantés parallèlement.	Lorsque l'ensemble des bâtiments a une hauteur qui se situe entre 10 et 30 m, le coefficient de survitesse peut prendre la valeur 1,5. Pour un ensemble dont les hauteurs sont entre 15 et 90 m, la valeur de la survitesse peut être égale à de 1,8.	Non
5	Effet de barre	Phénomène de déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre sous un vent incident à 45° c'est-à-dire 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 sur-vitesse de l'ordre de 1,4 sur une distance d'environ 2 fois la hauteur construite.	Non
6	Effet de tourbillon amont	Phénomène de mouvement d'air tourbillonnaire à composante verticale, plongeant sur la façade directement exposée au vent.	Peu d'effet pour les constructions basses, effet important pour les constructions de plus de 5 étages (augmentation 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 étant 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 l'effet Venturi entraîne une valeur de la survitesse d'environ 1,6.	Oui
8	Effet de liaison	Phénomène d'écoulement entre des zones de pressions différentes entre des immeubles. Il est formé à cause de la disposition de deux constructions décalées créant un couloir de liaison.	La valeur de la sur-vitesse 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 de la survitesse peut atteindre 1,8.	Non
9	Effet de canalisation	Phénomène d'écoulement le long d'une rue ou d'un couloir à ciel ouvert. La rue 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

	Effet aérodynamique et légende	Description	Evaluation de l'effet	Intérêt sur potentiel éolien
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 de l'alvéole 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 avec des décrochements et de forme pyramidale.	Les sur-vitesses 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 d'une longueur de plus de 100 m, les effets de l'environnement proche ne se font plus sentir. Les lieux de la forme d'une place sont dépendants des accès aux rues et aux autres éléments de convergence du vent.	Non

2.4.3.3 Propositions pour un bon environnement aéraulique

Un bon environnement aéraulique devrait conduire à un ressenti confortable et être « sûr ». Bottema (1993) a expliqué la différence entre le vent confortable et le vent sûr. En fait, on ne peut prendre en compte que la vitesse sûre maximale pour les piétons. On constate que l'équilibre et la direction de la marche seront affectés quand la vitesse du vent est supérieure à 15 m/s. Cette situation pourrait être dangereuse 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).

Cependant, différents des indicateurs de sécurité, les indicateurs de confort ne peuvent pas être directement reliés aux effets du vent car le sentiment de mal-être varie beaucoup selon la vitesse du vent ou des rafales et d'une personne à l'autre. Une enquête de Jackson (1978) auprès de piétons a montré que 57 % des gens sont « insatisfaits » si $U_0 > 6$ m/s (Bottema 1993, pp. 66). Dans le mémoire de Zhang D.F. (2011, pp. 70), l'auteur a appliqué le critère de confort du vent pour les piétons (hauteur de 2 m depuis le sol), avec un seuil de vitesse de 6 m/s, en analysant l'énergie éolienne autour de bâtiments.

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

- Une largeur maximale de rue de 8 à 19 fois 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.

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

- Les activités avec de 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 du côté le plus long des bâtiments et surtout pas près des angles des bâtiments ni dans les espaces entre les constructions.

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

- Les immeubles de grande hauteur décalés en plan 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, par ordre décroissant : la hauteur du bâtiment H , l'angle du flux du vent 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 du 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 en tant que référence lorsque nous évaluons le vent à une hauteur importante. En plus, ces règles de conception et de planification sur l'environnement aéraulique doivent être respectées dans le cadre de l'urbanisme.

2.5 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 ce sujet. Différentes théories et méthodes sont apparues autour de la morphologie urbaine, notamment dans le cadre de ISUF créé en 1996.

La morphologie urbaine concerne l'étude des formes urbaines. Basée sur la théorie de typologie et de 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, la morphologie urbaine est souvent utilisée pour les problèmes d'aménagement comme l'analyse des transports, 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, à la nature de l'utilisation du sol en aménagement et à différentes formes de villes archétypales. Dans ce cadre, 17 exemples pris dans 14 types de tissus urbains sont proposés. Leurs caractéristiques morphologiques, les caractéristiques de l'environnement aéraulique et les évaluations prévisionnelles sur l'installation des éoliennes sont discutées.

Pour les paramètres de forme urbaine, trois catégories ont été identifiées. La catégorie qui porte 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, la forme physique et les interactions entre les bâtiments et le vent sont d'un grand intérêt. Ainsi les différents indicateurs de la morphologie bâtie et urbaine sont choisis et adaptés aux quatre étapes des modélisations (voir le **Tableau 2-3**).

Ensuite, dans la section de l'environnement aéraulique et de 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 nos futures simulations. Différentes recherches dans le domaine reliant le climat (surtout l'environnement aéraulique) et la forme bâtie ou urbaine sont résumées. Les résultats et expériences nous serviront de références, par exemple, pour la prise en compte du climat, des relations entre le vent et la morphologie urbaine, de l'échelle appropriée, des impacts de bâtiments sur la ventilation, etc... Pour mieux connaître la performance d'écoulement du vent autour de bâtiments, des exemples de simulation et l'analyse des résultats sont présentés dans la littérature. 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 les formes et les configurations de bâtiments les plus prometteuses avant de commencer la simulation. La sécurité et le confort du vent sont enfin discutés et des règles destinées aux architectes et aux urbanistes pour mieux construire l'environnement aéraulique sont présentées. Celles-ci doivent être respectées dans le cadre de l'urbanisme lorsqu'on utilise l'énergie éolienne dans la ville.

En résumé, ce chapitre nous permet de répondre aux questions suivantes :

- 1) Qu'est ce que la morphologie urbaine ? (Chapitre 2.1)
- 2) Comment peut-on classifier les différentes formes urbaines ? (Chapitre 2.2)
- 3) Quels sont les paramètres importants de la morphologie urbaine ? Lesquels nous intéressent ? (Chapitre 2.3)
- 4) Comment le vent s'écoule-t-il dans la ville et autour de bâtiments ? (Chapitre 2.4)

3. Modélisation du vent autour de bâtiments

Dans ce chapitre nous allons considérer la modélisation du vent autour des bâtiments. Tout d'abord, nous commencerons par une brève introduction sur la simulation CFD, puis nous présenterons les méthodes numériques associées. Les différents modèles de turbulence les plus utilisés seront décrits et comparés. Comme notre choix s'est porté sur une approche moyennée (de type RANS), la question de la loi de paroi sera étudiée. La bibliographie sur la simulation CFD de l'écoulement du vent dans un environnement bâti sera résumée. Des applications intéressantes sur des sujets proches de notre cas d'étude seront montrées et discutées, notamment l'étude de l'effet de concentration du vent dans le milieu bâti.

3.1 Introduction : 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 in situ (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 expérimentales basées sur l'érosion par l'eau ou le sable peuvent être utilisées mais, moins fiables, leurs résultats ne sont pas exploitables pour la validation de simulation CFD. Le [Tableau 3-1](#) compare les trois méthodes principales pour l'évaluation du vent ([Sharag-Eldin 1998](#), [Bonneaud 2004](#), [Leitl 2000](#), [Blocken et al. 2012](#)).

La simulation CFD résout des systèmes d'équations aux dérivées partielles non linéaires. Il n'existe pas de solution analytique dans le cas général et la résolution passe par des approches numériques itératives. Aucune preuve mathématique ne permet de garantir la stabilité, l'exactitude et la convergence des résultats ([Bonneaud 2004](#)), la validation et la vérification sont donc indispensables avant d'utiliser les résultats de simulations. 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. Comme le processus de validation des simulations est très important, nous allons discuter dans la suite des moyens pratiques pour sa 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... Nous n'avons pas mené d'étude comparative de ces logiciels. L'INSA utilise depuis une vingtaine d'année les logiciels de la société FLUENT et dispose d'une expertise dans le domaine. ANSYS (FLUENT), qui est utilisé pour nos 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 peuvent être dessinées à l'aide du logiciel AutoCAD et puis importées dans ANSYS (FLUENT).

Tableau 3-1

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

Outils d'évaluation	Atouts	Limites
Mesure in situ	<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"> • Généralement plus coûteux que les simulations à l'étape de conception ; • 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 ; • Adapté aux études paramétriques réalisables sur des maquettes dans une veine aéraulique de soufflerie ; • Adapté aux mesures des pressions sur les façades ; • Adapté 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 ; • Influence du 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 ; • Incompatibilité 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 ; • Réservé à des experts.
Code CFD	<ul style="list-style-type: none"> • Très adapté 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 ; • Adapté 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 obtenu en soufflerie ; • Calculs longs si la géométrie est complexe ; • Grande puissance de calcul de l'ordinateur nécessaire ; • Réservés à des experts ; • Difficulté de définir les conditions aux couches limites qui peuvent avoir des effets importants sur la résolution du modèle ; • Difficulté de valider les résultats de la simulation.

3.2 Processus de modélisation par les méthodes CFD

3.2.1 Equations et principes de résolution

La simulation des écoulements par CFD s'appuie sur les lois de conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement. Pour l'écoulement du vent dans l'environnement bâti, 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). Nous avons choisi de ne pas considérer les effets thermiques et nous avons donc écarté l'équation du bilan d'énergie. Ainsi, nous traiterons des deux équations de conservation de la mase et de la quantité de mouvement dites équations de Navier-Stokes :

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Equation 3-1})$$

- Bilan de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (\text{Equation 3-2})$$

où u_i désigne la composante du vecteur de la vitesse instantanées de l'écoulement dans la direction de x_i ($i = 1, 2, 3$, 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,

f_i désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide.

Ces équations sont locales et instantanées : elles décrivent toutes les échelles présentes dans l'écoulement, en temps et en espace. Or dans un écoulement turbulent, les plus petites structures turbulentes sont caractérisées par des tailles (et des durées de vie) extrêmement petites en comparaison de l'échelle des bâtiments. Cette large gamme d'échelle est un obstacle à la résolution complète (ou Directe) des équations de Navier-Stokes. Des modèles ont donc été développés, notamment pour la turbulence et conduisent à ce que l'on appelle une approche moyennée. Ces points vont être précisés dans la suite.

Une seconde caractéristique de ces équations est qu'il n'existe pas de solution analytique. Le calcul des vitesses en tout point du domaine simulé repose donc sur une résolution numérique des équations. Pour ce faire, le domaine de calcul est divisé en un grand nombre de volumes élémentaires. Les équations locales sont intégrées à l'échelle de ce volume (ou maille) et on obtient ainsi un système non linéaire d'équations algébriques (en régime permanent) ou différentielles (si l'on conserve la dimension temporelle). On parle de discréétisation des équations. Nous n'entrerons pas dans le détail des techniques de discréétisation et de résolution numérique des équations discréétisées. Cependant, on gardera à l'esprit que la dimension de la maille (ou du volume élémentaire) fixe l'échelle des phénomènes que l'on peut simuler sans recourir à une modélisation. Tout phénomène dont l'échelle est inférieure à la maille devra être modélisé. Par ailleurs, la dimension du calcul et donc le temps nécessaire à la résolution augmentent proportionnellement avec le nombre de mailles.

Il existe plusieurs méthodes pour la modélisation de la turbulence dans les codes de CFD. Il est très important de choisir un modèle adapté au problème auquel nous faisons face. Car, souvent, à partir de données d'entrées identiques, en utilisant différents modèles de turbulence on peut obtenir des résultats très différents ([Laporte, 2008](#)).

3.2.2 Méthodes de résolution et modèles de turbulence

En résumé il existe deux types d'approches pour la simulation numérique : la Simulation Numérique Directe et la simulation avec modèle de turbulence. Au sein des approches moyennées, on distinguera encore les modèles RANS (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 [Fig. 3-2-1](#). Les détails sont donnés dans les paragraphes suivants.

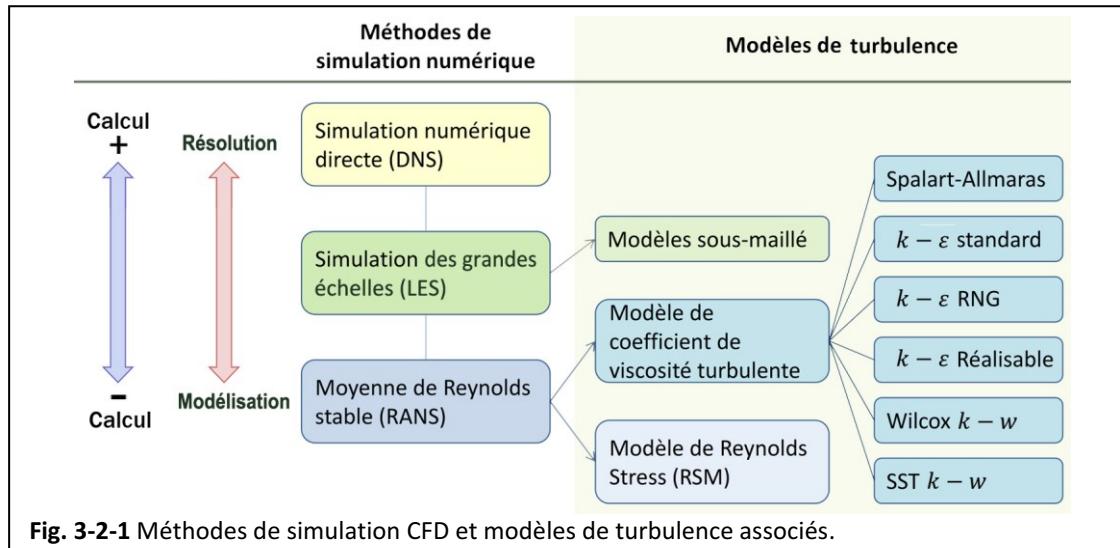


Fig. 3-2-1 Méthodes de simulation CFD et modèles de turbulence associés.

a) Simulation Numérique Directe (DNS : *Direct Numerical Simulation*)

Cette méthode permet de résoudre toutes les équations de Navier-Stokes sans un modèle de turbulence. Le calcul doit résoudre toutes les échelles spatiales et temporelles de l'écoulement, en représentant toutes les structures tourbillonnaires. La résolution spatiale et temporelle doit être très élevée. La DNS nécessite donc une grande puissance de calcul et reste limitée à des cas avec un nombre modeste de Reynolds (car le nombre de point de maillage N doit satisfaire : $N^3 \geq Re^{2,25}$)⁴⁸ et réservée à des utilisateurs experts. Pour l'écoulement du vent autour de bâtiments, les nombres de Reynolds sont souvent très élevés ($Re > 10^5$) ([Blocken et al. 2011](#)), donc cette méthode ne convient pas à nos recherches.

b) Simulation des Grandes Echelles (LES)

Située entre les méthodes DNS et RANS, la méthode LES résout directement les grands tourbillons et modélise les petits. Il s'agit aussi d'une méthode instationnaire par nature : une résolution temporelle est nécessaire. Les valeurs moyennes (comparables aux données de terrain) sont obtenues en moyennant les résultats au cours du temps. Les principes de cette méthode sont résumés comme suit :

- La quantité de mouvement, la masse, l'énergie sont transportées 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 ;
- Les petits tourbillons sont moins dépendants de la géométrie, ont tendance à être plus isotropes et la physique associée est par conséquent plus universelle ;
- On peut associer un modèle de turbulence universel aux plus petits tourbillons.

⁴⁸ www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Direct_numerical_simulation_%28DNS%29

Lors de l'utilisation de la méthode 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 écoulements en régime transitoire, autour ou derrière un obstacle, qui ne peuvent pas être simulés par les modèles RANS en stationnaire (Davidson et Nielsen 1996). Cette approche nécessite des mailles sensiblement plus fines que celles utilisées pour les calculs RANS. En outre, comme il est conçu pour résoudre les instationnarités de l'écoulement, il doit être exécuté pour des temps suffisamment longs afin d'obtenir des statistiques convergées de l'écoulement modélisé. Les besoins en puissance et en temps de calculs sont sensiblement moins élevés que pour la DNS. Donc la LES peut être utilisée pour des applications industrielles ou environnementales.

c) Simulation en Moyenne de Reynolds (RANS)

Sur la base des équations de Navier-Stokes (Equation 3-2), Osborne Reynolds a proposé une décomposition où la quantité instantanée est décomposée en quantités moyennes dans le temps et quantités fluctuantes. Ces équations peuvent être utilisées avec des approximations basées sur la connaissance des propriétés de la turbulence de l'écoulement, pour donner des solutions en moyenne temporelle des écoulements turbulents. Pour un fluide newtonien stationnaire et incompressible, ces équations peuvent être écrites :

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

où \bar{u}_i représente la $i^{\text{ème}}$ ($i = 1, 2, 3$) composante de la vitesses moyenne et u'_i représente la fluctuation de la vitesse définie par $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$, \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 ($-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$) qui apparaît dans les équations, 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 3.1).

Même si les différents modèles RANS se développent et proposent des améliorations sur la base du modèle $k - \varepsilon$ 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 la recirculation en aval des bords au vent et la formation de tourbillons dans le sillage (Blocken et al. 2011). Ceci est dû principalement au fait que le modèle $k - \varepsilon$ est conçu à la base pour les écoulements confinés.

Il n'existe pas de règle universelle pour choisir le meilleur modèle de turbulence (Blocken et al. 2012). On peut cependant s'appuyer sur des comparaisons entre les différents modèles dans certains cas particuliers qui sont fait. Par exemple, Salim et al. (2011) ont trouvé que le modèle LES produit de meilleurs résultats que les modèles RANS et URANS, sur la prédition de l'écoulement du vent et la dispersion des polluants. Blocken et al. (2011) ont trouvé que le modèle RANS régulier est assez fidèle et peut produire des résultats précis (10-20 %) dans les zones du vent de grande vitesse.

L'approche instationnaire (Unsteady-RANS) peut être mentionnée : on peut résoudre les écoulements en régime transitoire avec un coût moindre par rapport à la LES car la turbulence est ici modélisée. En contrepartie, avec l'approche U-RANS, on ne simule pas la turbulence (tandis que la LES simule les grandes échelles de la turbulence), mais seulement les instationnarités du champ de vitesse moyenne. L'approche U-RANS peut donc être une bonne alternative quand les instationnarités sont prévisibles (battements). Néanmoins, très peu d'applications de ce modèle sont proposées aujourd'hui dans le domaine des écoulements externes (Blocken et al. 2011, Salim et al. 2011).

Les caractéristiques des différentes méthodes CFD et les types d'écoulements correspondants sont résumés dans le **Tableau 3-2**.

Tableau 3-2

Résumé des caractéristiques des méthodes CFD et des écoulements correspondants

Méthodes et modèles	Caractéristiques principales	Écoulement 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 calcul.	Avec un nombre de Reynolds faible.
Simulation des Grandes Echelles (LES)	Il résout les grands tourbillons et simule les petits. Il est précis mais demande un maillage assez fin et une bonne puissance de calcul.	Écoulement de sillage, écoulement transitoires, écoulement séparés, écoulement autour ou derrière un obstacle.
Modèle de Reynolds Stress (RSM)	Il simule tous types de tourbillons. Il donne des prévisions plus précises des écoulements complexes que les modèles à une ou deux équations.	Écoulement anisotropes des contraintes de Reynolds : écoulement cycloniques, écoulement très tourbillonnants dans les chambres de combustion, passages d'écoulement rotatif et écoulements secondaires induits par le stress dans les conduits.
RANS, $k - \varepsilon$ 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 turbulents mais pas de tourbillon, ni écoulement tournant, ni écoulement avec une forte séparation, ni écoulement très tendus.
RANS, $k - \varepsilon$ RNG	Il est basé sur le modèle $k - \varepsilon$ standard mais il améliore les résultats lors de courbure aérodynamique élevée et de taux de déformation important.	Écoulement transitoires et écoulement séparés, vortex effusif, transfert de chaleur et masse proches de la paroi.
RANS, $k - \varepsilon$ Réalisable	Il est basé sur le modèle $k - \varepsilon$ 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.	Écoulement le long des parois et écoulement 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 $k - \varepsilon$ dans les autres couches et dans les écoulements libres.	Écoulement le long des parois, écoulement de cisaillement libre et notamment écoulement 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, nous choisirons donc dans la suite les modèles $k - \varepsilon$.

3.2.3 Définition des conditions limites

Lorsqu'il n'y a pas de termes 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 écoulements 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 écoulements) pour donner les informations initiales aux équations de Navier-Stokes, aux premiers points à proximité des parois.

Dans le cas d'un écoulement externe turbulent comme celui qui nous intéressera ici, il est essentiel de disposer de conditions aux limites réalistes. Trois situations sont à considérer :

- L'écoulement au voisinage d'un bâtiment : la surface peut être vue comme une surface lisse.
- L'écoulement au voisinage du sol : il conviendra de prendre en compte la rugosité effective qui tienne compte de la nature du couvert.
- Le profil de vitesses imposé aux limites du domaine : on utilisera un profil de vitesse typique d'une couche limite atmosphérique (CLA).

En ce qui concerne l'écoulement au voisinage d'une paroi lisse, la compilation des données expérimentales a montré qu'il existait un profil de vitesse universel. Un modèle empirique ([Schlichting et Gersten 2000, pp. 522-524](#)) utilisé est la loi logarithmique de la paroi qui peut s'exprimer comme :

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C^+ \quad (\text{Equation 3-4})$$

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 fluide, μ est la viscosité turbulente, ρ désigne la masse volumique du fluide, U^* la vitesse de frottement et C^+ est une constante. Cette loi permet de calculer la vitesse à une distance y_p de la paroi, ce qui évite de résoudre l'écoulement jusqu'à la paroi elle-même. Cependant, cette loi ne s'applique en toute rigueur que pour des valeurs de y^+ comprises entre 30 et 300. Il convient donc de construire un maillage qui respecte cette condition. En pratique il faut donc estimer la vitesse de frottement (environ 5% de la vitesse loin du sol) et en déduire l'épaisseur de la première maille de sorte que la valeur associée de y^+ respecte la condition ci-dessus.

Lorsque la surface présente une certaine rugosité, réelle ou modélisée par une constante apparente k_s , il importe que l'épaisseur de la première maille soit supérieure à cette rugosité. Pour l'écoulement du vent dans une ville dense, l'estimation de cette épaisseur de couche est donnée dans l'[Annexe 3.2](#).

Pour ce qui relève du profil de vitesse dans une couche limite atmosphérique, un profil vertical de vitesse à proximité du sol est donné dans la [Fig. 3-2-2](#).

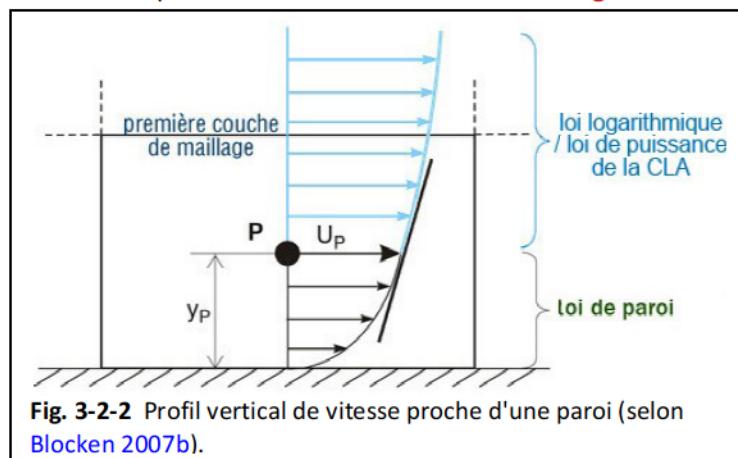


Fig. 3-2-2 Profil vertical de vitesse proche d'une paroi (selon Blocken 2007b).

Par contre, la détermination de la fonction de paroi dans le code pose un certain nombre de problèmes, car 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 (par exemple, 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 du domaine) qui est plus grande que la rugosité physique k_s du terrain ($y_p > k_s$),
- 4) la connaissance de la relation entre k_s et z_0 (la longueur de rugosité aérodynamique).

En pratique il peut être difficile de respecter ces quatre conditions en même temps, en particulier si la rugosité effective est modélisée par une constante k_s et que cette valeur est élevée. Le respect de la condition 3 conduit à imposer une valeur de vitesse (basée sur la loi logarithmique) à une distance exagérée de la paroi, là où le profil de couche limite atmosphérique devrait être utilisé.

Face à ce constat, [Blocken et al. \(2007b\)](#) ont proposé certaines solutions, dont certaines apparaissent faisables et pratiques pour nous :

- 1) Une simulation explicite des éléments de rugosité. Il s'agit alors d'approcher 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 l'écoulement dans la zone d'intérêt. Cependant, ceci induit une augmentation de la durée du calcul.
- 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 ([Blocken et al. 2006](#)). Pourtant, la longueur minimale en amont doit être toujours fournie ($5H$ ⁴⁹ comme proposée par les règles de l'art).

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 complète (avec les bâtiments), 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 utilisés comme conditions en entrée pour la simulation complète.

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 : épaisseur de la première couche de maille proche du sol (terrain) $D_{ter} = 0,3 \sim 0,5$ m, et épaisseur de la première couche proche des murs de bâtiment $D_{bat} = 0,08 \sim 0,1$ m. Une analyse de sensibilité à ces valeurs sera proposée dans la suite de l'étude.

3.2.4 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. Autrement dit, la validation interroge l'évaluation de la pertinence des résultats de calcul par rapport à la réalité physique (entre le monde réel et le

⁴⁹ H signifie la hauteur du bâtiment le plus haut dans le domaine.

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 le 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 moyenne) 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 sont dus à plusieurs sources. Deux sources principales ont été mises en avant (Coleman & Stern 1997, Franke *et al.* 2007, Laporte 2008, Blocken *et al.* 2012) :

1) Les erreurs et les 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 les incertitudes numériques : la modélisation (par exemple, 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 simulations d'écoulement urbain. On trouve que la vitesse du vent en arrière d'un brise-vent d'arbres (ou / et arbustes) est réduite 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 aux espaces ouverts influencent grandement la circulation de l'air à l'intérieur des structures abritées (Sharag-Eldin 1998). Certains chercheurs ont assimilé les arbres à un mur de porosité de 50 % (Baskaran *et al.* 1996). Pour nous, même si l'effet de la végétation n'est pas grand pour les régions de grande vitesse qui nous intéressent (souvent situés à une altitude élevée), la prise en compte de la végétation dans l'analyse locale de la forme urbaine est utile et rend les résultats plus précis et corrects.

Par ailleurs, comme mentionné dans le Tableau 3-1, l'expérimentation en soufflerie coûte cher 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 obtenues sont précieuses et rarement publiées comme les benchmarks par un propriétaire. Même si quelques ensembles de données sur l'écoulement au niveau des piétons (soit pour le confort, soit pour la pollution de l'air) peuvent être trouvées en ligne ou dans des documents anciens en version 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 du Japon. Le processus de validation de paramètres de simulation en utilisant le benchmark sera présenté dans le chapitre 4. Par contre, en raison du manque de validation directe en soufflerie, les méthodes indirectes comme l'étude de paramètres de code, l'analyse de la cohérence du champ et l'analyse de la sensibilité de maillage sont essentielles pour nous assurer de résultats cohérents 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 de 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 la complexité des paramètres de code et son impact important sur les résultats. Donc une étude attentive des paramètres de code est très importante avant de commencer 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. 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 nombreux 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

Il y a souvent de grands décalages entre le profil du vent à l'entrée et celui situé 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 (par exemple, 20 % pour les grandes vitesses), il faut modifier le maillage ou le profil du vent à l'entrée.

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 différents doit être mise en œuvre ([Casey et Wintergerste 2000, Franke et al. 2004, 2007, Tominaga et al. 2008](#)). Parmi les différents maillages correspondant à différents degrés de finesse, nous choisissons un compromis entre la précision et le temps 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, par exemple, la simplicité algébrique des estimateurs locaux par rapport à la formulation complexe des équations aux dérivées partielles ou les solutions précises d'ordre supérieur, le post-traitement par rapport à la modification du code. Parmi eux, les études systématiques de convergence du maillage restent l'approche la plus commune, la plus simple et sans doute constitue la méthode la plus fiable pour la quantification de l'incertitude numérique.

En résumé, de nombreux facteurs impactent le résultat d'une simulation CFD. Cependant, les protocoles de validation et de vérification sont disponibles et ont été menés avec succès sur de nombreux cas tests pour les codes CFD commerciaux (dont Fluent). De plus, selon [Benzerzour \(2004\)](#),

en faisant des études sur plusieurs formes urbaines, nous pouvons éliminer certaines grandes erreurs (accidentelles) en comparant les résultats de différents tissus avec des conditions initiales identiques. Ainsi, bien que nous ne disposions pas de données issues du terrain ou d'expérimentation en soufflerie, nous pourrons nous appuyer sur des données de la littérature pour développer une maîtrise de cet outil dans le cas des écoulements aérodynamiques externes.

3.2.5 Protocoles pour adapter les simulations aux pratiques

L'évaluation de la performance de la simulation CFD sur l'écoulement autour des bâtiments est très difficile (Blocken et Cualtieri 2012). Plusieurs études ont tenté d'établir des protocoles pour orienter les pratiques dans ce domaine. A partir de la bibliographie exploitée, les conclusions suivantes peuvent être données :

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). Il faut représenter le bâtiment de 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 du domaine à la direction du vent) $D_b > 10\sim 15H$. La distance latérale $D_c > 4\sim 6H$. La hauteur du domaine $H_a > 3\sim 6H$. Pour l'écoulement autour de bâtiments bas où les écoulements sont principalement au-dessus du toit, H_a est proposé comme $6H$, alors que pour l'écoulement autour d'une tour où les écoulement 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 inférieur à 3-5 % (Frank et al. 2007, Zhang 2011).
- Une forme hémisphérique 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 entre deux constructions voisines (Frank et al. 2007).
- Le maillage est de préférence composé des cellules hexaédriques ou prismatiques à proximité des parois solides, avec des faces de cellules perpendiculaires à la frontière (Fothergill et al. 2002). 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). Il s'agit ici de contrôler le maillage dans la direction où les gradients de vitesses sont attendus, perpendiculairement à la paroi (Casey et Wintergerste 2000, Menter et al. 2002).

3) Sur la méthode de résolution

- La résolution des équations RANS en stationnaire est la méthode la plus utilisée, très efficace et correspondant à une représentation adéquate de la réalité en soufflerie (Frank et al. 2004). Elle est assez précise (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 $k-\varepsilon$ révisés et de modèles de stress différenciés à la place du modèle de $k-\varepsilon$ standard qui est souvent utilisé ([Franke et al. 2004, Tominaga et al. 2008](#)).
- Pour l'advection, les schémas de discréétisation du premier ordre ne doivent pas être utilisés en raison de la diffusion numérique associée ([Blocken et al. 2012](#)). Ils peuvent et doivent être utilisés pour les itérations initiales, mais des schémas de discréétisation d'ordre supérieur sont recommandés. Cependant, la discréétisation à l'ordre supérieur amène à des exigences plus fortes sur la qualité de maillage ([Frank et al. 2007](#)).

4) Sur les conditions limites et initiales

- Un profil de la vitesse du vent adapté à l'environnement urbain modélisé ([Reiter 2008](#)).
- Une condition de paroi lisse pour les surfaces du bâtiment (correspondant à une hauteur rugosité de zéro) ([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 ne doivent 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 les résidus sont constants 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. Dans le cas des écoulements externes, il convient de prêter attention aux zones proches des parois qui déterminent tout le reste de l'écoulement.
- Outre les résidus, l'examen de la force de traînée sur les bâtiments peut être un indicateur physique de la convergence.
- 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 d'intérêts ([Blocken et al. 2012](#)).

En résumé, l'observation de ces règles permet de réaliser des simulations d'écoulement avec un degré de confiance élevé vis-à-vis des résultats. Il est important de traiter des situations simplifiées pour lesquelles il existe des moyens objectifs de juger de la qualité des résultats (solution analytique, base de données publiées). Une fois cette phase d'apprentissage réalisée, il est possible d'utiliser l'outil CFD comme un moyen de produire des résultats physiquement réalistes dans un grand nombre de configurations et de comparer ces résultats entre eux.

3.3 Bibliographie : simulation CFD du vent autour de bâtiments

3.3.1 Identification des emplacements favorables

Plusieurs résultats intéressants ont été trouvés 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 peu variés.

1) Influence de la forme d'obstacle

• Influence de la configuration

Yang (2011a) a étudié les impacts de la configuration de bâtiments sur le vent avec des simulations CFD. Différentes modifications asymétriques et morphologiques sont considérées. Elle a montré que les capacités d'influencer le vent de ces modifications sont ordonnées de la manière suivante (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 le côté extérieur de la frontière.

• Influence de la hauteur

Dans l'expérience avec 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 présente 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 correspond à 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 une grande tour d'étude et les bâtiments alentour peut augmenter la vitesse du vent autour de cette tour. De 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 faible, plus la vitesse du vent entre eux est grande. 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 pourrait 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 qu'à 4 m sur le toit d'une tour le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent C_v (voir l'[Equation 1-6](#)) peut atteindre de 1,3 à 5,4. Pourtant, certains travaux relativisent l'importance de ce phénomène. 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 des bâtiments au vent (au premier rang) ou d'immeubles plus élevés que la hauteur moyenne des bâtiments alentour. Alors que de nombreux articles trouvent que l'effet de Venturi du vent dans le passage⁵⁰ existe (Stathopoulos *et al.* 1992, Bottema 1993, To et Lam 1995) et que le coefficient C_v peut atteindre 1,4 (Baskaran et Kashef 1995), Blocken *et al.* (2007a) calculent 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 du passage est plus faible que le vent de référence. Ces résultats montrent que l'importance de l'effet de Venturi peut varier beaucoup selon la hauteur de mesure.

- 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 du profil aérodynamique (par exemple, l'aile d'avion) 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).

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. 3-3-1) (Bonneaud 2004, pp. 91).

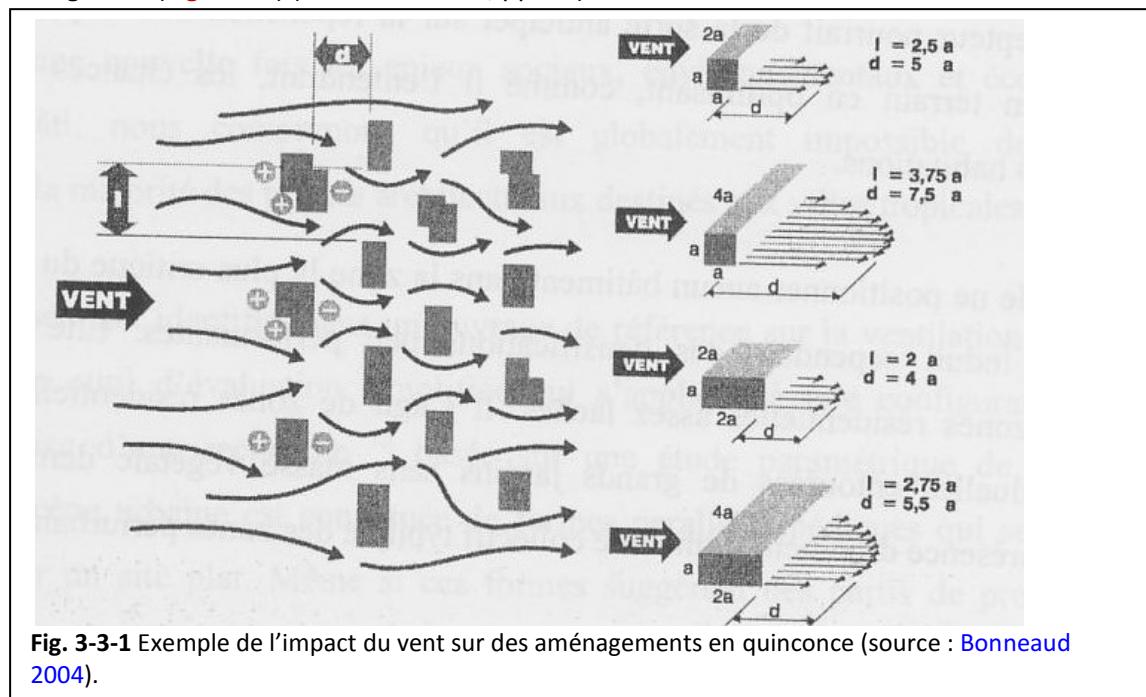


Fig. 3-3-1 Exemple de l'impact du vent sur des aménagements en quincone (source : Bonneaud 2004).

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 ;

- 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 ;

⁵⁰ Description dans le [Tableau 2-5, Chapitre 2.4.3.2](#).

- Le sillage d'une tour provoque 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 angles des premiers rangs de bâtiments au vent et autour d'immeubles plus élevés que la hauteur moyenne des bâtiments dans la ville. Généralement, dans une ville, les endroits favorables pour planter des éoliennes seront sur les tours, en particulier aux angles, à une hauteur importante et sur leurs toits.

3.3.2 Augmentation d'énergie éolienne par modification des bâts

La recherche dédiée au 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 connaissances de public de plus en plus élevées sur l'environnement et l'énergie renouvelable. Ici on va présenter des résultats de recherche dans la littérature où la méthode de simulation CFD est utilisée pour définir l'implantation des éoliennes.

Typiquement, trois catégories d'éoliennes peuvent être résumées selon leurs différentes positions autour de bâtiments (Fig. 3-3-2) : 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).

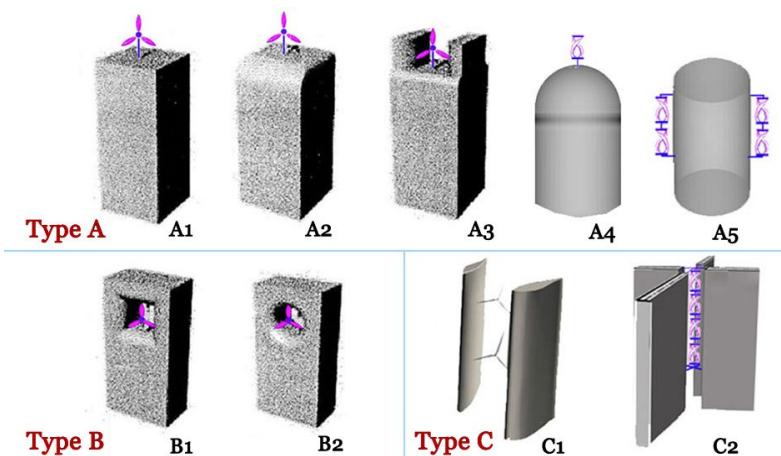


Fig. 3-3-2 Trois types principaux des bâtiments étudiés pour la modélisation du vent (source : Mertens 2006).

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

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 vif, 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 3-3). Généralement, on voit que le groupe B est plus efficace que le groupe A. Dans le groupe A, A2 est le meilleur et dans le groupe B, B2 est préféré.

Tableau 3-3

Productions globales d'énergie éolienne des différents 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. 3-3-2)	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

[Mertens \(2006\)](#) a analysé d'autres environnements bâtis 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 3-4). On voit que pour tous les 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 concentrateur⁵¹ $CR \geq 1$. Le vent au-dessus du toit formé d'une demi-sphère est beaucoup grand qu'au-dessus du toit plat, mais l'espace sur la demi-sphère est limité qu'il ne permet d'installer qu'une éolienne dessus alors que le toit plat 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 performances et de son efficacité ([Mertens 2006](#), pp. 144).

Tableau 3-4

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 é 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 plat, 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 expliqué l'avantage de l'installation d'éolienne sur un toit (Fig. 3-3-3) : 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 devient 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 murs concentrateurs du vent sur le toit (Fig. 3-3-4). Les résultats d'expérience montrent que :

- Le concentrateur sur le toit d'une tour cylindrique (type E) a l'effet de concentration du vent, mais en raison du mur lisse du cylindre qui ne peut pas bloquer le vent comme un barrage du vent, la

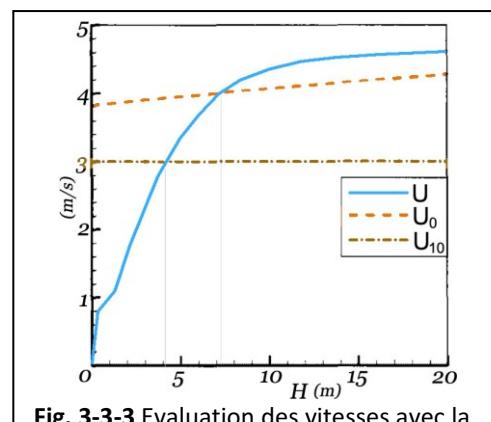


Fig. 3-3-3 Evaluation des vitesses avec la hauteur (source : [Zhang 2011](#)).

⁵¹ Le rapport du rendement énergétique généré par une éolienne dans un environnement bâti et et celui d'une éolienne toute seule à la même hauteur : $CR = (U/U_0)^3$.

vitesse du vent dans le concentrateur est faible ;

- 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 ;
- Le concentrateur à deux murs (type C) peut concentrer le vent, mais l'effet de concentration est affaibli par la structure asymétrique ;
- Le concentrateur à 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 (Zhang 2010, pp. 61-62).

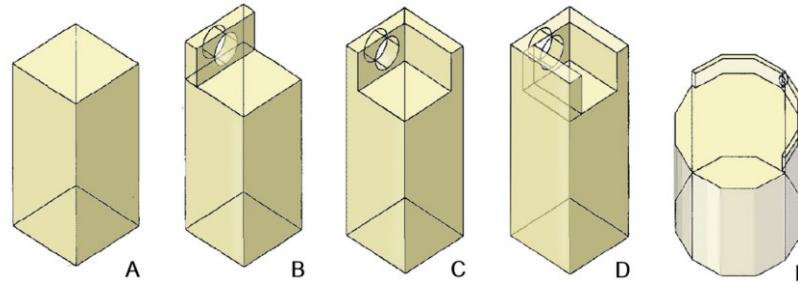


Fig. 3-3-4 Configurations des concentrateurs de mur sur toit : A – sans mur, B – avec un mur, C – avec deux murs, D – avec trois murs, E – tour de cylindre (source: Zhang 2010).

Y. Zhang (2011) a analysé les rendements d'énergie éolienne de différentes formes de toiture (Fig. 3-3-5). 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 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).

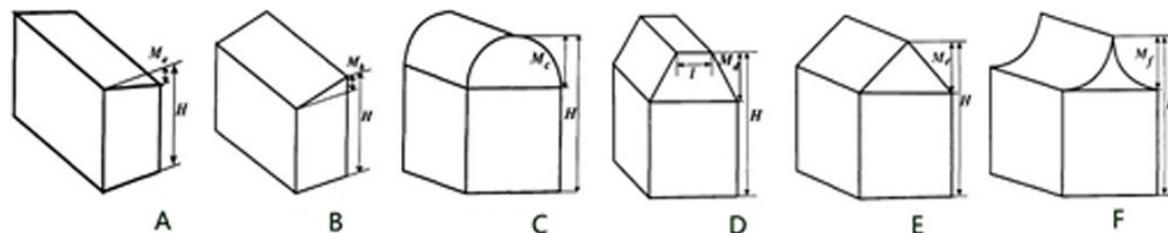


Fig. 3-3-5 Différentes configurations de toiture : A – à pente unique au vent, B – à pente unique sous le vent, C – à deux versants ronds, D – à deux versants trapézoïdaux, E – à deux versants incurvés (Source : Zhang 2011).

D'ailleurs, le concentrateur avec 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° au conduit de concentration, le coefficient C_v est toujours $> 1^{52}$. Elle a aussi proposé une forme d'escalier 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.

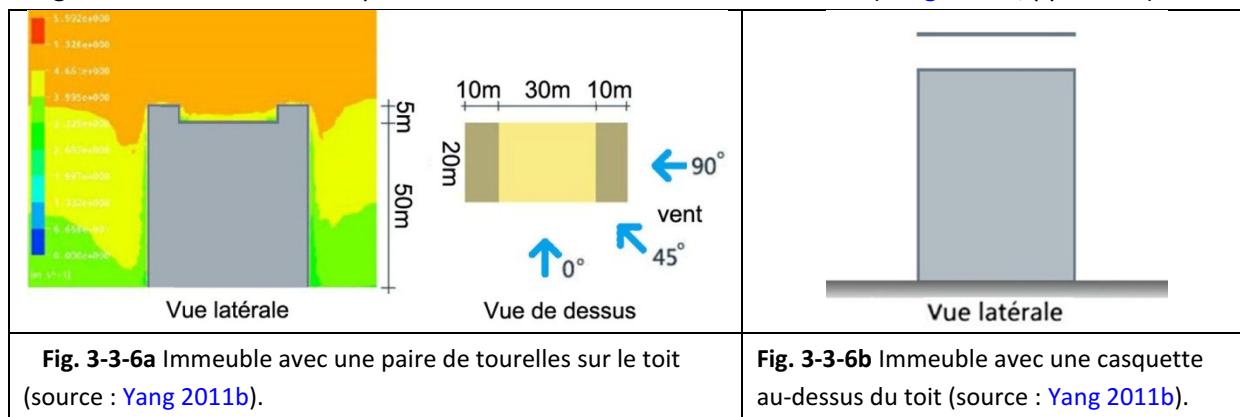
Pour l'emplacement de l'éolienne sur le toit, on suppose que le vent dominant est perpendiculaire à la longueur du bâtiment analysé, si la largeur du bâtiment $W < 8D$ (diamètre du rotor)⁵³. Pour éviter la couche de turbulence sur le toit, le mat des éoliennes posées au bord en

⁵² Dans son 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.

⁵³ 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.

amont de la toiture doit être supérieur à 5 m et le mat des éoliennes posées au milieu de la toiture doit être supérieur 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 \times largeur \times hauteur = 10 m \times 20 m \times 5 m) pour un immeuble de 50 m \times 20 m \times 50 m, la puissance de l'énergie éolienne est élevée de 10 % comparée à celle d'un même immeuble sans les tourelles (Fig. 3-3-6a). 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 (canopée) au-dessus du toit (Fig. 3-3-6b), les résultats confirment pleinement ses avantages pour optimiser la capture du vent : l'augmentation de l'énergie éolienne est d'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 2 m est proposée pour cette casquette au-dessus du toit (Yang 2011b, pp. 43-64).

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

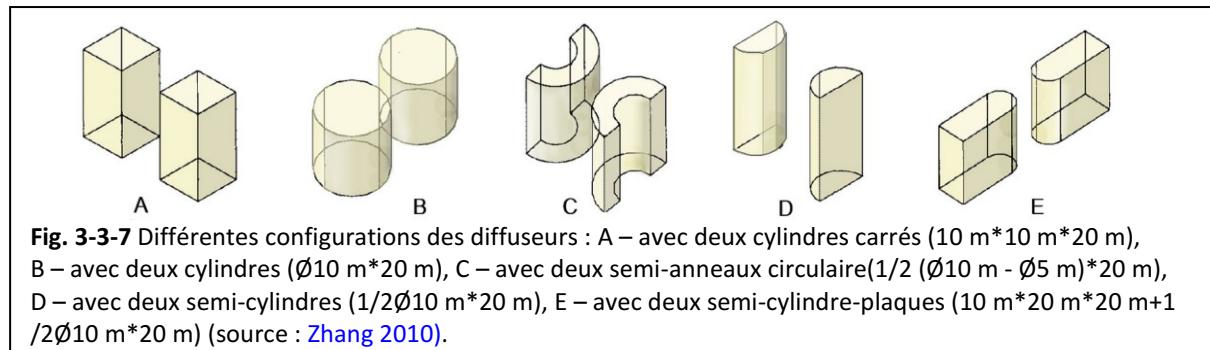
Pour la position d'un conduit à travers un bâtiment, D.F. Zhang (2010) a trouvé que le passage du vent sur le toit est beaucoup plus élevé que celui posé au milieu de façade. Il montre que l'effet de conduit est beaucoup fort que l'effet de barrage. Plus précisément, avec l'augmentation de la hauteur 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 une augmentation de 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 en 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 3-3). Par contre, les résultats de Mertens (2006) montrent que l'efficacité de concentration du vent de conduit à travers un bâtiment est plus que d'autres types de concentrateur (voir Tableau 3-4). D.F. Zhang (2010) trouve aussi qu'au lieu de creuser des trous à travers le bâtiment, ce qui est souvent complexe et problématique, l'installation des éoliennes dans les trous sur des concentrateurs de mur sur le toit est beaucoup plus simple et efficace.

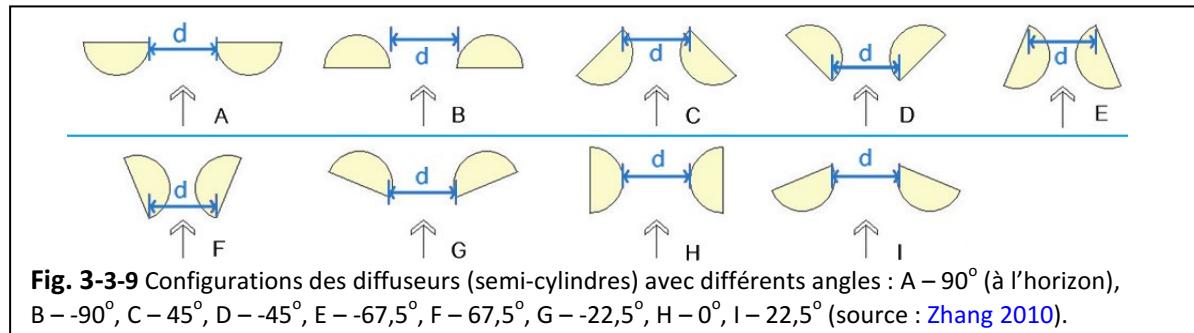
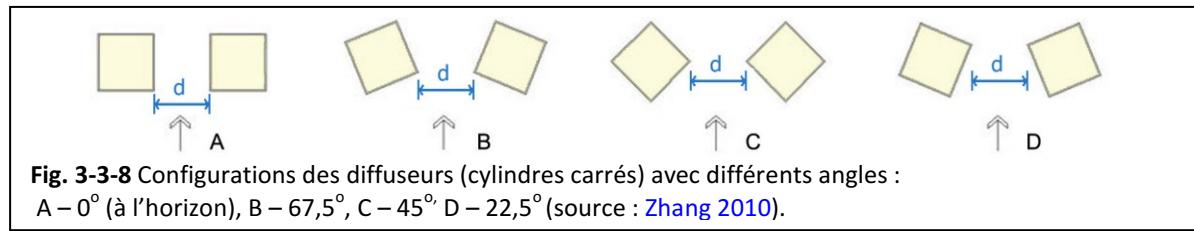
3) Développement de l'énergie éolienne dans les passages du vent entre des bâtiments

Il y a deux sous-catégories qui profitent de la combinaison de l'effet de plusieurs bâtiments : éolienne entre des bâtiments profilés aérodynamiquement (type C1 dans la [Fig. 3-3-2](#)) ou de forme classique (type C2).

[Zhang \(2010\)](#) a analysé les effets des concentrations de différentes configurations de diffuseurs ([Fig. 3-3-7](#)). Les résultats montrent que le diffuseur constitué de deux blocs + demi-cylindre (type E) est le meilleur, puis celui avec deux demi-cylindres seuls (type D), celui avec deux demi-anneaux circulaire (type C) et celui avec deux cylindres (type B). Le diffuseur avec deux cylindres carrés (type A) est le moins efficace ([Zhang 2010](#), pp. 71-73). Pourtant, certaines comparaisons ont, en fait, peu de sens. Par exemple, la comparaison entre le type E et les autres est douteuse : lorsque la longueur du bloc joue manifestement un rôle et l'influence de la longueur de bâtiment est très importante sur l'écoulement du vent à deux côtés du bâtiment.



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. 3-3-8](#)), tandis que pour les deux semi-cylindres c'est : A<B<C<D<E<F<G<H<I ([Fig. 3-3-9](#)) ([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. 3-3-9](#)), c'est le changement de largeur de passage, qui rend les comparaisons parmi les modèles peu fiables. Par contre, les configurations de deux cylindres carrés sont bien choisies comme la référence, parce que les résultats des deux groupes indiquent clairement que, pour une même section droite, l'effet principal de concentration du vent vient de la forme des deux murs incurvés dans le passage de diffuseur. Ces travaux mériteraient d'être complétés en explorant une gamme plus fine d'angles et en jouant sur la longueur des murs (taille du bâtiment).



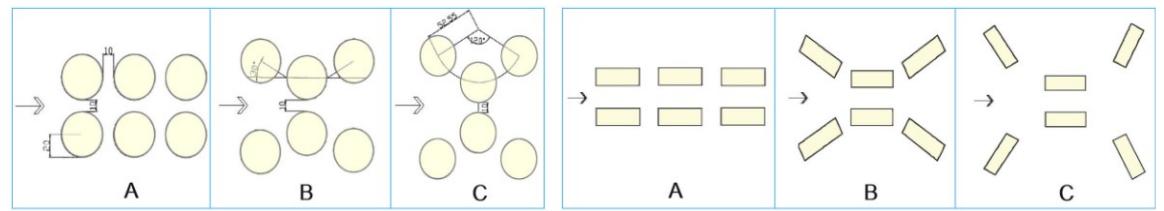


Fig. 3-3-10 Les configurations des groupes des bâtiments de diffuseur (cylindre à gauche, parallélépipède à droite) (source : [Zhang 2010](#)).

Pour les configurations de groupes des bâtiments, [D.F. Zhang \(2010\)](#) a étudié le cas de deux rangées de tours cylindriques et de tours parallélépipédiques en variant les positions relatives des tours (Fig. 3-3-10). 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 rangée de tours cylindriques est généralement meilleur sur l'effet de concentration que celui de tours parallélépipédiques ([Zhang 2010](#), pp. 80-85).

3.4 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 la 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 est efficace de nos jours et trouve des applications toujours plus nombreuses mais elle nécessite un niveau d'expertise important si on souhaite l'utiliser efficacement. Idéalement il est souhaitable de confronter les résultats aux mesures de terrain mais cette étape est parfois délicate du fait de l'absence de métrologie adaptée. 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 nos études, en raison d'un équilibre entre leur efficacité, leur précision et la capacité de calcul requise. Dans le type d'étude envisagée, les résultats dépendent essentiellement des frottements sur les parois. Cette question a donc fait l'objet d'une attention particulière : 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. Nous pourrons les adopter, selon nos besoins, pour la validation et la vérification de nos futures simulations CFD. Ensuite, des protocoles pour adapter les simulations aux pratiques sont données. Compte tenu du manque de validation directe par l'expérimentation en soufflerie, les processus d'évaluation et le respect des protocoles 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, par exemple, celles qui portent sur les indicateurs permettant d'évaluer l'énergie éolienne et l'effet de concentration du vent. Des résultats intéressants 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 discutées. Les régions proches d'un bâtiment, soit sur le toit, soit à côté, sont identifiées, étant 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 le toit, comparée avec les autres formes de toiture. Une toiture à deux versants ronds et une toiture à deux versants trapézoïdaux peuvent être aussi des bons choix. Des concentrateurs de type mur sur le toit avec conduit pour les éoliennes, des tourelles qui forment le passage du vent sur le toit, ou une casquette, sont parmi des options favorables et pratiques pour concentrer le vent et en tirer bénéfice. 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 conclusions des études dans ce domaine sont moins claires.

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

Simulation et analyse

Cette partie concerne la 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*).

Différents modèles simplifiés sont étudiés. Différentes formes et configurations d'un, deux et trois bâtiments sont analysées sur le potentiel éolien autour de bâtiments, notamment au-dessus du toit (*Chapitre 5*). Ensuite, des modèles de quartiers réels sont considérés et comparés. Les impacts de la morphologie urbaine sur le potentiel éolien sont ainsi évalués (*Chapitre 6*). Enfin, l'évaluation du potentiel éolien dans un quartier est considérée, compte tenu des conditions locales. En outre, une méthode mathématique simplifiée est proposée pour simuler et prévoir les impacts de la morphologie urbaine sur le vent (*Chapitre 7*).

4. Méthode de validation et vérification

Dans ce chapitre nous présentons la méthode de validation et la vérification de notre simulation 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 nombreuses simulations ont été comparées aux données de sortie de cette expérimentation. Différentes valeurs des paramètres du code CFD sont ainsi étudiées et les meilleures ont été choisies pour les simulations futures. Pour la partie de 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 $5\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$ (largeur \times longueur \times 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 du domaine.

57 essais avec des différentes valeurs pour les paramètres du code sont effectués. Un processus visant à établir les valeurs des paramètres CFD est donné dans l'[Annexe 4.1](#). Avec les meilleures valeurs 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 à la fin de thèse).

Il existe une grande incertitude sur la pertinence de choix de valeur des paramètres de code CFD et un risque important de validation avec 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, par exemple, 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

Grâce à la validation présentée ci-dessus avec la référence à l'expérience en soufflerie, la majorité des paramètres du code ANSYS Fluent peut être conservée pour les futures simulations. Pourtant, il y a toujours des paramètres qui doivent être modifiés en raison du changement de modèle : par exemple, sur la forme, la dimension, la configuration, la 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 déterminer 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 énergétiques éoliennes 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 du quartier.

5.1 Indicateurs du potentiel éolien à l'échelle du bâtiment

5.1.1 Définitions des indicateurs

En s'inspirant de la définition de la puissance d'une éolienne qui est une fonction de la vitesse du vent au cube ([Equation 1-1](#)), un indicateur simplifié pour évaluer le potentiel éolien, dit potentiel éolien total de surface, est défini dans un plan de coupe⁵⁴ comme suit:

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

où A_i est la surface de la zone et u_i est la vitesse moyenne. Dans le cas de simulation d'écoulement autour d'un 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 vitesses 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 son 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](#).

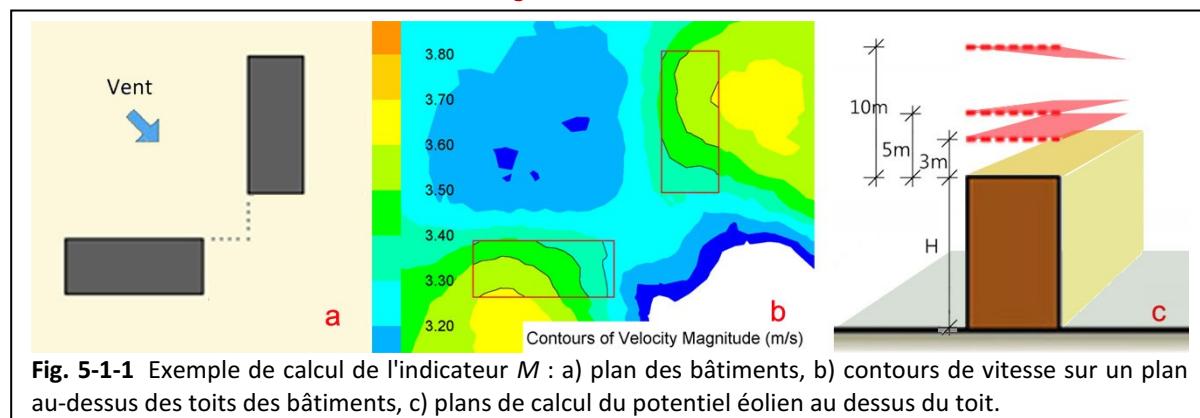


Fig. 5-1-1 Exemple de calcul de l'indicateur M : a) plan des bâtiments, b) contours de vitesse sur un plan au-dessus des toits des bâtiments, c) plans de calcul du potentiel éolien au dessus du toit.

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

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

De même, pour analyser l'impact de bâtiment sur la performance du vent (p. ex., l'effet de concentration), le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent C_v , peut être utilisé ([Equation 1-6](#)). 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'une éolienne et le cube de la vitesse du vent. On définit donc l'indicateur F , appelé coefficient d'augmentation d'énergie éolienne, comme le rapport entre le potentiel éolien d'un espace bâti et celui du vent libre à la même hauteur et sur une même surface :

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

⁵⁴ En fait, il serait plus juste d'évaluer l'énergie éolienne dans un espace 3D. Cependant, la quantification d'un espace 3D avec différentes gammes de vitesse de vent est difficile. Pour simplifier, plusieurs coupes sont effectuées et évaluées pour un rendu 3D.

5.1.2 Indicateur équivalent

Parmi les indicateurs calculés directement par le code FLUENT, il 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 respectivement la vitesse moyenne et la surface correspondante à la $i^{\text{ème}}$ parcelle. Donc, un indicateur équivalent de l'indicateur M peut être défini par :

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

De même, comme dans l'[Equation 5-3](#) un indicateur équivalent de l'indicateur F peut être défini par :

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

Pour évaluer la différence entre M et M' , un groupe de 24 bâtiments de $12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ($W \times L \times H$) avec des positions décalées les uns par rapport aux autres est choisi. La [Fig. 5-1-2](#) présente les écoulements du vent aux altitudes $z = 10 \text{ m}$ et $z = 25 \text{ m}$ (à partir du sol). Pour chaque bâtiment, les contours de vitesse du vent à deux altitudes ($Z = 5 \text{ m}$ et 10 m à partir du toit) dans les plans au-dessus du toit sont considérés.

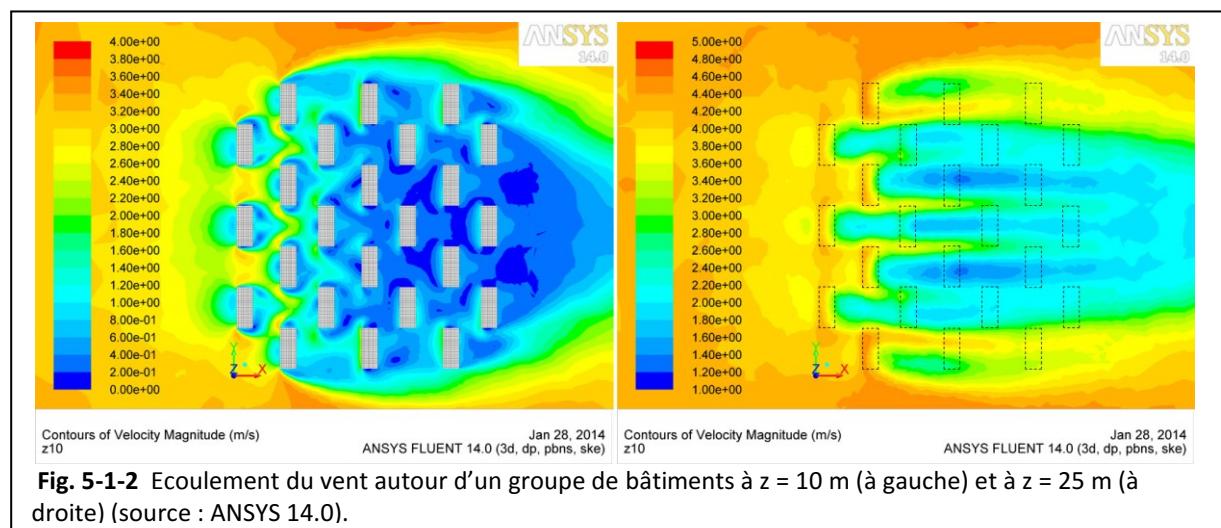


Fig. 5-1-2 Ecoulement du vent autour d'un groupe de bâtiments à $z = 10 \text{ m}$ (à gauche) et à $z = 25 \text{ m}$ (à droite) (source : ANSYS 14.0).

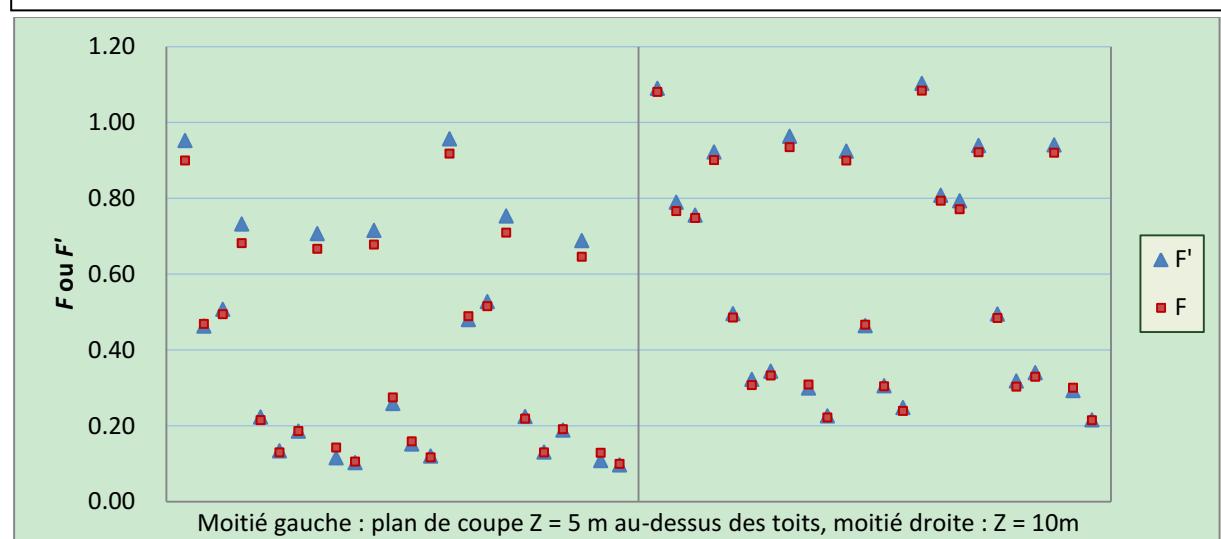


Fig. 5-1-3 Comparaison entre les deux indicateurs F et F' sur chacun des 24 bâtiments.

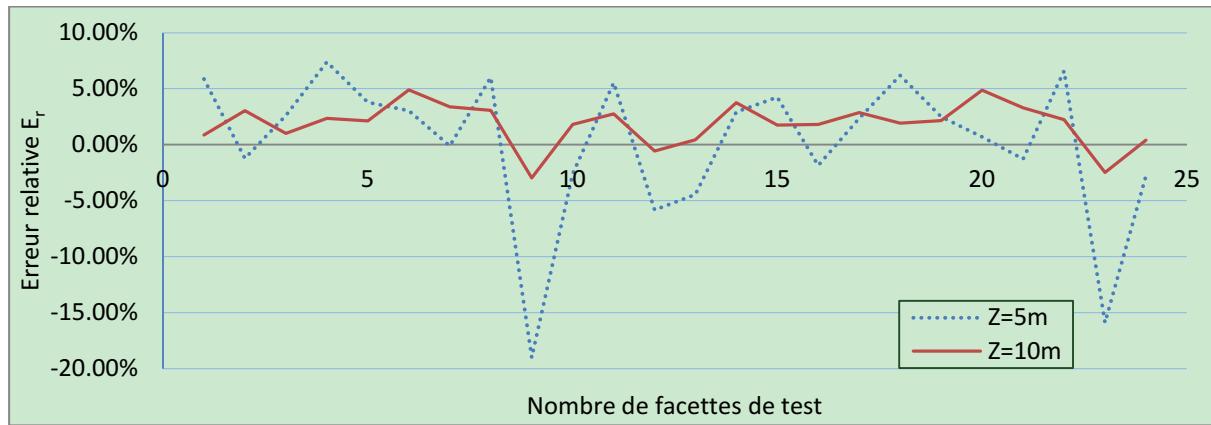


Fig. 5-1-4 Erreurs relatives entre les deux indicateurs F et F' sur chacun des 24 bâtiments.

Nous pouvons remarquer que les écarts (valeurs absolues) entre les deux indicateurs sur ces 24 bâtiments pour chaque plan de coupe $Z = 5$ m et $Z = 10$ m sont faibles (Fig. 5-1-3). La Fig. 5-1-4 présente les erreurs relatives : $E_r = F'/F - 1$. Nous pouvons constater que l'erreur quadratique moyenne (6,44 %) pour toutes les valeurs à l'altitude $Z = 5$ m au-dessus des toits est généralement plus grande que celle à $Z = 10$ m (2,66 %). En outre, la majorité de bâtiments ont une valeur F' plus grande que F , d'où une erreur moyenne E_r positive.

En conclusion, 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 traitement d'images) et sera utilisée pour la majorité de modèles suivants.

5.1.3 Evaluation de l'indicateur M

Pour évaluer les erreurs sur l'indicateur M , des essais avec différentes précisions sur les classes de vitesses sont effectuées pour être comparées. 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.

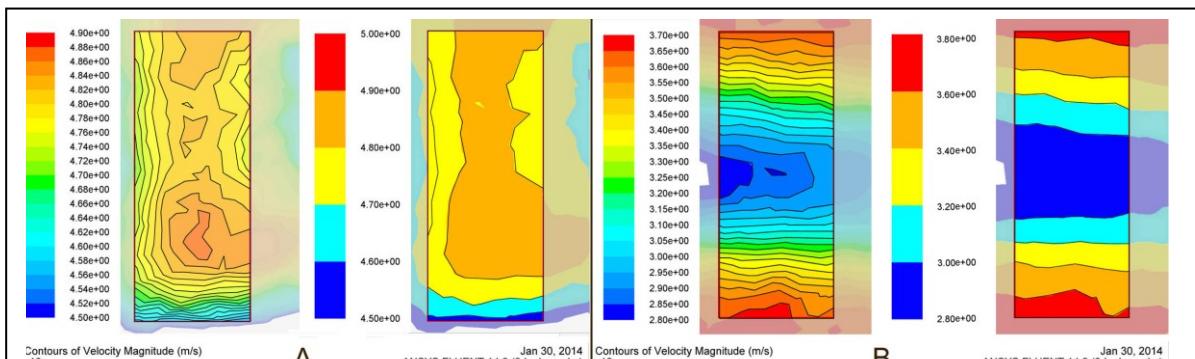


Fig. 5-1-5 Deux groupes (modèles A et B) de différentes précisions de contours de vitesses.

Tableau 5-1

Comparaison des valeurs de l'indicateur F (F') entre les différentes classes de vitesses

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 (Tableau 5-1), nous trouvons que les différences dues à l'échelle des classes de vitesses sont très faibles (l'erreur relative pour le modèle A est de 0,35 % et pour le B de 0,08 %), et sont beaucoup plus faibles que celles entre F et F' (2,89 % en moyenne).

5.2 Simulation et potentiel éolien d'un bâtiment isolé

Les impacts de la morphologie urbaine sur l'écoulement du vent sont très nombreux et complexes. Cette partie s'intéressera d'abord aux caractéristiques morphologiques d'un bâtiment isolé. Plus précisément, cette partie concerne la forme géométrique du bâtiment, la longueur, la largeur, la forme de la toiture, la forme du coin extérieur du bâtiment, la forme de la cour, les variantes de passages autour d'un bâtiment. Des vents avec des variations d'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 ceux présentés dans le cas de validation (voir [Chapitre 4](#)). Pour la géométrie, un taux de blocage au vent inférieur à 0,6 % dans le champ 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 (comparé celui d'une ville moyenne indiquée dans le modèle de validation dont $\alpha = 0,25$), un nouveau profil du vent d'entrée est appliqué : $U = 3 \times \left(\frac{Z}{10}\right)^{0,4}$ (m/s). Pour la convergence, nous avons retenu un résidu portant sur l'équation de continuité inférieur à 10^{-6} , et des résidus portant sur les composantes de la vitesse inférieurs à 10^{-7} .

5.2.1 Impact du plan du bâtiment

Pour évaluer l'impact du 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, une plage de 0° à 90° avec des incrément de 15° est considérée pour l'angle d'incidence du vent.

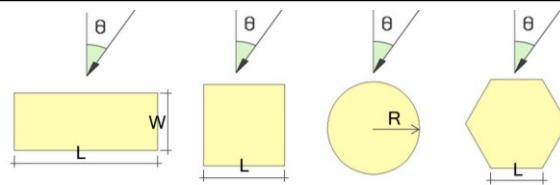


Fig. 5-2-1 Modèles de bâtiments en différents plans : rectangulaire ($L \times W = 30$ m \times 12 m), carrée ($L = 19$ m), circulaire ($R = 10,7$ m) et hexagonal ($L = 11,7$ m).

Les contours de vitesse en coupe $H = 10$ m sous vent normal ($\Theta = 0^\circ$) sont donnés dans la [Fig. 5-2-2](#). Nous pouvons remarquer les différences de la taille des tourbillons en amont et en aval du bâtiment, ainsi que la forme de la zone de vitesse importante autour du bâtiment. Cependant, ce qui nous intéresse ici est de comparer le potentiel éolien exploitable pour tous les modèles. Par des essais en simulation, nous remarquons que les vents exploitables à proximité des murs ont une distance au mur très variable, qui rend donc la comparaison entre les 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.

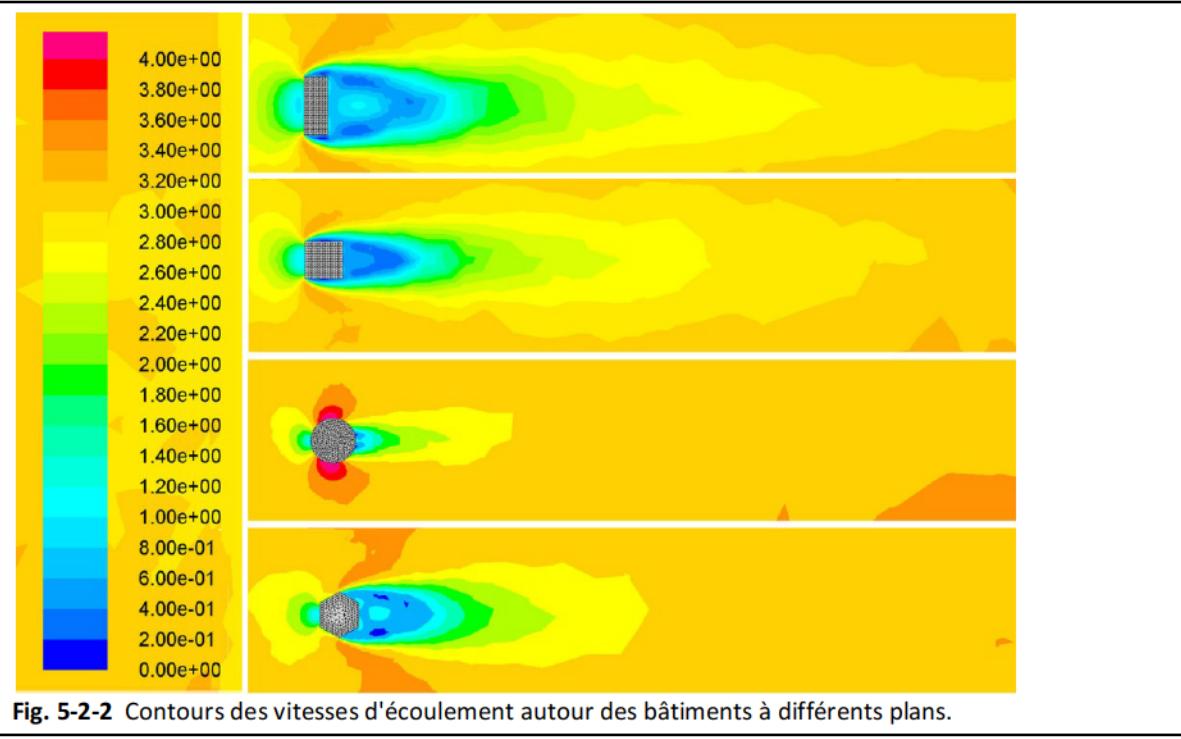


Fig. 5-2-2 Contours des vitesses d'écoulement autour des bâtiments à différents plans.

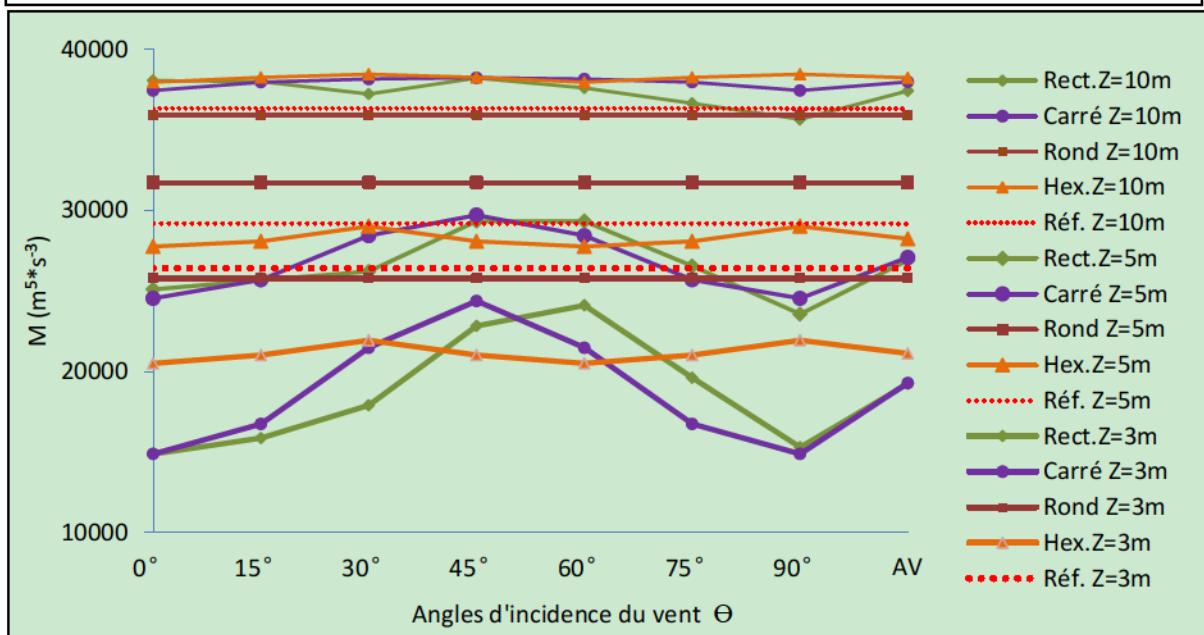


Fig. 5-2-3 Indicateur du potentiel éolien au-dessus du toit pour les bâtiments à différents plans.

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

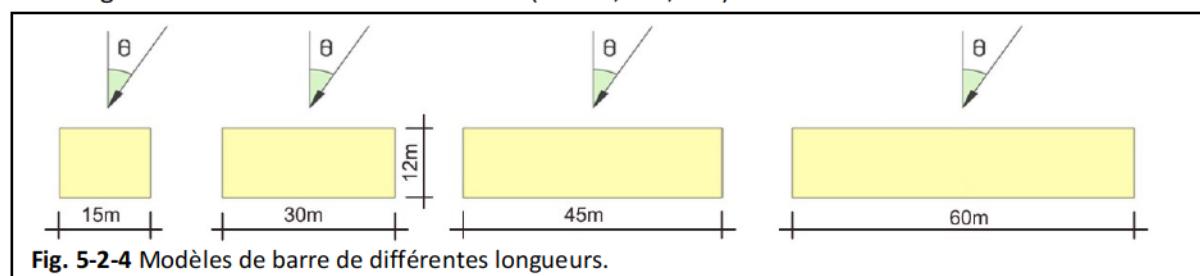
- 1) La valeur de M au-dessus du toit du bâtiment à plan circulaire est supérieure à celle des autres lorsque $Z = 3 \text{ m}$ et 5 m , mais pour $Z = 10 \text{ m}$ elle devient inférieure.
- 2) La valeur de M au-dessus du toit du bâtiment hexagonal est presque monotone par rapport au changement de 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 situé entre 1,28 % et 6,55 %.
- 3) Les performances du modèle à plan rectangulaire et à plan carré sont très proches à une faible altitude ($Z = 3 \text{ m}$). Lorsque l'altitude augmente à $Z = 10 \text{ m}$, le modèle carré devient 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 éolienne des différents plans diminue avec les formes géométriques suivantes : circulaire, hexagonale, carrée puis rectangulaire. Cependant, pour de hautes altitudes, l'ordre change : hexagonale, carrée, 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 ») sert de référence. Nous trouvons qu'à l'altitude $Z = 3$ m, tous les modèles sont inférieurs à la référence, alors qu'à $Z = 10$ m, la majorité sauf le plan circulaire sont supérieurs à la référence.

5.2.2 Impact de la longueur du bâtiment

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



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 densité d'énergie éolienne D_e . Les résultats à deux altitudes au-dessus du toit ($Z = 5 \text{ m}, 10 \text{ m}$) 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 $L = 15 \text{ m}$ (ligne verte) est plus élevée que celle des autres modèles. Pourtant, quand l'altitude augmente (à $Z = 10 \text{ m}$), la barre $L = 30 \text{ m}$ peut avoir une densité d'énergie éolienne plus importante (avec un angle d'incidence de 0°).
- 2) A une altitude faible ($Z = 5 \text{ m}$), les variations de D_e pour différentes longueurs sont plus grandes que celles à haute altitude ($Z = 10 \text{ m}$).
- 3) Généralement, la densité D_e décroît avec la longueur, jusqu'à $L = 45 \text{ m}$. La densité du modèle $L = 45 \text{ m}$ et celle de $L = 60 \text{ m}$ sont relativement proches.

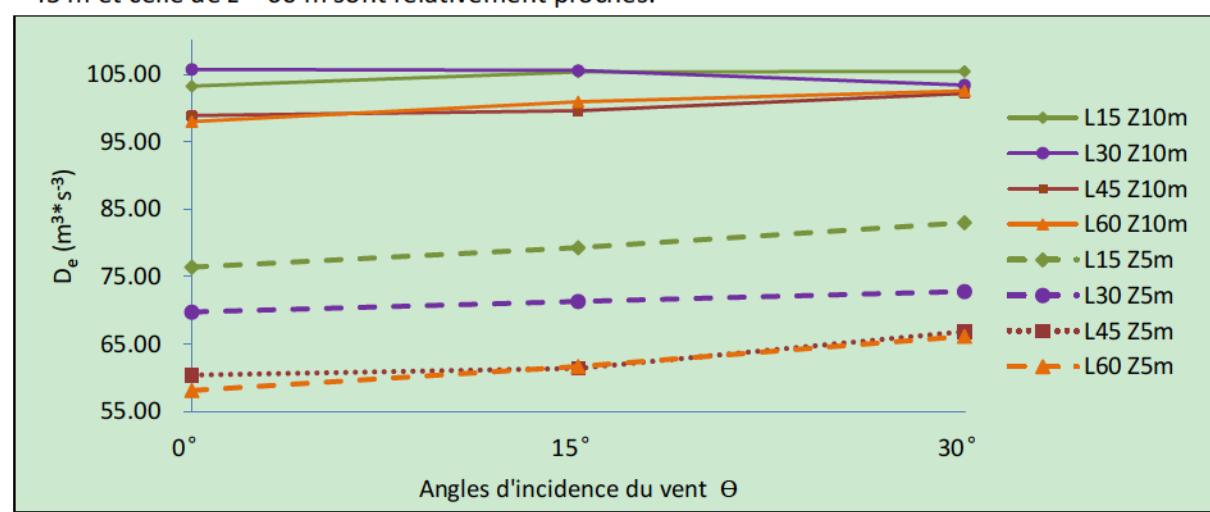


Fig. 5-2-5 Densité d'énergie éolienne au-dessus du toit d'une barre de différentes longueurs.

5.2.3 Impact de la largeur du bâtiment

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).

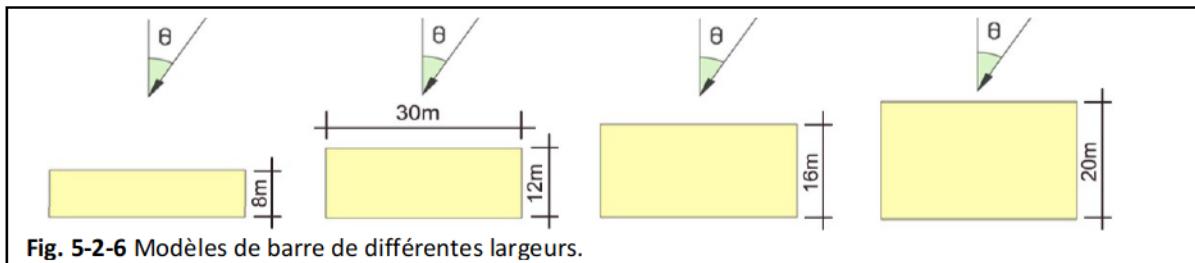


Fig. 5-2-6 Modèles de barre de différentes largeurs.

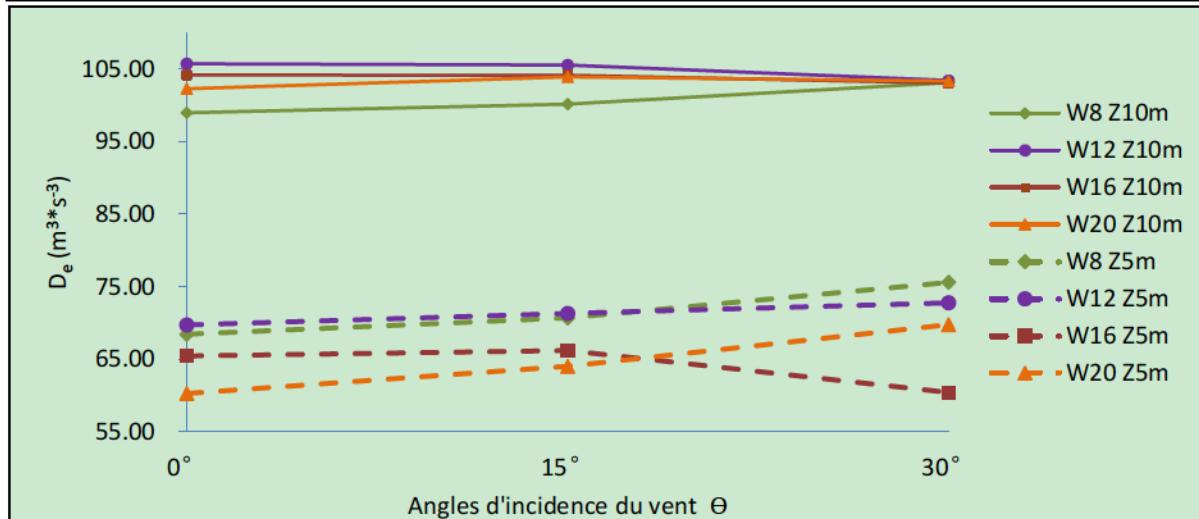


Fig. 5-2-7 Densité d'énergie éolienne au-dessus du toit pour une barre de différentes largeurs.

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) Pour différents angles d'incidence du vent, l'ordre des performances varie entre les modèles de différentes largeurs. L'angle d'incidence du vent est donc très important pour évaluer l'impact de la largeur d'un bâtiment.

5.2.4 Impact de la forme de la toiture

Pour évaluer l'impact de la toiture sur le potentiel éolien au-dessus du toit, neuf bâtiments de même plan (12 m \times 30 m) et de même hauteur moyenne ($H = 20$ m) 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 de l'écoulement au-dessus des toits de différentes formes, des plans à six altitudes au-dessus du toit sont proposés (lignes rouges discontinues, les hauteurs réelles sont : $H = 23$ 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 dans les cas de vent oblique, un seul angle d'incidence 0° du vent est analysé. La coupe reste la même sur toute la longueur ($L = 30$ m).

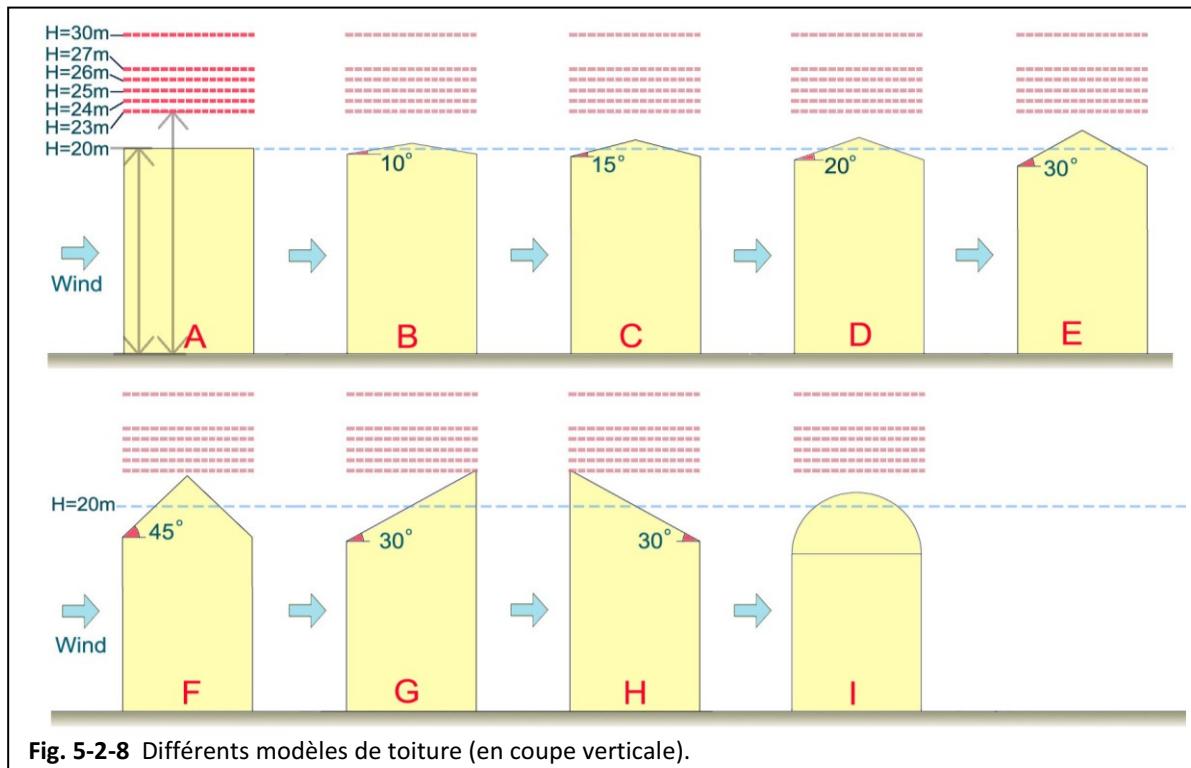


Fig. 5-2-8 Différents modèles de toiture (en coupe verticale).

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 à 7 %, voir [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 les valeurs de U_0 correspondantes. Selon la [Fig. 5-2-9a, b](#), les conclusions suivantes peuvent être apportées :

- 1) La toiture en forme de voûte sphérique (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 24 m 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).

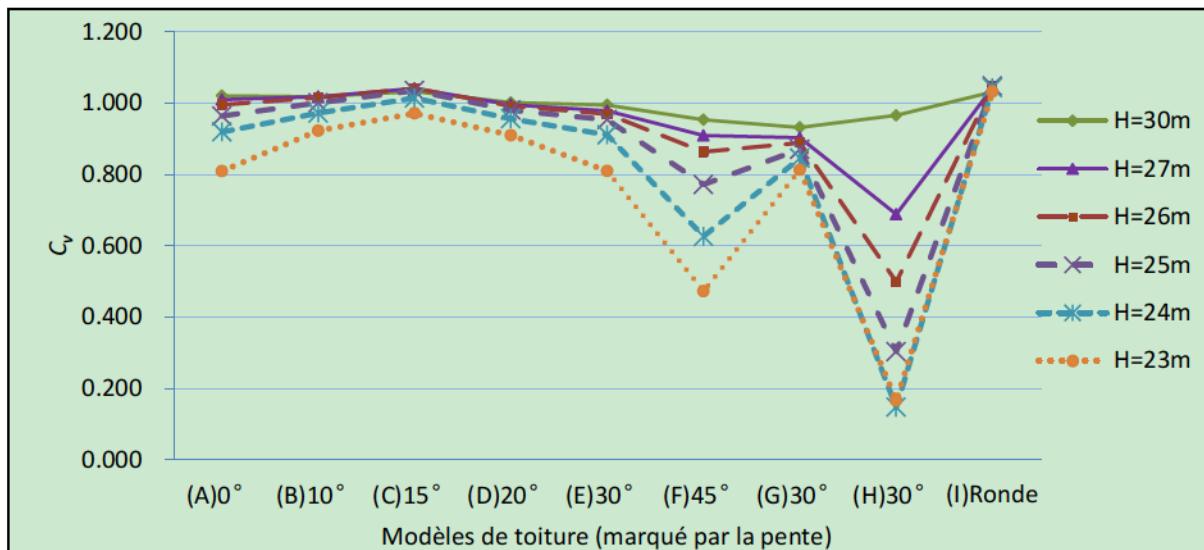


Fig. 5-2-9a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les différentes toitures.

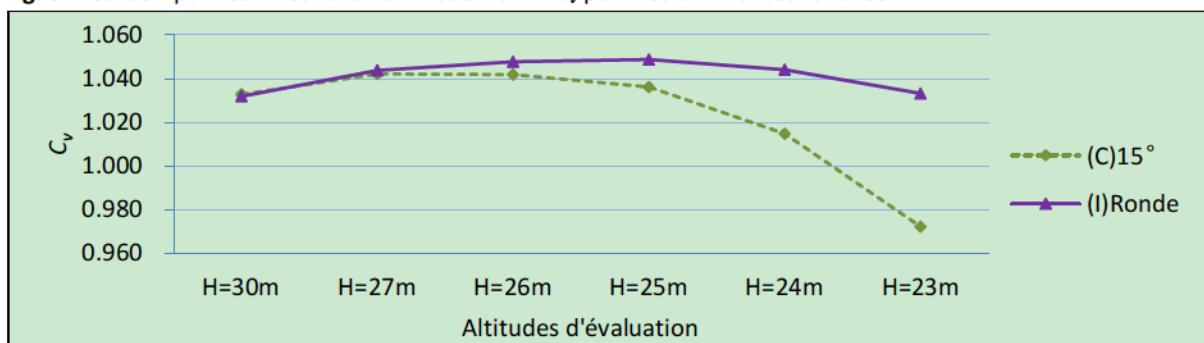


Fig. 5-2-9b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les différentes toitures.

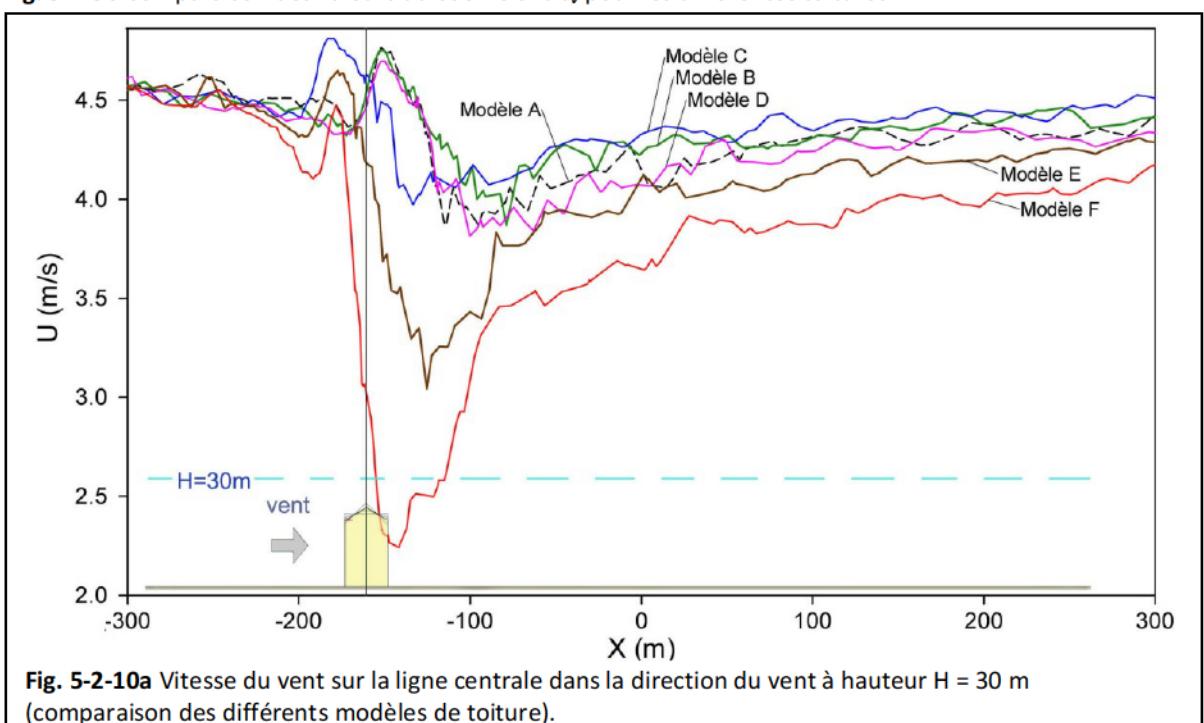


Fig. 5-2-10a Vitesse du vent sur la ligne centrale dans la direction du vent à hauteur $H = 30$ m (comparaison des différents modèles de toiture).

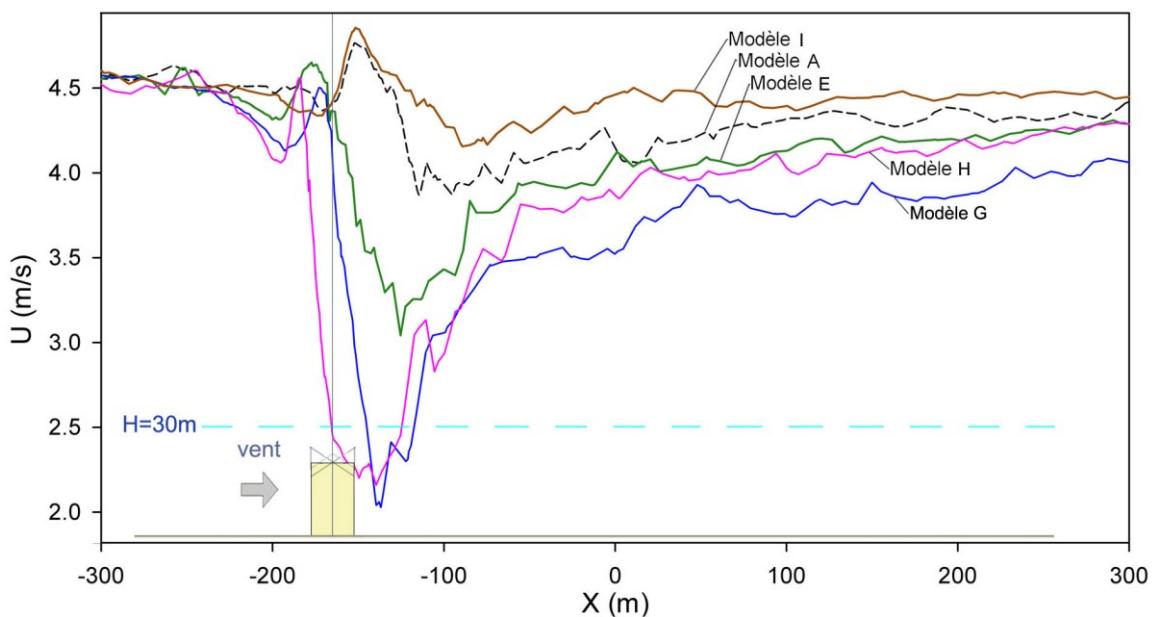


Fig. 5-2-10b Vitesse du vent sur la ligne centrale dans la direction du vent à hauteur $H = 30$ m (comparaison des différents modèles de toiture).

En outre, pour faire apparaître la formation d'écoulement derrière les différentes formes de toiture, des représentations de la variation de la vitesse sur 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 vitesse d'écoulement sont faibles ; par contre, en aval, elles sont importantes. Parmi les modèles de toiture à deux pans, le vent le plus fort derrière le bâtiment correspond au 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 en voûte sphérique sont aussi équivalentes.

5.2.5 Impact de la forme du coin du bâtiment

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

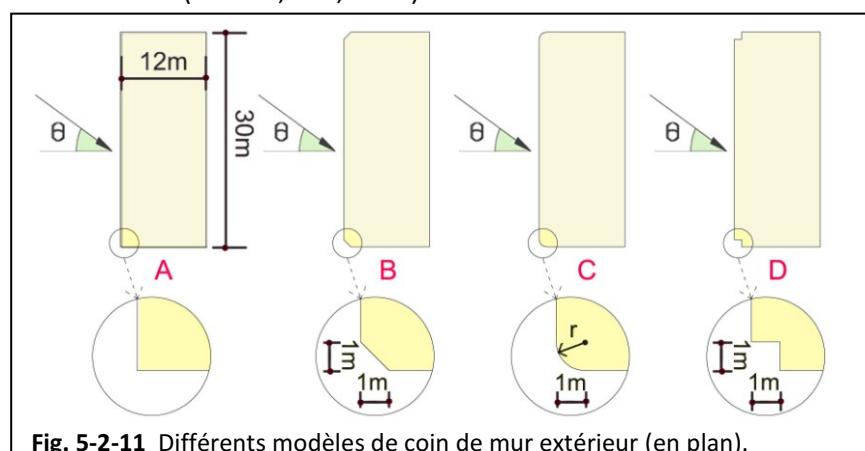


Fig. 5-2-11 Différents modèles de coin de mur extérieur (en plan).

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse des modèles de coin de la Fig. 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° , mais 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 performants 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 fort, notamment à basse altitude ($Z = 3 \text{ m}$ et $Z = 5 \text{ m}$).

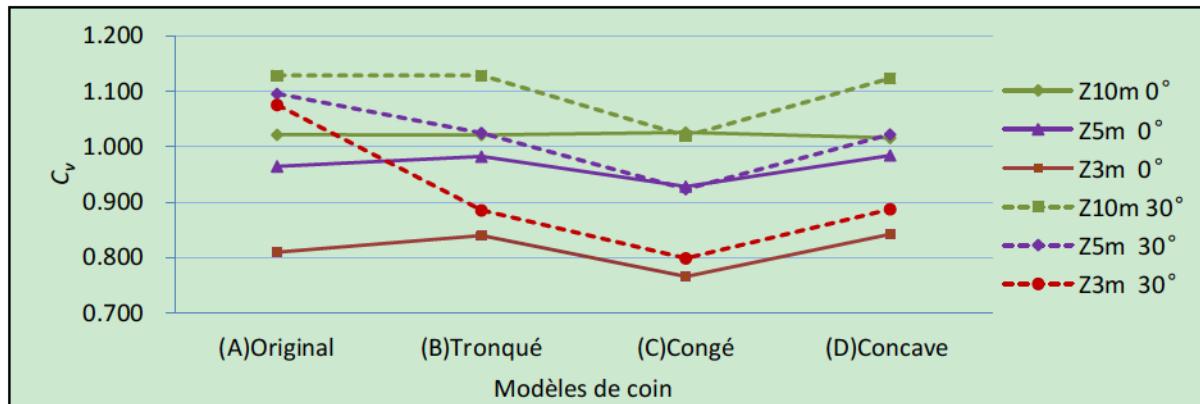


Fig. 5-2-12 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents modèles de coins de mur extérieur.

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 face au vent et les deux latéraux, comme présenté dans la [Fig. 5-2-13](#) la coupe verticale dans 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.

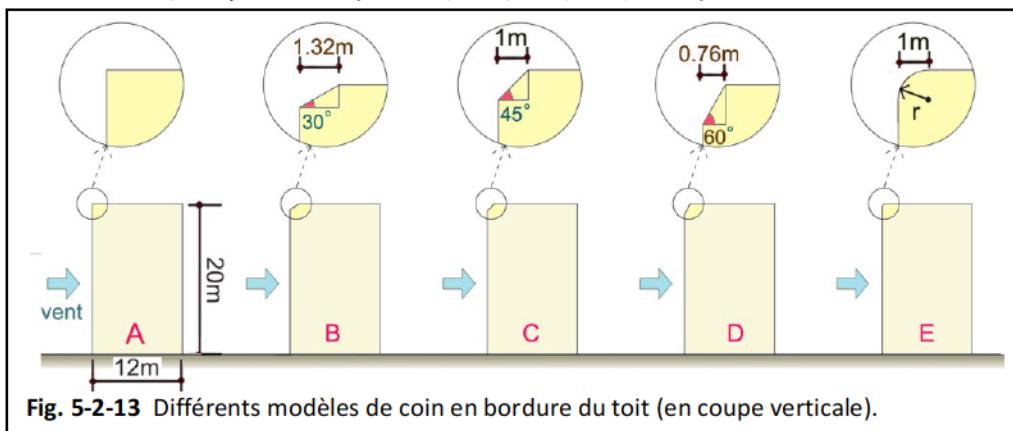


Fig. 5-2-13 Différents modèles de coin en bordure du toit (en coupe verticale).

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse des modèles de coin de la [Fig. 5-2-14](#), les conclusions suivantes peuvent être apportées :

1) Comparé au modèle de référence, tous les modèles avec coins modifiés en 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 peut 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.

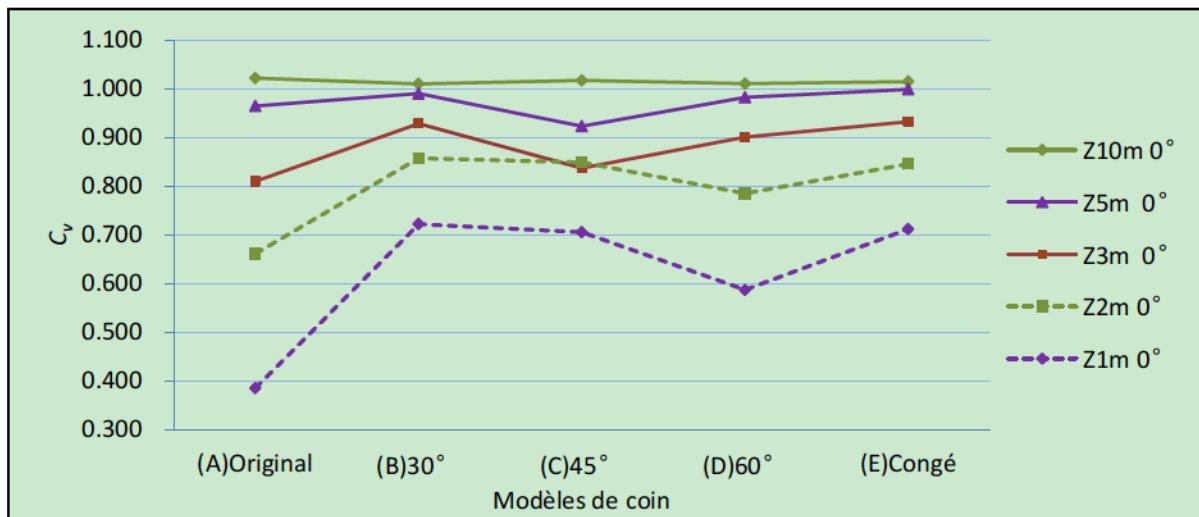


Fig. 5-2-14 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents modèles de coins en bordure du toit.

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

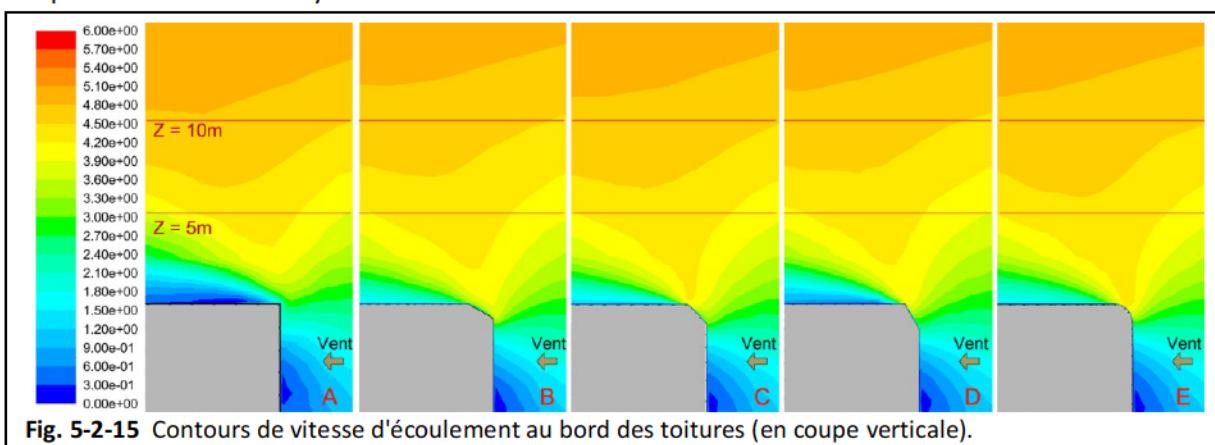


Fig. 5-2-15 Contours de vitesse d'écoulement au bord des toitures (en coupe verticale).

5.2.6 Impact de la présence d'une cour

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

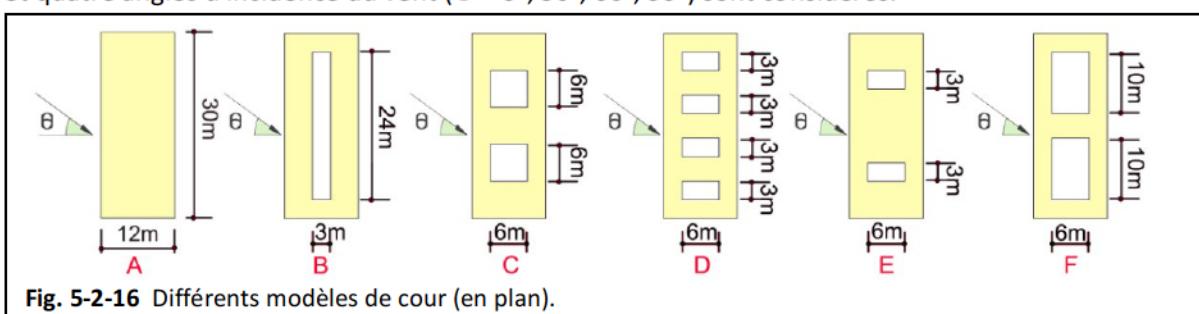


Fig. 5-2-16 Différents modèles de cour (en plan).

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 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) aux altitudes $Z = 5 \text{ m}$ et $Z = 10 \text{ m}$ au-dessus du toit. Les conclusions suivantes peuvent être apportées :

1) En général (sauf avec un angle d'incidence de 90°), les modèles avec cours sont plus ventés au-dessus du toit 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.

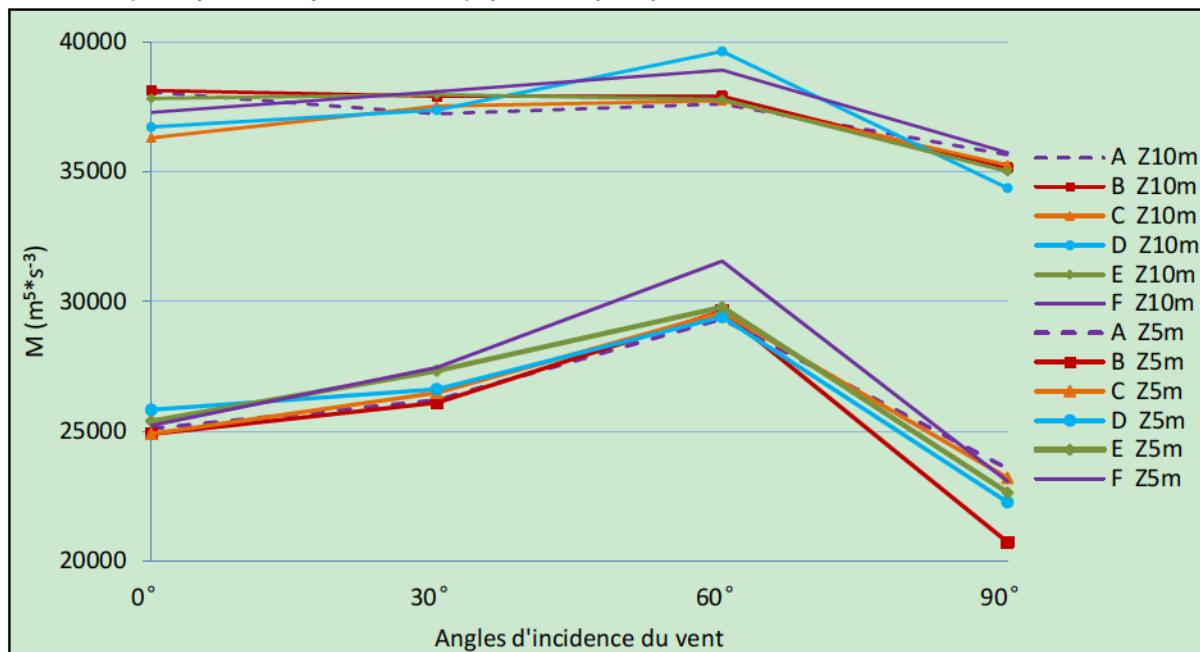


Fig. 5-2-17 Potentiel éolien total de surface au-dessus des toits pour différents modèles de cours.

5.2.7 Impact du passage du vent

Sur la base de la barre de référence ($W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$), 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 des dalles débordantes en avant de 1m mais reculées de différentes largeurs (modèle D1 : 0 m, D2 : 3 m, D3: 6m et D4 : 9 m). Il y a des modèles avec des passages du vent au rez-de-chaussée (Rdc) sur 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 2m à $H = 3 \text{ m}$, G1 : dalle à $H = 2,5 \text{ m}$ et G2 : dalle annulaire en bord de 2m à $H = 2,5 \text{ m}$). Il y a aussi des passages du vent au rez-de-chaussée sur 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, p. ex., $H = 22 \text{ m}$, 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 rez-de-chaussée sur 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 au rez-de-chaussée sur pilotis avec coin, une seule

altitude ($H = 3,5 \text{ m}$, au milieu de l'espace entre le sommet du coin et le plafond du rez-de-chaussée) est considérée.

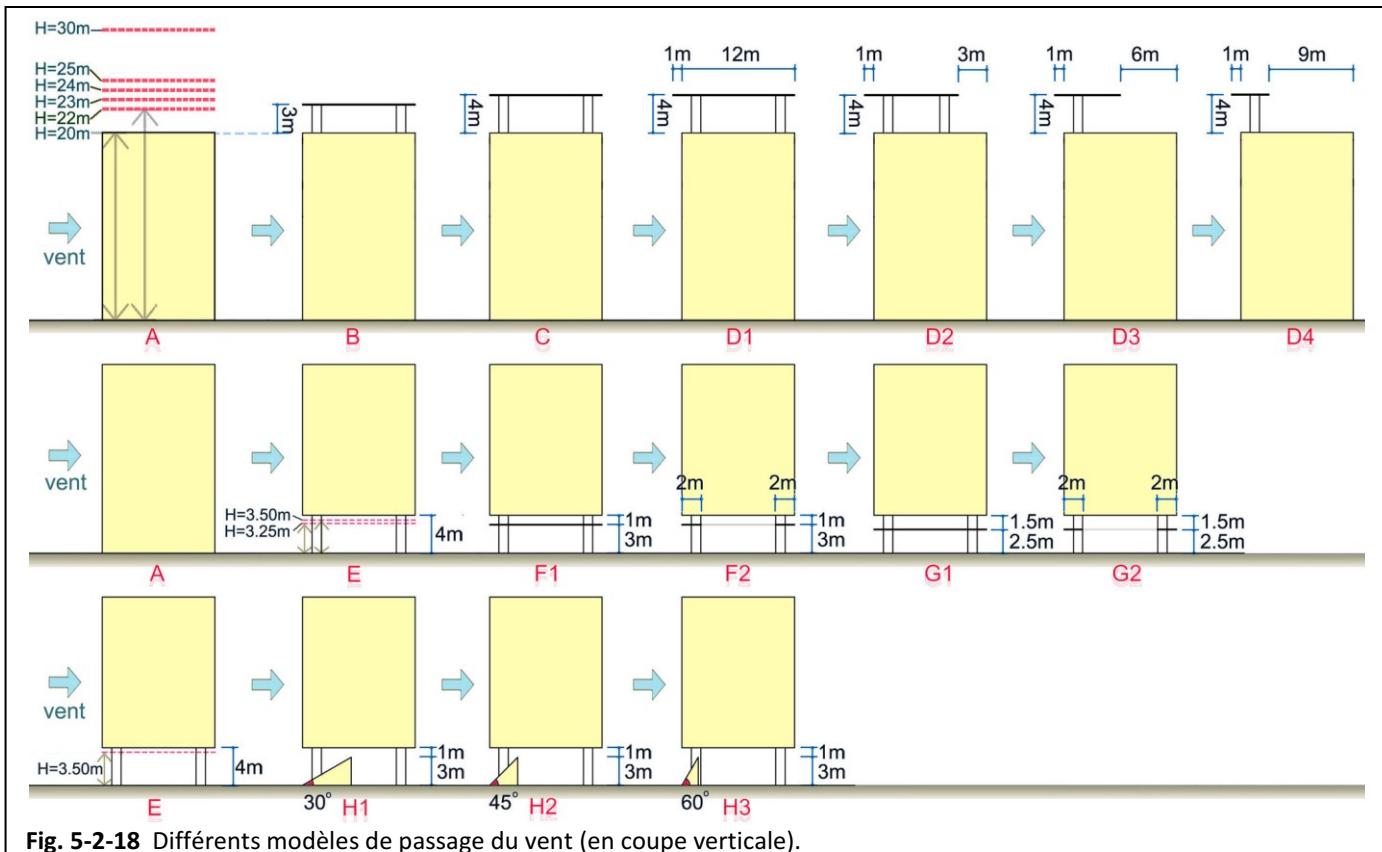


Fig. 5-2-18 Différents modèles de passage du vent (en coupe verticale).

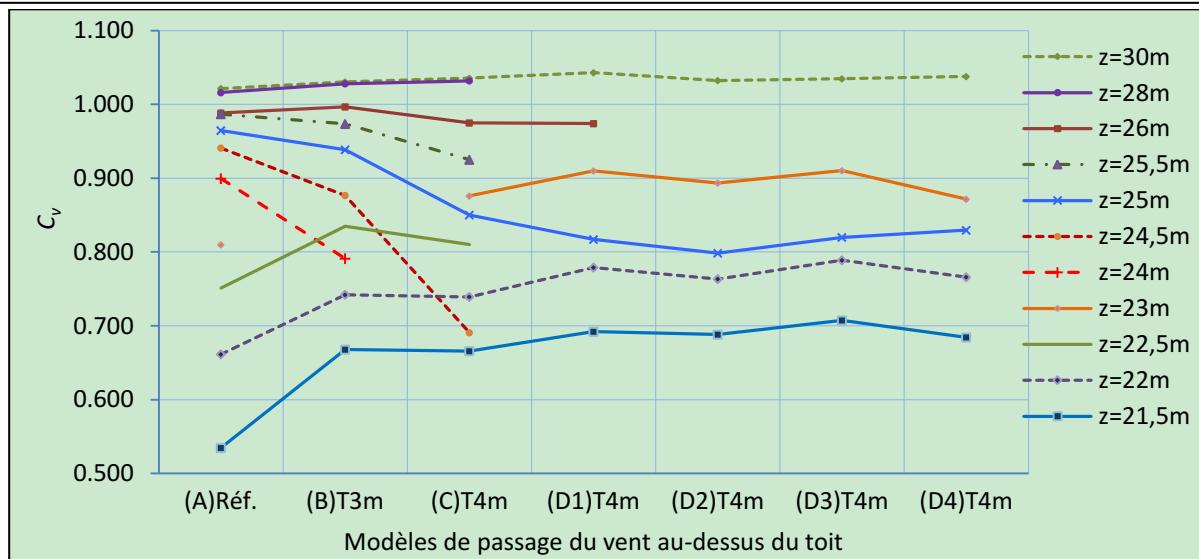


Fig. 5-2-19a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents modèles de passage du vent.

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 vitesses de vent au-dessus des casquettes de 3 m et de 4m de hauteur au-dessus du toit (modèles B et C) sont moins élevées jusqu'à une hauteur assez élevée ($z = 26 \text{ m}$) à partir de laquelle elles augmentent. 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.

2) La comparaison entre les deux modèles de casquette à différentes hauteurs (B et C), démontre que la casquette la moins élevée a plus d'effet de concentration du vent à une altitude faible ($z < 26 \text{ m}$). Alors qu'à une altitude importante, la casquette la plus élevée induit des vents plus forts.

3) A la même hauteur, les modèles avec une casquette débordante de 1m du front (D1, D2, D3 et D4) correspondent presque tous aux 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 de 6m en arrière, présente la vitesse moyenne de vent la plus élevée.

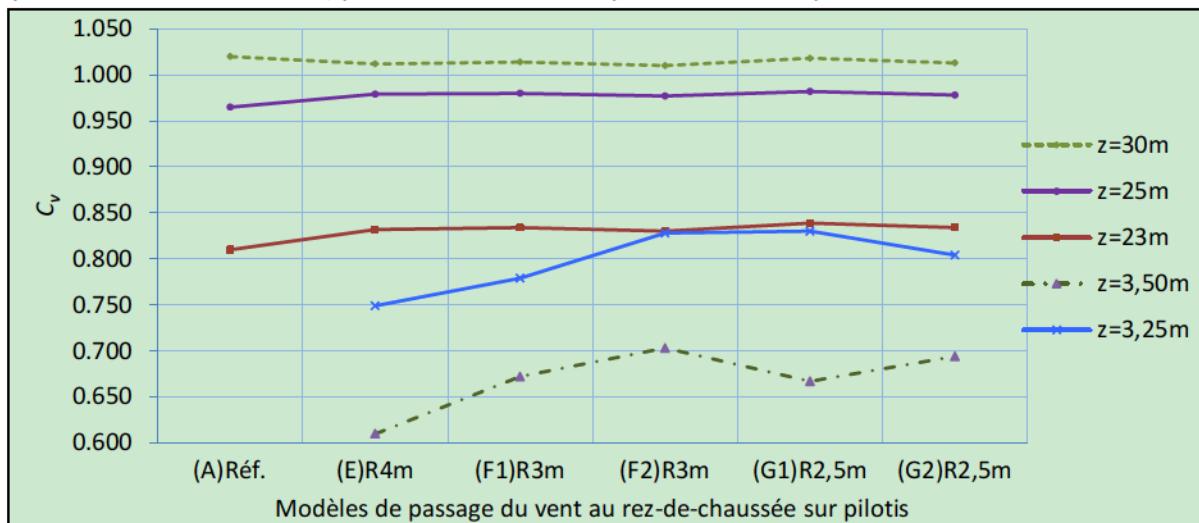


Fig. 5-2-19b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents modèles de passage du vent.

A partir des valeurs du coefficient C_v pour les passages du vent au rez-de-chaussée sur pilotis avec des dalles insérées (Fig. 5-2-19b), les conclusions suivantes peuvent être apportées :

1) Tous les passages du vent au rez-de-chaussée avec 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 dalles à différentes hauteurs (F1, G1), c'est le modèle avec la dalle la plus proche du sol qui a l'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 variables. La hauteur $H = 2,5$ m est plus favorable pour la dalle pleine, alors que la hauteur $H = 3$ m est plus intéressante pour la dalle annulaire de 2m.

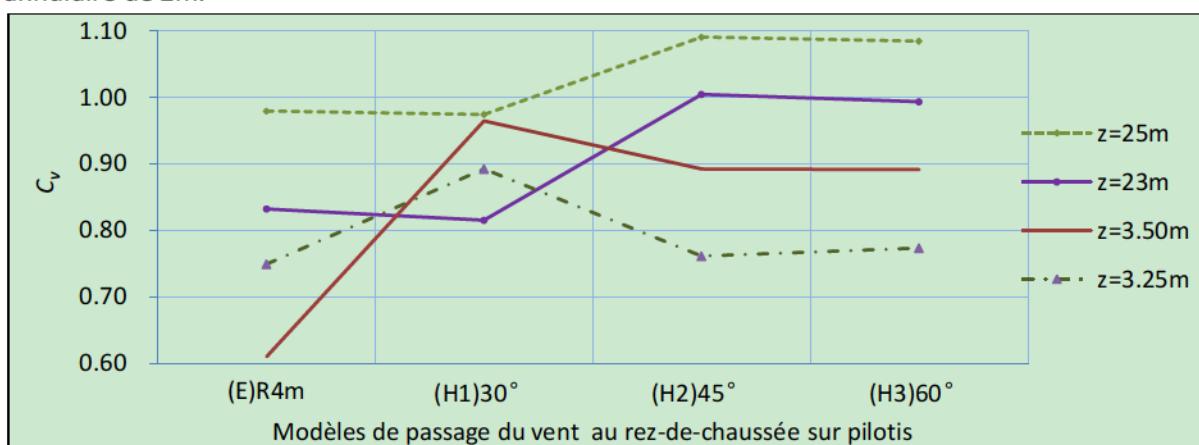


Fig. 5-2-19c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents modèles de passage du vent.

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

1) Les modèles avec coin avec un angle contre le vent de 45° et 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

Comme nous l'avons déjà vu dans les cas précédents, les performances énergétiques des modèles sont différentes en fonction de la direction du vent incident. Dans cette partie, nous évaluons l'impact de l'angle d'incidence du vent à partir de modèles choisis et classés suivant deux groupes *Fig. 5-2-20* :

- groupe 01 (modèle A, B, C, D) avec différents rapports de W/L (largeur / longueur) mais de même hauteur ($H = 20$ m) ;
- groupe 02 (modèle C, E) avec différents rapports de H/L (hauteur / longueur) mais de même forme en plan.

Pour des raisons de précision, nous introduisons plusieurs valeurs intermédiaires d'angles qui varient entre 30° et 75° et pour lesquelles un potentiel éolien maximal apparaît.

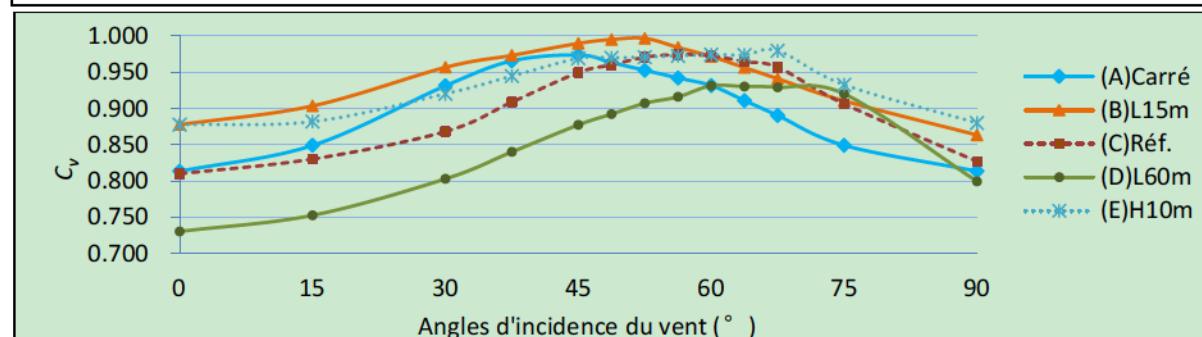
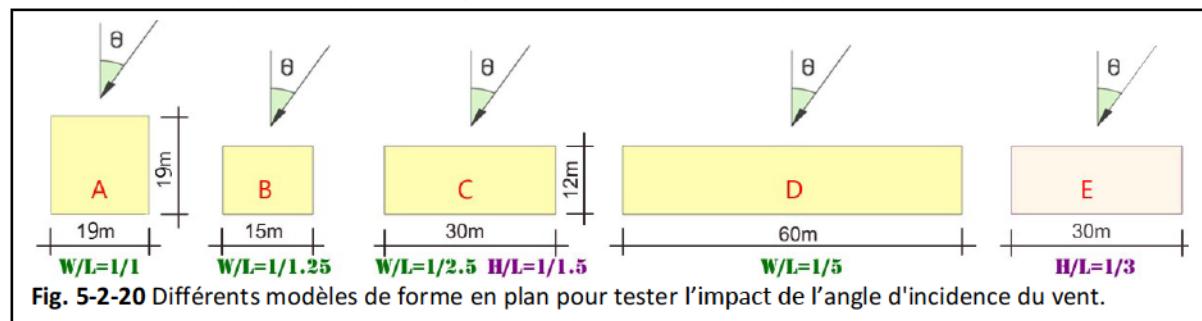


Fig. 5-2-21a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 3$ m).

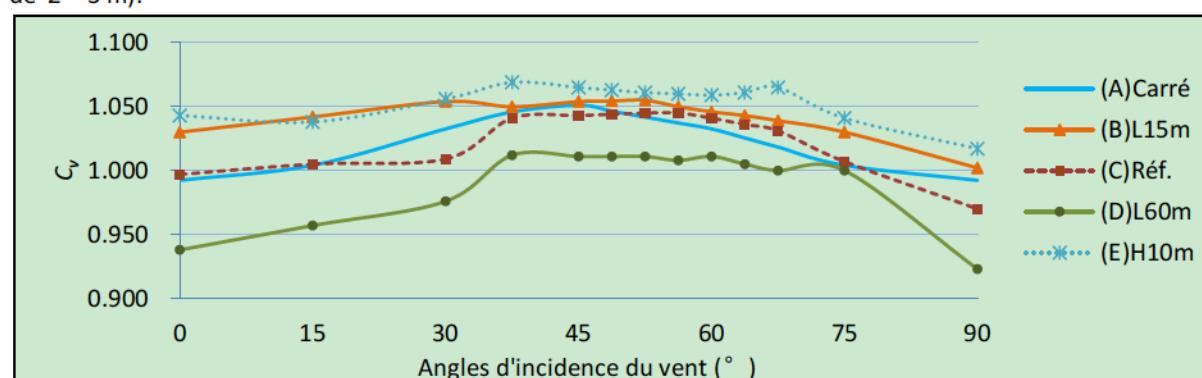


Fig. 5-2-21b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 5$ m).

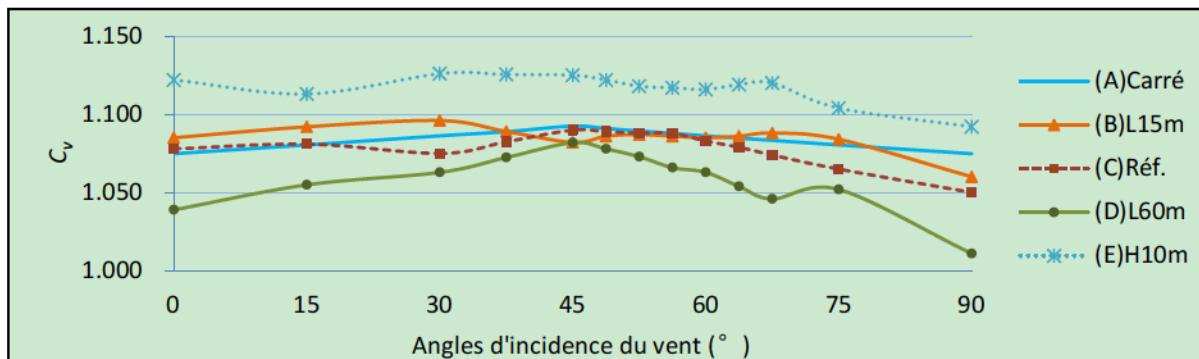


Fig. 5-2-21c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 7$ m).

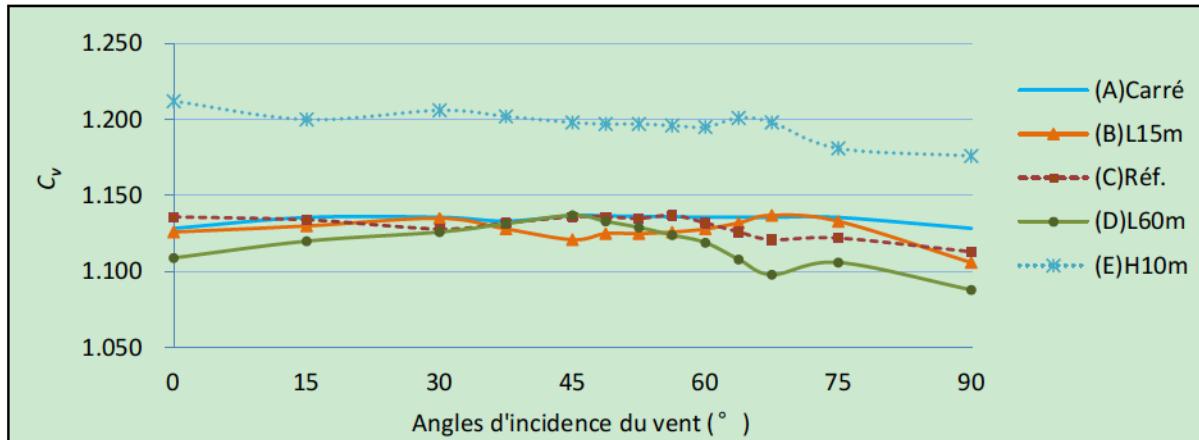


Fig. 5-2-21d Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 10$ m).

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) (Fig. 5-2-21), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) 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° pour le modèle L15 m (modèle B avec $W/L = 1/1,25$), 56,25° 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° pour le modèle H10 m (modèle E avec $W/L = 1/1,5$ et $H/L = 1/3$). Plus le rapport W/L est petit pour une même hauteur (modèles de A, B, C à D), plus grand doit être l'angle d'incidence pour optimiser l'effet du vent. De la même façon, plus la hauteur de bâtiment est petite pour la même forme en plan (modèles de C à E), plus grand doit être l'angle d'incidence du vent pour optimiser l'effet du vent.

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

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

A partir de simulations faites sur la barre de référence ($W \times L \times H = 12$ m \times 30 m \times 20 m) avec différentes variantes de hauteur, de longueur et de largeur, l'impact des paramètres de forme sur les vents à l'arrière du bâtiment peut être évalué. Trois lignes verticales positionnées sur 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 valeurs du coefficient C_v 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 données dans les Fig. 5-2-23 a, b et c.

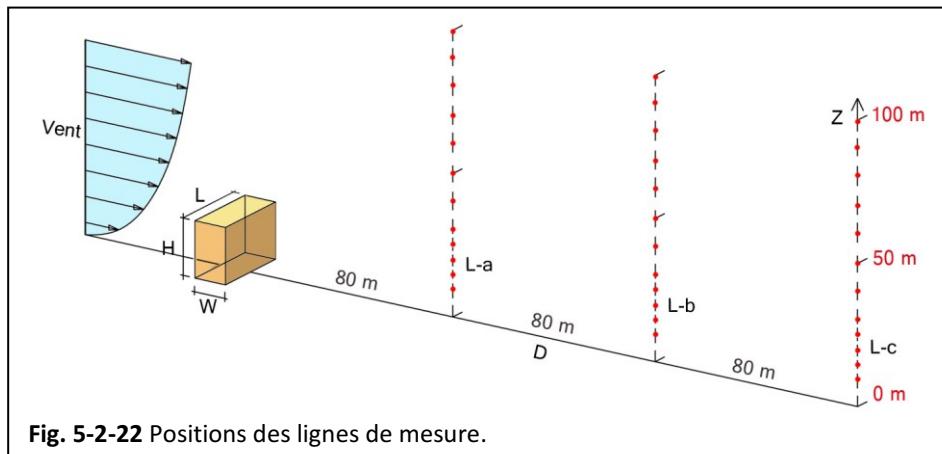


Fig. 5-2-22 Positions des lignes de mesure.

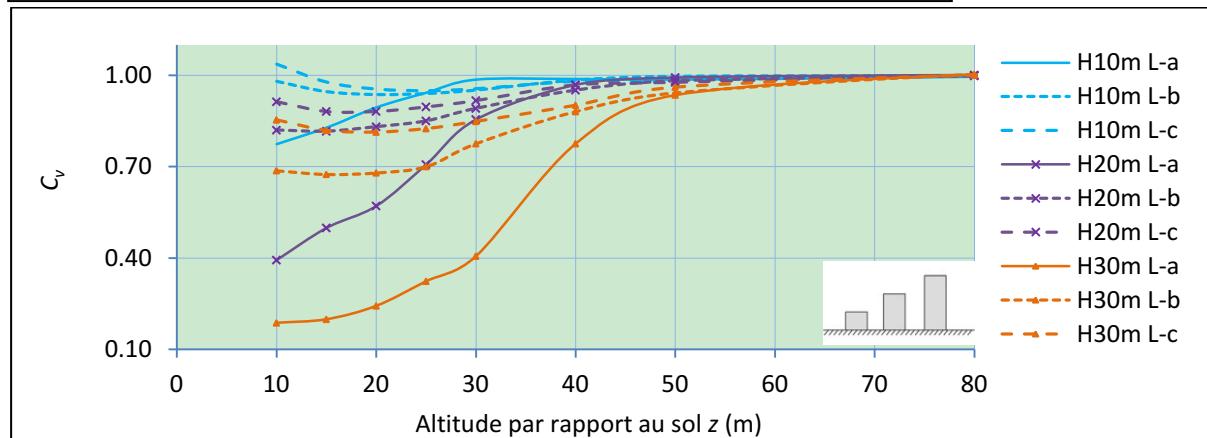


Fig. 5-2-23a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes hauteurs.

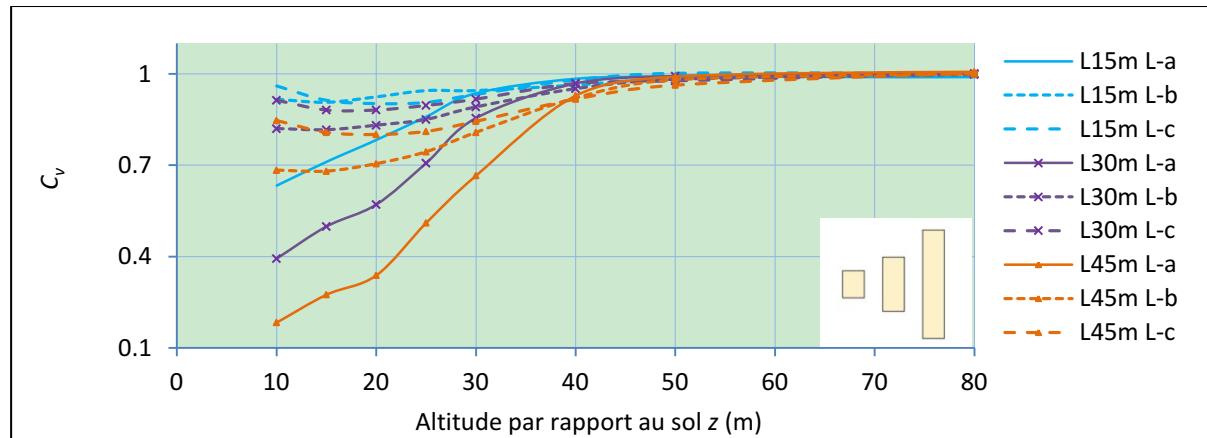


Fig. 5-2-23b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs.

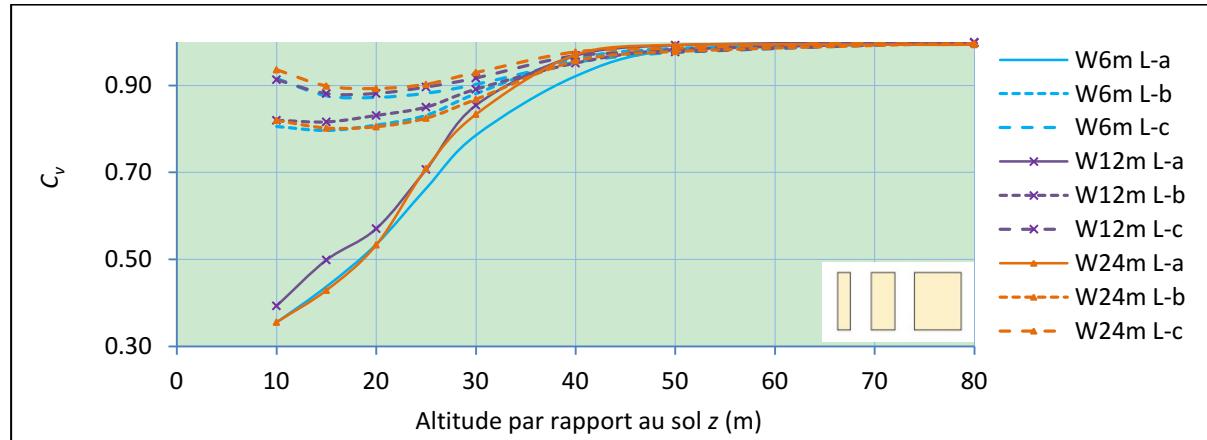


Fig. 5-2-23c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes largeurs.

Pour préciser l'impact de différents paramètres d'un 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 (H , L , W) sont donnés dans le [Tableau 5-2](#). Les pourcentages précis de variation de la vitesse du vent en changeant la distance en arrière du bâtiment (D) sont ainsi donnés. Selon les [Figures 5-2-23 \(a, b, c\)](#), le [Tableau 5-2](#), les conclusions suivantes peuvent être apportées.

1) L'impact des quatre paramètres diminue avec l'altitude. Pour un bâtiment de hauteur $H = 20$ m, l'influence de la variation des paramètres L , W et D est peu significative ($< 1,5\%$) lorsque $z > 50$ m. Pour le bâtiment dont $H = 30$ m, l'impact du paramètre D est insignifiant ($< 1\%$) lorsque $z > 70$ m. Donc, 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 variations avec le paramètre D montrent les mêmes tendances.

4) En faisant varier les paramètres H , L et W d'un facteur 1 à 0,5 et d'un facteur 1 à 1,5, les variations des valeurs de C_v sont faibles entre deux changements, quelque soit l'altitude d'évaluation ($< 7\%$, p. ex., 5 % pour le paramètre H à $Z = 20$ m, 2 % pour le paramètre L à $Z = 25$ m). Par contre, les deux taux de variation sur C_v pour le paramètre D varient beaucoup à une altitude faible (p. ex., 25 % à $z = 20$ m).

Tableau 5-2

Variations de vitesse du vent en fonction de paramètres du bâtiment (H , L , W , D)

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 à l'arrière du bâtiment est analysé ([Annexe 5.1](#)). Généralement, le rapport entre la distance minimale à l'arrière du bâtiment pour atteindre un vent stable (D_{stable}) et la hauteur du bâtiment (H), diminue avec l'augmentation de H . Grâce aux tests effectués, une relation entre cette distance minimale et la hauteur du bâtiment a été déterminée :

$$D_{stable} = \frac{84}{H^{0,6}} H.$$

Pour évaluer le potentiel éolien au-dessus du toit, deux tours placées en ligne dans la direction du vent sont simulées. Les impacts de plusieurs paramètres morphologiques sont analysés ([Annexe 5.2](#)).

5.3 Simulation et potentiel éolien de deux bâtiments

Dans cette partie, l'impact de différentes relations entre deux bâtiments sur le potentiel éolien est discuté. Les modèles principaux choisis sont : deux bâtiments en ligne, deux bâtiments parallèles, deux bâtiments décalés, deux bâtiments perpendiculaires et deux bâtiments en coins sous différents angles d'incidence du vent. Les paramètres pris 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 élevé. Dans ce contexte, il s'avère évidemment impossible de dégager une solution unique et définitive à l'optimisation de l'énergie éolienne autour des bâtiments. Par conséquent, des exemples types ont été choisis en faisant varier quelques paramètres pour illustrer la méthode de recherche.

5.3.1 Potentiel éolien de deux bâtiments en ligne par rapport au vent

Sur la base d'un couple de barres de référence ($W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) 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 d'une barre isolée avec les mêmes conditions de vent sont ajoutées à la comparaison : modèle A0 pour le groupe de modèles de hauteur $H = 10 \text{ m}$, et modèle B0 pour le groupe de modèles de hauteur $H = 20 \text{ m}$. 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).

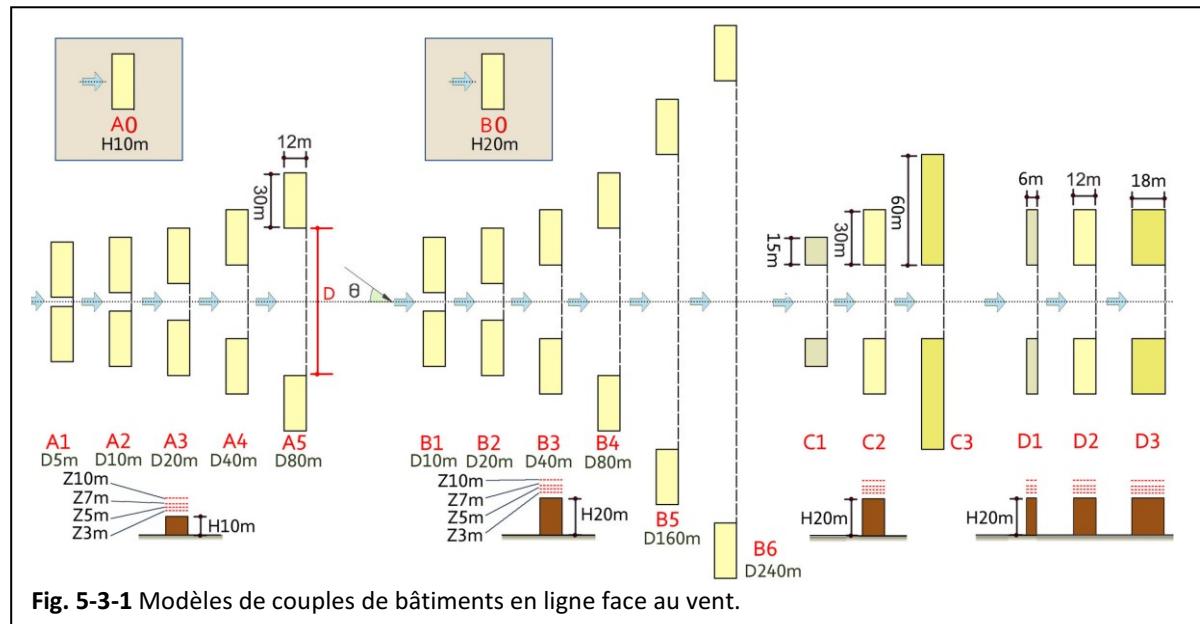


Fig. 5-3-1 Modèles de couples de bâtiments en ligne face au vent.

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 hauteur $H = 20 \text{ m}$ (B1-B6) et pour les deux angles d'incidence ($0^\circ, 30^\circ$). Pour le groupe de modèles de $H = 10 \text{ m}$ (A1-A5), les résultats obtenus avec l'angle d'incidence de 30° suivent la même tendance que ceux obtenus avec les modèles $H = 20 \text{ m}$. 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 hauteur $H = 10 \text{ m}$ ont peu d'effets sur l'augmentation de la vitesse du vent, sauf dans le cas A5 avec un vent de 30° , ou à

l'altitude de $Z = 3$ m. Pourtant, les couples de $H = 20$ m peuvent être plus ventés que le modèle à un bâtiment isolé : dès que la distance de séparation $D > 40$ m, les couples de bâtiments en ligne enregistrent plus de vent au-dessus des toits (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 réduite avec l'altitude (Fig. 5-3-2c, d).

4) Pour arriver à $C_v > 1$, l'altitude doit être supérieure à 7 m au-dessus du toit pour le modèle $H = 20$ m et supérieure à 10 m pour le modèle $H = 10$ m.

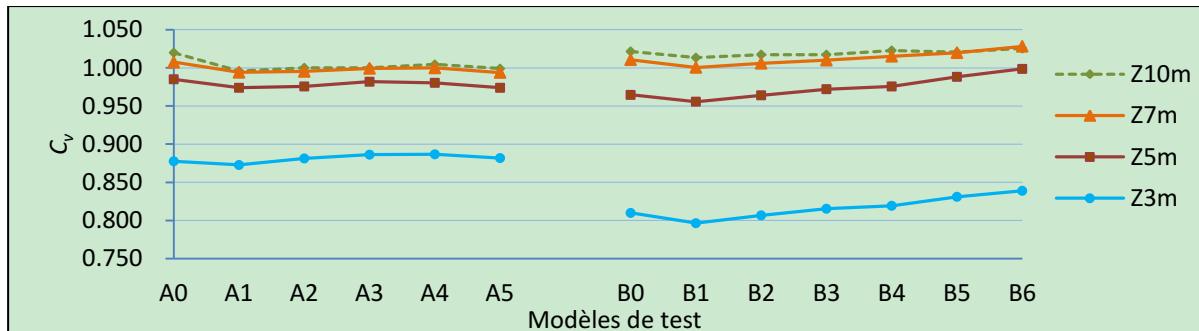


Fig. 5-3-2a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes distances de séparation entre deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 0°).

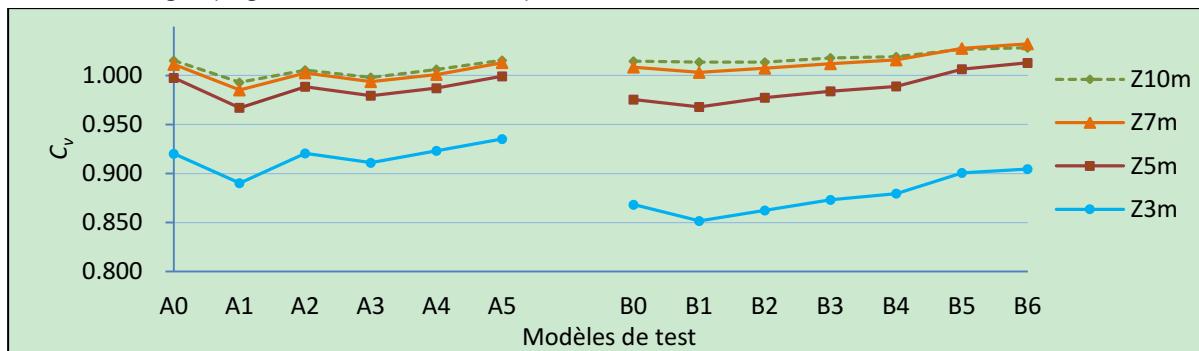


Fig. 5-3-2b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes distances de séparation entre deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 30°).

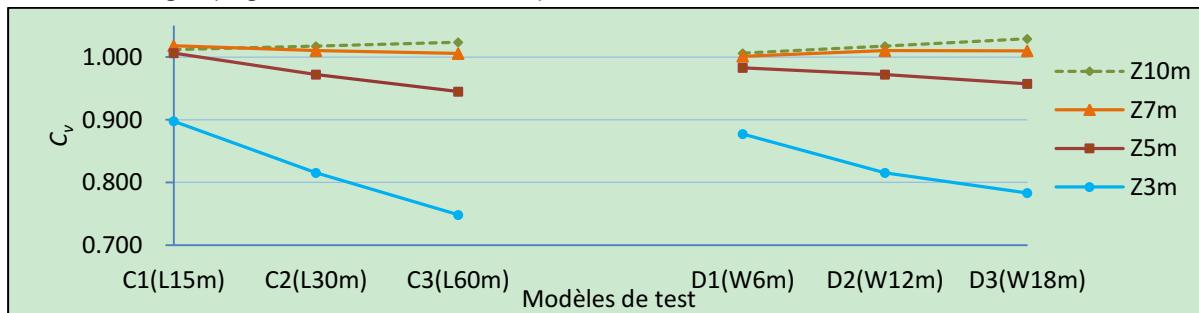


Fig. 5-3-2c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs et largeurs de bâtiments dans les modèles de deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 0°).

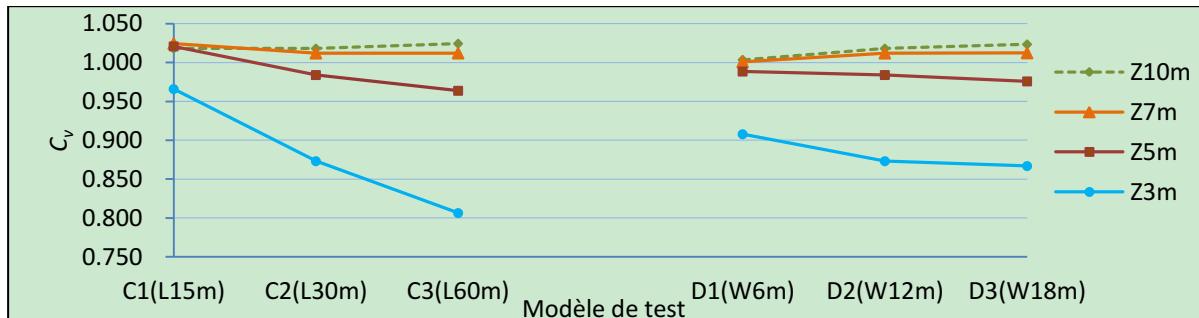


Fig. 5-3-2d Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs et largeurs de bâtiment dans les modèles de deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 30°).

5.3.2 Potentiel éolien de deux bâtiments parallèles

Pour analyser les écoulements du vent dans une rue, deux barres identiques de bâtiments 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. 5-3-3) 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 très longue des bâtiments, 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 à quatre altitudes $z = 10 \text{ m}, 15 \text{ m}, 20 \text{ m}$ et 25 m .

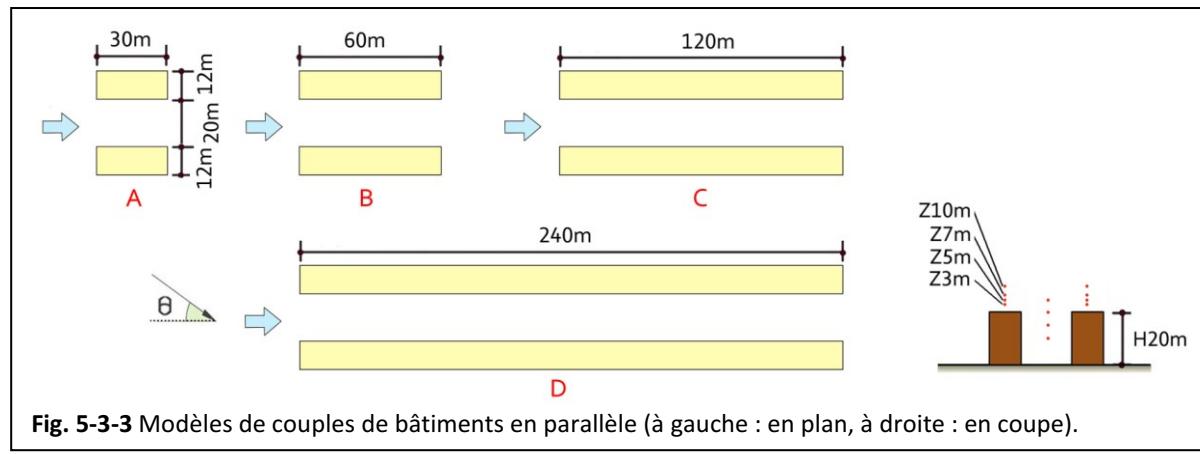


Fig. 5-3-3 Modèles de couples de bâtiments en parallèle (à gauche : en plan, à droite : en coupe).

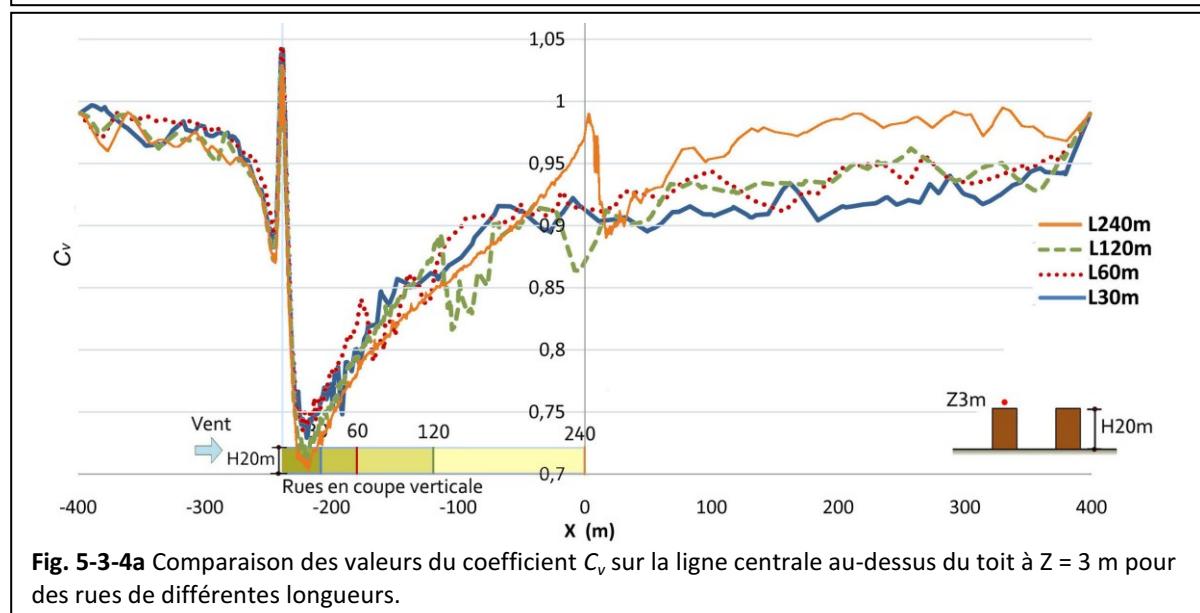


Fig. 5-3-4a Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 3 \text{ m}$ pour des rues de différentes longueurs.

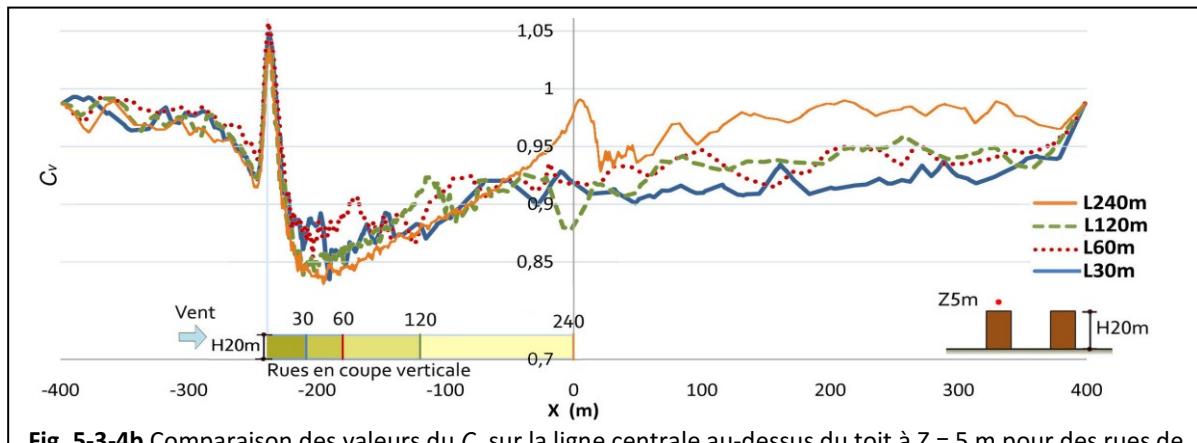


Fig. 5-3-4b Comparaison des valeurs du C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 5$ m pour des rues de différentes longueurs.

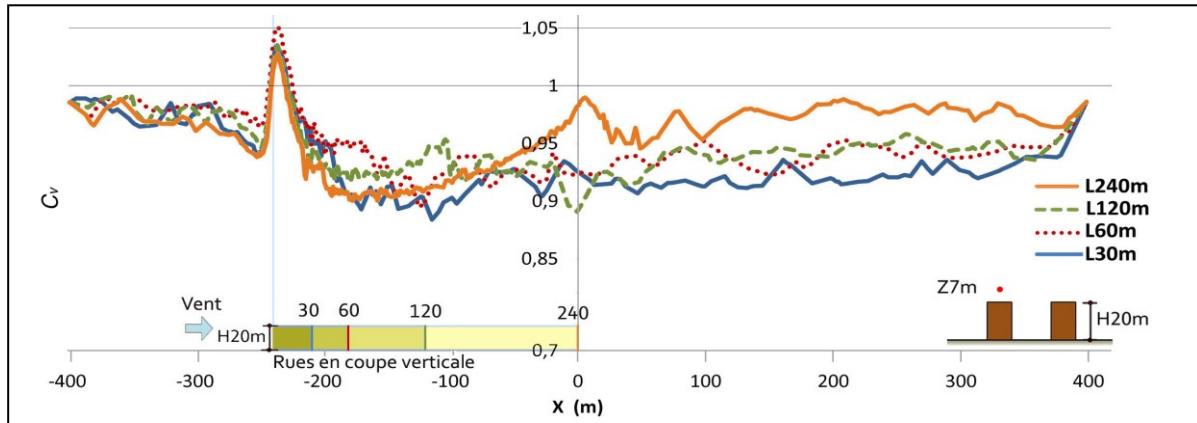


Fig. 5-3-4c Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 7$ m pour des rues de différentes longueurs.

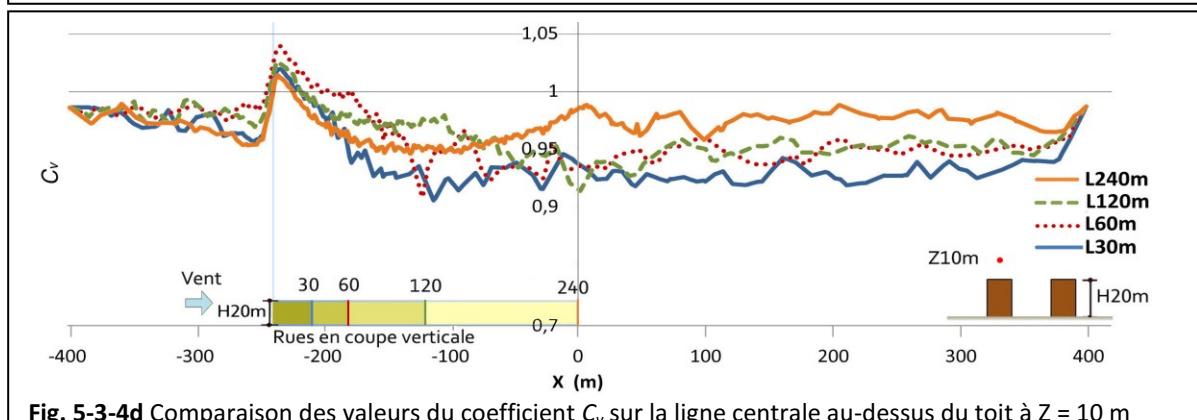


Fig. 5-3-4d Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 10$ m pour des rues de différentes longueurs.

Concernant les valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse sur les lignes centrales au-dessus du toit à plusieurs altitudes (Fig. 5-3-4a, 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 rue longue sont plus forts au-dessus des bâtiments que les vents d'une rue courte.
- 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 l'altitude. La longueur balayée à grandes vitesses (voir la longueur horizontale du pic de courbe où $C_v > 1$) est plus grande à haute altitude, ce 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.

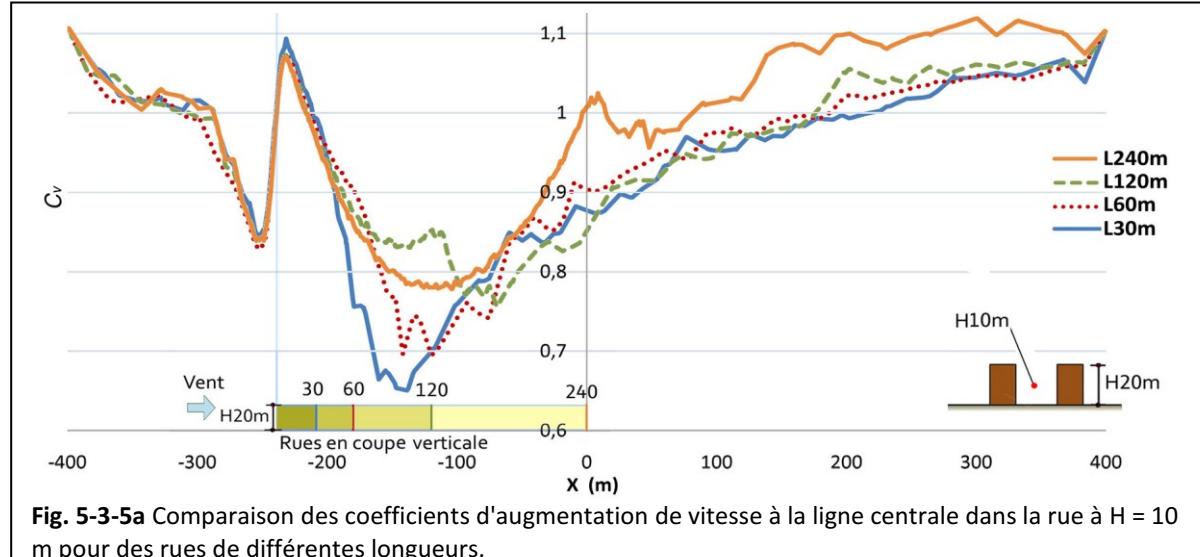


Fig. 5-3-5a Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à $H = 10$ m pour des rues de différentes longueurs.

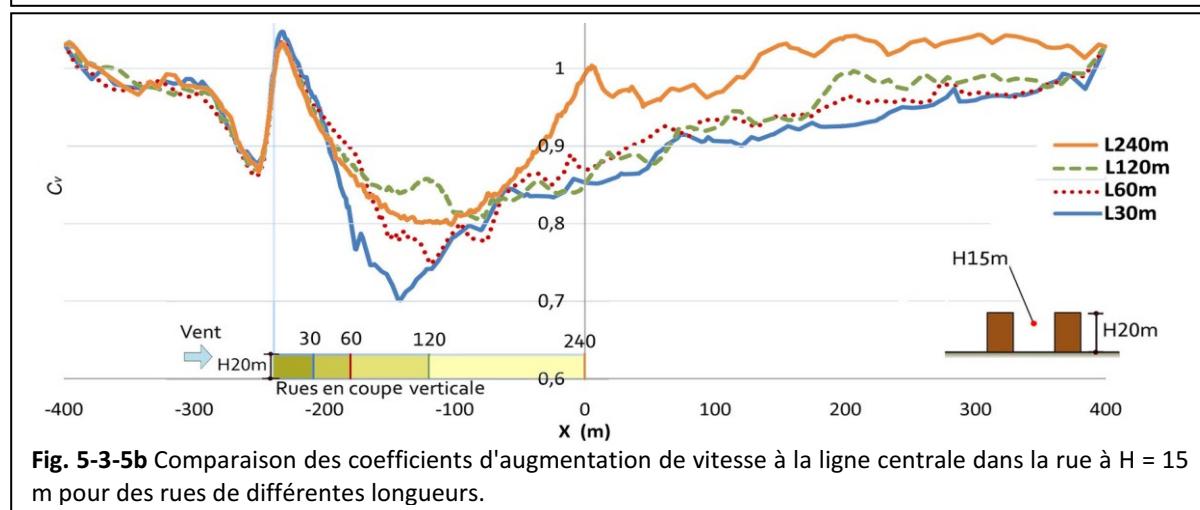


Fig. 5-3-5b Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à $H = 15$ m pour des rues de différentes longueurs.

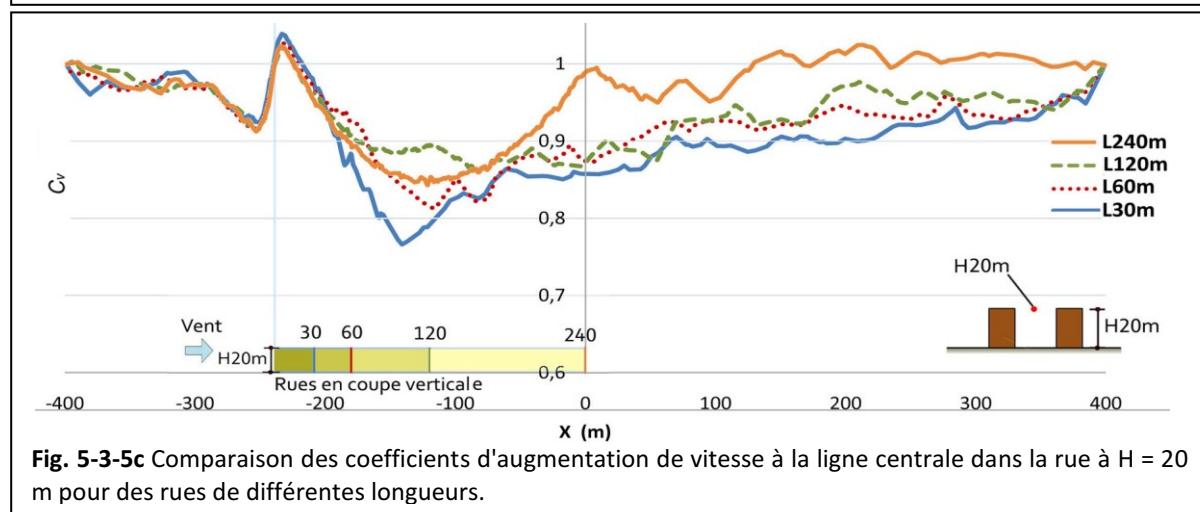


Fig. 5-3-5c Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à $H = 20$ m pour des rues de différentes longueurs.

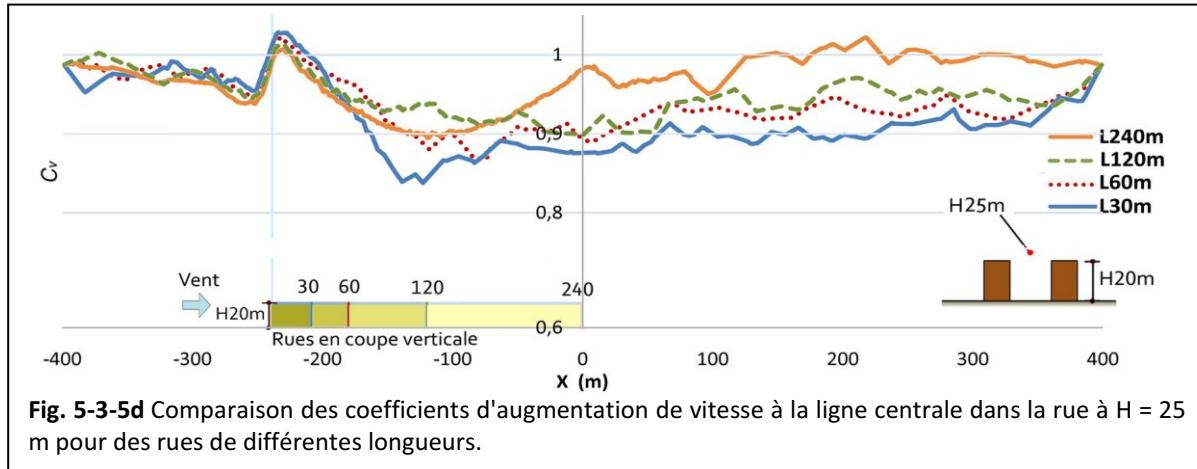


Fig. 5-3-5d Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse à la ligne centrale dans la rue à $H = 25$ m pour des rues de différentes longueurs.

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

1) En amont, les vents pour toutes les rues ont presque les mêmes vitesses. En aval à proximité du bâtiment, une rue courte a un coefficient un peu plus élevé qu'une rue longue. Par contre, en aval un peu plus loin du bâtiment, le vent dans la rue plus longue est beaucoup plus fort que celui dans une rue courte. Concernant l'amplitude des courbes présentées, la variation de la vitesse du vent traversant une rue courte est plus grande que celle traversant une rue longue.

2) quand la hauteur du point de test augmente, les coefficients d'augmentation de vitesse varient moins : les valeurs maxima sont plus faibles et les valeurs minimum augmentent. C'est-à-dire que les vents sont plus influencés par l'environnement bâti à basse qu'à haute altitude. En outre, lorsque la partie de courbe où $C_v > 1$ diminue avec la hauteur du calcul, les vents deviennent généralement moins forts que les vents libres, quand la hauteur est supérieure à 15 m. Dans ce cas là, pour développer l'énergie éolienne dans la rue, il faut penser à une hauteur adaptée où la vitesse est grande avec des effets de concentration.

5.3.3 Potentiel éolien de deux bâtiments décalés

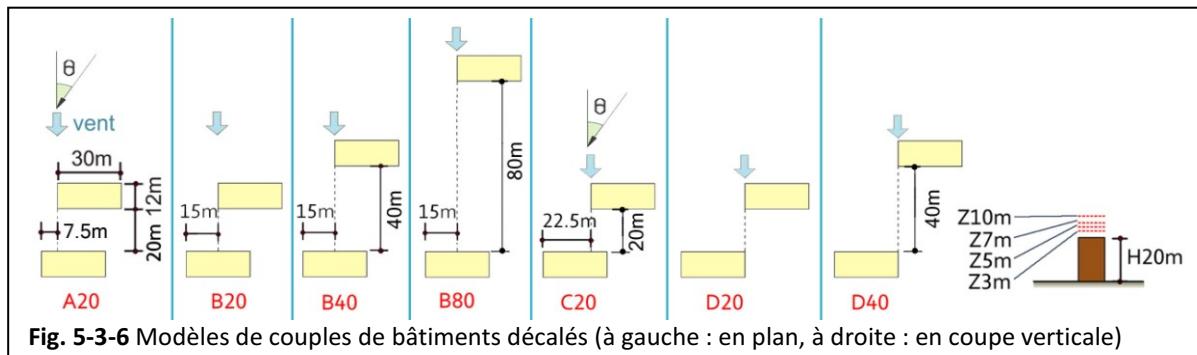


Fig. 5-3-6 Modèles de couples de bâtiments décalés (à gauche : en plan, à droite : en coupe verticale)

Sur la base du modèle de deux barres de référence ($W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$), plusieurs groupes de deux bâtiments avec différents décalages sont testés (Fig. 5-3-6). Les modèles A20, B20, C20 et D20 ont une même distance de séparation ($D = 20 \text{ m}$) dans la direction du vent mais différents décalages perpendiculaires à la direction du vent ($d = 7,5 \text{ m}, 15 \text{ m}, 22,5 \text{ m}, 30 \text{ m}$). Les 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 modèles D20 et D40 ont aussi un même décalage ($d = 30 \text{ m}$) mais différentes distances de séparation ($D = 20 \text{ m}, 40 \text{ m}$). 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° .

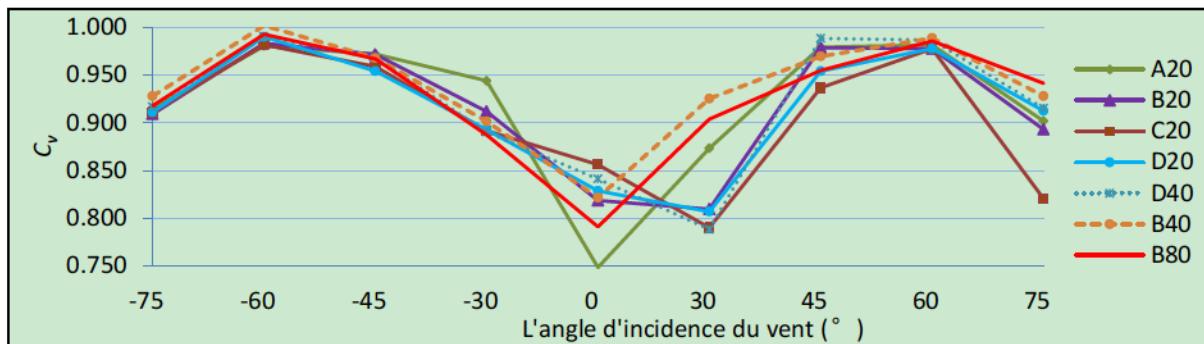


Fig. 5-3-7a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de bâtiments décalés (à $Z = 3$ m).

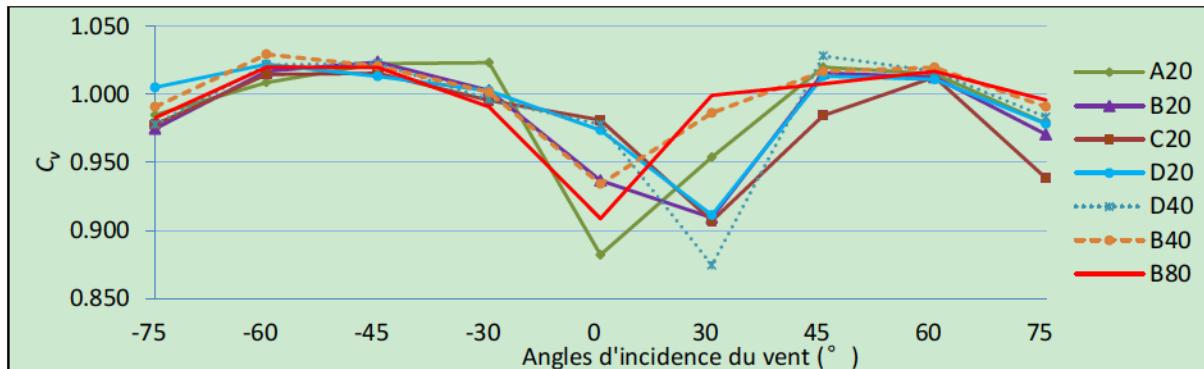


Fig. 5-3-7b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de bâtiments décalés (à $Z = 5$ m).

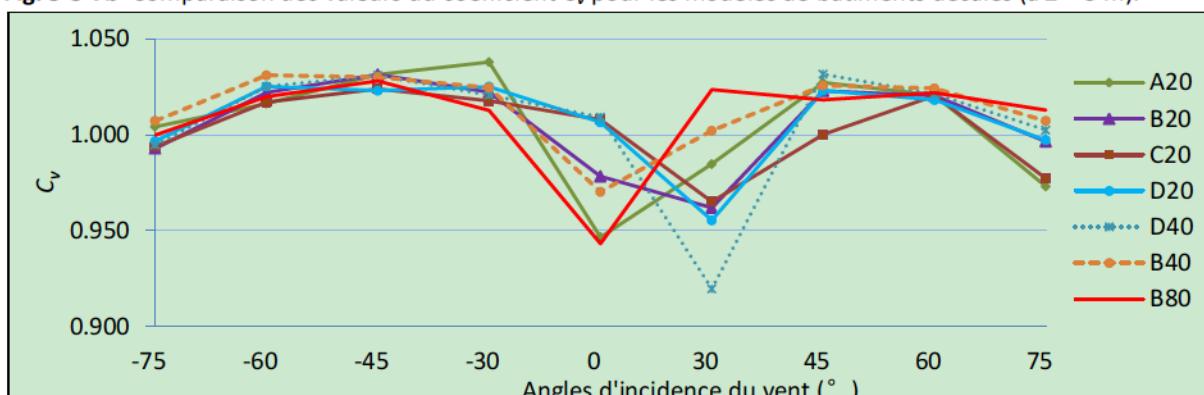


Fig. 5-3-7c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de bâtiments décalés (à $Z = 7$ m).

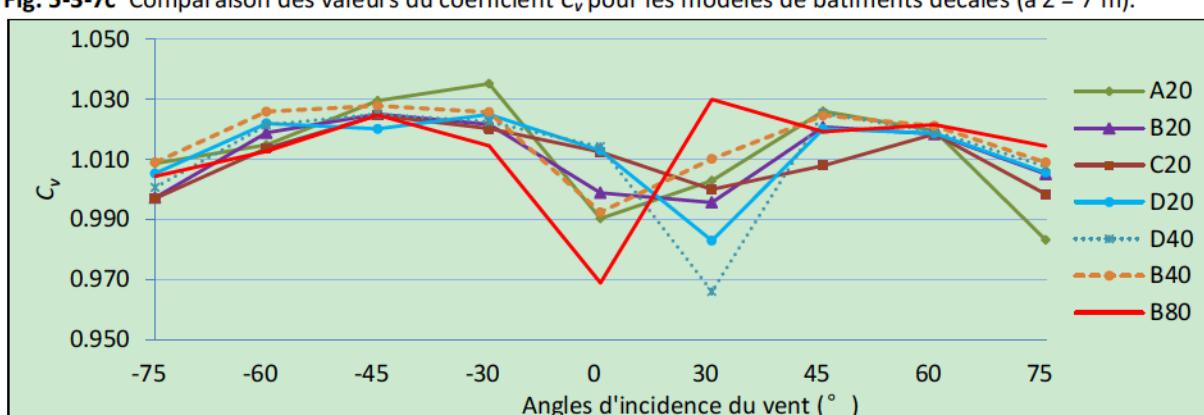


Fig. 5-3-7d Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de bâtiments décalés (à $Z = 10$ m).

A partir des valeurs du coefficient d'augmentation de la vitesse du vent (Fig. 5-3-7a, 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° . Les valeurs pour les angles de 60° et 45° sont aussi bonnes mais un peu plus faibles à cause de la configuration asymétrique.
- 2) Quand l'altitude augmente, la valeur de crête varie de manière centrée. Plus précisément, elle est restée faible autour de $-60^\circ/60^\circ$ ($Z = 3$ m) et reste élevée plutôt autour de $-45^\circ/45^\circ$ ($Z = 10$ m).

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

4) Parmi les modèles avec 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 de -30°.

5) Entre les modèles avec les mêmes décalages (modèles D20 et D40, ou modèles B20, B40 et B80), la valeur maximale du coefficient d'augmentation augmente linéairement, ou augmente avant puis diminue, avec la distance entre les deux bâtiments. Autrement dit, il existe une meilleure distance optimale de séparation correspondant à un effet de concentration du vent maximum, à un certain angle d'incidence.

5.3.4 Potentiel éolien de deux bâtiments identiques perpendiculaires

Pour évaluer l'impact de la forme d'un couple de barres perpendiculaires, deux barres ($W \times L \times H = 6 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, par défaut) identiques et symétriques à la ligne de mi-angle sont choisies (Fig. 5-3-8). Des modèles avec différentes longueurs, largeurs, hauteurs et angles d'incidence du vent (y compris le mode convergent et le mode divergent) sont comparés et les résultats à différentes altitudes au-dessus du toit sont analysés.

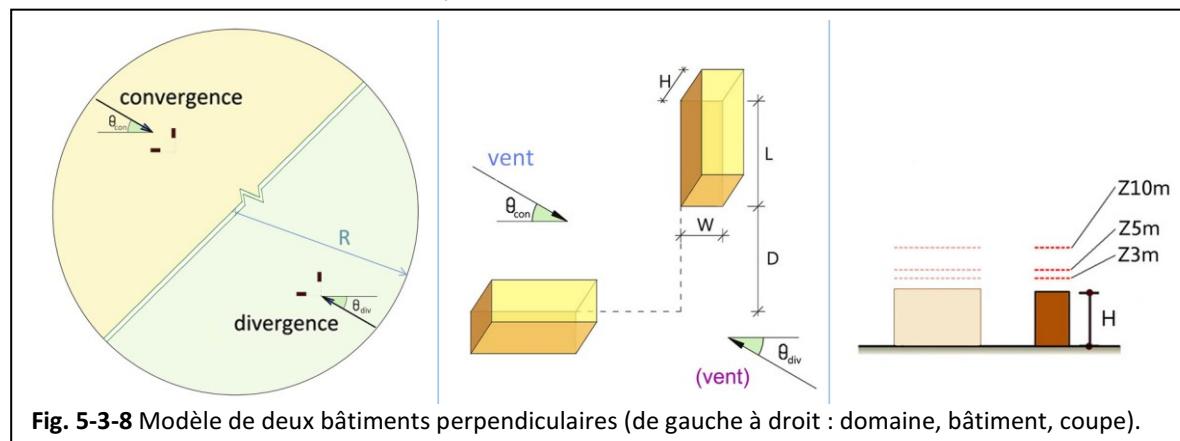


Fig. 5-3-8 Modèle de deux bâtiments perpendiculaires (de gauche à droit : domaine, bâtiment, coupe).

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

1) Pour exploiter au maximum potentiel éolien, un angle d'incidence du vent de 45° est le meilleur choix dans la plupart de cas. Les angles 30° et 60° peuvent parfois être un bon choix.

2) Avec un 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 coins des bâtiments. Alors qu'avec un vent incident en mode divergence, la valeur de l'indicateur M diminue assez lentement avec l'élargissement de la distance entre les coins.

3) Pour les bâtiments bas, le mode d'entrée convergent doit être évité 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 isolé, la plupart des configurations des deux barres perpendiculaires étudiées ici ont montré une plus grande densité de l'énergie éolienne sur le toit.

5) En général, les bâtiments couvrant une faible emprise au sol (avec une petite longueur ou largeur) ont plus de densité d'énergie éolienne que les bâtiments à grande emprise. Toutefois, le montant total de l'énergie produite et l'efficacité économique doivent être considérés dans une situation réelle.

6) Avec l'élévation de l'altitude d'évaluation, le coefficient C_v 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 identiques positionnés avec des angles variés

Sur la base du modèle du couple de bâtiments de référence ($W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) 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 correspondent au mode d'entrée du vent et à l'angle de coin, par exemple, « C60 » signifie « mode de convergence, $\alpha = 60^\circ$ » (Fig. 5-3-9). La longueur du bras, correspondant à la distance entre l'extrémité des bâtiments et l'intersection entre leurs deux grands axes (D sur la Fig. 5-3-9) et l'intersection des lignes de fuite est la même pour tous les cas dans un groupe. Deux longueurs de bras sont considérées ($D = 45 \text{ m}, 90 \text{ m}$). Sur la base des résultats de deux bâtiments perpendiculaires et symétriques, nous considérons qu'un angle d'incidence correspondant à la bissectrice de l'angle entre les deux axes des bâtiments, ce qui correspond à un meilleur potentiel éolien. En outre, quatre altitudes ($Z = 3 \text{ m}, 5 \text{ m}, 7 \text{ m}, 10 \text{ m}$) sont étudiées pour analyser l'impact de l'angle entre les deux axes des bâtiments sur le potentiel éolien au-dessus du toit.

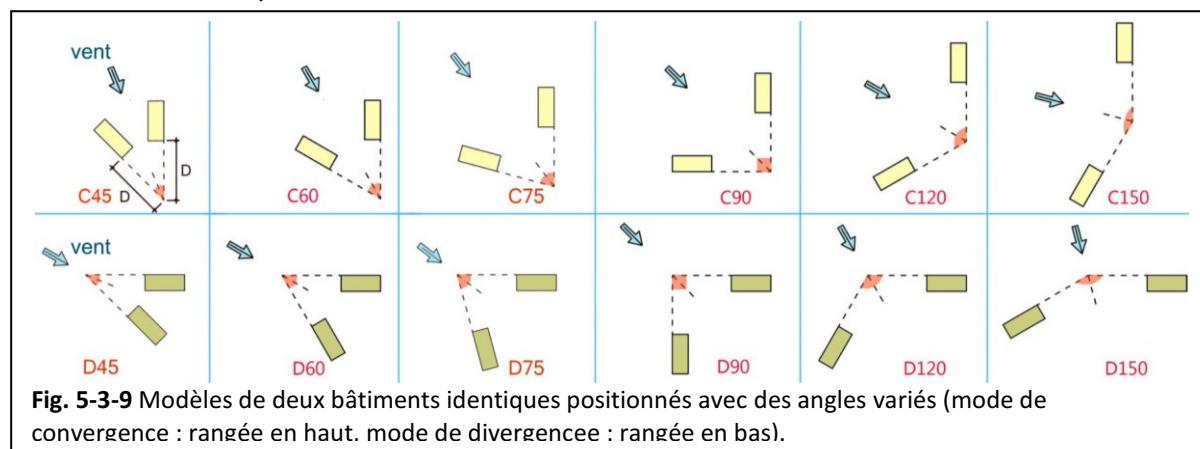


Fig. 5-3-9 Modèles de deux bâtiments identiques positionnés avec des angles variés (mode de convergence : rangée en haut. mode de divergence : rangée en bas).

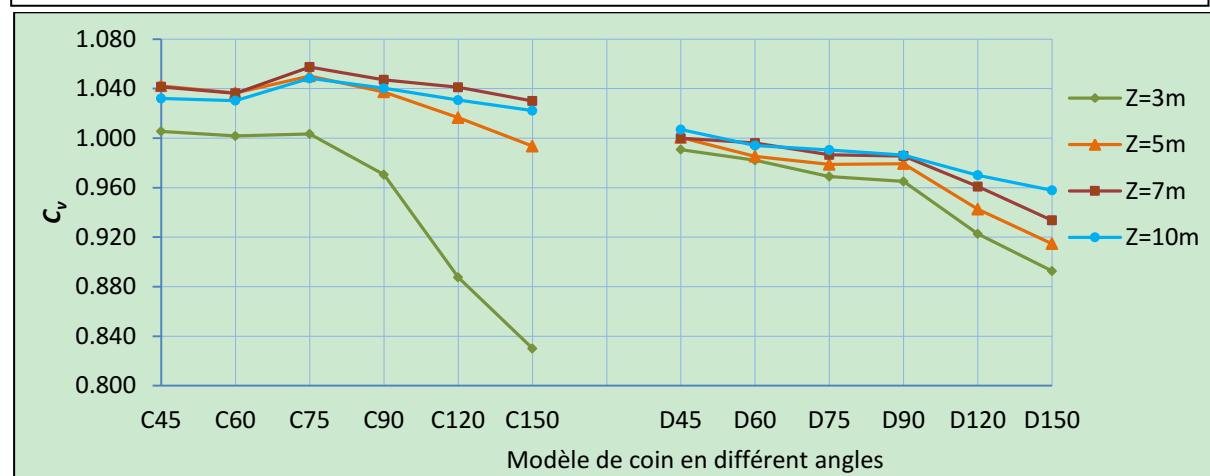


Fig. 5-3-10a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour le groupe de modèles $D = 45 \text{ m}$.

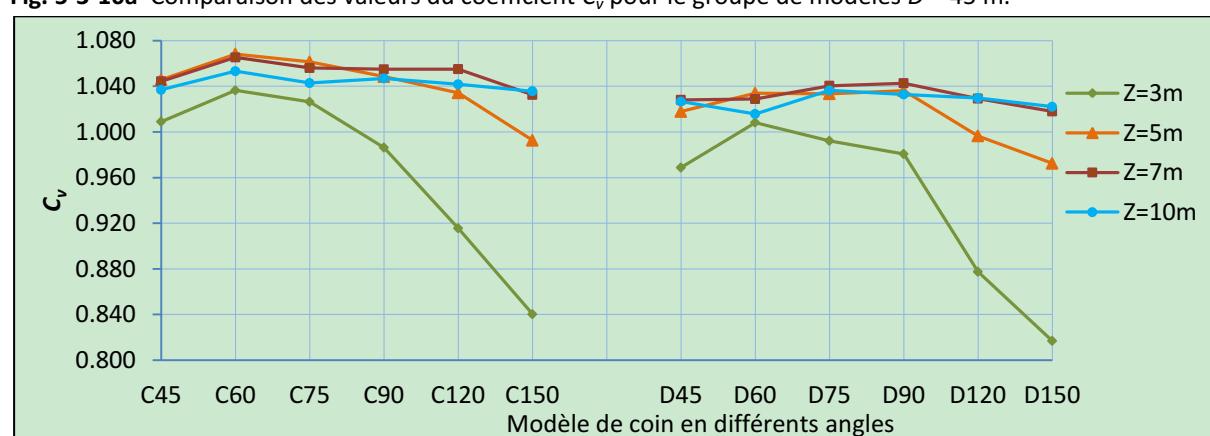


Fig. 5-3-10b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour le groupe de modèles $D = 90 \text{ m}$.

Concernant les résultats du coefficient C_v des différents modèles à plusieurs altitudes (Fig. 5-3-10a, b), les conclusions suivantes peuvent être apportées :

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

2) Avec les mêmes configurations, les coins en mode convergent sont généralement plus ventés au-dessus du toit que les coins en mode divergent, sauf pour quelques cas à l'altitude de $Z = 3$ m (C120, C150). De plus, à partir d'une altitude Z supérieure à 5 m, les vents sur les toits des modèles en mode convergent sont également plus forts qu'en vent libre ($C_v > 1$), alors qu'en mode divergent, les modèles du groupe $D = 45$ m sont toujours moins ventés qu'en vent libre ($C_v < 1$).

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

4) A mesure que la longueur du bras (D) augmente (de 45 m à 90 m), les valeurs du coefficient C_v augmentent généralement : pour les modèles en mode de convergence, on a une augmentation de 1,4 % entre les deux groupes. D'ailleurs, en mode convergent le meilleur angle entre bâtiments change de 75° à 60° , par contre en mode divergent le meilleur angle passe plutôt de 45° (ou plus petit) à 75° ou encore à 90° .

5.4 Simulation et potentiel éolien de trois bâtiments décalés

Sur les bases des résultats sur le potentiel éolien au-dessus d'un et deux bâtiments, des études sur trois bâtiments sont effectuées pour approfondir l'étude des interactions du vent sur les modèles simples avant de commencer avec des modèles complexes. Ici, sur la base du bâtiment de référence $W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, des groupes de trois bâtiments en parallèle avec celui du milieu décalé sont modélisés (Fig. 5-4-1). Le modèle A avec trois barres en parallèle est le modèle de base. Dans le groupe des modèles B (B1-B6), on déplace progressivement la barre du milieu à gauche de $L/4$ jusqu'à une distance de $2L$. Dans le groupe des modèles C (C1-C3), on déplace la barre du milieu à droite de $L/2$ 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 ($Z = 10 \text{ m}, 15 \text{ m}$) sont étudiées. Les exemples de distribution de contours de vitesses du vent avec l'angle d'incidence $\theta = 45^\circ$ et à la coupe $H = 20 \text{ m}$ pour chaque modèle sont donnés dans la Fig. 5-4-2.

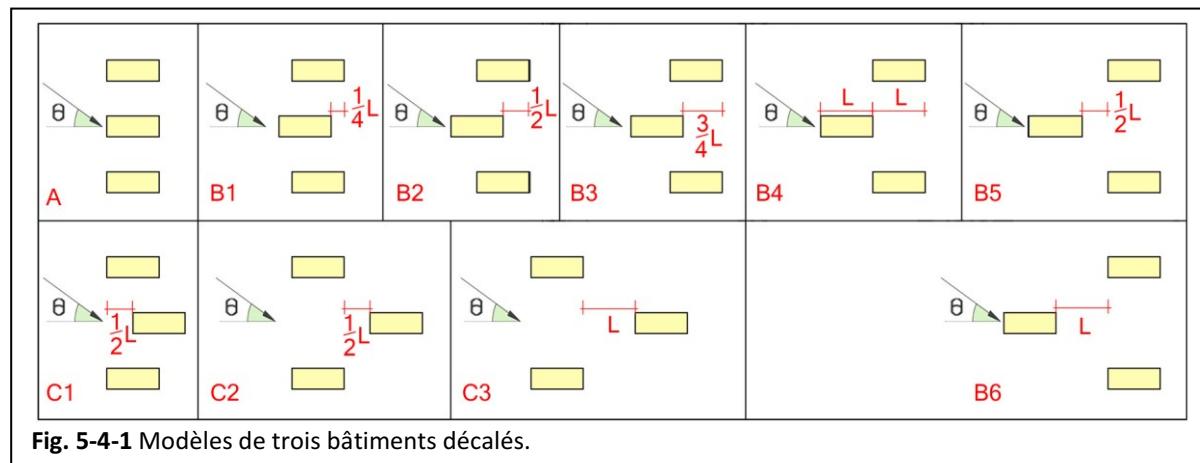


Fig. 5-4-1 Modèles de trois bâtiments décalés.

Concernant les résultats du coefficient C_v du vent au-dessus du toit du bâtiment central en deux altitudes ($Z = 10 \text{ m}$ et $Z = 15 \text{ m}$) pour différentes configurations de décalage (Fig. 5-4-3), les conclusions suivantes peuvent être apportées :

- 1) L'angle d'incidence correspondant au vent le plus fort au-dessus de toit est de :
 - 45° pour le modèle A,
 - 45° ou 30° à une altitude moyenne ($Z = 10 \text{ m}$) et 45° ou 60° à haute altitude ($Z = 15 \text{ m}$) pour le groupe B,
 - 30° pour le groupe C.
- 2) Concernant les amplitudes de variation du coefficient C_v en fonction de l'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 faibles que ceux des modèles B, par exemple, le modèle C1 est plutôt plus venté que le modèle B4.
- 3) Les coefficients moyens d'augmentation pour les quatre angles d'incidence ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ et 60°) sont donnés dans la Fig. 5-4-3c. Ils nous montrent que le bâtiment central peut trouver une optimisation d'énergie éolienne au-dessus du toit dans le modèle B2.

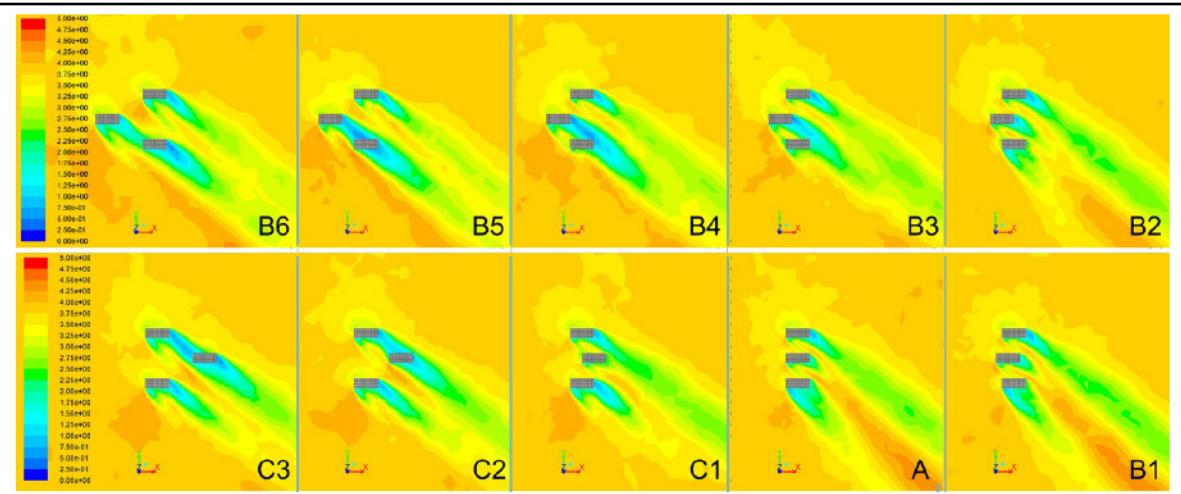


Fig. 5-4-2 Contours de vitesse des modèles de trois bâtiments décalés (plan à $H = 20$ m, $\Theta = 45^\circ$).

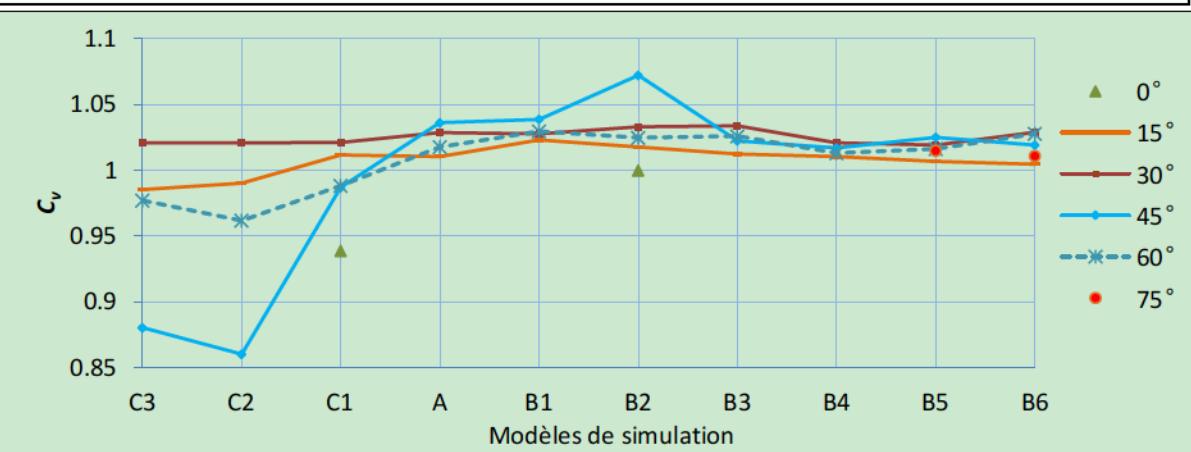


Fig. 5-4-3a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de trois bâtiments ($Z = 10$ m).

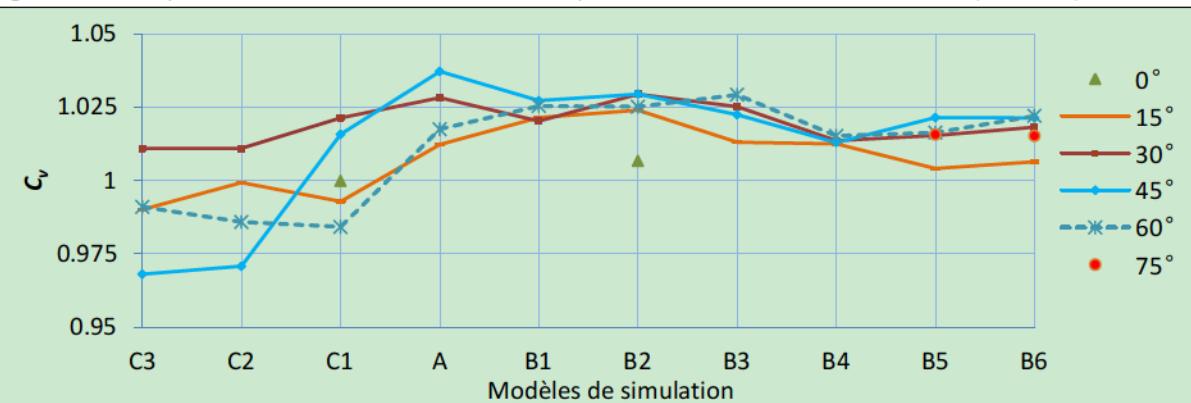


Fig. 5-4-3b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de trois bâtiments ($Z = 15$ m).

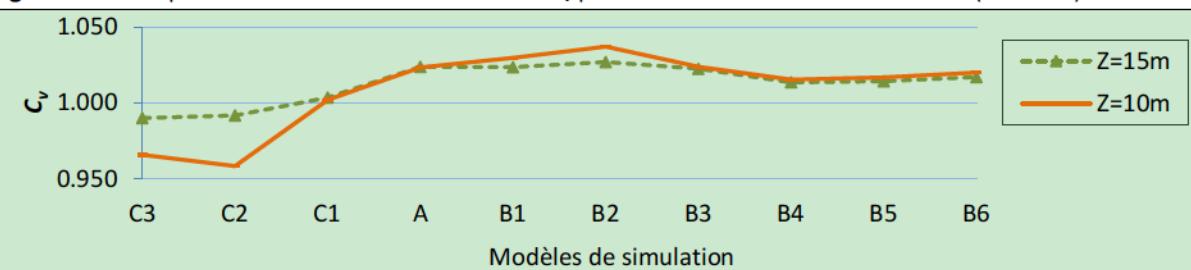


Fig. 5-4-3c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de trois bâtiments ($\Theta = 15^\circ - 60^\circ$)

5.5 Conclusion

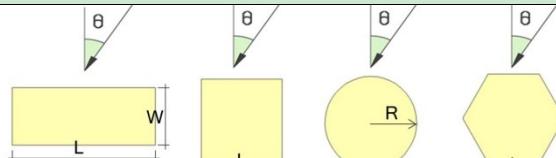
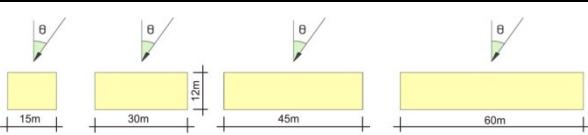
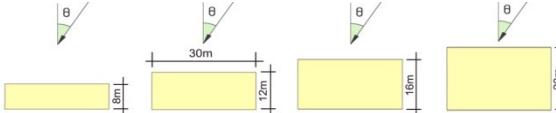
Dans ce chapitre, l'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés est simulé et discuté. Tout d'abord, des indicateurs sont proposés pour évaluer l'énergie éolienne dans l'environnement bâti. L'indicateur M est défini pour évaluer le potentiel éolien total d'une surface, notamment au-dessus du toit d'un bâtiment puisque cet endroit est le plus prometteur pour développer l'énergie éolienne en milieu urbain. L'indicateur D est défini comme la densité d'énergie éolienne par unité de surface. L'indicateur C_v 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 correspond à une marge d'erreur moyenne de 3 à 7 % sur les cas d'étude. En comparaison, l'indicateur M donne un résultat précis mais prend plus de temps pour traiter des profils de contours de vitesses. La précision de classes de vitesse dans une surface est évaluée. Les résultats montrent que l'influence de la précision des classes de vitesses est assez faible voire 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.

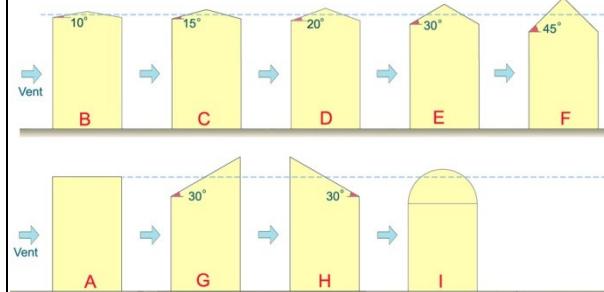
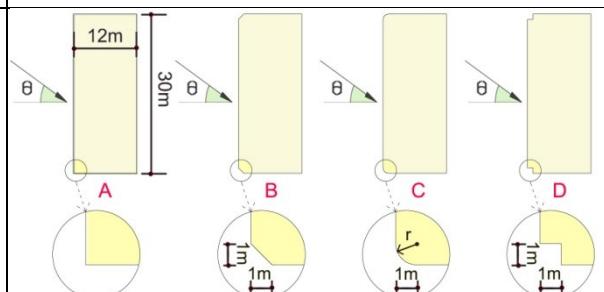
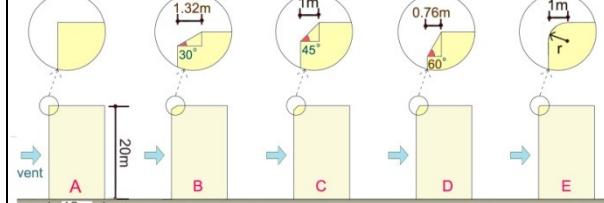
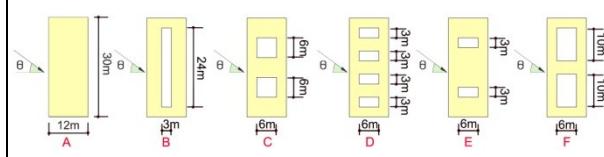
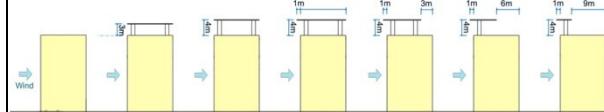
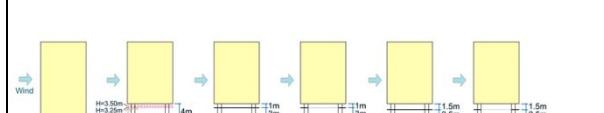
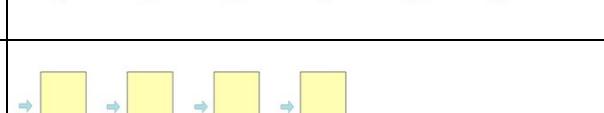
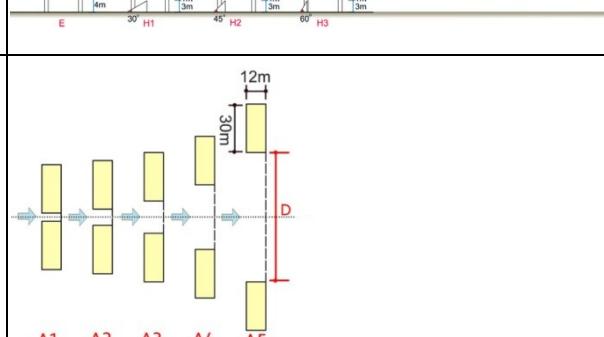
Ensuite, avec les indicateurs proposés, différentes formes de bâtiments isolés sont analysées. Lorsque la direction du vent dominant n'est pas donnée, les vents tout autour d'un bâtiment avec un pas de variation de l'angle d'incidence de 15° sont considérés et leurs impacts sont étudiés également. Deux ou trois altitudes d'évaluation au-dessus du toit sont analysées. En raison de la taille et de la position variée de la zone du vent exploitable à proximité d'un bâtiment en plan, la comparaison du potentiel éolien proche de murs n'est pas facile à obtenir d'une manière égale pour tous les modèles. On ne peut donc comparer raisonnablement le rendement d'énergie éolienne à proximité immédiate d'un mur. De plus, les vents proches des côtés du mur sont généralement moins forts qu'au-dessus du toit par leur altitude inférieure.

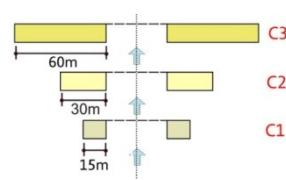
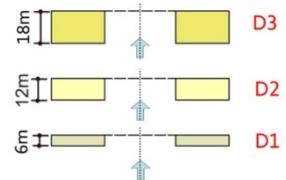
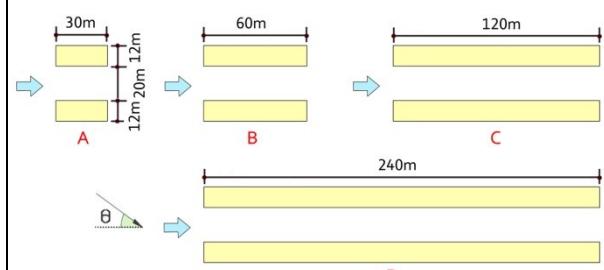
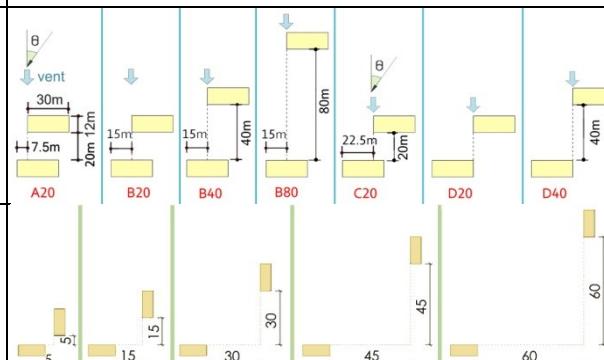
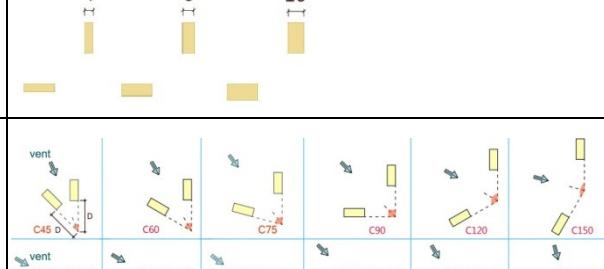
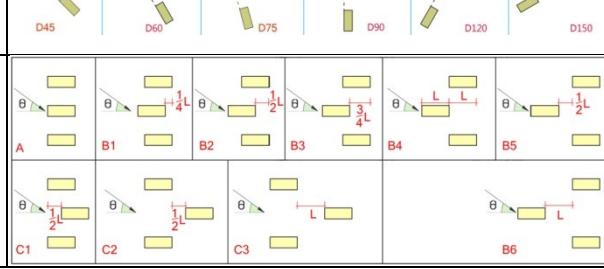
Une synthèse des paramètres morphologiques des modèles simples et l'évaluation d'intérêt sur le développement du potentiel éolien sont données (Tableau 5-3).

Tableau 5-3

Synthèse des paramètres morphologiques des bâtiments analysés et l'évaluation d'intérêt sur le potentiel éolien

Paramètres	Cas analysé	Niveau d'impact sur le vent	Intérêt sur le potentiel éolien
Forme en plan		Très important	oui
Longueur		important	oui
Largeur		faible	non

Paramètres		Cas analysé					Niveau d'impact sur le vent	Intérêt sur le potentiel éolien
Forme de toiture							Très important	oui
Coin	Coin de mur extérieur						Peu important	oui
	Coin en bordure du toit						Très important	oui
Forme de cour							Peu important	non
Passage du vent	Au-dessus du toit						important	oui
	Au rez-de-chaussée avec des dalles insérées						Peu important	non
	Au rez-de-chaussée avec des coins						important	non
Distance de séparation entre deux bâtiments							Peu important	non

Paramètres		Cas analysé		Niveau d'impact sur le vent	Intérêt sur le potentiel éolien
Longueur de deux bâtiments (face au vent)				Important	oui
Largeur de deux bâtiments (face au vent)				Peu important	non
Longueur de deux bâtiments (parallèle à la direction du vent)				Peu important	non
Décalage de deux bâtiments				Important	oui
Deux bâtiments perpendiculaires	Distance de séparation entre eux			Important	oui
	Longueur de bâtiments			Important	oui
	Largeur de bâtiments			Peu important	non
Angles de position de deux bâtiments				Très important	oui
Décalage de deux bâtiments				Important	oui

Pour les modèles de bâtiments de différentes formes de plan mais de même emprise au sol et de même hauteur, les résultats sur l'indicateur M montrent que les vents au-dessus du toit d'un modèle à plan rond sont plus forts à proximité du toit mais s'affaiblissent lorsque l'altitude s'élève. Les performances du modèle à plan rectangulaire et à plan carré sont semblables même si le plan carré est un peu plus venté à altitude élevée. Concernant l'impact de l'angle d'incidence du vent sur sa vitesse, un angle de 45° est meilleur pour le plan carré et de 60° pour le plan rectangulaire. Comparés au vent libre, tous les modèles présentent un effet de concentration du vent à une altitude « utilisable » au-dessus du toit.

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

Concernant l'impact de la largeur d'un bâtiment rectangulaire, nous remarquons qu'il y a une largeur optimale permettant d'avoir une densité maximale d'énergie éolienne au-dessus du toit. Pour notre cas de référence (bâtiment de 30 m de long et 20 m de haut) pour un vent incident d'angle 0° , cette largeur optimale est de $W = 12\text{m}$ (parmi $W = 8\text{ m}, 12\text{ m}, 16\text{m}$ et 20 m). Pour d'autres angles d'incidence du vent, cette largeur varie.

Concernant l'impact de la forme de la toiture d'un bâtiment rectangulaire, les résultats obtenus pour l'indicateur C_v , mènent aux conclusions suivantes :

- La toiture en voûte sphérique a plus d'effet de concentration du vent qu'une toiture en pente. La hauteur où cet effet est le plus fort est $H = 25\text{ m}$ lorsque le bâtiment fait 20 m de haut.
- Parmi les modèles de toiture en pente, le meilleur pour capter l'énergie éolienne correspond à deux pans avec une pente de 15° , ceci à une hauteur d'environ $H = 27\text{m}$.
- La pente de toiture la moins ventée est de 10° , puis $20^\circ, 30^\circ$ et enfin 45° .
- Avec une même hauteur moyenne, la toiture à un pan face au vent est moins ventée que la toiture à deux pans, mais elle reste plus forte que la toiture à un pan dos au vent.

Concernant l'impact de la forme des coins du bâtiment dans le cas particulier choisi (1/20 de la taille de bâtiment), les résultats obtenus pour l'indicateur C_v , mènent aux conclusions suivantes :

- Les résultats obtenus avec les modèles à coins tronqués et à coins concaves sont généralement meilleurs que ceux obtenus avec un coin arrondi.
- De plus, pour un vent normal, les résultats obtenus avec les deux modèles sont légèrement meilleurs que ceux obtenus avec le modèle de référence.
- Par contre, pour les vents obliques ($\Theta = 30^\circ$), ils sont moins bons, notamment à basse altitude au-dessus du toit.

L'impact de la forme du coin en bord de toiture 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, ce qui n'est plus le cas à haute altitude. Parmi les différents coins tronqués, c'est le coin de 30° qui correspond à une vitesse moyenne du vent plus forte. Le coin arrondi a une puissance semblable au coin de 30° .

Concernant l'impact de la cour d'un bâtiment rectangulaire, plusieurs formes de cours avec différentes tailles sont testées. Les résultats pour 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, l'influence de l'angle d'incidence est importante.

Concernant l'impact du passage du vent, plusieurs modèles de passage du vent sont testés. Les résultats pour l'indicateur C_v montrent que la présence de casquettes sur le toit accélère le vent entre le dessus du toit et la casquette (toujours par rapport au modèle de référence sans casquette) et ralentit le vent au-dessus de la casquette. La casquette la moins élevée est plus ventée au-dessous de celle-ci. Une casquette avec débord a un impact fort sur la vitesse du vent dans le passage. De plus, le raccourcissement de l'arrière de la casquette permet aussi de renforcer l'effet de concentration du vent. Les résultats concernant l'indicateur C_v sur les modèles permettant le passage du vent au niveau du rez-de-chaussée sous le bâtiment montrent qu'ils sont plus ventés au-dessus du toit que le modèle sans le passage du vent au rez-de-chaussée. Le rajout d'une dalle au niveau du rez-de-chaussée peut renforcer l'effet de concentration du vent dans le passage entre la dalle et le plafond du rez-de-chaussée. La largeur verticale du passage doit être assez grande pour obtenir l'effet de concentration le plus fort. Le rajout d'un coin avec un angle autour de 45° à 60° dans le passage du vent au niveau du rez-de-chaussée peut favoriser la capture d'énergie éolienne au-dessus du toit ou dans le passage au rez-de-chaussée.

Concernant l'impact de l'angle d'incidence du vent, plusieurs modèles avec différents rapports W/L et H/L sont testés. Les résultats concernant l'indicateur C_v montrent que le meilleur angle d'incidence augmente quand le rapport W/L s'accroît et pour le modèle carré, le meilleur angle d'incidence est de 45°. De la même façon, quand la hauteur de bâtiment augmente pour la même forme du bâtiment en plan, le meilleur angle d'incidence du vent diminue.

Concernant l'impact de la forme sur le vent à l'arrière du bâtiment, différentes variantes de hauteur, de longueur et de largeur d'un bâtiment sont évaluées. Nous trouvons que les vents à l'arrière d'un bâtiment sont ralents avec la hauteur et la longueur du bâtiment, alors qu'ils sont renforcés avec la distance par rapport au bâtiment. L'impact de la largeur n'est pas significatif. 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 peu significatif sur les vents à l'arrière du bâtiment.

Ensuite, différentes configurations de deux bâtiments et de trois bâtiments identiques sont étudiées. En raison de nombreux paramètres concernés (la taille de bâtiment, la configuration d'association, la distance de séparation, etc...), les variantes sont très nombreuses. Des exemples qui ne concernent que quelques paramètres ont été choisis pour présenter la méthode de recherche pour optimiser l'énergie éolienne autour des bâtiments.

Concernant l'étude de deux bâtiments en ligne, plusieurs modèles avec différentes distances de séparation, différentes hauteurs, différentes longueurs et largeurs du bâtiment sont considérés. Les résultats concernant l'indicateur C_v montrent que l'effet de concentration du vent s'accroît généralement avec l'augmentation de la distance séparant deux bâtiments jusqu'à une distance très importante. Pourtant il diminue avec l'augmentation de la longueur et de 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 au cas d'un bâtiment isolé.

Concernant l'étude de deux bâtiments en parallèle, plusieurs modèles en forme de rue avec différentes longueurs sont étudiés. L'augmentation de l'indicateur C_v sur les lignes médianes au-dessus du toit et au milieu de la rue à différentes hauteurs est étudiée. Nous trouvons que les vents au-dessus des bâtiments sont généralement moins efficaces que les vents libres aux mêmes hauteurs. Les vents au-dessus des bâtiments d'une rue longue sont plus forts en aval que ceux d'une rue courte. La plus grande valeur du coefficient C_v est obtenue à basse altitude au-dessus du toit. Pourtant, la vitesse du vent augmente généralement avec l'altitude et la zone de concentration du vent varie avec la forme du bâtiment et l'altitude. Une altitude adaptée peut donc être trouvée où à la fois la vitesse du vent et la surface de la zone du vent concentré sont importantes. L'effet d'augmentation de vent s'accroît puis diminue avec l'allongement de rue. Donc une longueur optimale pour

développer l'énergie éolienne au-dessus du toit peut être déterminée. Concernant les résultats en milieu de rue à hauteurs différentes, nous trouvons que l'effet de concentration du vent est plus fort en aval proche des bâtiments sur une rue courte, mais en aval plus loin des bâtiments sur une rue longue.

Concernant l'étude de deux bâtiments décalés, plusieurs modèles avec différents décalages et différentes distances de séparation sont étudiés. Les résultats concernant l'indicateur C_v montrent que la plupart des modèles ont des vents plus forts autour d'un l'angle d'incidence -60° ou -45° . Avec des angles de 60° ou de 45° , ils sont un peu moins forts. L'angle d'incidence où l'effet de concentration du vent est le plus fort est autour de $-60^\circ/60^\circ$ à basse altitude au-dessus du toit et autour de $-45^\circ/45^\circ$ à 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 puis diminue avec l'augmentation de la distance de séparation entre les deux bâtiments, ce qui signifie qu'il y a une distance optimale pour avoir un maximum d'effet de concentration à un certain angle d'incidence du vent.

Concernant l'étude de deux bâtiments perpendiculaires et symétriques, plusieurs modèles sont étudiés : différentes tailles de bâtiment, différentes distances de séparation et différents angles d'incidence. Les résultats montrent que la densité d'énergie éolienne au-dessus du toit augmente au début et puis diminue ensuite avec la distance de séparation entre bâtiments. Comparé avec un bâtiment isolé, le couple de bâtiments perpendiculaires peut avoir des effets de concentration du vent en mode divergent pour tous les modèles, et en mode convergent pour les modèles présentant une distance de séparation importante entre bâtiments. Quand l'altitude s'élève, la meilleure direction du vent change de 45° à 30° / 60° . Le potentiel éolien est plus sensible en mode convergent qu'en mode divergent en changeant la distance de séparation entre les bâtiments. En mode convergent il vaut mieux une distance importante, alors qu'en mode divergent, une faible distance est préférable pour obtenir le maximum d'énergie éolienne au-dessus du toit.

- Pour un couple de bâtiments bas, le mode divergent est plus intéressant que le mode convergent.
- Pour un couple de bâtiments hauts, l'avantage de l'un sur l'autre n'est pas évident.

Concernant l'impact de la largeur et de la longueur de bâtiment, nous trouvons que la meilleure distance de séparation de coin varie en fonction de la longueur des bâtiments. Généralement le modèle avec la plus courte longueur a la plus haute densité d'énergie. La meilleure largeur varie avec l'altitude : plus basse est l'altitude, plus faible doit être la largeur.

Concernant l'étude de deux bâtiments en coin symétrique avec angles variés, plusieurs angles d'ouverture et deux distances entre les bâtiments et l'intersection des axes sont étudiés. Les résultats concernant l'indicateur C_v montrent qu'en mode convergent, 75° semble être le meilleur angle d'ouverture pour avoir les vents les plus forts au-dessus du toit, alors qu'en mode divergent, le meilleur angle est plutôt de 45° ou encore plus petit. Les coins en mode convergent sont généralement plus ventés au-dessus du toit que les coins en mode divergent, et le phénomène est plus clair lorsque la longueur de « bras » est plus importante. De plus, à partir d'une altitude supérieure à 5 m, les coins en mode convergent ont toujours des effets de concentration du vent au-dessus du toit, alors qu'en mode divergent il faut une longueur de « bras » assez importante pour obtenir des effets de concentration. Ainsi, lorsque la longueur de bras devient plus importante, le meilleur angle de coin varie de 75° à 60° en mode convergent et de 45° (ou plus petit) à 75° (ou plus grand) en mode divergent.

Pour les modèles avec trois bâtiments, en raison de la complexité et du nombre des configurations possibles, on ne choisit qu'une configuration correspondant à plusieurs groupes de trois bâtiments en parallèle. Les résultats concernant l'indicateur C_v montrent que les meilleurs angles d'incidence pour ces différents modèles sont variables. Le bâtiment au milieu joue un rôle

important sur la configuration du groupe. Une meilleure position du bâtiment au milieu peut être déterminée pour un maximum de rendement d'énergie éolienne du groupe.

Ces résultats de simulations de modèles simplifiés permettent de comparer le potentiel éolien de différentes formes simples avec des conditions simplifiées. Ces résultats constituent une base de connaissances sur l'évaluation d'énergie éolienne autour des bâtiments et aussi une référence pour des études plus précises à l'échelle du quartiers.

6. Simulation de modèles morphologiques complexes

Dans ce chapitre des modèles complexes sont abordés. Tout d'abord, des indicateurs de formes urbaines ont été choisis et définis pour identifier une forme urbaine à l'échelle du quartier, dont la dimension varie entre 200 à 500 m. Ensuite, deux indicateurs spécifiques sont analysés. Les impacts de ces deux indicateurs morphologiques sur le vent et le bilan de l'énergie éolienne produite sont discutés. Ensuite, six modèles de quartiers réels choisis à l'échelle mondiale 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 des modèles de quartiers, des modèles d'unité avec des bâtiments simplifiés ou avec des modifications sont testés. Quelques prototypes d'unités urbaines sont proposés.

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

Dans la synthèse de la bibliographie ([Chapitre 2.3.2](#)), 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 caractéristiques morphologiques. Quelques indicateurs socio-économiques sont ajoutés dans la partie d'analyse locale et de l'application dans les cas réels ([Chapitre 7](#)). Nous nous concentrons sur les éléments physiques ayant une influence sur le vent à l'échelle du 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, prospect moyen.
Vitesse maximale	Forme des rues, des bâtiments et des espaces ouverts.	Taille des bâtiments les plus hauts, forme et taille des rues.
Orientation	Forme des rues et des grands espaces ouverts.	Direction des rues, sinuosité, taille des espaces ouverts principaux.
Intensité de turbulence	Forme et variété de bâtiments, rues et espaces ouverts, végétation.	Coups, 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 des unités de bâtiments), 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 le 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 du quartier.

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

Le CES est défini comme l'emprise au sol de 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 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 :

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

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 écrite comme suit :

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

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'espaces verts

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

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

Le REV est un indicateur qui peut être utilisé pour évaluer le confort aéraulique. Même si la végétation a un impact sur le ralentissement direct du vent ([Melbourne 1987](#)), un espace vert peut avoir un impact positif sur la vitesse moyenne du vent à une grande échelle ([Miao et al. 2013](#)). Pourtant, parce que 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 aéraulique dans un projet d'urbanisme, cet indicateur est intéressant.

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

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

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

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

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 hauteur de bâtiment

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

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](#))

$$\overline{V_b} = \sum_i V_{bi} / N \quad (\text{Equation 6-7})$$

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) Prospect moyen (mean aspect ratio)

Grimmond et Oke ([1998](#)) ont décrit l'effet de l'enveloppe du bâtiment en termes de prospect. 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-clés - CNRS⁵⁵](#)). Pour la ville, celui-ci est utilisé pour analyser l'effet d'obstacle par rapport à l'écoulement du vent ([Adolphe 2001, Yoshida et Omae 2005](#)) :

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

(10) Rugosité relative

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

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

où V_{bi} représente le volume du $i^{\text{ème}}$ bâtiment, $\overline{V_b}$ 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 comportant 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-clés - CNRS⁵⁶](#)). En ce qui concerne la ville, les pores sont des espaces ouverts et vides comme pour la rue, la place, la rivière, la pelouse,

⁵⁵ <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/motsclés/developp.html>

⁵⁶ <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/motsclés/developp.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 :

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

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) :

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

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

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

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

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 :

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

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 à des tissus qui ont des groupes de bâtiments connectés formant des rues se comportant comme des corridors pour le 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 :

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

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 $W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ est mis en oeuvre dans un domaine hémisphérique de rayon 400 m. Tous les autres paramètres de simulation CFD sont réglés comme dans les chapitres précédents (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 la coupe verticale et centrale du domaine qui est parallèle au vent normal, mais les distances entre les rangs de bâtiment ne sont pas identiques, ce qui peut générer des résultats variés et contrastés.

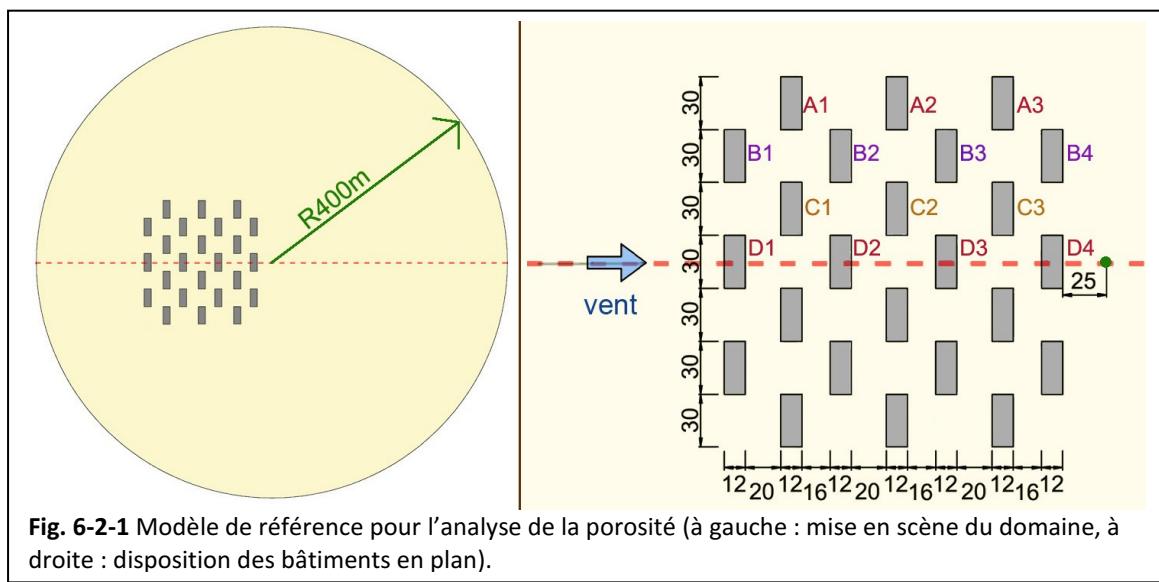


Fig. 6-2-1 Modèle de référence pour l'analyse de la porosité (à gauche : mise en scène du domaine, à droite : disposition des bâtiments en plan).

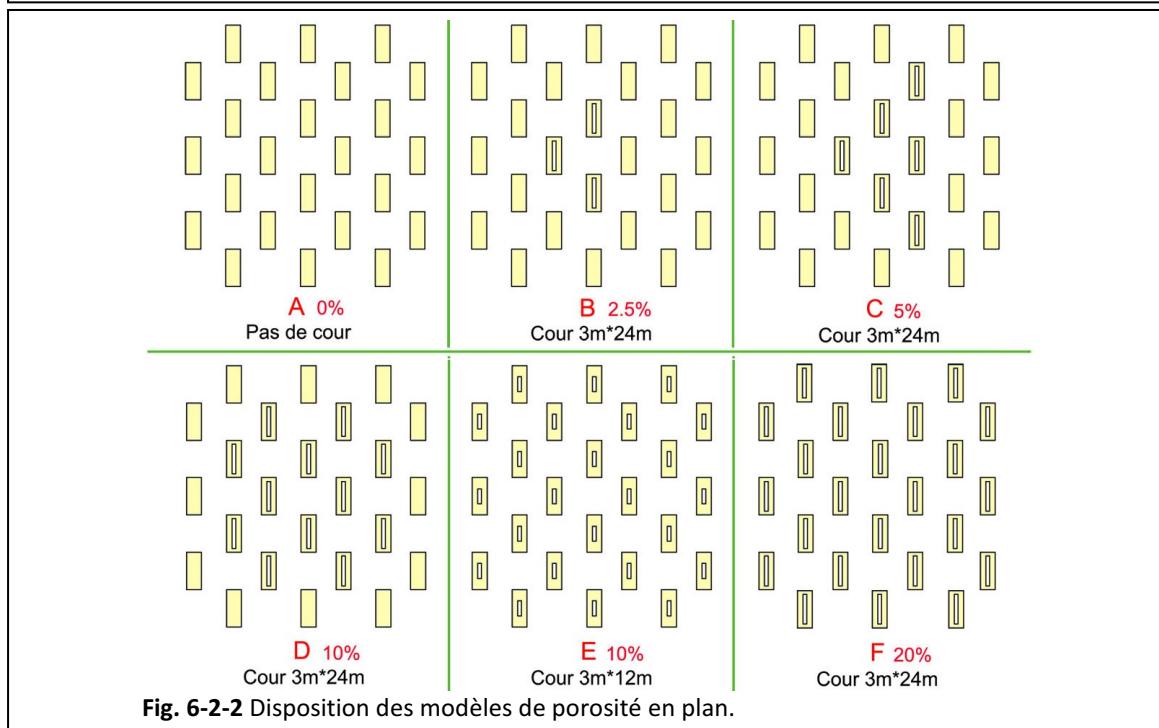


Fig. 6-2-2 Disposition des modèles de porosité en plan.

Sur la base du modèle de référence, on insère des variantes avec des cours dans les bâtiments pour simuler les différentes porosités de ce « quartier » (0 %, 2,5 %, 5 %, 10 %, 20 %) (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 placées au rez-de-chausée. Une seule direction du vent incident (normal) est considérée. Deux altitudes (Z = 5 m et 10 m) au-dessus du toit sont appliquées.

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 %), comparés 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 zero (A) à 10 % (E) et puis à 20 % (F), l'effet du vent commence par augmenter et puis diminue ensuite, c'est-à-dire qu'il 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 de cours aux bâtiments autour des 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 cours (lorsque les bâtiments au milieu ont déjà des cours) peut accélérer les vents globaux 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.

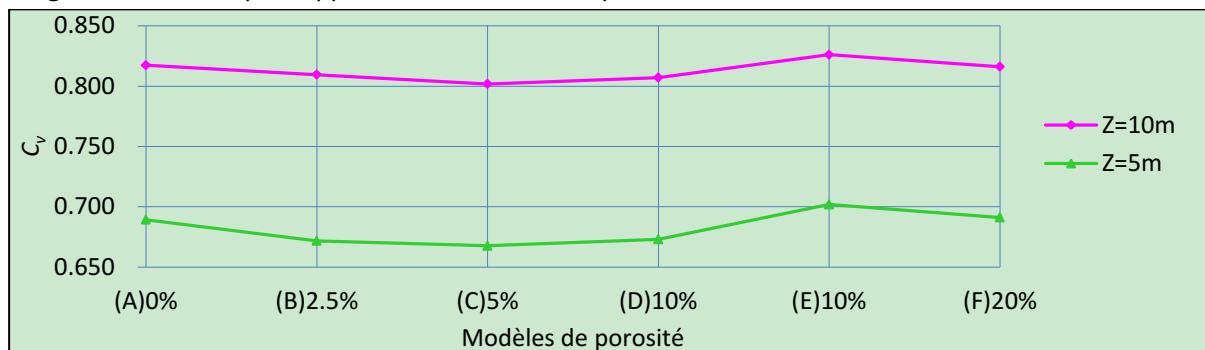


Fig. 6-2-3 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de porosité.

Lorsqu'on voit l'influence importante de la disposition des cours sur le bilan aéraulique, 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 sont comparés dans les Fig. 6-2-4a et b, à deux altitudes. La moitié des bâtiments 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 sont présentés 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 de cours ; à l'inverse, 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 addition de cours autour des 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).

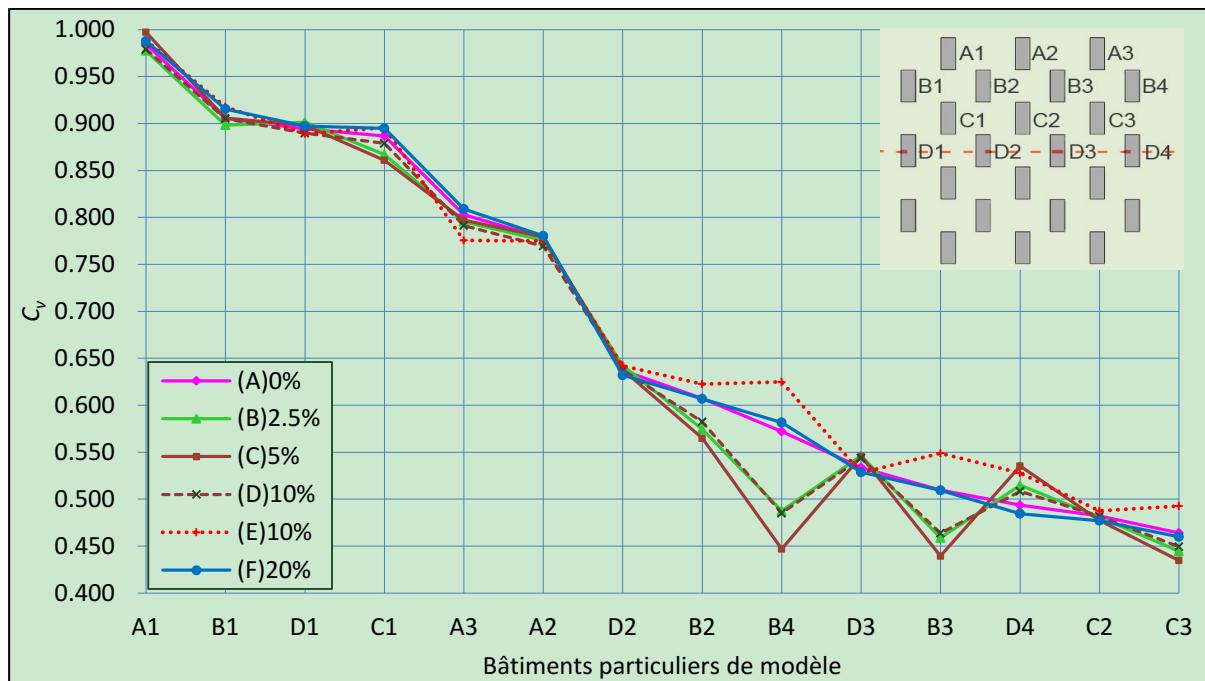


Fig. 6-2-4a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de porosité ($Z = 5 \text{ m}$).

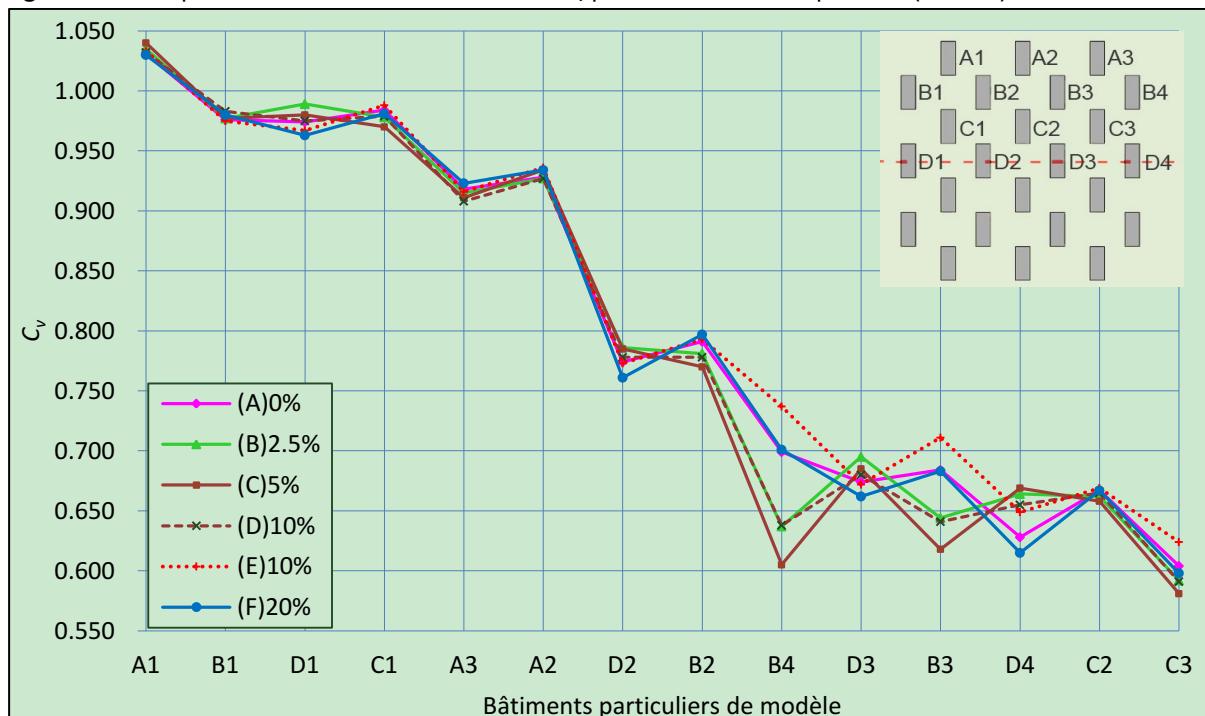


Fig. 6-2-4b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de porosité ($Z = 10 \text{ m}$).

6.2.2 Impact de la densité sur le vent

Sur la base du groupe de 24 bâtiments identiques de $W \times L \times H = 12 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, comme dans le cas précédent, plusieurs autres groupes de bâtiments avec différences formes en plan ($W \times L = 12 \text{ m} \times 45 \text{ m}$, $12 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, $18 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, $8 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, $12 \text{ m} \times 10 \text{ m}$) ont été choisis pour analyser l'impact de la densité à l'échelle du 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 avec la même emprise au sol et sont placés de manière uniforme.

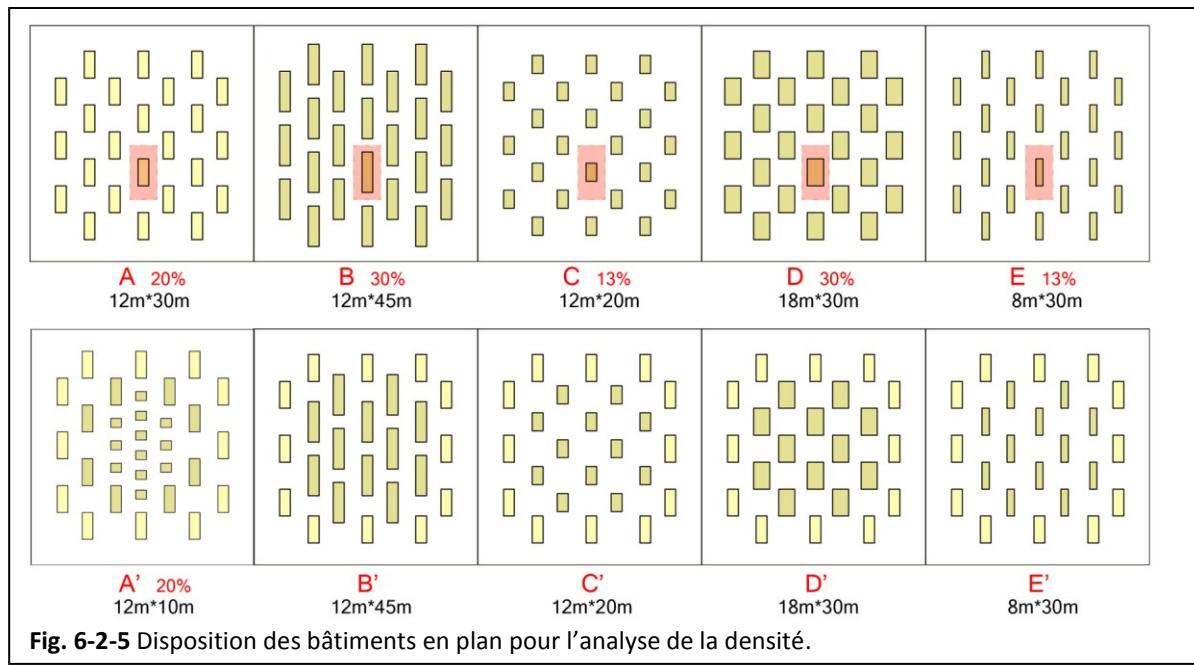


Fig. 6-2-5 Disposition des bâtiments en plan pour l'analyse de la densité.

Concernant les valeurs du coefficient C_v du vent au-dessus du toit en deux niveaux ($Z = 5 \text{ m}$ et 10 m), 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 la 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', la somme de potentiel éolien 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 faibles (modèles C et C') sont plus ventés au-dessus du toit que les autres. D'ailleurs, le rendement énergétique au-dessus des toits dans la zone centrale semble être fortement influencé par la périphérie des 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 la largeur des bâtiments (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 de 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.

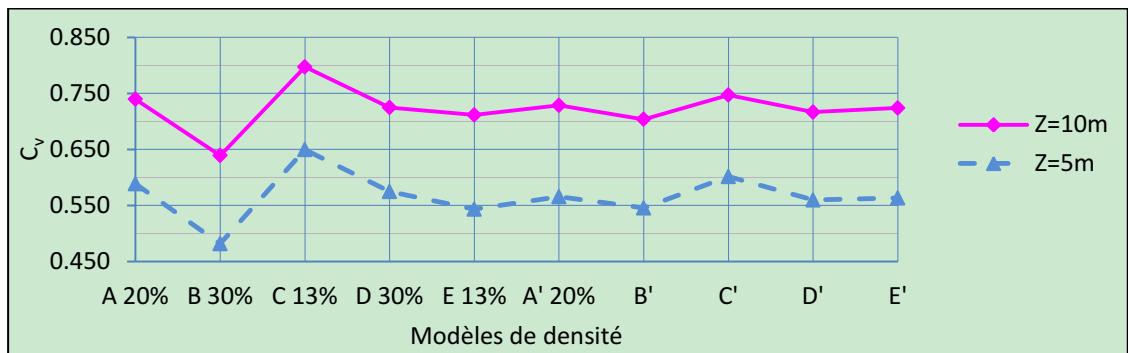


Fig. 6-2-6 Comparaison des valeurs du coefficient moyen C_v pour les modèles de densité.

Pour évaluer l'impact de la densité sur 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 sur le modèle A. Les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Généralement, les bâtiments les plus en amont du vent (p. ex. 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 de 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.

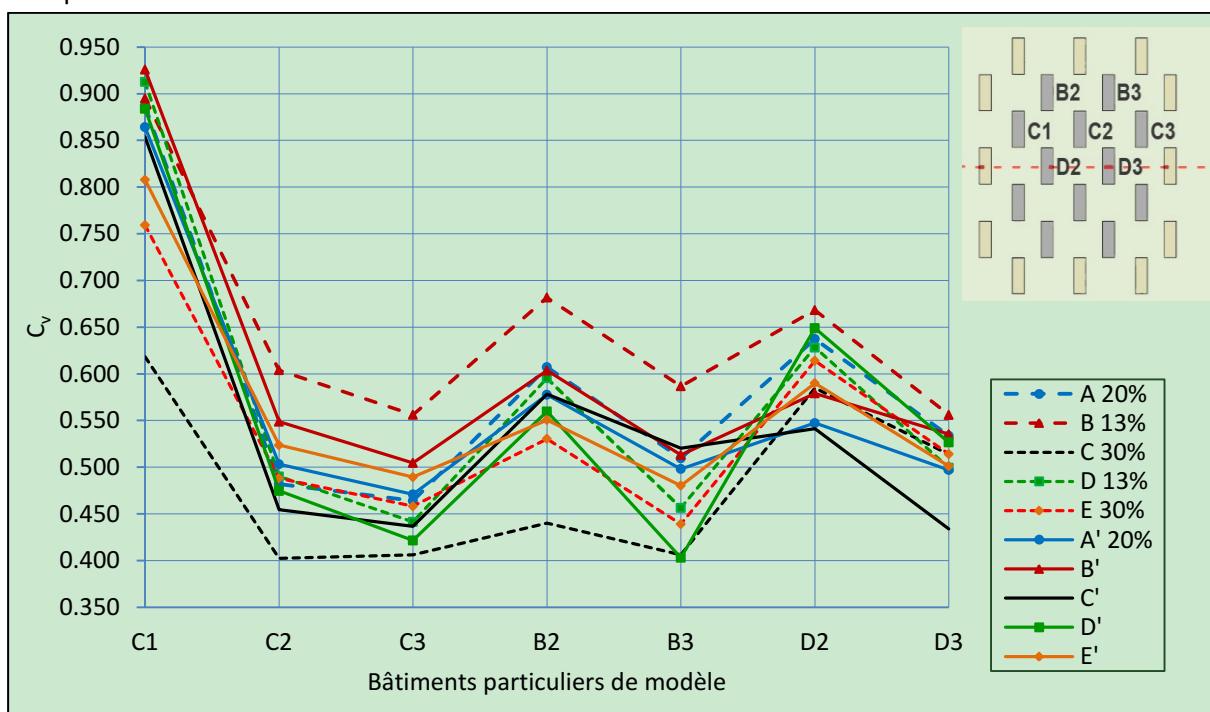


Fig. 6-2-7a Comparaison des valeurs du coefficient C_v des barres situées au centre du quartier ($Z = 5$ m).

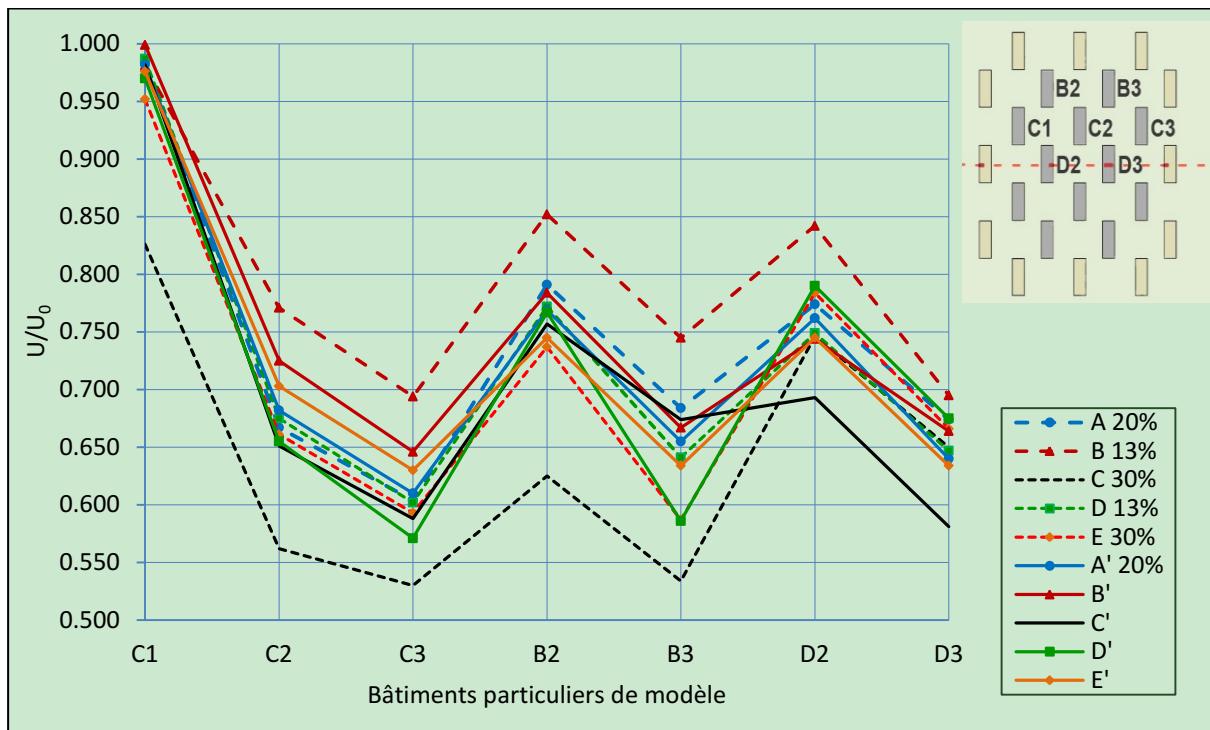


Fig. 6-2-7b Comparaison des valeurs du coefficient C_v des barres situées au centre du quartier ($Z = 10$ m).

6.3 Simulation préliminaire de six formes urbaines à l'échelle du 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 valeurs des paramètres du modèle CFD ont été choisies comme suit.

1) Sur le domaine et sur la géométrie

La surface du domaine d'étude est à l'échelle du quartier : $450m * 450m = 202500 m^2$ 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 des quartiers, afin de se conformer aux lignes directrices : pour les modèles de quartiers à Paris, à Toulouse, à Bombay et à Barcelone où la hauteur maximum de bâtiment $H_{max} < 35 m$ nous appliquons un domaine (hémisphérique) de rayon de 750 m ; pour le modèle de quartier à New York où $H_{max} < 250 m$, nous appliquons un rayon de 1100 m ; pour le modèle de quartier de ville Pékin où $H_{max} < 100 m$, 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). Les 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 des bâtiments. Nous 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 : $N = 8$, $T_g = 0,3 m$, $r_g = 1,3$, $T_b = 0,1 m$ 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 un 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 (c.-à-d. équilatéral) d'une surface ou d'une cellule. Les valeurs de référence de l'asymétrie de maille sont données par : bonne qualité si $0,25 < Q_{asy} < 0,5$, et excellente qualité si $Q_{asy} < 0,25$ ([ANSYS 2013](#)).

Tableau 6-2

Nombres de mailles et qualité du maillage des modèles de 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, $K_s = 1 \text{ m}$, $C_s = 0,99$ pour le sol, schème Simple pour la solution, 2^{ème} ordre pour la discrétisation. Le profil d'incidence du vent sur la ville peut être approché par la relation : $U = 3 \times \left(\frac{Z}{10}\right)^{0,25} \text{ (m/s)}$. Le nombre d'itérations de calcul est normalement supérieur à 3000 (jusqu'à 6000), selon la situation de convergence. Le résidu de continuité est gardé inférieur à 2×10^{-5} , alors que les niveaux de résidu de vitesses en trois dimensions sont tous gardés inférieurs à 10^{-5} .

6.3.2 Description des indicateurs morphologiques de 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 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 prospect moyen, 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 quartiers

Indicateur morphologique \ Site de quartier	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 sol (COS)	2,98	1,18	1,08	2,94	12,08	3,57
Hauteur moyenne de bâtiment (\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 hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})	10 %	85 %	39 %	32 %	71 %	67 %
Hauteur max. des bâtiments (H_{max})	24 m	50 m	35 m	32 m	230 m	93 m
Volume moyen de bâtiment (\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
Prospect moyen (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 %

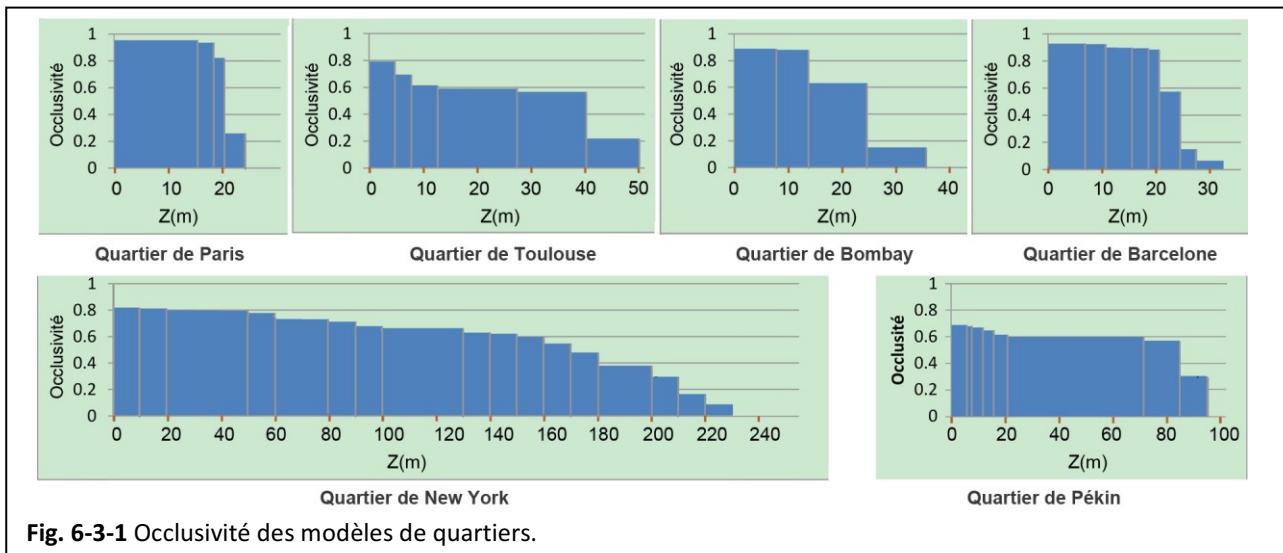


Fig. 6-3-1 Occlusivité des modèles de quartiers.

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.

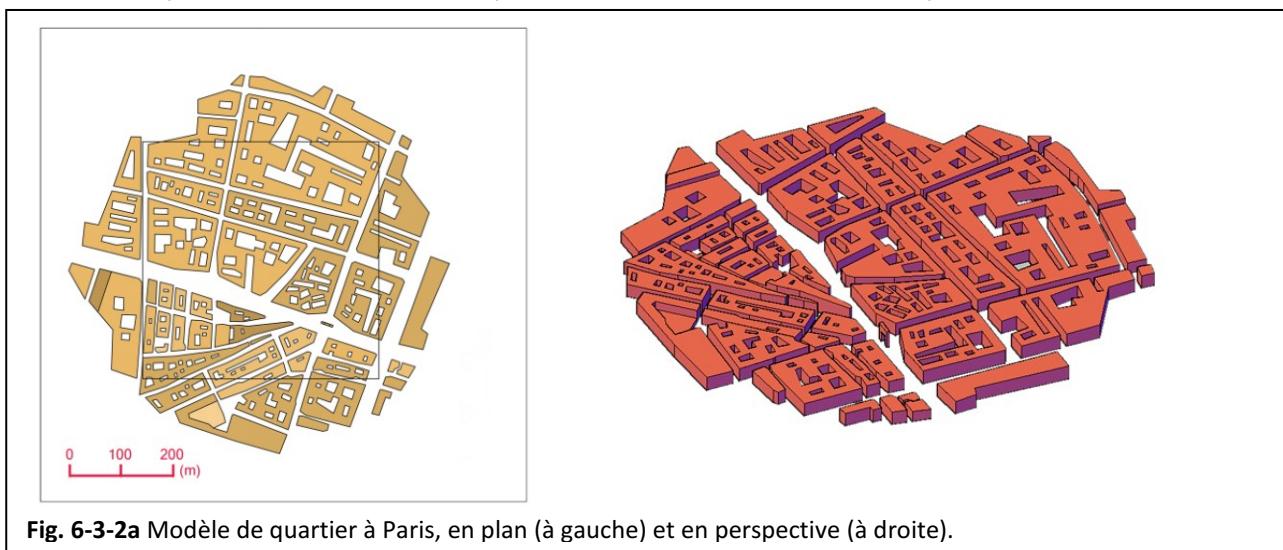


Fig. 6-3-2a Modèle de quartier à Paris, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

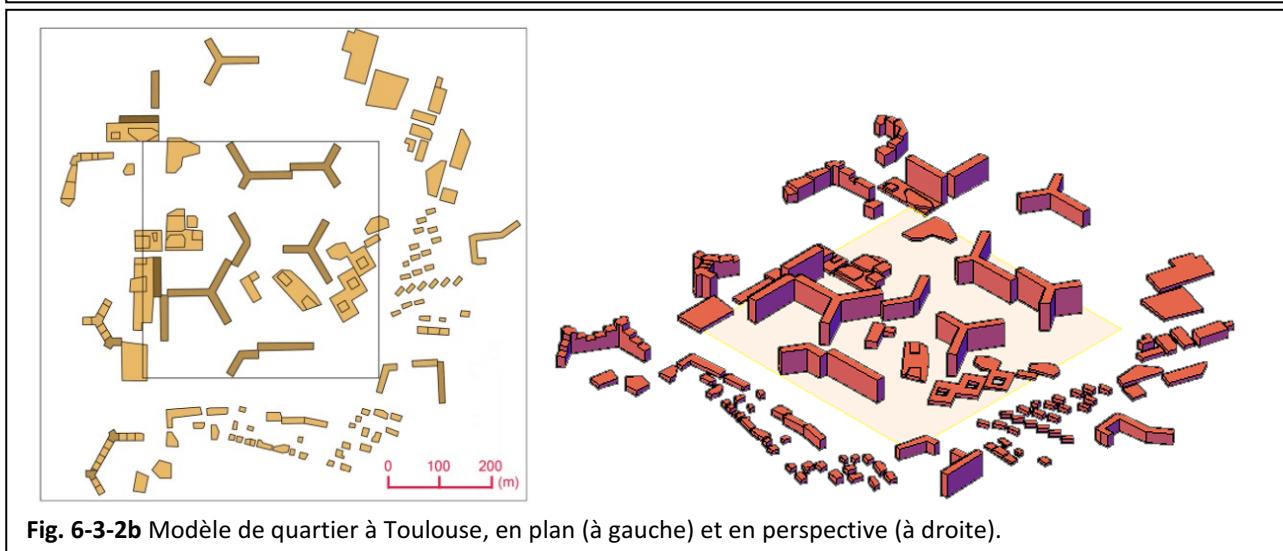


Fig. 6-3-2b Modèle de quartier à Toulouse, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

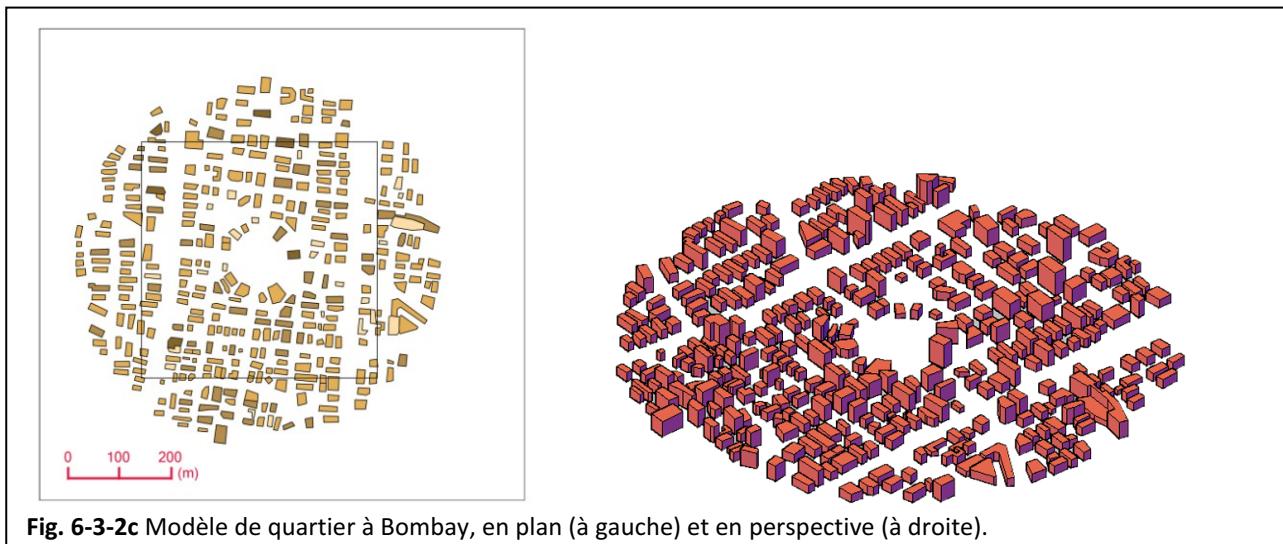


Fig. 6-3-2c Modèle de quartier à Bombay, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

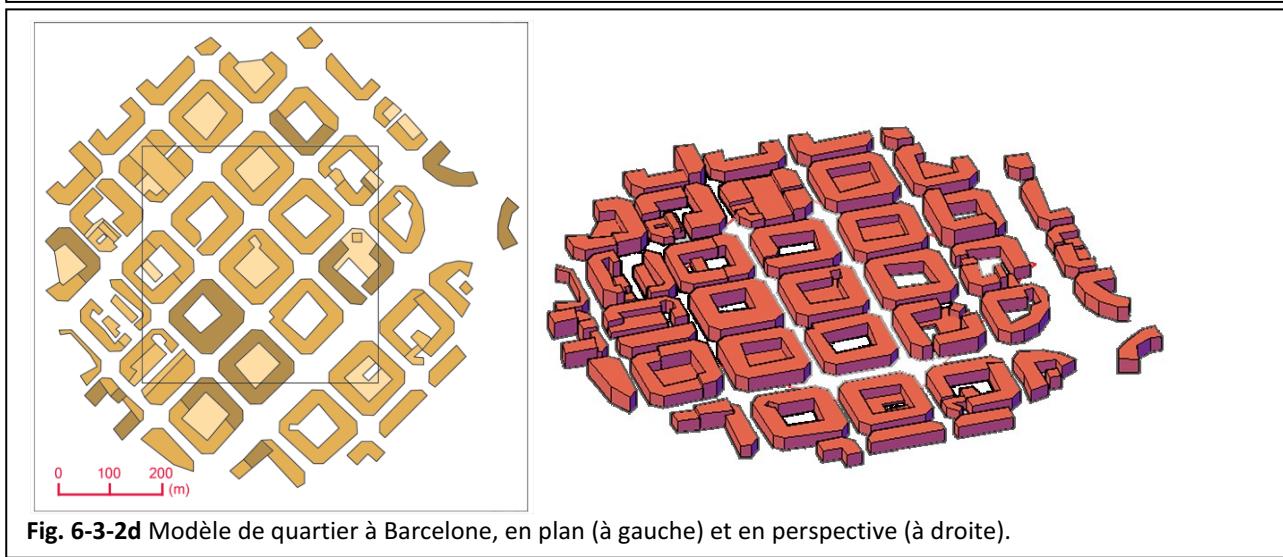


Fig. 6-3-2d Modèle de quartier à Barcelone, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

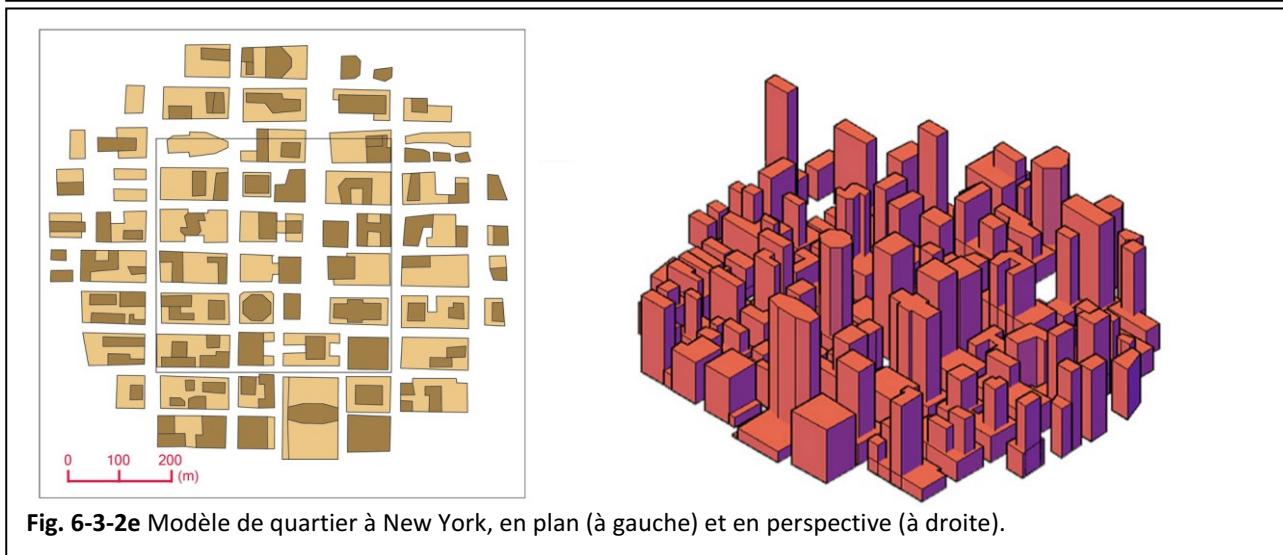


Fig. 6-3-2e Modèle de quartier à New York, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

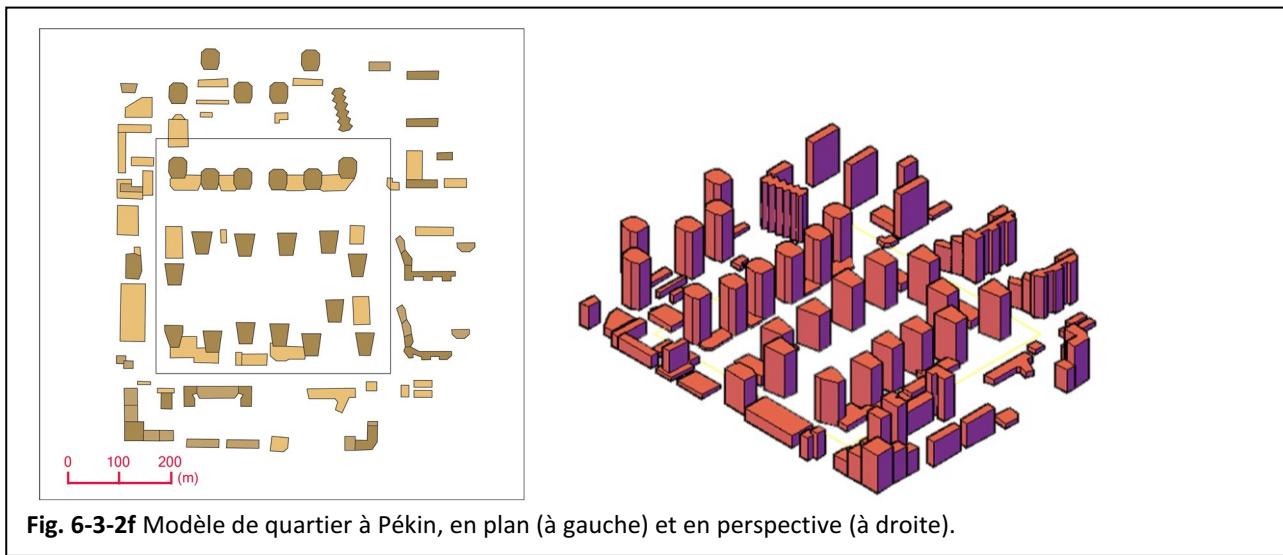


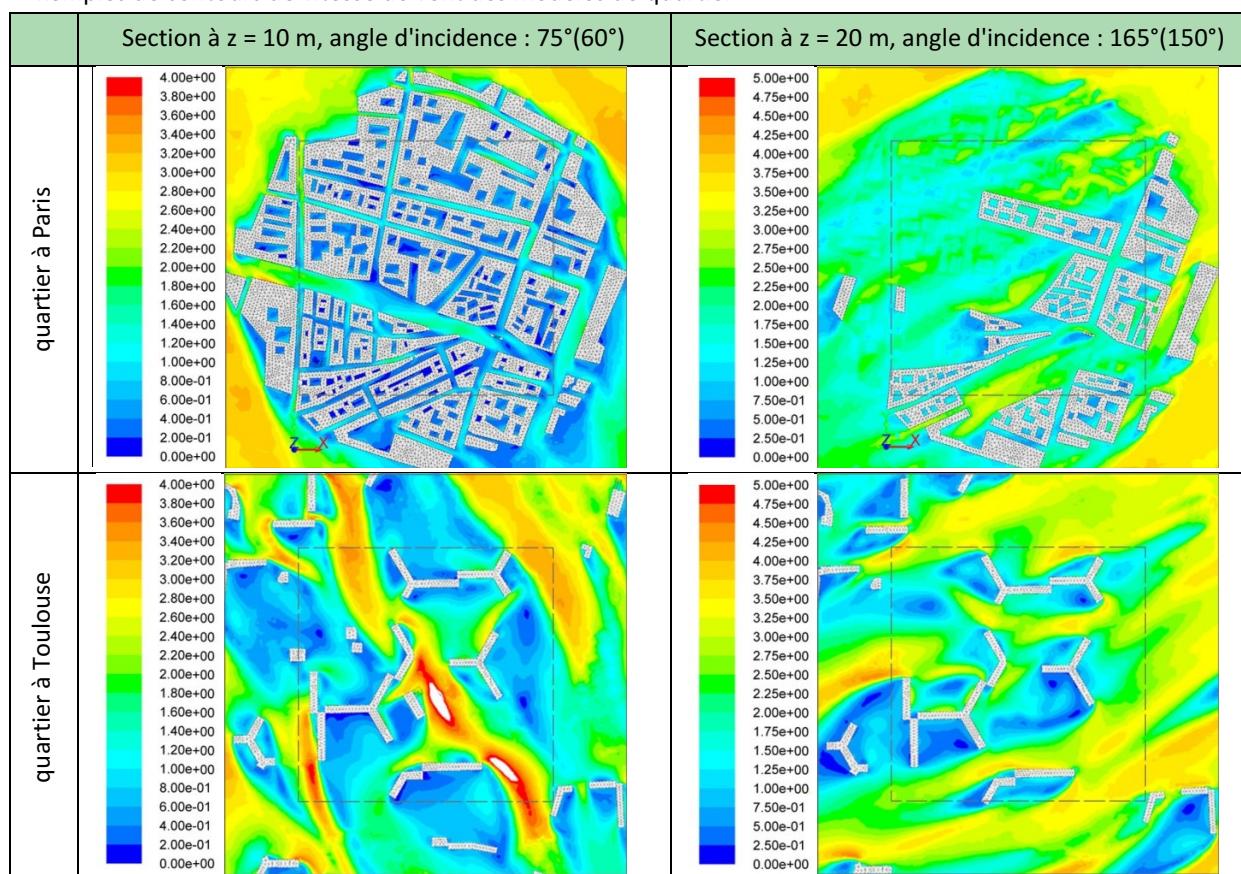
Fig. 6-3-2f Modèle de quartier à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

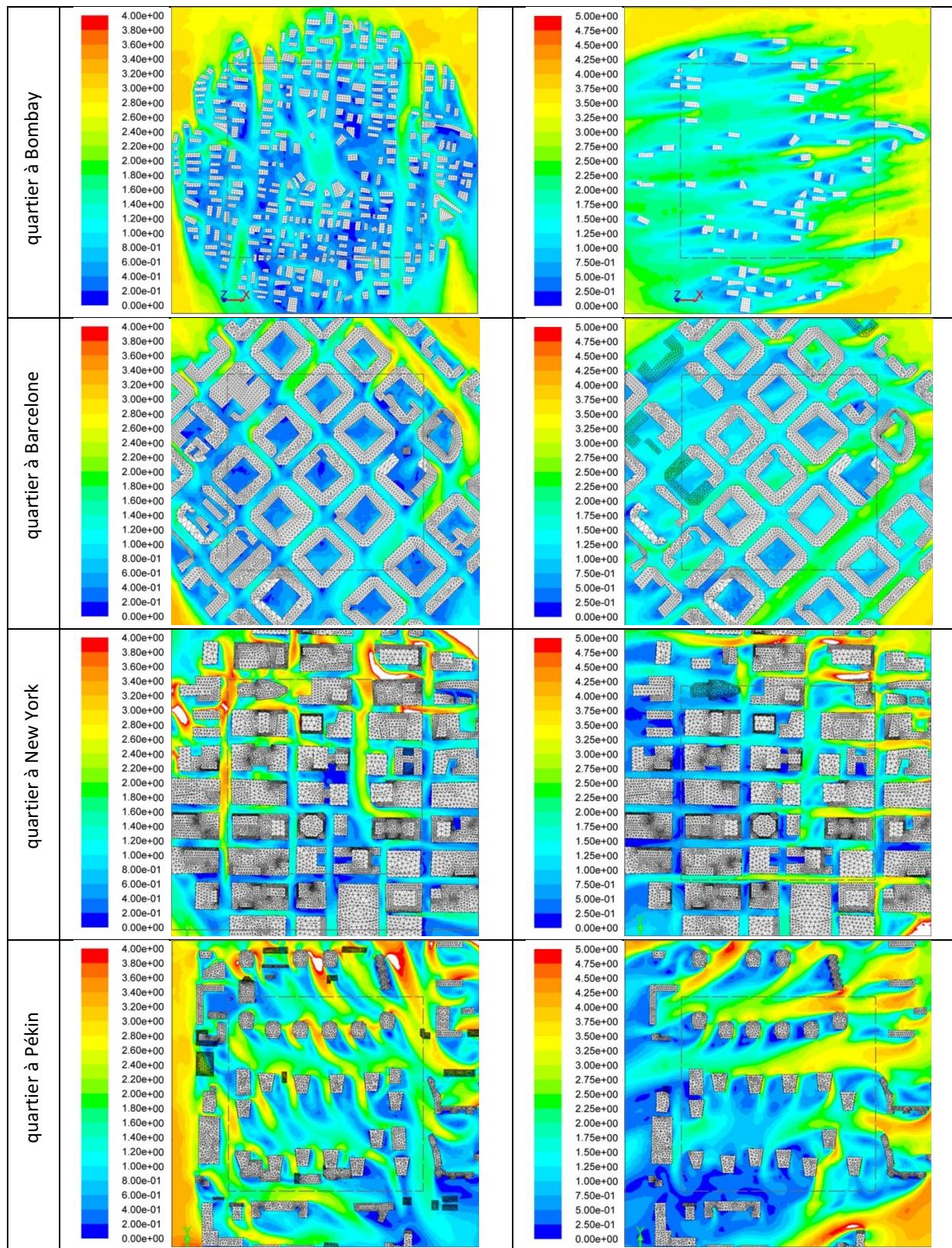
6.3.3 Résultats sur le rendement énergétique éolien des quartiers réels

Les conditions locales du climat n'étant pas prises en compte (p. ex. 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 du 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 ($z = 10$ 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 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 du modèle ($H > \bar{H}$, qui sont les plus ventés et les plus prometteurs pour exploiter l'énergie éolienne). En raison de la grande variation des hauteurs parmi les plus grandes tours dans certains modèles (p. ex. quartier à New York), nous ne choisissons que des bâtiments avec des emprises importantes. Le coefficient C_v des bâtiments d'une

certaine hauteur et l'indicateur M' sont analysés pour chaque modèle. Pour favoriser la comparaison entre les modèles, les valeurs minimales et maximales du coefficient C_v , la variation des moyennes de C_v entre $Z = 5$ m et $Z = 15$ m des groupes de bâtiments les plus hauts (classer selon leurs hauteurs), l'intervalle de variation totale des moyennes 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 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 moyenne totale 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
Variation des moyennes des groupes de bâtiments les plus hauts	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	
Variation totale des moyennes		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

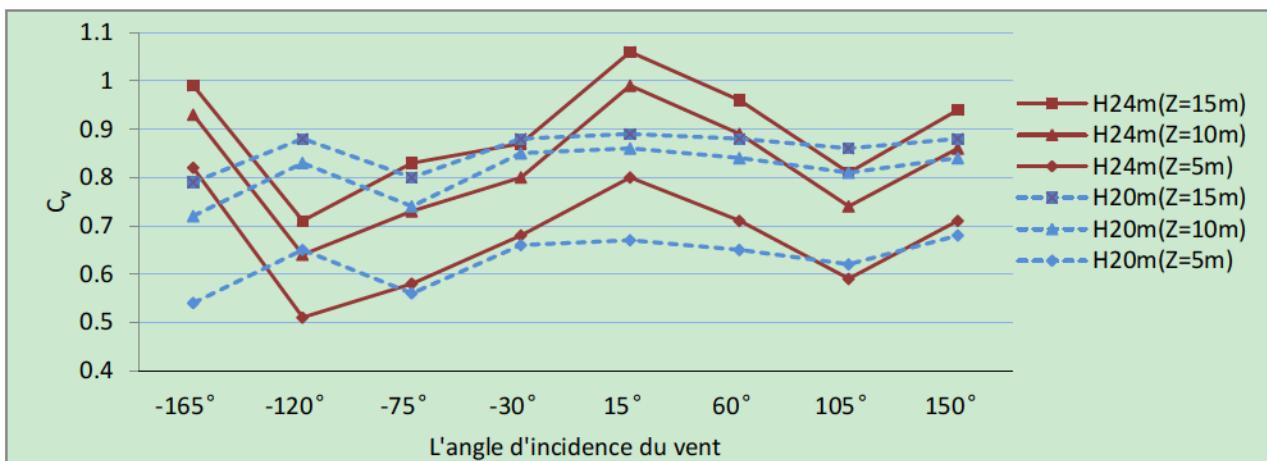


Fig. 6-3-3a Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Paris).

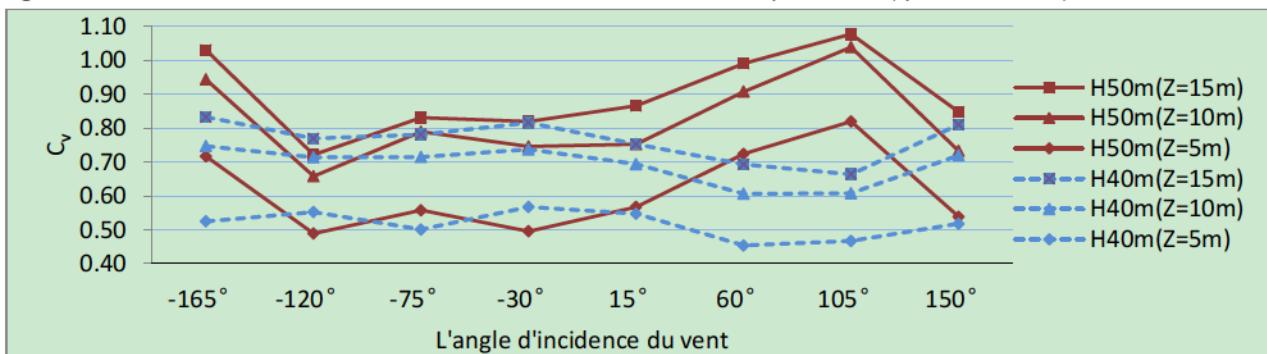


Fig. 6-3-3b Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Toulouse).

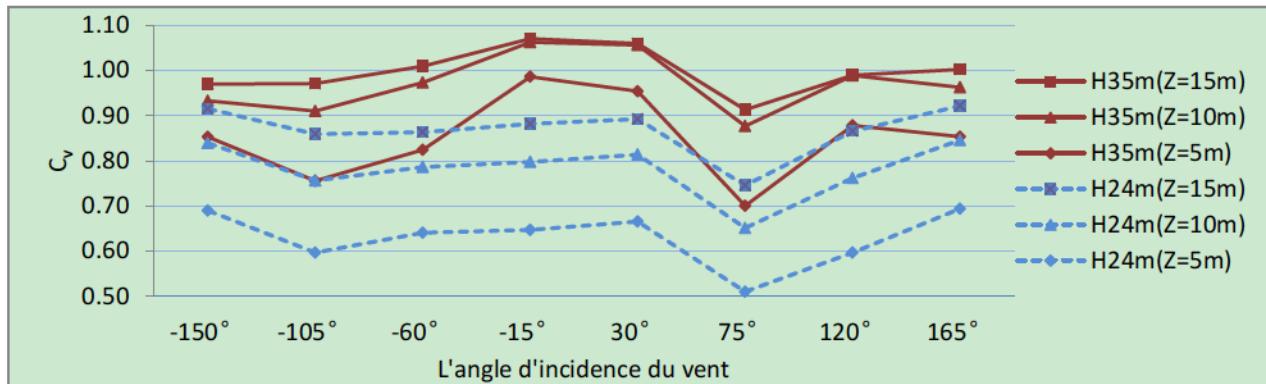


Fig. 6-3-3c Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Bombay).

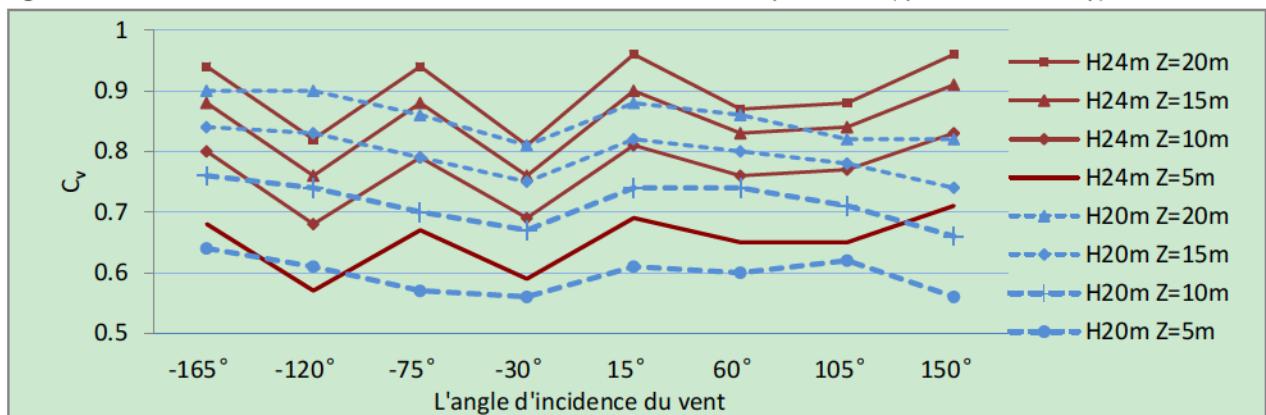


Fig. 6-3-3d Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Barcelone).

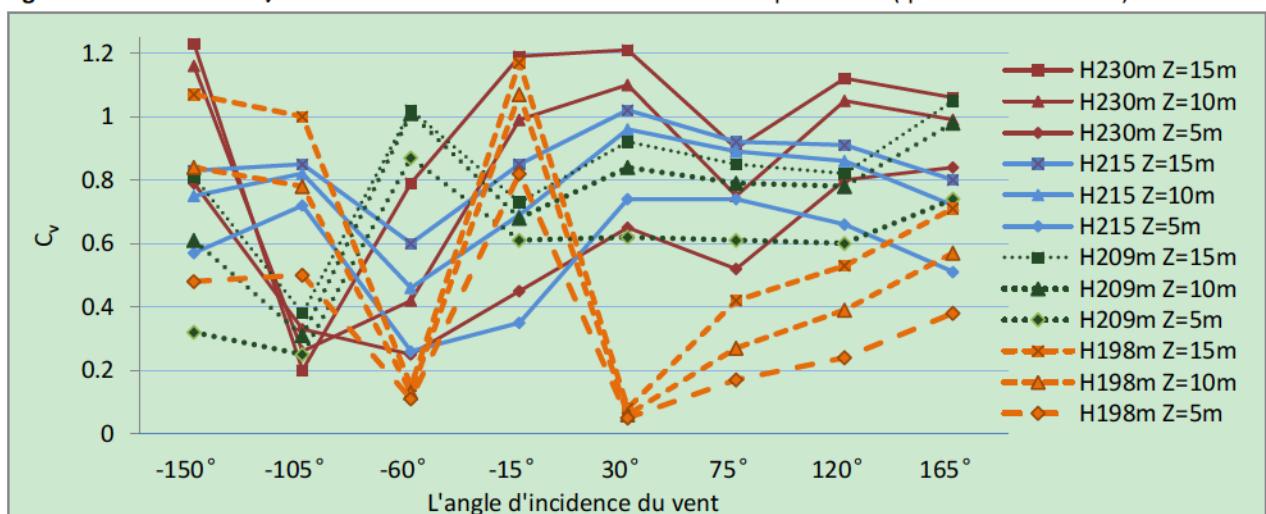


Fig. 6-3-3e Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à New York).

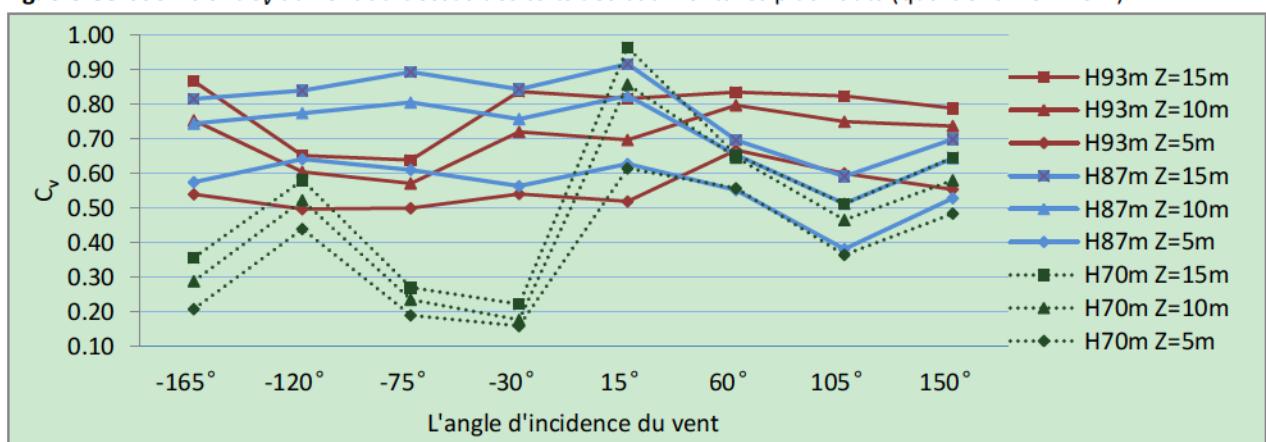


Fig. 6-3-3f Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Pékin).

Concernant les résultats du coefficient d'augmentation de 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 quartiers à Paris, à Barcelone et à 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 bâtiments les plus hauts avec certains angles d'incidence du vent. Le cas du quartier à New York est un peu plus favorable, mais l'effet d'augmentation 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 de 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 minimales et maximales 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). Autrement dit, 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 (p. ex., dans le quartier à 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 minimales, moyennes et maximales moyennes 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, est 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, les coefficients de variation de la hauteur des bâtiments sont les deux plus grands parmi les six modèles (voir Tableau 6-3).

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.

Tableau 6-6

Valeurs moyennes de l'indicateur M' à trois altitudes au-dessus du toit, amplitude moyenne des valeurs de M' , hauteurs des bâtiments les plus hauts dans le modèle et surface totale de toiture des modèles de quartiers (unités de valeur du M' : $10^6 \text{ m}^5 \cdot \text{s}^{-3}$)

		Paris	Toulouse	Bombay	Barcelone	New York	Pékin
Moyenne de M' à $Z=15 \text{ m}$		1,74	1,46	0,79	3,50	3,82	2,03
Moyenne de M' à $Z=10 \text{ m}$		1,17	1,14	0,59	2,32	2,77	1,54
Moyenne de M' à $Z=5 \text{ m}$		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 toiture (m^2)	37 588	16 724	13 223	85 260	42 482	24 220

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 de potentiel éolien au-dessus des toits que les autres quartiers. En fait, les deux quartiers ont de grandes surfaces de toiture des bâtiments les plus hauts qui peuvent être utilisées 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 variation de majorité des indicateurs morphologiques (COS , CES , \bar{H} , λ_c , R_a , P_o) y est faible, 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 de 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 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 quartier à Paris, le quartier à Pékin a un potentiel plus élevé.

En outre, en considérant la vitesse minimale 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 ayant potentiellement une vitesse de 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 de toiture des bâtiments avec des vents exploitables ($U > U_d$) sont données (**Tableau 6-7**).

Tableau 6-7

Valeurs moyennes de l'indicateur M' à $Z = 10 \text{ m}$ au-dessus des toits où les vents ont une vitesse plus élevée que la vitesse minimale exploitable du vent pour une éolienne (2 / 3 m/s), liste des hauteurs des bâtiments avec des vents exploitables et la surface totale de toiture des modèles de quartiers (unité de valeur du M' : $10^6 \text{ m}^5 \cdot \text{s}^{-3}$)

		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 de toiture (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 quartier à Paris est devenu beaucoup plus avantageux, grâce à une grande surface de toiture exploitable pour l'énergie éolienne. En fait, les hauteurs de ces bâtiments sont juste un peu inférieures à la hauteur moyenne et elles ne sont pas comptées dans le **Tableau 6-6**. Alors que les autres modèles n'ont pas ou peu de surfaces de bâtiments exploitables, l'avantage du quartier à Paris apparaît ici. On peut voir que sa surface totale de toiture est la plus grande parmi tous les modèles.

2) Le quartier à 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 quartier à Paris et celui à Barcelone ont une valeur de M' assez importante grâce à leurs grandes surfaces de toiture avec des vents exploitables pour les VAWTs.

3) Les autres modèles que les modèles à Paris et à Barcelone ont une variation faible des valeurs de M' , entre deux conditions de seuils de vitesse. Pour ceux-ci, une éolienne avec une petite vitesse de démarrage n'apporte pas un grand avantage, lorsque les surfaces de toiture exploitables sont limitées et donc l'énergie éolienne utilisable pour des vents d'une vitesse de 2 à 3 m/s n'est pas importante.

6.3.4 Cohérence entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques

Pour analyser les impacts de la morphologie urbaine sur le vent, la cohérence des indicateurs de forme urbaine avec les indicateurs de performance du vent est considérée. Nous allons comparer les ordres des valeurs des indicateurs énergétiques éoliens et les ordres des valeurs des indicateurs morphologiques, sur les six modèles de quartier étudiés. La méthode, basée sur le comptage du nombre de changements d'ordre entre séquences, est appliquée :

$$N_p = \sum_i N_{pi}$$

où $i = 1, 2, \dots, 6$ représente une séquence d'éléments (modèles de quartier), N_{pi} représente le nombre de changements d'ordre des éléments entre les deux groupes d'indicateurs. L'ordre des éléments évalué par un indicateur énergétique éolien est utilisé comme l'ordre de référence. Quatre indicateurs énergétiques éoliens 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 choisis varient entre la valeur de l'indicateur la plus élevée (classée en 1) et la valeur la plus petite (classée en 6). Un exemple de calcul du nombre de changements d'ordres dans la séquence est donné (Fig. 6-3-4). Avec les références des ordres des indicateurs énergétiques éoliens, les nombres totaux de changements d'ordre de séquence pour chaque indicateur morphologique est calculé (Tableau 6-8). Un nombre négatif signifie que le sens de la déviation est inverse à l'ordre de référence. Plus le nombre de changements d'ordre est petit, plus la cohérence entre l'indicateur morphologique et l'indicateur énergétique éolien est grande.

Indicateur énergétique	NY	Paris	Barcelone	Pékin	Toulouse	Bombay
C	1	2	3	4	5	6
Indicateur morphologique	COS	1	3	4	2	5
$N_p = 0 + 1 + 1 + 2 + 0 + 0 = 4$						

Fig. 6-3-4 Exemple de calcul du nombre de changements d'ordre.

Tableau 6-8

Nombre de changements d'ordres entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs de performance du vent pour les modèles de quartiers

		Ordre de valeur de l'indicateur la plus grande (marqué en 1) à la plus petite (marqué en 6)						Nombre de changements d'ordre N_p			
		New York	Paris	Barcelone	Pékin	Toulouse	Bombay				
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 sol (COS)		1	3	4	2	5	6	-6	10	4	6
Hauteur moyenne de bâtiment (\bar{H})		1	4	5	2	3	6	-6	8	8	10
Ecart type de hauteur de bâtiment (σ_h)		1	6	5	2	3	4	-6	8	12	12
Coefficient de variation de hauteur de bâtiment (σ_h/\bar{H})		2	6	5	3	1	4	-8	8	-10	-8
Hauteur maximale de bâtiment (H_{max})		1	6	5	2	3	4	-6	8	12	14
Volume moyen de bâtiment (\bar{V}_b)		1	3	2	4	5	6	-10	10	2	4
Prospect moyen (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

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 d'indicateurs de forme urbaine ont une cohérence moyenne ($4 < |N_p| \leq 8$) et aucun indicateur morphologique présent n'a de grande cohérence ($|N_p| \leq 4$).
- 2) Avec la moyenne de M' exploitable à $Z=10$ m pour un seuil de $U > 3$ m/s (réf. **C**), l'indicateur rugosité relative (R_r) a une cohérence « parfaite » ($N_p = 0$) et les indicateurs \cos , \bar{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 pour un seuil de $U > 2$ m/s (réf. **D**), les indicateurs comme \bar{V}_b , R_r , λ_c , R_a , P_o et O_c ont une cohérence assez grande ($|N_p| \leq 4$).

En résumé, la majorité des modèles n'ont pas un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit, comparés aux vents libres de mêmes hauteurs. En général, les bâtiments les plus hauts 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 de bâtiment est un élément décisif pour l'effet d'augmentation du vent. Les modèles des grandes tours avec des hauteurs variées ont une plus grande amplitude de variation de l'effet. Vis à vis du potentiel éolien sur le toit, la surface totale exploitable des toits pour installer des éoliennes et la hauteur moyenne des bâtiments les plus hauts du modèle sont des éléments ayant un impact le plus important. De plus, une grande variation des hauteurs de bâtiment pourrait augmenter le potentiel éolien sur les toits. Pour l'adaptation des éoliennes, les VAWTs avec une vitesse de démarrage basse ne produisent pas beaucoup plus d'énergie que les HAWTs. La connaissance de l'intensité de turbulence et de l'efficacité de production d'éolienne sont nécessaires

pour faire un bon choix. Comme la somme de l'énergie éolienne sur toute la surface au dessus un toit, le coefficient M' n'est pas valable seul pour l'exploitation de l'énergie éolienne en pratique. En fait, les distributions des éoliennes et les tailles d'éoliennes doivent être précisées pour arriver un bilan exact de l'énergie éolienne au-dessus du toit. Un exemple sera donné dans le Chapitre 7.

Du côté des indicateurs de forme urbaine, lorsqu'on dépose plus de l'importance sur l'indicateur C représentant la moyenne de M' exploitable à $Z = 10$ m ($U > 3$ m/s), que les autre 3 indicateurs énergétique éoliens, nous pouvons remarquer que deux indicateurs sont très cohérents avec le potentiel éolien au-dessus des toits : le volume moyen de bâtiment \bar{V}_b et la rugosité relative R_r . Une grande valeur de ces indicateurs permet d'envisager un potentiel éolien important au-dessus des toits. Les indicateurs comme \cos , λ_c , R_a , P_o et O_c ont une cohérence générale assez grande, les indicateurs CES , \bar{H} et H_{max} offrent des informations nécessaires pour définir un tissu en urbanisme et les autres ne font pas apparaître de 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 urbains simplifiés de 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 oeuvre de manière symétrique. Sur la base du modèle de l'unité 04, le modèle de l'unité 04b correspond au modèle 04 sans les trois bâtiments de coin et il est proposé 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 « faisables » dans les conditions réelles. Nous représentons les unités de quartier en conditions réelles (la forme, la position) dès que possible pour respecter les contraintes architecturales (p. ex., la mise en scène du plan d'une grande tour de logement) et les contraintes d'urbanisme (p. ex., l'exigence d'accès de soleil entre les bâtiments). Chaque modèle représente 9 unités identiques, et l'unité au centre est utilisée comme 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 urbaine

Sur les formes, on voit que l'unité 01 et l'unité 03 sont des groupes de tours de logements en forme de plots, 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 plots reliés. La majorité des indicateurs de la morphologie urbaine sont les mêmes que ceux du modèle de quartier réel présenté. Les valeurs des indicateurs des six modèles d'unité sont présentées dans le [Tableau 6-9](#) et sur la [Fig. 6-3-1](#). On voit que les densités de bâtiment des quatre modèles d'unité à Pékin sont similaires.

Tableau 6-9

Description des indicateurs morphologiques des modèles d'unité urbaine

Indicateur morphologique \ Site de quartier	Jinsong, Pékin unité 01	Jinsong, Pékin unité 01b	Jinsong, Pékin unité 02	Jinsong, Pékin unité 03	Humg hom, Hong Kong unité 04	Humg 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 de bâtiment (\bar{H})	59,53 m	55,50 m	70,01 m	57,53 m	50 m	50 m
Hauteur max. de bâtiment (H_{max})	87 m	87m	87m	93 m	50 m	50 m
Coefficient de variation de hauteur de bâtiment (σ_h/\bar{H})	59,6 %	65,1 %	44,4 %	72,1 %	0 %	0 %
Volume moyen de bâtiment (\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
Prospect moyen (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 %

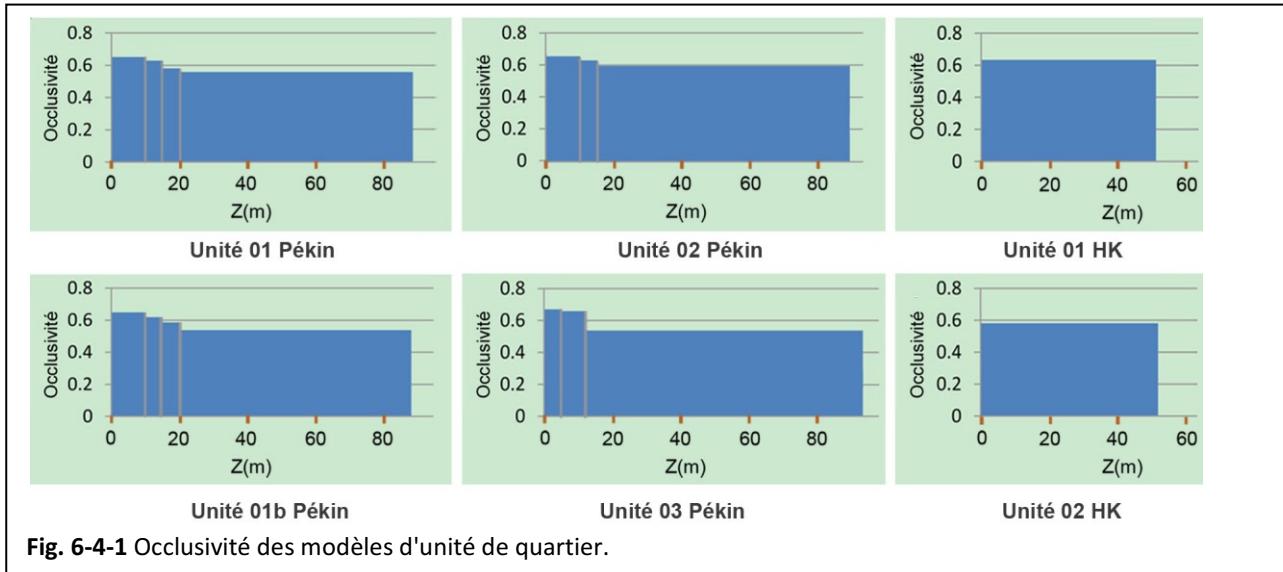


Fig. 6-4-1 Occlusivité des modèles d'unité de quartier.

Les Fig. 6-4-2 (a à f) présentent les plans et les perspectives des six modèles d'unités urbaines. La limite du domaine d'étude au milieu du plan, appelée unité, est indiquée en couleur. L'intensité de la couleur est relative à la hauteur du bâtiment : plus la couleur est intense, plus la hauteur du bâtiment est importante.

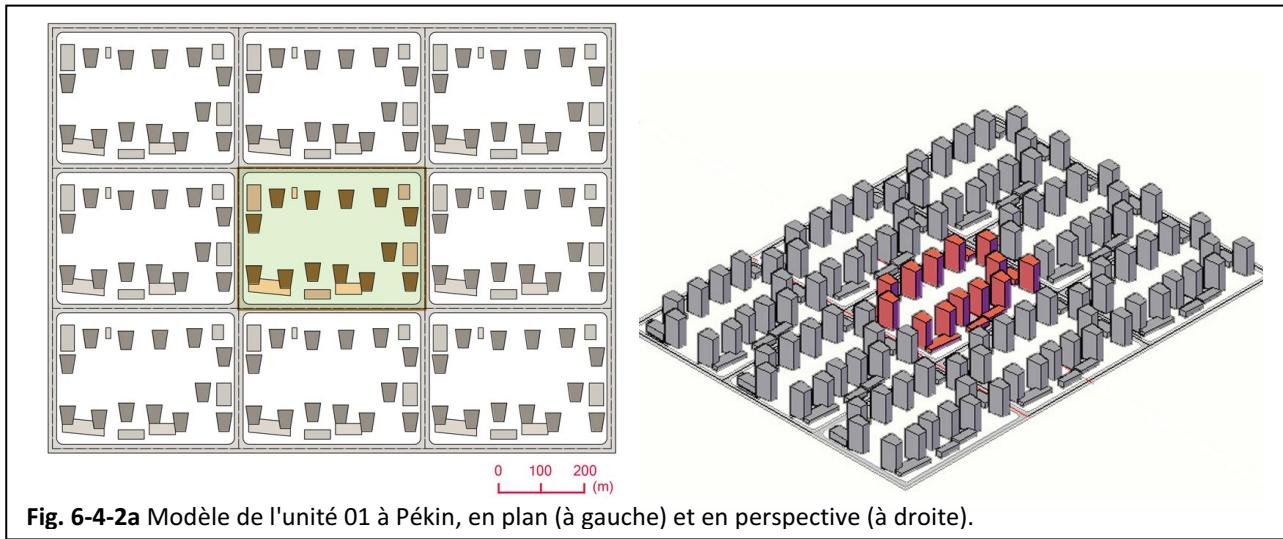


Fig. 6-4-2a Modèle de l'unité 01 à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

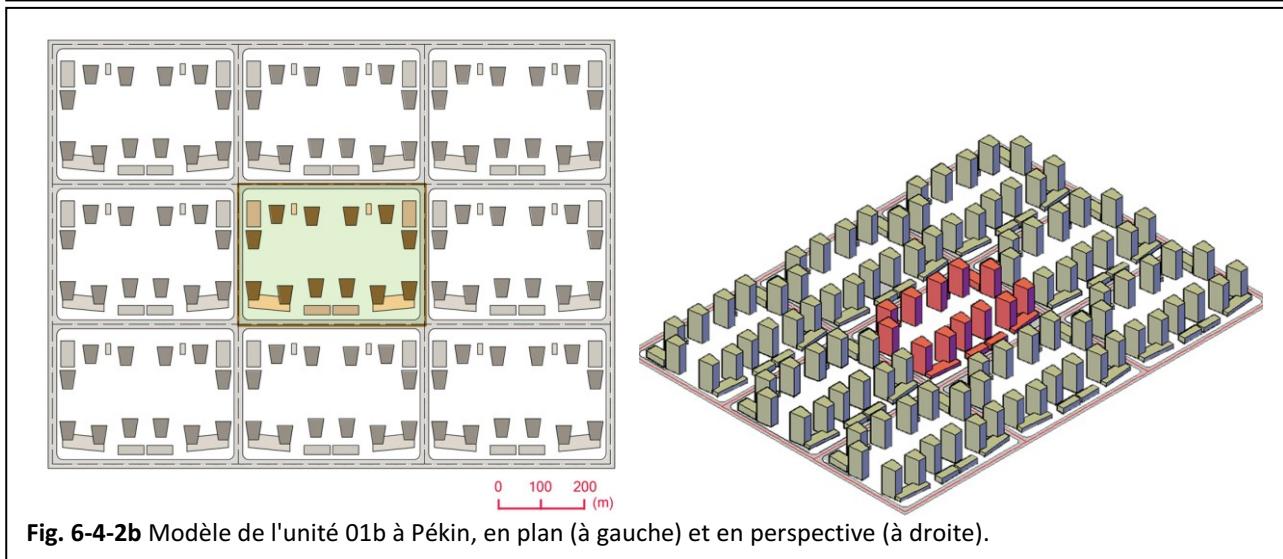


Fig. 6-4-2b Modèle de l'unité 01b à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

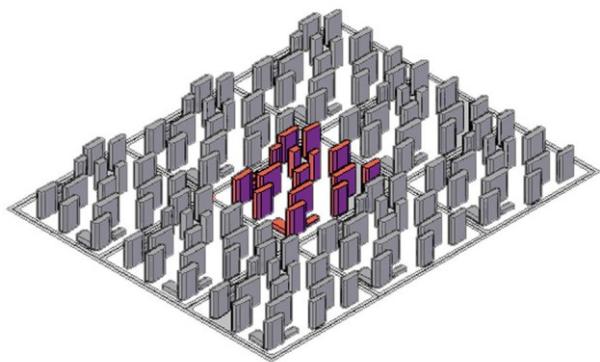
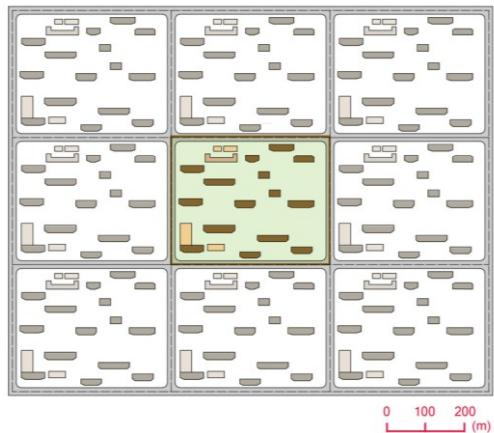


Fig. 6-4-2c Modèle de l'unité 02 à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

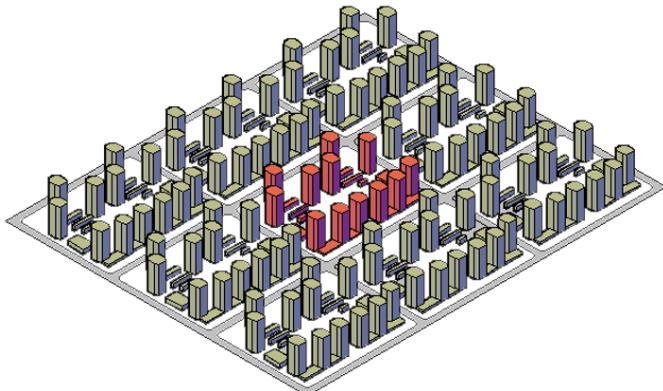
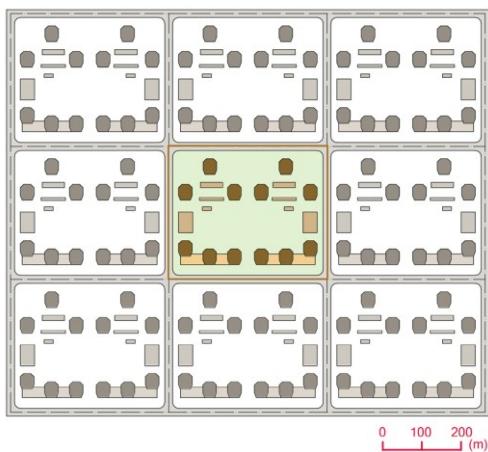


Fig. 6-4-2d Modèle de l'unité 03 à Pékin, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

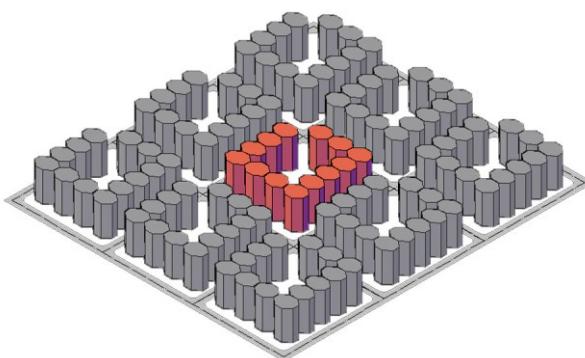
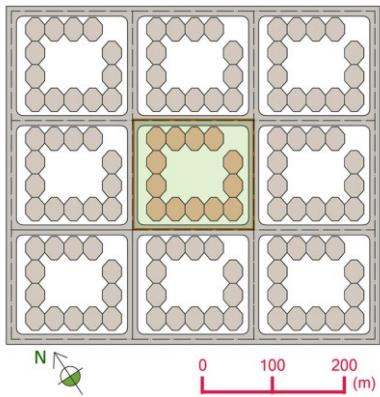


Fig. 6-4-2e Modèle de l'unité 04 à Hong Kong, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

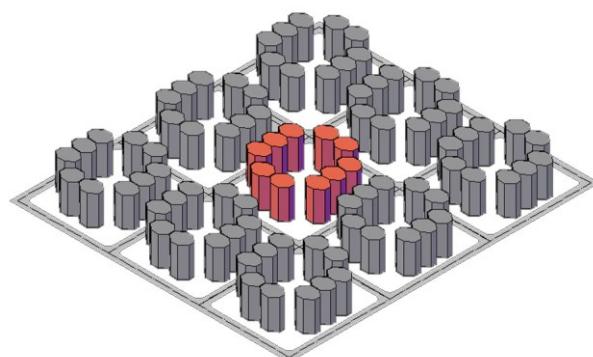
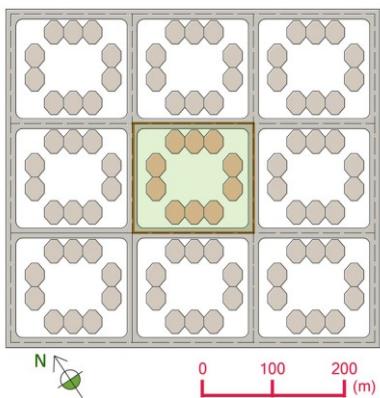


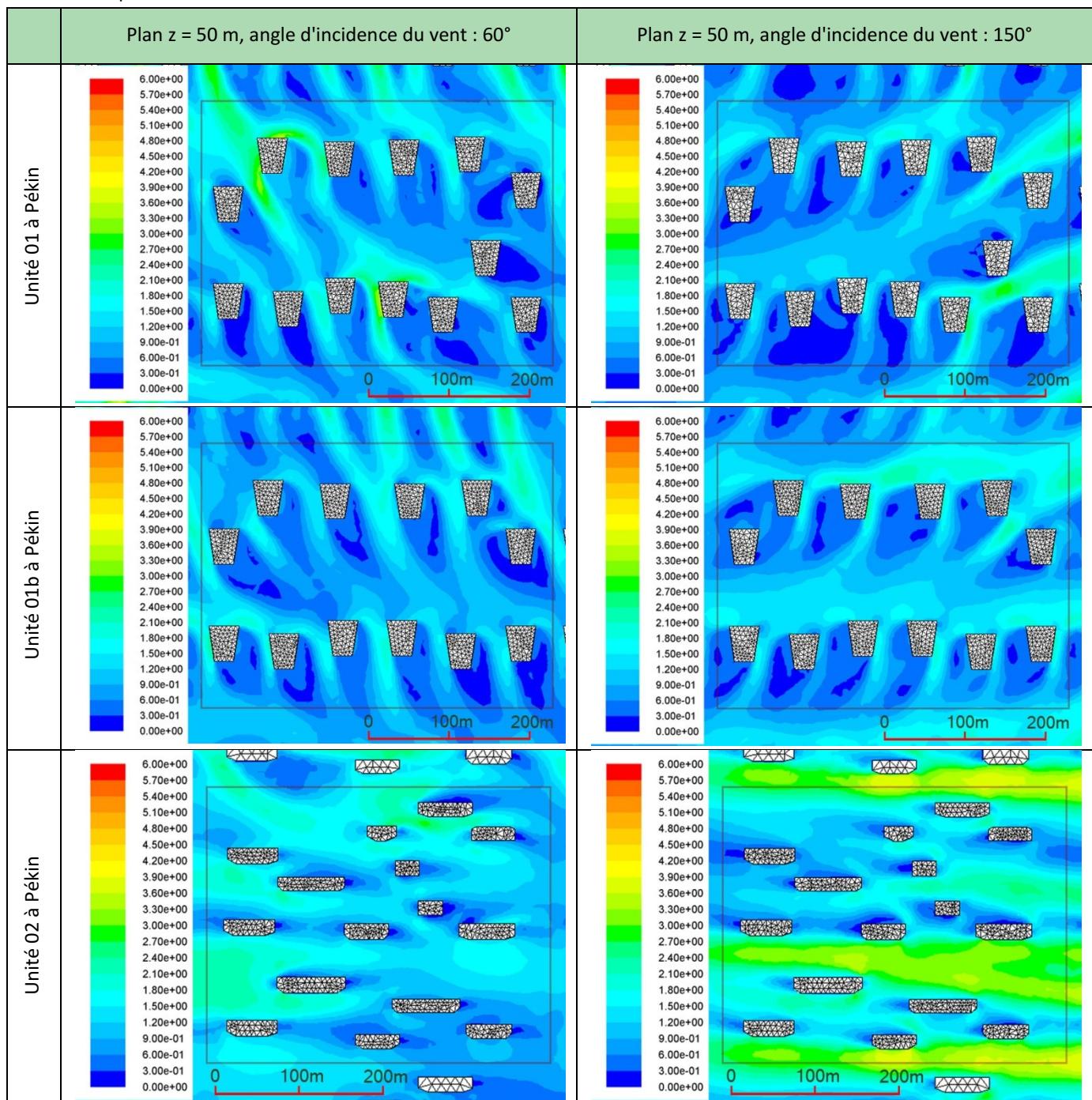
Fig. 6-4-2f. Modèle de l'unité 04b à Hong Kong, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

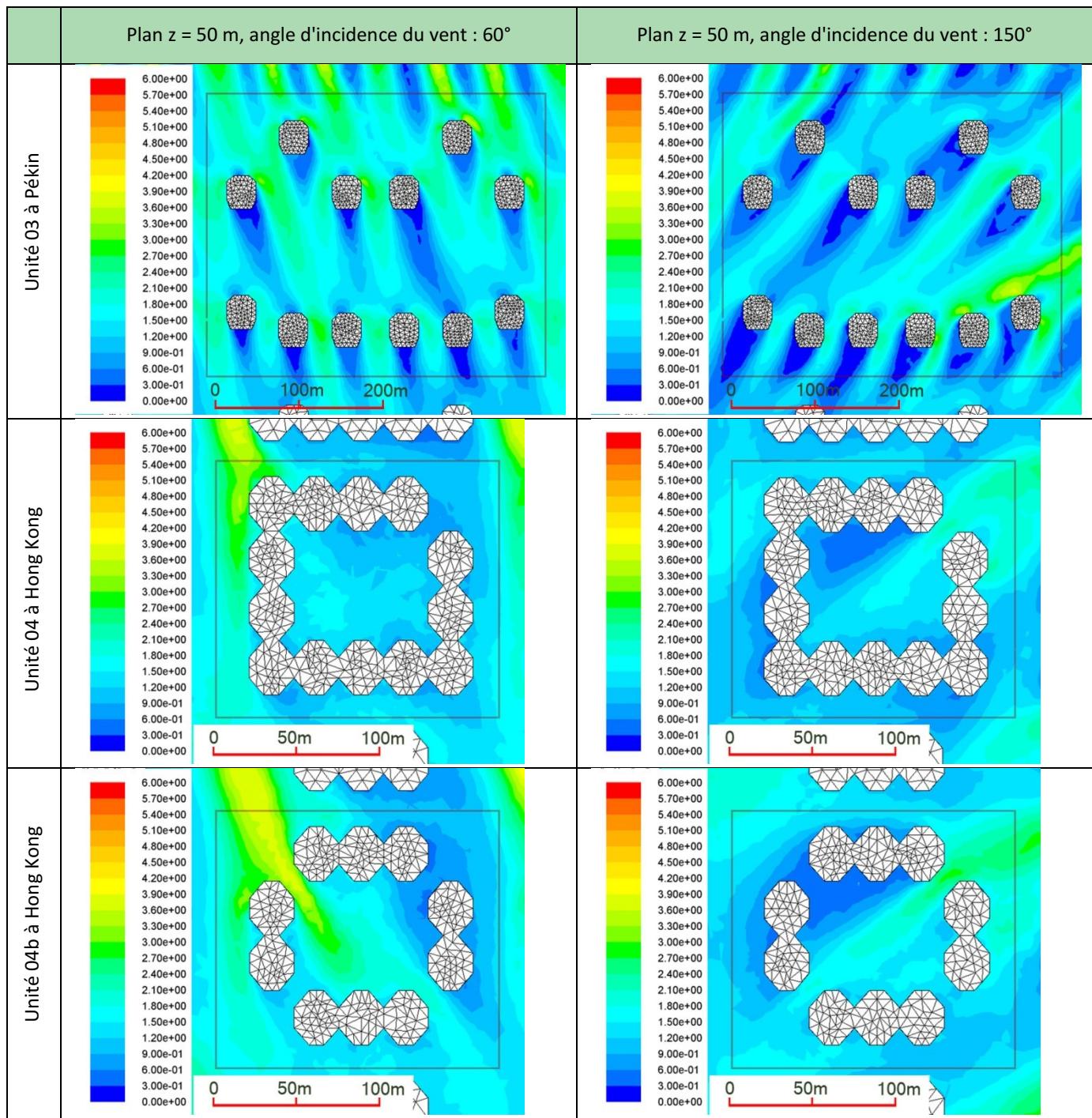
6.4.2 Résultats sur le rendement énergétique éolien des modèles d'unité urbaine

Pour chaque modèle d'unité, nous appliquons le même profil de vent et nous simulons 8 directions d'incidence du vent autour de l'unité. Les conditions climatiques locales ne sont pas prises en compte. L'impact de la forme de l'unité sur le vent est évalué en termes de rendement énergétique éolien. Pour chaque modèle, des exemples de représentation de contours de vitesse de vent dans la zone d'unité sont donnés dans le **Tableau 6-10** en considérant deux directions d'incidence, 60° et 150°, à une hauteur de coupe $z = 50$ m.

Tableau 6-10

Exemples de contours de vitesse de vent des modèles d'unité





Comme dans le cas de l'analyse des modèles de quartiers réels, la vitesse moyenne pondérée dans les modèles d'unité est calculée sur les parcelles aux trois altitudes ($Z = 5 \text{ m}, 10 \text{ m}, 15 \text{ m}$), au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts. En fait, chaque modèle concerne un seul type de tour. Le coefficient C_v évalué au-dessus des toits des tours et la somme du potentiel éolien de surface (M') à différents angles d'incidence du vent sont évalués et analysés pour chaque modèle. Une étude comparative des valeurs du coefficient C_v obtenues pour les différents modèles est proposée. Les valeurs moyennes et amplitudes moyennes du coefficient C_v , pour tous les angles d'incidence du vent et à trois altitudes différentes d'évaluation, sont précisés dans le [Tableau 6-11](#) ainsi que leur intervalle de variation à l'altitude $Z = 10 \text{ m}$, et les angles d'incidence du vent qui conduisent à un effet important d'augmentation du vent. Les résultats détaillés des valeurs du coefficient C_v des modèles d'unité à différents angles d'incidence du vent sont donnés dans l'[Annexe 04](#).

Tableau 6-11

Valeurs moyennes du coefficient C_v , à trois altitudes d'évaluation, intervalle de variation du coefficient C_v , à l'altitude $Z = 10$ m, amplitude moyenne de la variation du coefficient C_v et angles d'incidence favorables du vent pour les six modèles d'unité urbaine.

	Pékin unité 01	Pékin unité 01b	Pékin unité 02	Pékin unité 03	Hong Kong unité 04	Hong Kong unité 04b
Valeur moyenne du coefficient C_v à $Z = 15$ m	0,49	0,51	0,50	0,56	0,39	0,44
Valeur moyenne du coefficient C_v à $Z = 10$ m	0,43	0,46	0,45	0,51	0,34	0,38
Valeur moyenne du coefficient C_v à $Z = 5$ m	0,35	0,37	0,37	0,39	0,26	0,30
Intervalle de variation du coefficient C_v 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 de la variation du coefficient C_v	0,178	0,184	0,375	0,113	0,216	0,142
Angles d'incidence favorables	-75°, -120°	-75°, -120°	-165°, 15°	-75°, 60°	60°, -120°	-120°, 60°

Compte tenu des résultats du **Tableau 6-4-3**, les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Comparés avec le modèle de quartier à Pékin (voir [Fig. 6-3-3f](#)), tous les modèles d'unité urbaine avec des configurations de bâtiments similaires ont un coefficient C_v beaucoup plus faible. Par exemple, à l'altitude $Z = 15$ m, la valeur moyenne du coefficient C_v est égale à 0,87 au-dessus du toit d'une tour de 87m dans le modèle de quartier à Pékin, alors que au-dessus du toit d'une tour de même hauteur dans les modèles d'unité 01, 01b et 02, la valeur moyenne du coefficient C_v est égale à 0,50. La raison vient probablement de la grande rugosité de l'unité d'étude due aux 8 autres unités identiques installées autour.

2) Lorsqu'on change l'angle d'incidence du vent, on constate que, dans le cas de l'unité de tours en forme de barres (unité 02), l'intervalle de variation du coefficient C_v est beaucoup plus grand que celui de l'unité de tours en forme de plots (unité 01, 03). Cela signifie que l'assemblage des bâtiments en forme de barre est beaucoup plus sensible à la direction du vent incident qu'un modèle de bâtiments en forme de plots.

3) En considérant l'unité 01, si on enlève une tour et que l'espace entre les tours est élargi, l'unité 01b conduit à un coefficient C_v un peu plus élevé que celui de l'unité originale. Les angles d'incidence du vent les plus favorables ne changent pas.

4) En comparant les unités 01b et 03 de bâtiments en forme de plots, dont les valeurs des indicateurs morphologiques sont très similaires, nous remarquons que l'unité 03 a un effet d'augmentation du vent plus grand que l'unité 01b. L'amplitude moyenne de variation pour différents angles d'incidence est plus petite pour l'unité 03 que pour l'unité 01b. Les raisons viennent peut-être de la hauteur des tours de l'unité 03 (93 m) qui sont plus hautes que celles de l'unité 01b (87 m) et de la forme plus arrondie du bâti. Rappelons qu'un bâtiment de forme hexagonale a toujours un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit supérieur à celui d'un bâtiment de forme carrée ou rectangulaire de même surface (voir [Chapitre 5.2.1](#)).

5) Dans le cas où on enlève trois tours aux angles de l'unité 04, on observe que l'unité 04b a un coefficient C_v légèrement plus élevé que l'unité 04 d'origine. L'amplitude moyenne de variation pour différents angles d'incidence est plus faible. Les angles d'incidence du vent les plus favorables sont inchangés.

Pour évaluer l'énergie éolienne au-dessus des toits, nous prenons en compte toutes les tours dans la zone d'étude de l'unité. Les valeurs de l'indicateur M' à 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, la hauteur de tours et les surfaces totales des toits des tours sont résumés dans le [Tableau 6-12](#).

Tableau 6-12

Valeurs moyennes de l'indicateur M' à trois altitudes au-dessus du toit, amplitude moyenne des valeurs de M' , hauteurs des bâtiments les plus hauts dans le modèle et surface totale de toiture des modèles d'unité (unités de valeur du M' : $10^6 \text{ m}^5 \cdot \text{s}^{-3}$)

	Pékin unité 01	Pékin unité 01b	Pékin unité 02	Pékin unité 03	Hong Kong unité 04	Hong Kong unité 04b
Moyenne de M' à l'altitude $Z=15 \text{ m}$	0,413	0,377	0,460	0,505	0,143	0,191
Moyenne de M' à l'altitude $Z=10 \text{ m}$	0,296	0,263	0,355	0,358	0,089	0,125
Moyenne de M' à l'altitude $Z=5 \text{ m}$	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 toiture 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

Compte tenu des résultats du [Tableau 6-4-4](#), les conclusions suivantes peuvent être proposées :

1) Avec une surface totale de toiture exploitable de 8 % de moins que l'unité 01, l'unité 01b a un potentiel éolien total au-dessus du toit de 12 % (moyenné aux trois altitudes) plus faible que celle de l'unité originale, même si elle a un coefficient C_v un peu plus élevé (5 % en moyenne, voir [Tableau 6-4-3](#)).

2) En comparant les deux unités similaires 01b et 03 de bâtiments en forme de plots, on voit que l'unité 03 dont la surface est 4 % plus petite que celle de l'unité 01b conduit à une valeur de l'énergie éolienne totale en moyenne 30 % plus élevée que celle de l'unité 01b. La raison vient de l'augmentation importante du vent au-dessus du toit.

3) La valeur moyenne du coefficient C_v de l'unité 02 est légèrement supérieure à celle de l'unité 01 et sa surface totale de toiture est 14 % plus petite que celle de l'unité 01. L'unité 02 a un potentiel éolien 21 % en moyenne plus élevé que celui de l'unité 01. La raison vient de la grande variation de vitesse, car l'énergie éolienne varie avec le cube de la vitesse du vent.

4) Avec 3 % de moins de surface totale de toiture et 10 % de moins de densité bâti (COS) que l'unité 03, l'unité 02 a l'énergie éolienne totale la plus grande à une faible altitude ($Z = 5 \text{ m}$) au dessus des toits et la plus petite à une altitude élevée.

5) Même si la surface totale de toiture des tours est 23 % plus petite que celle de l'unité 04, l'unité 04b a un potentiel éolien total de 28 % plus élevé que celui de l'unité 04. Donc, en enlevant trois tours aux angles du quartier, on augmente l'effet du vent et l'énergie éolienne totale au-dessus du toit.

Pour analyser la cohérence entre les indicateurs énergétiques éoliens et les indicateurs morphologiques, la méthode de calcul du nombre total de changements d'ordre entre les séquences des modèles de unité est appliquée (voir [Chapitre 6.3.4](#)). En raison des grandes différences entre valeurs des indicateurs, les unités à Pékin et à Hong Kong sont évaluées séparément. Compte tenu des résultats de N_p ([Tableau 6-13](#)), nous trouvons que, les indicateurs σ_h/\bar{H} , \bar{V}_b , R_r , P_o et O_c ont une cohérence importante avec les indicateurs énergétiques éoliens. En raison que l'importance de l'indicateur C représentant la moyenne de M' à $Z=15 \text{ m}$ est plus grande que les autres 3 indicateurs énergétiques éoliens, l'évaluation sur la cohérence est faite plutôt sur cet indicateur. Donc, avec les

résultats de modèles de quartiers le sous-chapitre précédent, les deux indicateurs, \bar{V}_b et R_r sont assurés d'avoir une grande cohérence générale ($|N_p| \leq 2$).

Tableau 6-13

Nombres de changements d'ordre entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques éoliens pour des modèles d'unité urbaine

		Ordre de valeur de l'indicateur la plus grande (marqué en 1) à la plus petite (marqué en 6)						Nombre de changements d'ordre N_p			
		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 sol (COS)		1	3	4	2	1	2	6/1	6/0	6/1	4/1
Hauteur moyenne de bâtiment (\bar{H})		2	4	1	3			6	6	-4	-2
Coefficient de variation de hauteur de bâtiment (σ_h/\bar{H})		3	2	4	1			0	2	2	4
Volume moyen de bâtiment (\bar{V}_b)		1	2	3	4			-4	4	-2	-4
Prospect moyen (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, aucun modèle d'unité urbaine n'a un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit et ils peuvent même être pires que les modèles de quartiers réels. La raison vient de la grande rugosité autour de l'unité centrale évaluée. Pourtant, l'objectif des simulations d'unité est de comparer la performance du vent entre les unités avec peu de changement ou avec des valeurs des indicateurs morphologiques très similaires. Les résultats montrent que l'unité avec des bâtiments en forme de plots a une variation du potentiel éolien à différents angles d'incidence du vent inférieure à l'unité avec des bâtiments en forme de barres. A une altitude faible au-dessus des toits les bâtiments en forme de barres ont un potentiel éolien plus important que les bâtiments en forme de plots ; on observe le contraire à une altitude importante. Les bâtiments en forme de plots plus arrondis sont plus favorables pour obtenir un vent fort au-dessus des toits. Si on enlève un ou plusieurs bâtiments dans un modèle alors la vitesse moyenne du vent au-dessus du toit augmente, mais cela n'assure pas l'augmentation de l'énergie éolienne totale en raison de la perte de surface de toiture exploitable. Il faut aussi prendre en considération la perte de surface de toiture exploitable. Concernant les indicateurs morphologiques, le volume moyen de bâtiment \bar{V}_b et la rugosité relative R_r continuent de montrer une grande cohérence générale avec les indicateurs énergétiques éoliens.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre des modèles complexes à l'échelle du quartier ont été considérés.

Tout d'abord, compte tenu de l'analyse de l'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. Dans cette partie, les treize indicateurs choisis portent sur la forme physique et les relations morphologiques. Les méthodes de calcul et les implications potentielles de l'impact de la forme urbaine sur le vent sont expliquées.

Ensuite, deux indicateurs morphologiques ont été particulièrement analysés. Avec un modèle de base de 24 bâtiments identiques groupés, 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 :

- Le percement de cours dans seuls les bâtiments au milieu du domaine ralentit généralement le vent au-dessus des toits. Par contre, le percement de cours dans tous les bâtiments, le vent au-dessus des toits est plus fort.
- Pour les groupes de bâtiments avec une cour dans chaque bâtiment, il existe une porosité optimale qui correspond à l'effet du vent maximal au-dessus du toit.
- L'addition de cours dans les bâtiments autour des bâtiments à cours existantes peut accélérer les vents au-dessus des toits.
- Les vents au-dessus des toits des bâtiments situés en amont sont peu influencés par l'existence des cours. En revanche, les bâtiments situés en aval sont très influencés par les cours.
- Au-dessus des toits des bâtiments de différentes positions dans le plan, les effets du vent varient. Un modèle ayant des vents généralement moins forts qu'un autre modèle, peut avoir des bâtiments au-dessus desquels les vents sont plus forts que dans l'autre modèle.

Les résultats sur la densité montrent que :

- La fragmentation du volume d'un bâtiment avec la même emprise au sol ralentit le vent moyen.
- La diminution de la densité d'un tissu urbain en diminuant la longueur de tous les bâtiments accélère les vents au-dessus des toits.
- Le changement de densité en faisant varier la largeur des bâtiments a une influence faible sur l'effet du vent au-dessus du toit.
- Les bâtiments situés dans la partie centrale du modèle sont peu influencés par les changements de forme du bâti (longueur, largeur).
- Pour des modèles de même densité ou de même porosité, les rendements énergétiques éoliens sont différents.
- Les formes et les positions des cours ont beaucoup plus d'importance que l'indicateur de la porosité et la densité sur cette performance.

Ensuite, six quartiers typiques de différentes villes du monde ont été modélisés : Paris, Toulouse, Bombay, Barcelone, New York et Pékin. Afin de les comparer et de discuter les résultats, les conditions aérauliques initiales sont identiques. Dans cette phase d'étude, on ne prend donc pas en compte le climat local ni l'environnement socio-économique. En utilisant le modèle de validation, les paramètres du code CFD ont été à nouveau évalués et adaptés aux conditions nouvelles. Un compromis a été trouvé entre la précision des résultats et le temps de calcul. Des vérifications ont été faites pour assurer la cohérence et la pertinence des résultats. Pour chaque modèle, le coefficient d'augmentation de 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 surfaces au-dessus du toit ont

été analysés. Huit angles d'incidence du vent autour des modèles ont été considérés. Les résultats montrent que la majorité des modèles de quartier n'ont pas un effet d'augmentation du vent au-dessus du toit. Les vents sont très faibles à une altitude faible au-dessus des toits des grandes tours alors que les vents peuvent être très forts à une altitude élevée. Cependant, l'effet moyen du vent est plus faible que pour les bâtiments de hauteur moyenne. Normalement, les bâtiments les plus hauts montrent un coefficient C_v plus important. La hauteur de bâtiment est un élément décisif pour étudier l'effet d'augmentation du potentiel éolien. Les modèles avec des grandes tours qui ont des hauteurs variées montrent une amplitude plus grande de variation de l'effet du vent.

Quand on s'intéresse au potentiel éolien total au-dessus du toit (M'), la surface totale de toiture exploitable pour installer des éoliennes et la hauteur moyenne des bâtiments les plus hauts du modèle sont les paramètres qui ont les impacts les plus importants. Une grande variation de hauteur de bâtiment pourrait augmenter le potentiel éolien total. Comparées avec les éoliennes à axe horizontal (HAWTs), les éoliennes à axe vertical (VAWTs), qui sont normalement plus adaptées à l'environnement du vent turbulent dans une ville et ont une plus petite vitesse de démarrage, ne produisent pas beaucoup plus d'énergie sauf dans les modèles urbains qui ont une surface totale très importante de toiture exploitable. L'intensité de la turbulence et l'efficacité de la production électrique éolienne sont des informations nécessaires pour orienter un bon choix d'éolienne. Le coefficient M' n'est pas exploitable pour évaluer l'énergie éolienne s'il est le seul paramètre à être considéré. La distribution de vitesses des vents dans un espace est un autre élément très important. Les valeurs moyennes du coefficient C_v et de M' ont été évaluées pour comparer le potentiel éolien général entre les différents modèles de quartier.

Enfin, sur la base d'un modèle de quartiers réels, six modèles d'unité, avec des bâtiments simplifiés ou avec des variantes morphologiques, ont été testés. L'objectif des simulations des modèles d'unité urbaine est de comparer la performance du vent entre des unités similaires ou qui ont des valeurs des indicateurs morphologiques très proches. Les résultats montrent que l'unité avec des bâtiments en forme de plots est moins sensible aux différents angles d'incidence du vent que l'unité avec des bâtiments en forme de barres. A une altitude faible au-dessus du toit, les bâtiments en forme de plots génèrent un potentiel éolien plus important que les bâtiments en forme de plots. Cependant, à une altitude élevée le potentiel éolien est plus faible que les bâtiments en plot. Les bâtiments en forme de plots arrondis, conduisent plus facilement à un vent fort au-dessus des toits. Si on enlève un ou plusieurs bâtiments dans un modèle, la vitesse moyenne du vent au-dessus du toit peut augmenter. Néanmoins, cela ne garantit pas l'augmentation de l'énergie éolienne totale à cause de la perte de surface de toiture exploitable. En résumé, nous proposons comme prototype de forme urbaine permettant de développer l'énergie éolienne au-dessus du toit, un tissu urbain avec des tours en forme de plots avec des coins tronqués ou arrondis en plan ou encore un tissu avec des tours en forme de barres en supposant que le vent dominant à un angle d'incidence faible avec la direction longitudinale de la barre.

Concernant les indicateurs morphologiques, nous trouvons que deux indicateurs sont très cohérents avec le potentiel éolien au-dessus des toits : le volume moyen de bâtiment \bar{V}_b et la rugosité relative R_r . Une grande valeur de ces deux indicateurs signifie un potentiel éolien important au-dessus des toits. Les autres indicateurs comme la porosité absolue P_o et l'occlusivité moyenne O_c ont une certaine cohérence mais ils ne peuvent pas être pris en compte pour prévoir la capacité de production éolienne.

7. Développement et application de l'énergie éolienne en ville

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode simplifiée 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 de quartier choisi ici est à une échelle plus grande 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 de 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 bâtiment 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 pour différentes positions est présenté. Selon les résultats de simulations 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 nombreuses simulations sont effectuées 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 du potentiel éolien du quartier Jinsong

7.1.1 Etat de lieu du quartier Jinsong

Le quartier Jinsong se trouve dans le district de Chaoyang à Pékin, au centre 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 présentées dans la [Fig. 7-1-1](#). Le quartier 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 référence.

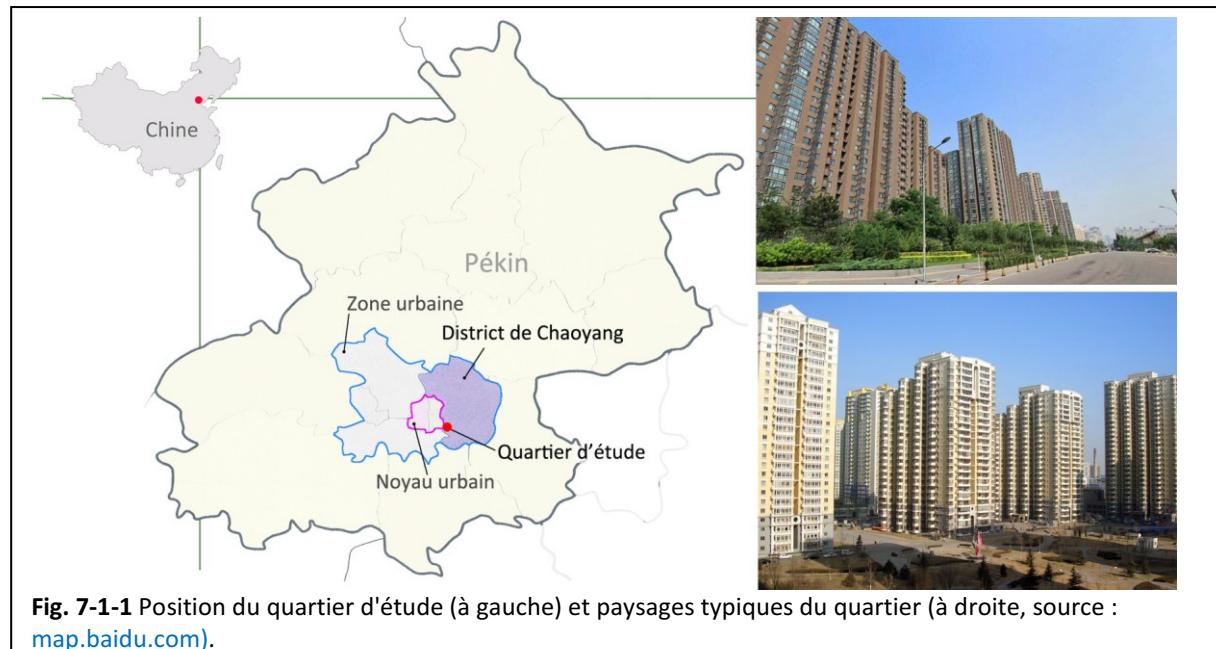


Fig. 7-1-1 Position du quartier d'étude (à gauche) et paysages typiques du quartier (à droite, source : map.baidu.com).

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 l'Est de Pékin, le district de Chaoyang a une population résidente de 3,84 millions en 2013 et une superficie de 470,8 km^2 , soit une densité de 8 158 Hab/ km^2 . 45,8 % de la population du district sont des étrangers résidentes⁵⁷. Une grande proportion d'immigrants (67 %) est arrivée pour le travail⁵⁸. 82 % de la population a entre 15 à 64 ans et 9 % sont des 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 PIB⁵⁹. 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 16 874 \$⁶⁰. En comparaison, le PIB par habitant en 2013 en France est de 42 991 \$ et aux Etats-Unis il est de 52 839 \$⁶¹.

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 la population possèdent l'Assurance retraite de l'Etat et

⁵⁷ <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjxx/bulletin/8a24fe8345f410840145f8be044800c3.html>

⁵⁸ <http://news.163.com/14/0619/02/9V2MS0JK0001124J.html>

⁵⁹ http://www.360doc.com/content/14/0313/15/502486_360270979.shtml

⁶⁰ <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjxx/bulletin/8a24fe8345f410840145f8be044800c3.html>

⁶¹ <http://www.journaldunet.com/economie/magazine/classement-pib.shtml>

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 des habitants

Dans le district de Chaoyang, les dépenses de consommation annuelle moyenne par habitant sont de 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.

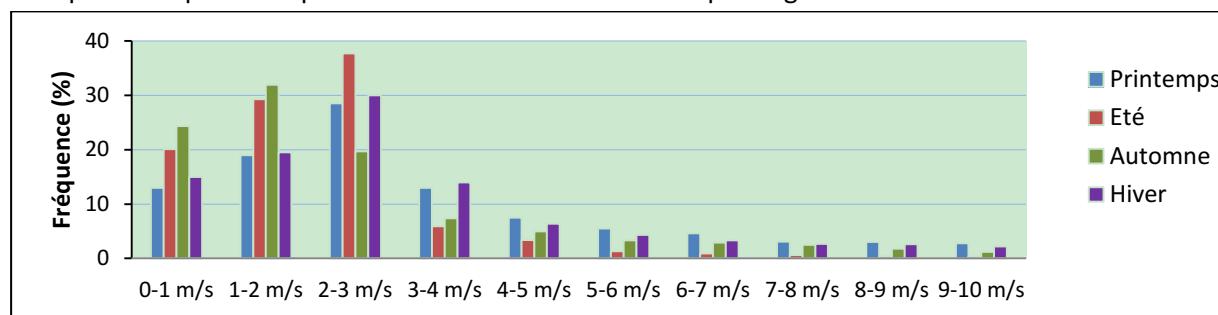


Fig. 7-1-2 Distribution des vitesses des vents aux différentes saisons (selon Météo Chaoyang).

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 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 linéaire du réseau routier est 4 km/km².⁶²

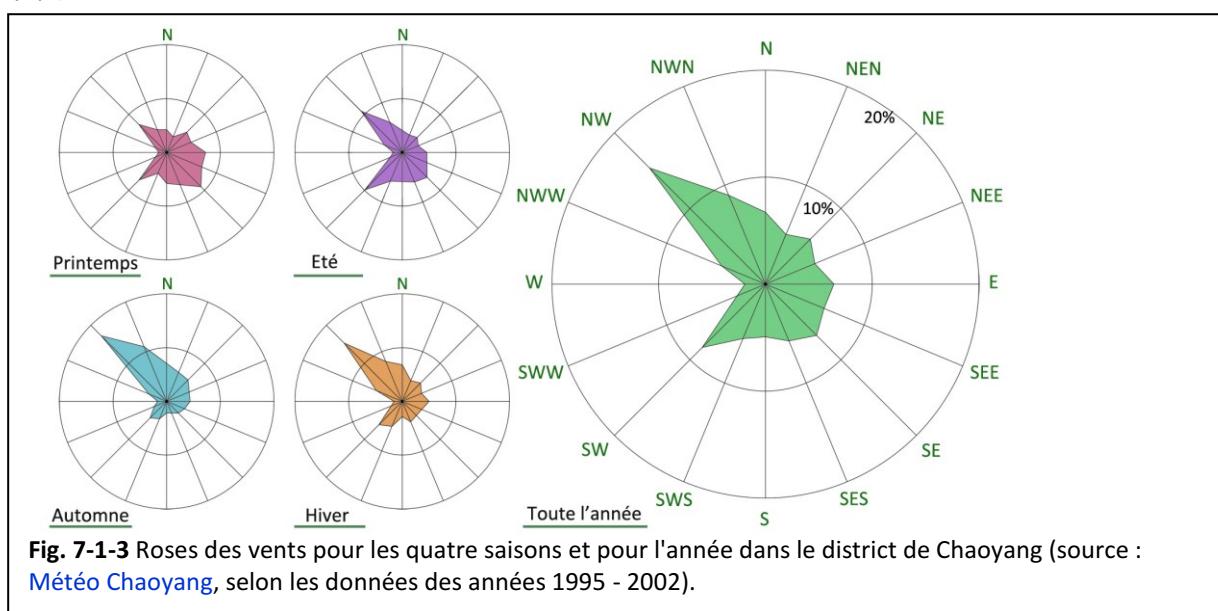


Fig. 7-1-3 Roses des vents pour les quatre saisons et pour l'année dans le district de Chaoyang (source : Météo Chaoyang, selon les données des années 1995 - 2002).

⁶² <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjxx/bulletin/8a24fe8345f410840145f8be044800c3.html>

En conclusion, le quartier Jinsong, situé au centre ville de Pékin, a des activités économiques dynamiques et un niveau de vie assez élevé. Ces conditions offrent pour 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, de promotions des technologies utilisant les 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 aéraulique

Sur la base du modèle de quartier à 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 du 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 de façon à économiser l'espace du domaine ainsi que pour prendre en compte des lignes de directrice sur la simulation CFD (Fig.7-1-4) : la distance entre l'entrée du domaine 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 %.

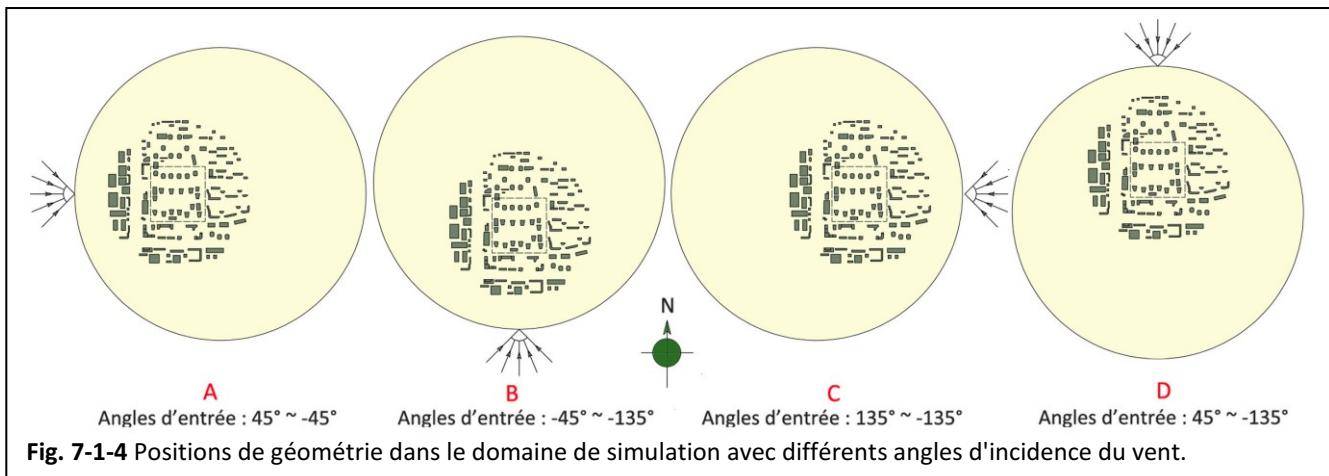


Fig. 7-1-4 Positions de géométrie dans le domaine de simulation avec différents angles d'incidence du vent.

2) Sur le maillage

De 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 le 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 $r = 1,3$, le nombre de couches d'inflation à partir du sol et à partir des murs $N = 5$ et deux cellules au minimum 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 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 du 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 la couche de surface (voir Fig. 2-4-1)⁶³ est assimilée à $Z_{gm} = 400$ m. Donc, au point de mesures de la situation météorologique de Chaoyang, selon l'Equation 2-2, la vitesse du vent u_m à une hauteur z_m est définie par :

$$u_m = u_{10,5} * \left(\frac{z_m}{10,5}\right)^{0,16} \quad (\text{Equation 7-1})$$

Alors la vitesse du vent du gradient (à la hauteur de couches de surface) sur place :

$$U_{gm} = u_{10,5} * \left(\frac{Z_{gm}}{10,5}\right)^{0,16} \quad (\text{Equation 7-2})$$

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), la hauteur de la couche de surface peut être définie par $Z_{gp} = 450$ m et la vitesse correspondante est U_{gp} (GB50009-2012) (Fig. 7-1-5). Alors la vitesse du vent u_p à une hauteur z_p peut être définie par :

$$u_p = U_{gp} * \left(\frac{z_p}{Z_{gp}}\right)^{0,22} \quad (\text{Equation 7-3})$$

Comme les vitesses de vent du gradient de deux terrains sont égales : $U_{gm} = U_{gp}$, grâce aux Equation 7-2, 7-3, on obtient :

$$u_p = u_{10,5} * \left(\frac{Z_{gm}}{10,5}\right)^{0,16} * \left(\frac{z_p}{Z_{gp}}\right)^{0,22} = 4,78 * \left(\frac{z_p}{450}\right)^{0,22} \quad (\text{Equation 7-4})$$

Donc on peut trouver la vitesse de référence à une hauteur $z = 10,5$ m dans la périphérie proche du centre ville : $u'_{10,5} = 2,09$ m/s. Le profil du vent d'entrée pour la simulation CFD peut donc être défini à partir de : $U = 2,09 * \left(\frac{z}{10,5}\right)^{0,22}$ (m/s).

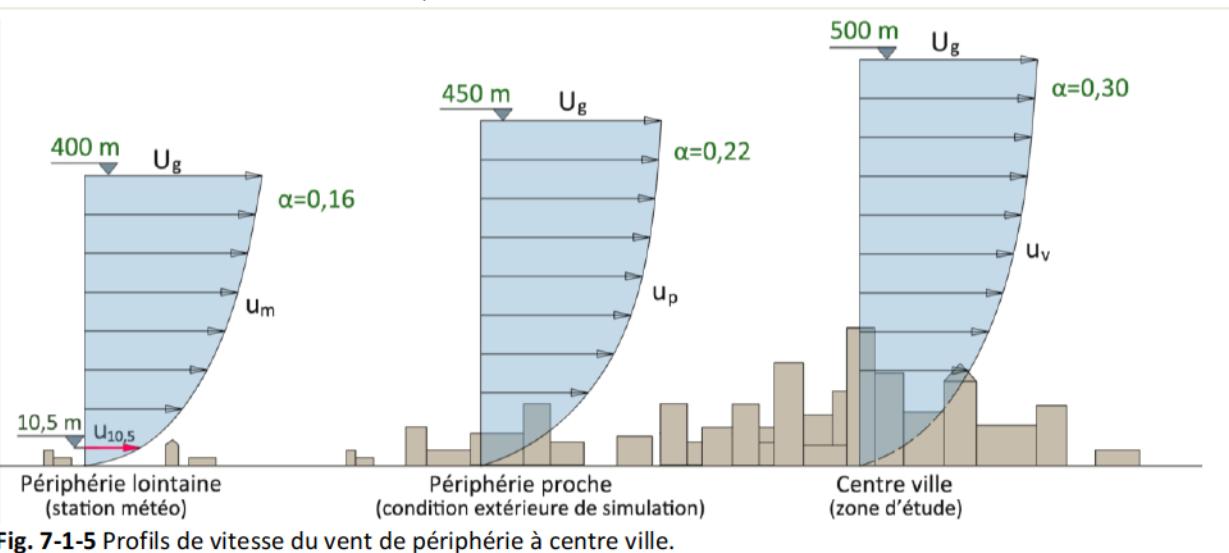


Fig. 7-1-5 Profils de vitesse du vent de périphérie à centre ville.

⁶³ Appelée aussi 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.

Le nombre d'itération du calcul est typiquement plus de 3000. Pour la convergence, nous avons retenu un résidu portant sur l'équation de continuité inférieur correspondant à 2×10^{-5} et les résidus portant sur les composantes de la vitesse sont généralement tous inférieurs à 10^{-5} .

7.1.3 Description des paramètres morphologiques du modèle de Jinsong

Nous appliquons ici un certain nombre de modifications au modèle urbain. Tous les bâtiments de hauteur inférieure 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 similaire d'emprise du sol. 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 du nombre d'éléments du maillage est important : 24 %.

Les informations sur la morphologie urbaine du quartier 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 seulement sur \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	Logement collectif, bureaux
Surface de terrain	202 500 m^2	202 500 m^2	1 130 973 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 %	16,87 %
Ratio d'espaces verts (REV)	37,13 %	37,13 %	32,09 %	32,09 %	32,09 %
Coefficient d'occupation des sols (COS)	3,47	3,57	1,90	1,84	1,84
Hauteur moyenne des bâtiments (\bar{H})	73,31 m	56,62 m	39,60 m	35,73 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	29,55 m
Coefficient de variation de la hauteur des bâtiments (σ_h/\bar{H})	39 %	67 %	72 %	83 %	83 %
Hauteur maximale des bâtiments (H_{max})	93 m	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	36 272 m^3
Prospect moyen (λ_c)	1,35	1,41	0,91	1,00	1,00
Rugosité absolue (R_a)	10,89 m	11,28 m	6,21 m	6,03 m	6,03 m
Rugosité relative (R_r)	34 429 m^{-3}	50 130 m^{-3}	46 781 m^{-3}	41 738 m^{-3}	41 738 m^{-3}
Porosité absolue (P_o)	89,43 %	89,07 %	93,97 %	94,15 %	94,15 %
Occlusivité moyenne (O_c)	58,38 %	57,60 %	65,83 %	66,99 %	66,99 %

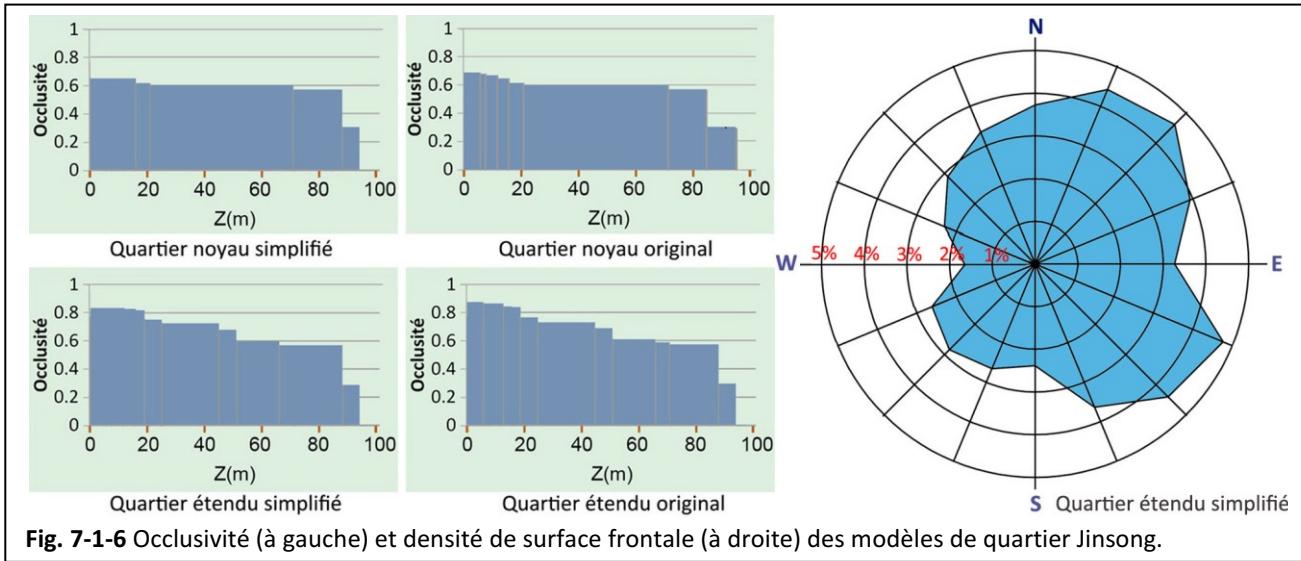


Fig. 7-1-6 Occlusivité (à gauche) et densité de surface frontale (à droite) des modèles de quartier Jinsong.

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 $H = 87$ m 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.

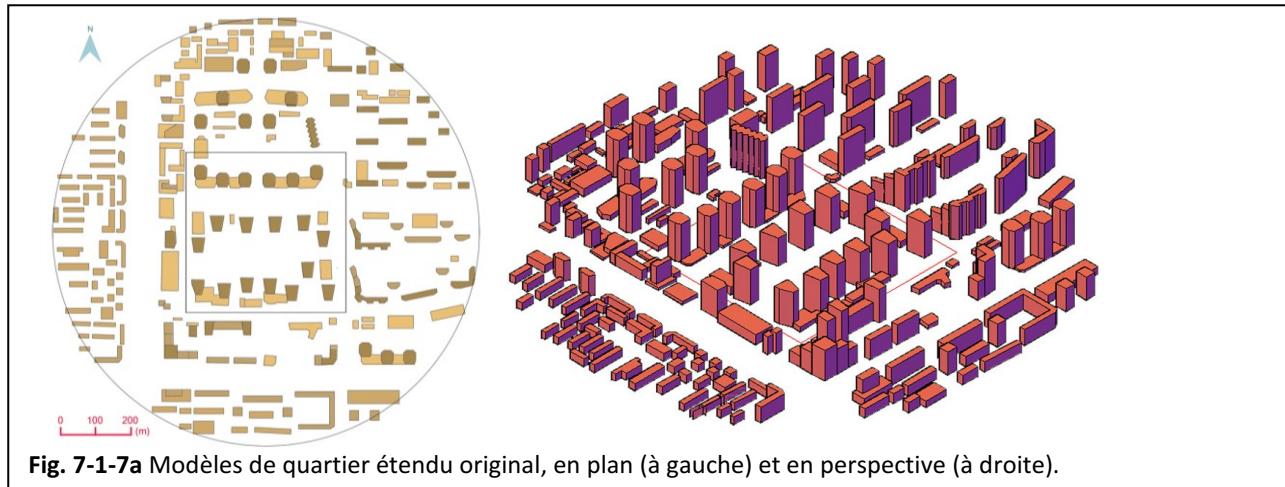


Fig. 7-1-7a Modèles de quartier étendu original, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

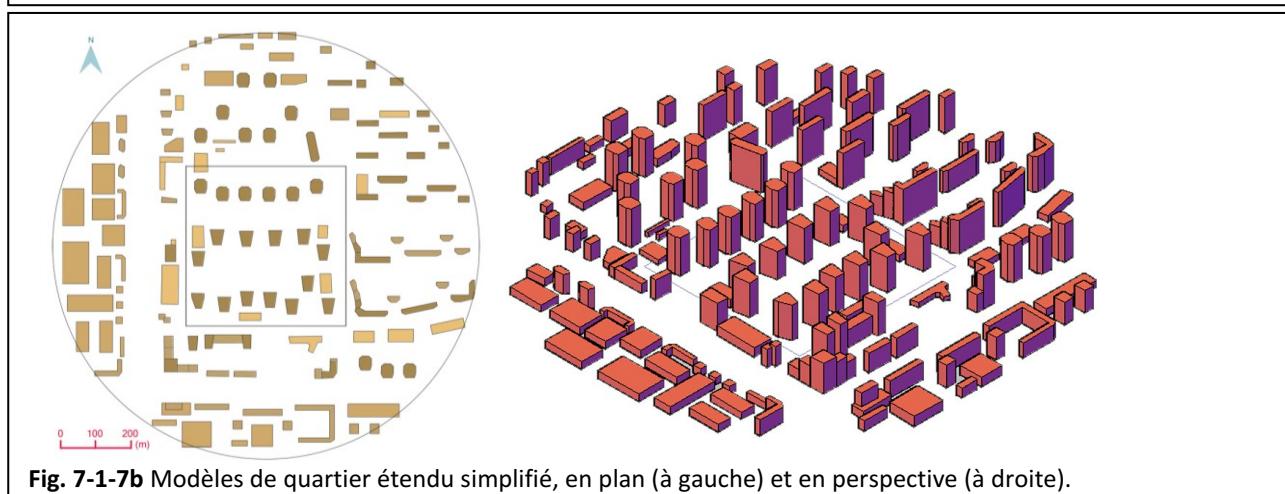


Fig. 7-1-7b Modèles de quartier étendu simplifié, en plan (à gauche) et en perspective (à droite).

7.1.4 Analyse des résultats

Sur 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 en premier lieu sans prise en compte de la distribution du vent local, afin d'étudier l'impact de la forme urbaine du quartier 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 données dans la Fig. 7-1-8.

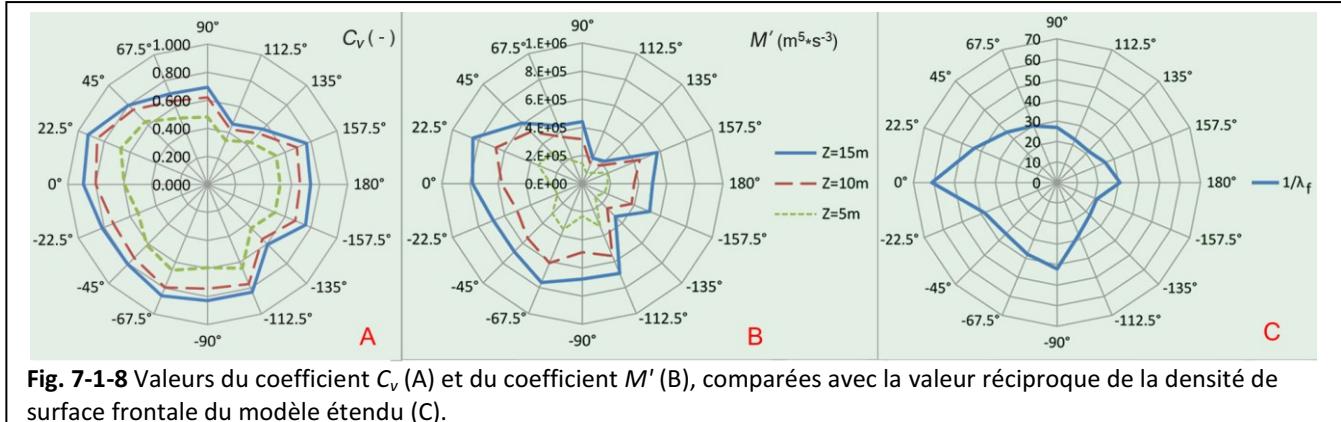


Fig. 7-1-8 Valeurs du coefficient C_v (A) et du coefficient M' (B), comparées avec la valeur réciproque de la densité de surface frontale du modèle étendu (C).

Pour faciliter la comparaison entre eux, la variation de la densité de surface frontale du modèle est redessinée (Fig. 7-1-8 c). La distribution des vents locaux n'est pas prise en compte pour les comparaisons. Nous remarquons que pour des angles d'incidence respectifs de 112,5°, 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°, 135° et -135° sont aussi parmi les angles pour lesquels les valeurs sont les plus faibles. Avec une incidence de 0° correspondant aux vents les plus forts, la valeur réciproque de la densité de surface frontale est aussi parmi les plus élevées. Malgré 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.

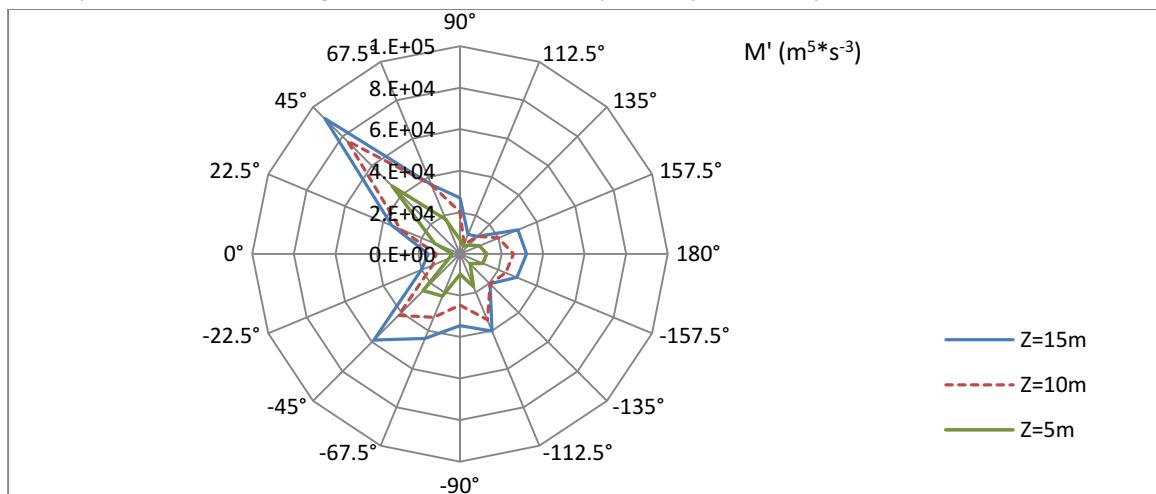


Fig. 7-1-9 Potentiel éolien total au-dessus des toits des tours de quartier Jinsong, compte tenu de la rose des vents locaux.

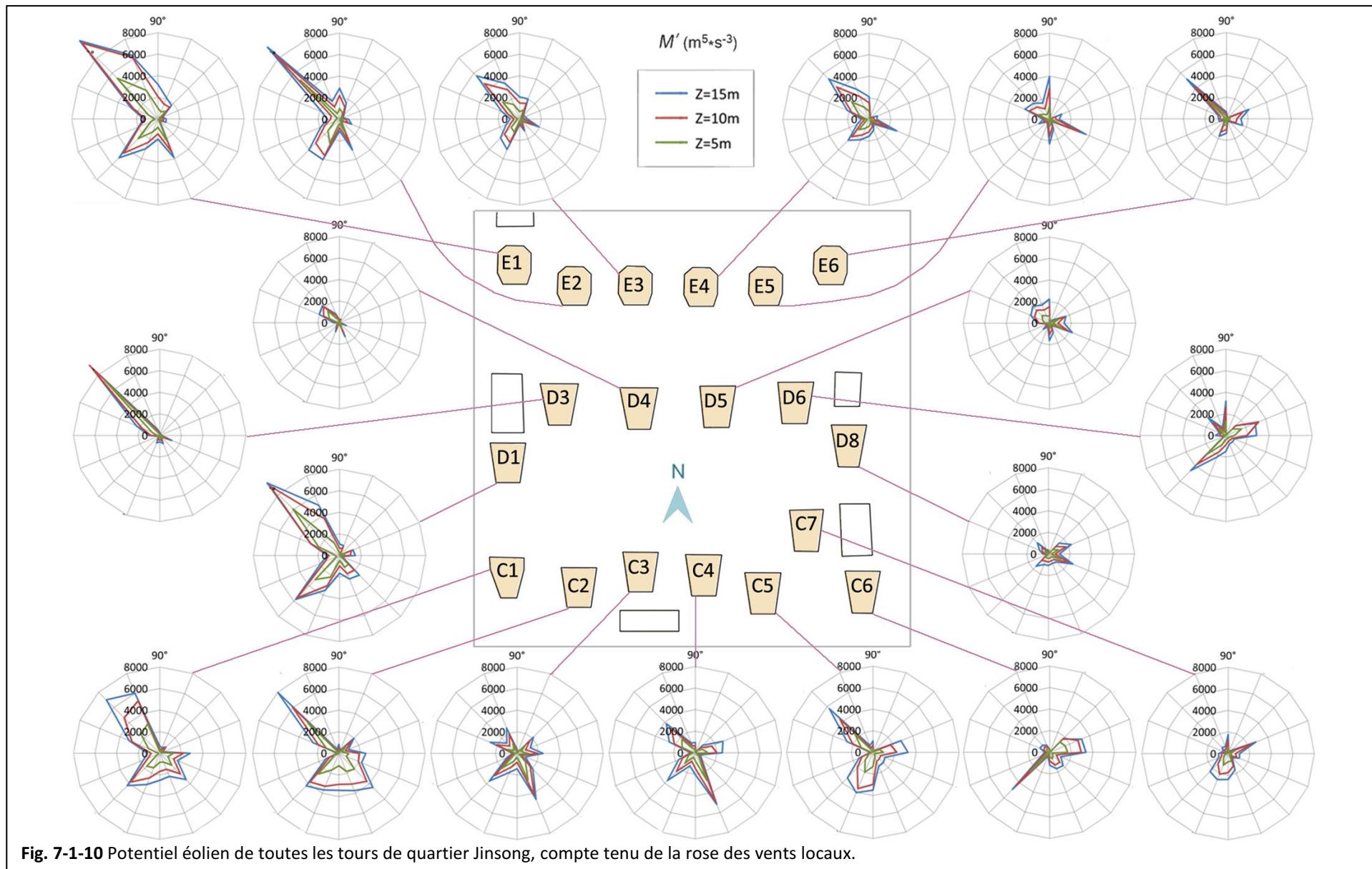


Fig. 7-1-10 Potentiel éolien de toutes les tours de quartier Jinsong, compte tenu de la rose des vents locaux.

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 un 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 $2000 \text{ m}^5 \text{s}^{-3}$, quelque soit l'angle d'incidence.

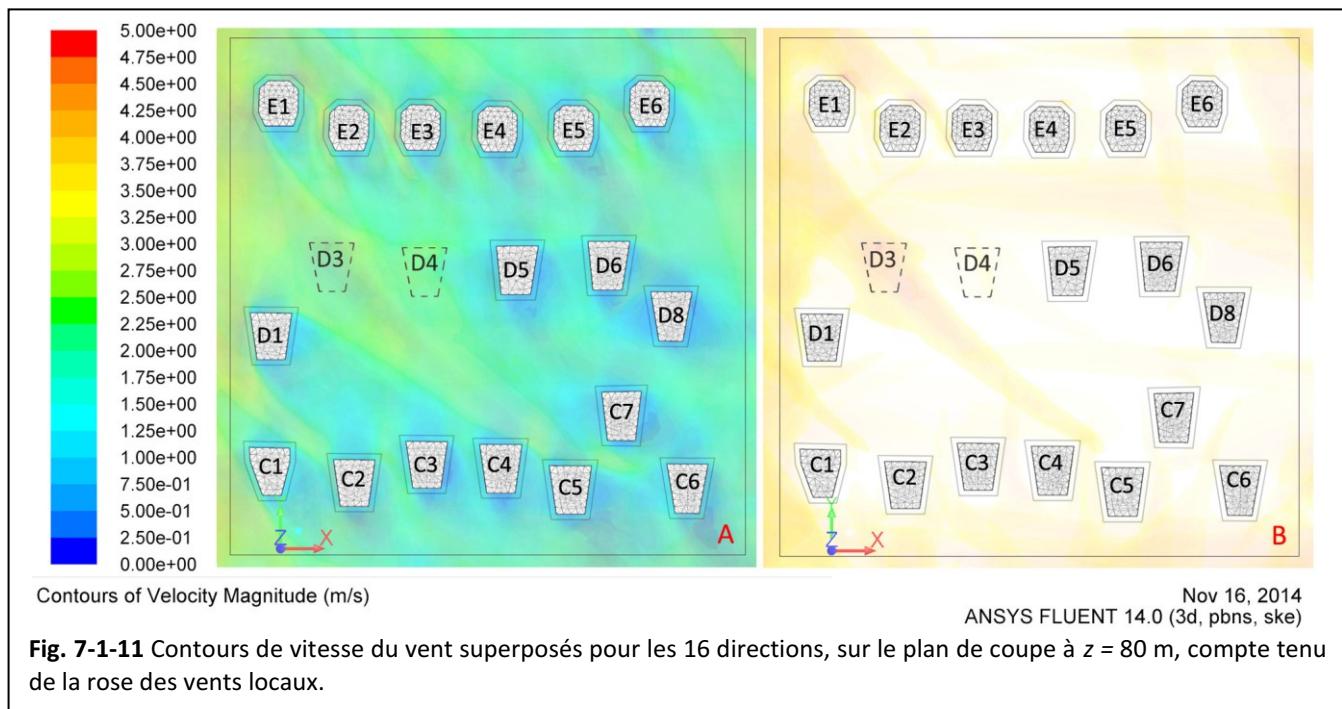
Si nous nous intéressons à l'intensité de la turbulence au-dessus des toits des tours les plus ventées (Tableau 7-3), nous remarquons qu'à l'altitude $Z = 5 \text{ m}$ au-dessus du toit, on obtient une intensité de turbulence de 54 % en moyenne, à $Z = 10 \text{ m}$, de 41 %, et à $Z = 15 \text{ m}$, 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 $z = 80 \text{ m}$ (par rapport au sol). A cette hauteur des éoliennes verticales proches des murs extérieurs peuvent être installées. Les classes de vitesse pour chaque angle d'incidence du vent sont superposées avec une opacité correspondant à la fréquence de distribution dans la rose des vents (Fig. 7-1-11A). Pour mieux identifier les zones les plus ventées, les contours de vitesses du vent supérieures à $3,25 \text{ m/s}$ 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 figurée sur 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 pas au meilleur choix (voir Fig. 7-1-10).



7.2 Proposition d'emplacement d'éoliennes et évaluation énergétique

7.2.1 Choix d'éoliennes adaptées et leur 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 (une éolienne chinoise), qui est en fait assez puissant pour un vent faible, le plus léger et le moins cher 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

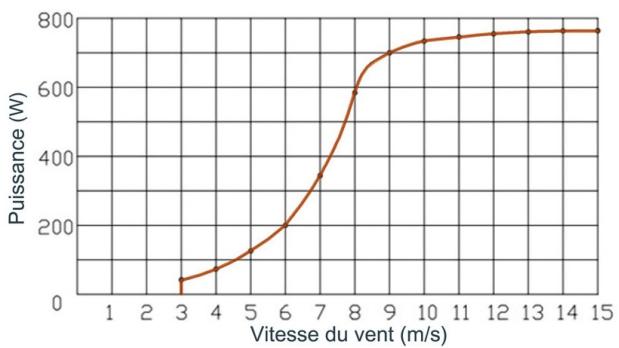
		Beijio Bdp-600/250 ⁶⁴	Archimedes Liam F1 ⁶⁵	WindTronics BTPS6500 ⁶⁶
				
Puissance nominale		600 W	1 000 W	1 500 W
Vitesse nominale du vent		8 m/s	12 m/s	14 m/s
Vitesse minimale exploitable		3 m/s	2 m/s	1 m/s
Taille (largeur × longueur × Profondeur)		1,8 m × 1,8 m × 1,4 m	1,5 m × 1,9 m × 1,75 m	2 m × 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 \$ ⁶⁷	5 695 \$ ⁶⁸
Puissance en expérimentation	2 m/s	0	0	22W
	3 m/s	48 W	10 W	58 W
	4 m/s	82 W	62 W	100 W
	5 m/s	130 W	141 W	163 W
 <p>The graph shows the power output of the Beijio Bdp-600/250 wind turbine as a function of wind speed. The x-axis represents the wind speed in m/s, ranging from 0 to 15. The y-axis represents the power in W, ranging from 0 to 800. The curve starts at approximately (3, 50), remains flat until about 7 m/s, then rises sharply to about 750 W at 8 m/s, and continues to rise more gradually, reaching a plateau of approximately 800 W between 12 and 14 m/s.</p>				

Fig. 7-2-1 Courbe de puissance de l'éolienne Bdp-600/250 (source : detail.1688.com).

⁶⁴ <http://detail.1688.com/offer/36389662346.html>

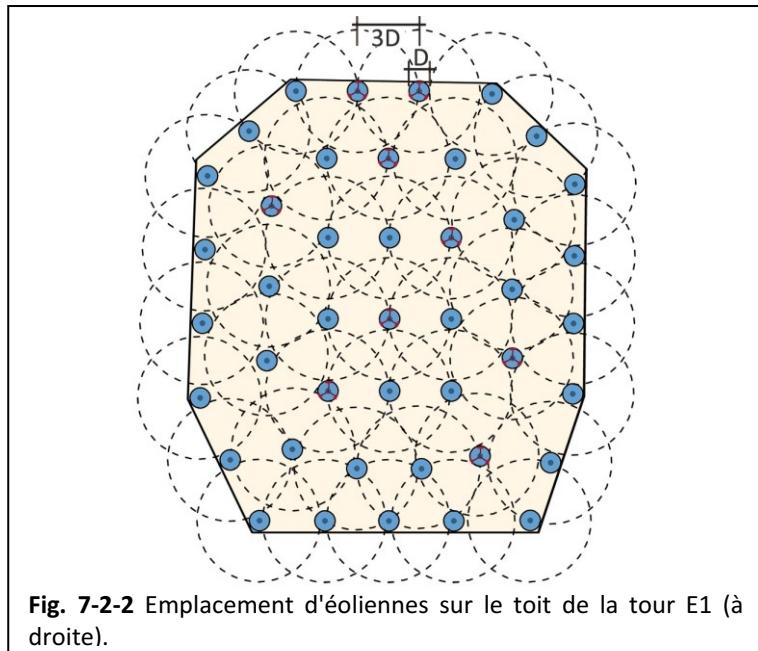
⁶⁵ <http://dearchimedes.com/>

⁶⁶ http://www.ecotownstore.com/wind/honeywell/wind_honeywell.html

⁶⁷ <http://wonderfulengineering.com/urban-wind-turbine-has-been-reinvented-with-this-new-design/>

⁶⁸ http://www.allsmallwindturbines.com/small_wind_turbines/119/111/BTPS6500/WindTronics/

Un exemple de mise en place d'éoliennes 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 de l'intervalle entre les éoliennes du premier rang et à une distance d'environ trois diamètres de rotor des autres. La matrice d'arrangement provisoire d'éoliennes est présentée dans la [Fig.7-2-2](#). 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 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. 7-2-3](#)). 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 1.3.1.2](#)). Nous appliquons les roses des vents du district de Chaoyang pour les quatre saisons séparément car pour chaque saison la distribution du vent est tout à fait différente ([Fig. 7-1-2, 7-1-3](#)).

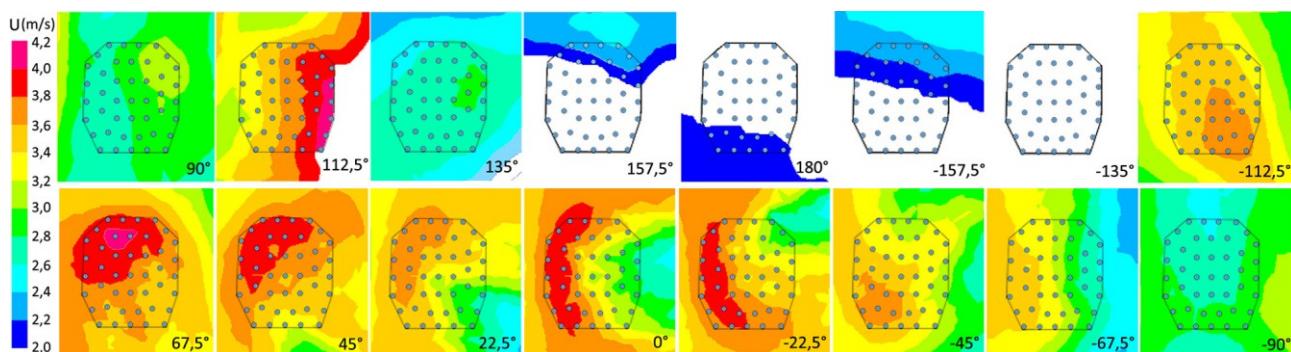


Fig. 7-2-3 Contours des vitesses du vent à $Z = 10$ m au-dessus du toit de la tour E1 pour les 16 directions du vent.

La puissance d'éolienne sur le point x , appelé P_x , est une 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 $P_{x,i}$ représente la puissance d'éolienne sur le point x pour la $i^{\text{ème}}$ saison,

U_x représente la vitesse du vent calculée sur le point x dans la simulation CFD,

$U_{0,i}$ représente la vitesse du vent moyenne pour la $i^{\text{ème}}$ saison selon les données météos,

$P_{0,i}$ représente la puissance supposée d'une éolienne avec les vents sous la distribution de vitesses pour la $i^{\text{ème}}$ saison,

$U_{i,j}$ représente 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,

$f_{i,j}$ représente la fréquence et $P_{e,j}$ signifie 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 de l'électricité à partir de cette vitesse.

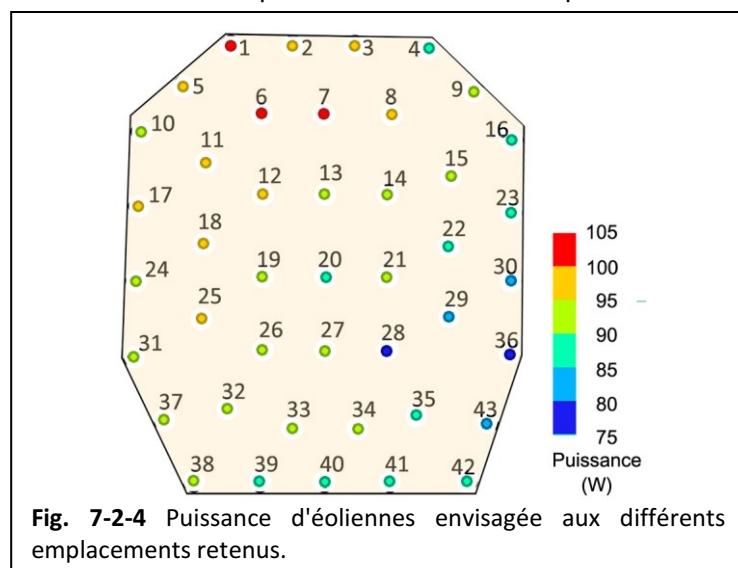


Fig. 7-2-4 Puissance d'éoliennes envisagée aux différents emplacements retenus.

Les résultats sur la puissance d'éolienne envisagée de chaque point sont présentés dans la Fig.7-2-4. Nous remarquons que les points avec un potentiel relativement fort sont situés au bord du coin au 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 $C_{\text{éolienne}}$ représente le coût de l'éolienne,

C_{support} représente la dépense liée au support qui est constitué par le mât, l'installation, le génie civil et l'entretien,

R_{annuel} représente le revenu annuel équivalent grâce à la production de l'électricité,

et 0,08 \$/kWh est le prix de l'électricité locale.

De la même façon, on trouve que 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 Jinsong est acceptable. D'ailleurs, prise en compte de possibilité d'augmentation du vent (par exemple, en rajout de parapet sur toit) et la crédit par le gouvernement, le temps de retour sera moins que la durée de vie standard d'une éolienne (20 an).

Compte tenu du fait que la tour E1 correspond à 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 la 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 Jinsong demande environ 40 h de calcul sur la machine actuellement utilisée (voir note de l'[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 dans un quartier complexe pour développer l'énergie éolienne.

7.3.1 Méthode mathématique pour évaluer l'impact d'obstacles 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 au 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 est 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{v(H)} = 1,3 \cos\left(\frac{(HH_0-2400)}{6440}\right) + 0,1 \\ C_{v(L)} = \cos\left(\frac{LL_0}{3600}\right) + 0,4 \\ C_{v(d)} = 1,8 \cos\left(\frac{\beta-28}{39}\right) - 0,34, \quad \beta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{D}\right) \\ C_{v(D)} = 1,31 \cos\left[\frac{(DH_0+20560)}{10400}\right] + 1,97, \quad D < 3H_0 \\ C_{v(D)} = 9 * 10^{-6}(DH_0 - 19200) + 0,92, \quad D \geq 3H_0 \end{array} \right. \quad (\text{Equations 7-9})$$

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 est respectivement défini par K_H , K_L , K_d et K_D . Alors l'[Equation 7-10](#) peut s'écrire comme suit :

$$I_o = \begin{cases} \frac{1}{(C_{v(H)})^{K_H} (C_{v(L)})^{K_L} (C_{v(d)})^{K_d} (C_{v(D)})^{K_D}}, & Z < 2,5H \\ \frac{1}{(C_{v(H)})^{K_H} (C_{v(L)réf})^{K_L} (C_{v(d)})^{K_d} (C_{v(D)réf})^{K_D}}, & Z > 2,5H \end{cases} \quad (\text{Equation 7-11})$$

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 :

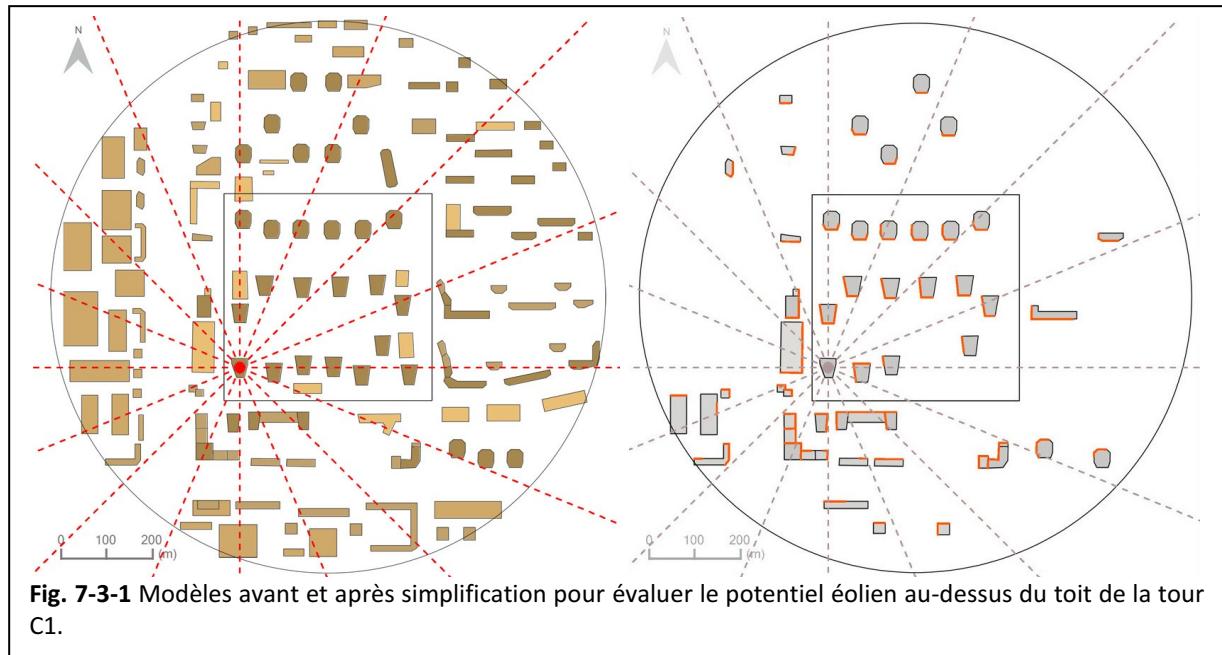
$$\eta_i = \left(\frac{I_{oi} + 0,1}{0,7} \right)^6 \quad (\text{Equation 7-13})$$

7.3.2 Application et évaluation de la méthode mathématique

L'énergie éolienne au-dessus du toit de la tour C1 dans le quartier 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 de la tour C1, les bâtiments du deuxième rang sont conservés s'ils sont plus élevés que ceux du premier rang. Sinon, 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 les [Equation 7-9](#) et [7-11](#).

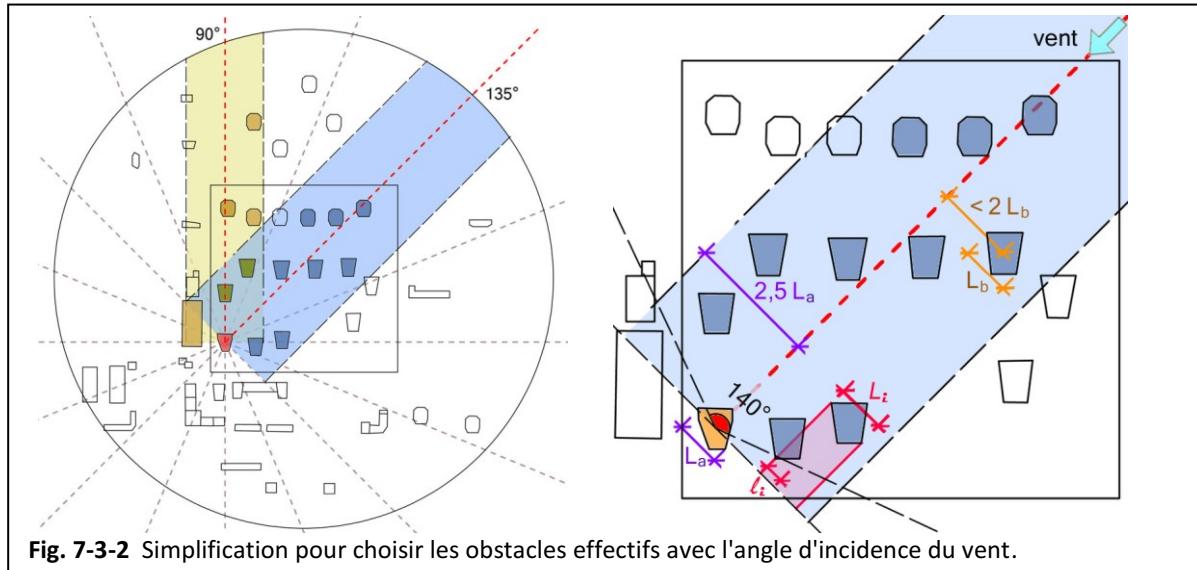


Fig. 7-3-2 Simplification pour choisir les obstacles effectifs avec l'angle d'incidence du vent.

En raison d'interaction entre les obstacles, nous proposons une correction sur l'impact d'obstacle donnée par :

$$I'_o = I_0 \left(1 - \frac{l_i I_{0a}}{L_i I_0} \right) \quad (\text{Equation 7-14})$$

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 par la projection de 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 superpositions, 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).

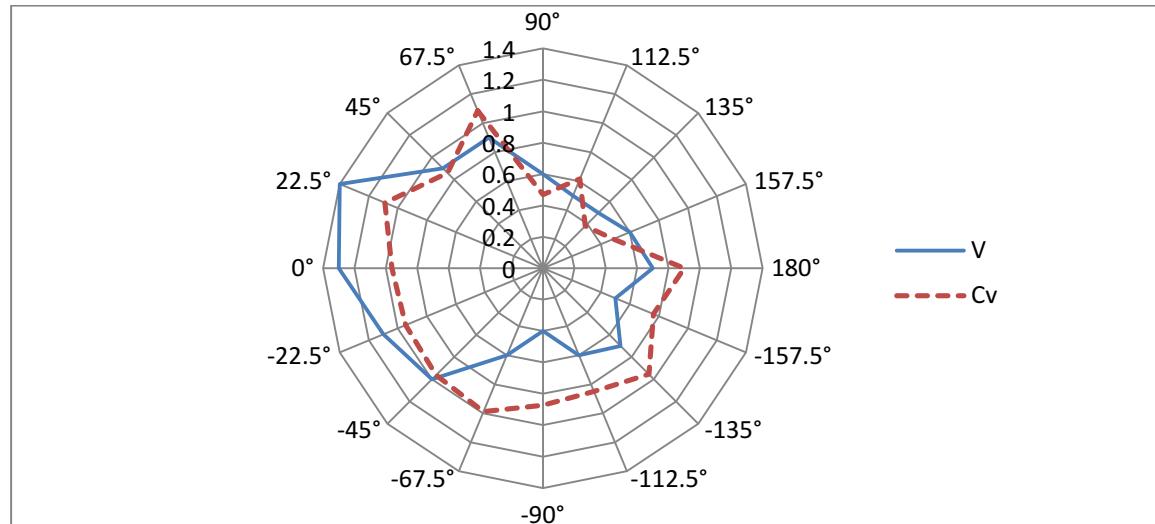


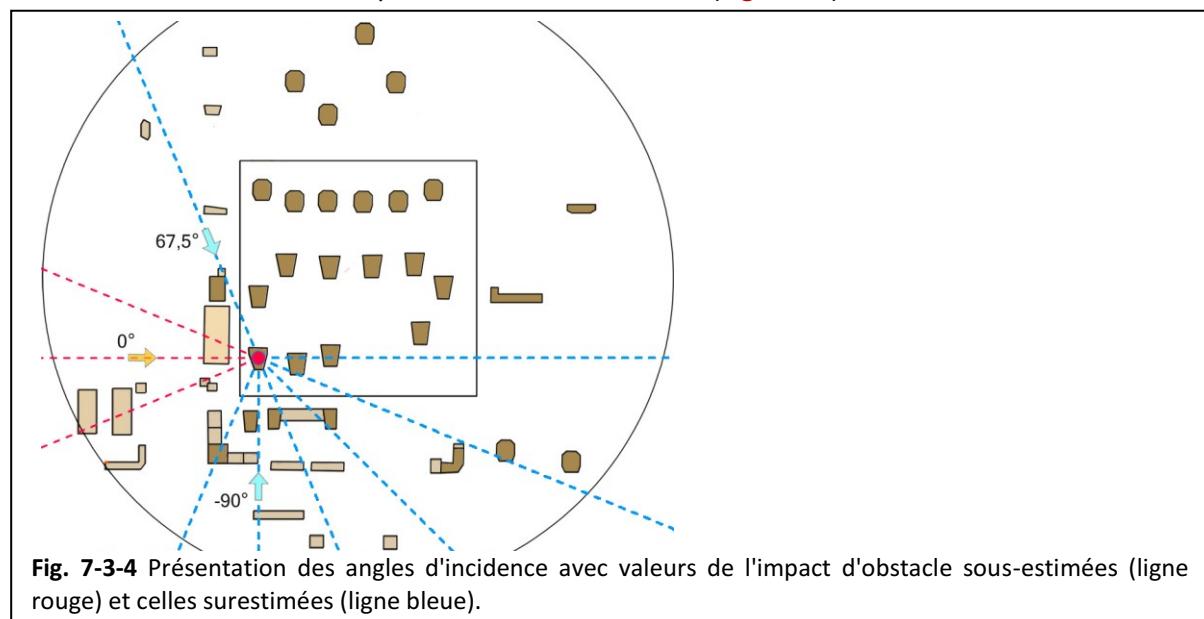
Fig. 7-3-3 Comparaison entre les valeurs du coefficient C_v en CFD et les valeurs de l'indicateur V calculé par la méthode mathématique simplifiée (pour un vent au-dessus du toit de la tour C1).

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 causes 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 y est très différent de celui de la tour C1. Les modèles avant et après la première simplification sont présentés (Fig. 7-3-5). Les valeurs de l'indicateur V sont calculées et comparées aux valeurs du coefficient C_v en CFD (Fig. 7-3-6).

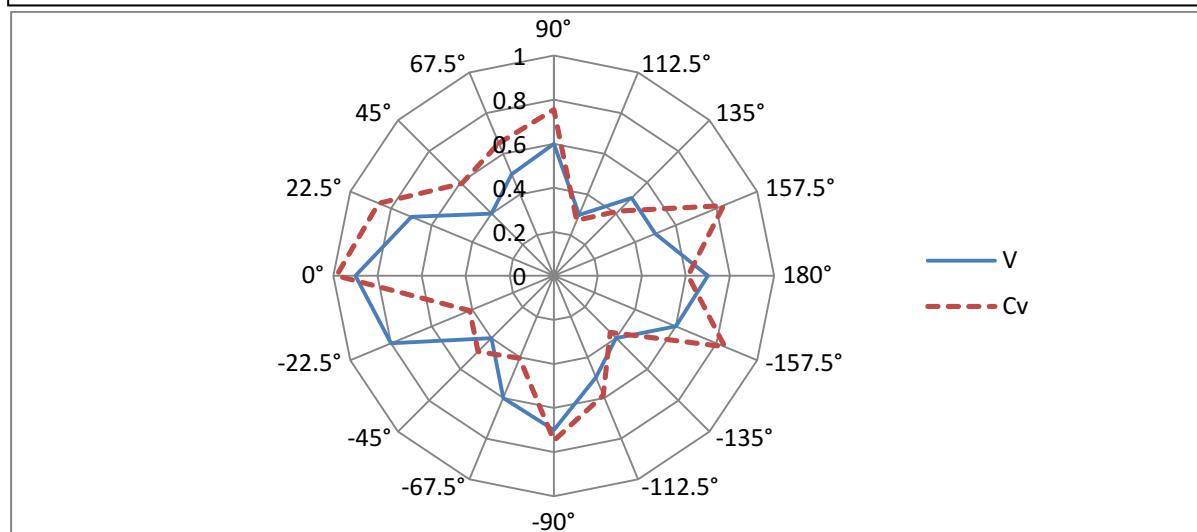
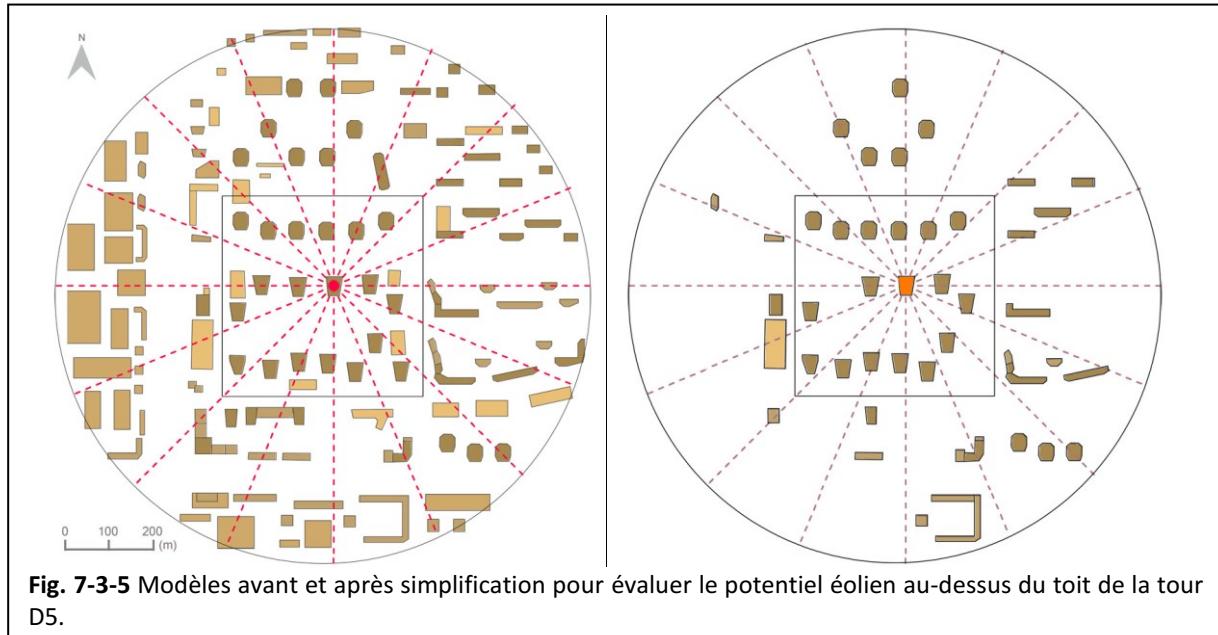


Fig. 7-3-6 Comparaison entre les valeurs du coefficient C_v en CFD et les valeurs de l'indicateur V calculé par la méthode mathématique simplifiée (pour un vent au-dessus du toit de la tour D5).

Selon les résultats de la [Fig. 7-3-6](#), les remarques suivantes peuvent être faites :

- 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 général, 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 par la 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 % existe sur cet exemple.

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 des 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 au-dessus du 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 proposé une méthode d'évaluation du potentiel éolien dans un quartier réel. Cette méthode mathématique simplifiée permet de prévoir la distribution du potentiel éolien au-dessus du toit.

L'application à un cas réel, intégrant certains facteurs socio-économiques, ainsi que certaines caractéristiques du climat local, notamment la distribution du vent, a été prise en compte. Le quartier Jinsong qui est choisi pour l'évaluation, 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 d'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 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 est souvent faible (avec une vitesse inférieure à 3,25 m/s).

Ensuite, plusieurs types d'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 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 choisie est de 25 ans à 33 ans. Le potentiel éolien dans le quartier 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 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 le bâtiment étudié, et le décalage à la ligne centrale. Des fonctions provisoires sont trouvées pour présenter la relation entre le coefficient C_v et ces 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 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 reste émergent. Les problèmes et les challenges auxquels nous sommes confrontés 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 échelle 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 n'ont été établi 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 la littérature sur ce sujet, des lignes directrices pour développer l'énergie éolienne urbaine à l'avenir sont ainsi proposées.

- 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 choisie est celle du quartier, car elle est plus adaptée que la ville entière pour définir des caractéristiques morphologiques fines et 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 ont été proposés. Leurs caractéristiques morphologiques, les caractéristiques de l'environnement aéraulique 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. Ils 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 de bonnes conditions initiales et des méthodes adaptées sont choisies, les résultats sont généralement approximatifs par rapport à l'essai en soufflerie ou aux mesures sur site. Dans notre cas, c'est la simulation CFD qui est la plus adaptée, 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 utilisées 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 travaillent sur des configurations géométriques archétypales. Pour des cas réels et complexes, 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 intéressants 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 car les facteurs d'influence sont très nombreux.

Les méthodes de validation et de vérification sont présentées dans le quatrième chapitre. Le contenu principal a été présenté dans l'article inclus. 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 du choix des valeurs des paramètres de code CFD et un risque important lié à la validation sur une seule étude de cas, lorsqu'on choisit différentes géométries ou autres différentes conditions initiales. 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 vérifier la robustesse du modèle avant et après la simulation. Sur les méthodes de vérification des simulations CFD, des exemples sont donnés sur l'analyse de la cohérence du flux, de la sensibilité à la taille du domaine et au 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.

L'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés est simulé et discuté dans le cinquième chapitre. Des indicateurs sont proposés pour évaluer l'énergie éolienne dans l'environnement bâti. L'indicateur M est défini pour évaluer le potentiel éolien total d'une surface urbaine. 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 d'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 les classes de vitesses. Les résultats montrent que l'influence de la précision sur les classes de vitesses 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 la 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 façades sont généralement moins forts qu'au-dessus des toits simplement à cause de leur altitude inférieure. Les résultats de simulations sur des 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 d'offrir une référence pour des études précises dans les simulations à l'échelle du quartier.

Des modèles complexes à l'échelle du quartier sont étudiés, dans le sixième chapitre. 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 particulièrement analysés. Six quartiers typiques dans différentes villes sont modélisés : quartiers 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 que peu d'effets sur l'augmentation du vent au-dessus des toits. Les grandes tours ont des vents très faibles à une petite altitude sur le toit, mais des vents pouvant être très forts à une altitude plus 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 toitures 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 quartiers réels, six modèles d'unités urbaines, avec des bâtiments simplifiés ou avec des variantes, sont testés. Les résultats montrent que le modèle avec des bâtiments en forme de plots est moins sensible pour différents angles d'incidence du vent que le modèle avec des bâtiments en forme de barres. À une altitude faible au-dessus des toits, les bâtiments en forme de barres conduisent à un potentiel éolien plus important que les bâtiments en forme de point, mais à une altitude élevée ils conduisent moins que les autres. Le fait de supprimer 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 surfaces de toiture 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 plots 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 volume moyen de bâtiment \bar{V}_b et la rugosité relative R_r . Une grande valeur de ces deux indicateurs signifie un potentiel éolien important au-dessus des toits.

Un exemple d'évaluation du potentiel éolien dans un quartier réel est donné, dans le septième chapitre. Sur l'application à un cas réel, les facteurs socio-économiques ainsi les climats locaux,

notamment la distribution du vent, sont intégrés. Le quartier Jinsong est choisi en analysant les conditions sociales et les problèmes environnementaux, ainsi que sa forme typique basée sur 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. Un 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 varie entre 25 ans et 33 ans. Le potentiel éolien dans le quartier 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 du bâtiment étudié 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 autres altitudes sont des pistes de développement possibles.

Donc, des points importants sur la conclusion générale peuvent être résumés comme la suite :

- A partir de l'étude de la bibliographie, et de notre cas d'application au quartier Jinsong à Pékin, nous pensons que l'énergie éolienne en ville peut être exploitables et rentables, dans la mesure où on utilise des éoliennes adaptées dans des endroits ventés.
- Nous trouvons que la méthode d'évaluation de l'énergie éolienne au-dessus du toit en ville proposé est une méthode pratique et efficace. Les indicateurs M et M' que nous définissons sont pertinents. L'énergie éolienne proche des façades des bâtiments est moins importante que celle au-dessus du toit, et aussi difficile à évaluer, puisque les endroits les plus ventés sont souvent très loin de la façade et cela rend difficile l'installation d'une éolienne.
- Nous trouvons que les paramètres morphologiques du bâtiment ont des impacts importants sur le potentiel éolien de modèles simples. Les impacts de différents paramètres varient. Par exemple, l'impact de la longueur ou la hauteur du bâtiment est beaucoup plus important que celui de la largeur du bâtiment.
- Pour les modèles complexes, il existe une certaine cohérence entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques éoliens. Nous avons trouvé deux indicateurs morphologiques très cohérents. Ils peuvent nous aider à prévoir le potentiel éolien d'un tissu urbain avant la simulation.
- Nous développons une méthode mathématique alternative à la simulation CFD pour évaluer rapidement l'énergie éolienne d'un quartier. Lorsque le modèle est très complexe et le temps est limité, cette méthode est utile. Les écarts entre les résultats de cette approche et de code CFD sont d'environ 27 % dans nos cas étudiés.

8.2 Evaluation de notre travail

Concernant ce travail, une auto-évaluation peut être réalisée. Des contributions et des limites de la thèse sont présentées dans la suite.

1) Contributions

Concernant la morphologie urbaine, notre contribution principale réside dans l'analyse de la cohérence entre indicateurs morphologiques et indicateurs énergétiques éoliens. Deux indicateurs morphologiques sont caractérisés par 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 de l'éolienne et il est plus adapté à l'évaluation de l'énergie éolienne que le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent (C_v) qui est largement utilisé aujourd'hui dans la littérature sur l'écoulement du vent.

Concernant la simulation CFD, nous avons abouti à une validation d'un nombre important de paramètres du code ANSYS. Ceux-ci permettent de valider des modèles simples similaires.

En outre, lorsque le modèle est très complexe, l'approche mathématique proposée permet d'évaluer, avec une certaine précision (70 %), le potentiel éolien au-dessus du toit d'une tour placée au milieu d'un quartier complexe.

2) Limites

Lorsque de nombreuses variantes de configurations de bâtiments existent, les travaux présentés par notre approche peuvent être insuffisants. En effet, les résultats peuvent être insuffisants pour montrer une tendance claire et correcte. Les simulations par des modèles simples peuvent s'avérer simplificatrices.

De plus, en raison du temps de calcul important, le nombre de modèles de quartier ou d'unités est limité. Des formes urbaines potentiellement favorables pour développer l'énergie éolienne peuvent être difficiles à déterminer par ces approches. Lorsque nous manquons de simulations sur des types variés de formes urbaines, des règles générales sur le choix de telles formes urbaines favorables pour développer le potentiel éolien sont difficiles à proposer dans le cadre des projets d'urbanisme.

8.3 Perspectives

Pour l'avenir de la recherche dans ce domaine, les pistes suivantes peuvent être intéressantes :

1) Sur des formes simples

La recherche peut être poursuivie sur des formes simples et sur la production de protocoles (ou de fonctions) liant les paramètres morphologiques et les indicateurs énergétiques. Par exemple, sur le passage du vent au-dessus du toit avec une casquette, plusieurs variantes peuvent être considérées pour trouver une casquette qui génère le potentiel éolien le plus élevé pour un bâtiment donné.

En outre, lorsque les modèles simples peuvent adopter les valeurs « validées » de paramètres du code, les résultats des simulations des modèles simples sont normalement validés et plus précis que ceux des modèles complexes.

2) Sur des formes complexes

A partir de notre travail, on peut tester plus des quartiers réels pour assurer la cohérence entre les deux indicateurs morphologiques trouvés et l'indicateur énergétique éolien M' . Les niveaux de cohérence sur différents indicateurs morphologiques peuvent être évalués. D'autres indicateurs de la morphologie urbaine peuvent être ainsi développés et analysés pour trouver des nouveaux indicateurs cohérents.

D'autres unités de forme urbaine peuvent être tester et l'impact de la petite modification morphologique peut être évalué. Cela peut être très utile pour renouveler un quartier pour développer le potentiel éolienne dans le cadre de l'urbanisme.

3) Sur la méthode mathématique

Nous pouvons améliorer l'approche mathématique d'évaluation simplifiée du potentiel éolien. D'autres critères influents peuvent être considérés et évalués, par exemple, l'interaction entre deux bâtiments, l'effet du vent sur les façades d'une grande tour...

Bibliographie

1. Livres, thèses et mémoires

- Allain**, R.. *Morphologie urbaine : géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand colin, 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.
- Duan**, J. and Qiu, G.C., *Urban Space 5 -- Conspectus of Foreign Urban morphology*. Southeast University Press, 2008. (Original en chinois : 段进, 邱国潮, 空间研究 5 -- 国外城市形态学概论.[M] 东南大学出版社. 2008.)
- Dutton**, A. G., Halliday, 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 élévatrices*. 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., Ada m, H., Bernard, J., Bonnelle, D., Brossé, R., Girtan, M., Guignard, J.C., Hladik, C.M., Maounoury, 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 Belkaïd 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 Wiley & 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., *Formes urbaines : de l'îlot à la barre*. Edition Parenthèses, 1997.

Panerai, p., Charles Depaule, J., Demorgan, 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'urbanismes 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.)

[Zhang, Y.](#), *Wind-Energy Efficiency Study in Building group environment*, MSc thesis (Chinese), Zhejiang University. 2014. (Original en chinois : 张瑛, 群体建筑环境中的风能利用效能研究. [D] 浙江大学硕士论文. 2014.03.)

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, volume 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, Kiyo & 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*. ERSA 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. Laaouina, M. Fabre et A. Wyatt, L'énergies 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 roughnessparameter 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., Tzamir. 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.

[Wieriinga](#), J., Davenport, A. G., Oke, T.R., *New revision of Davenport roughness classification*. In the preceedings of the 3rd European & Afican 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.

[Easom](#), G., Improved turbulence models for computational fluid dynamics. School of Civil engineering, University of Nottingham, 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.enr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug](http://aerojet.enr.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., Krüger, 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. Accès 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, Surajhund, 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. Hemstro m, M. Henriksson, R. Karlsson, A. Latrobe, A. Martin, P. Muhlbauer, M. Scheuerer, B. Smith, T. Takacs, and S. Willemesen, CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications, Report EVOLECOR A - 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 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 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. 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 - e 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.

[Salm](#), 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 Aerospatiale*. 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 Hooft, 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., Mochain, 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.

ADEME, *L'énergie éolienne*. Guide pratique, L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Mars 2014.

ADEME, *Le Petit Eolien*. Fiche Technique, L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Février 2015.

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., Sağlam, 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.

Axenue, S., *Wind energy integration in the urban environment*. Publishable Result-Oriented Report. Grant agreement no. EIE/04/130/S07.38591. Project WINEUR, April 2007.

Baldazzi, 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.

Baldazzi, 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 : influence 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*. In R.J. Howlett, L.C. Jain, & S.H. Lee (Eds.), *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, Maïte 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).

[Debled](#), A., Deblock, J., *Etude de faisabilité d'une implantation d'éolienne en milieu urbain à Roubaix et Templemars dans le cadre du projet européen WINEUR*. IMPACT 2005/2006, Rapport d'activité. Grant agreement no. EIE/04/130/S07.38591. Project WINEUR, 2006.

[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.

[Millward-Hopkins](#), J.T., Tomlin, A.S., Ma, L., Ingham, D.B., Pourkashanian, M., *Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model*. Renewable Energy 60 (2013) 701-710.

[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 Huseum](#), *Small Wind World Report 2014*. Published by World Wind Energy Association, March 2014.

[Oh](#), K.Y., Ki m, 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 form 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) Eolienne

Petites éoliennes :

<http://www.allsmallwindturbines.com/>
<http://www.solacity.com/smallwindtruth.htm>
<http://inhabitat.com/tag/wind-energy/>
<http://cleantechnica.com/2014/10/27/small-wind-turbine-myths/>

Petites VAWTs :

<http://www.windside.com/>
<http://dearchimedes.com/>
<http://www.urbangreenenergy.com/>

Energie éolienne intégrée à l'architecture :

www2.buildinggreen.com/article/folly-building-integrated-wind

2) Projet

WEB : <http://www.technology.stfc.ac.uk/ERU/web.htm>

WINEUR : <http://www.urbanwind.net>

WindFacts : <http://www.wind-energy-the-facts.org>

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.renewableuk.com>
<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>

Table des figures

Fig. 01 Termes d'étude.....	16
Fig. 02 Objectif du travail	16
Fig. 03 Méthode de la recherche sur la morphologie urbaine	19
Fig. 04 Méthode de la recherche sur l'énergie éolienne	19
Fig. 1-1-1 Moulin à vent à Castelnau.....	25
Fig. 1-1-2 Comparaison de la puissance (GW) des énergies renouvelables entre 2006-2012	26
Fig. 1-1-3a Réverbères intégrés avec une éolienne de type Savonius au Japon.....	30
Fig. 1-1-3b Eoliennes à axe horizontal à Rijnhaven, Rotterdam.....	30
Fig. 1-1-3c Eoliennes à axe horizontal dans le parc de La Villette, Paris	30
Fig. 1-1-3d Le projet «Wind to Light» par Jason Bruges Studio, Southbank Centre, Londres	30
Fig. 1-1-3e Eoliennes Quietrevolution Windlight.....	30
Fig. 1-1-4a Eoliennes sur le toit du bâtiment de Musé de la Science à Boston	31
Fig. 1-1-4b NGUp Windwall à la Haye, aux Pays-Bas	31
Fig. 1-1-4c Immeuble Kinetica à Londres	31
Fig. 1-1-5a Prototype UWECS	32
Fig. 1-1-5b Bahrain World Trade Center	32
Fig. 1-1-5c Tour de la Rivière des Perles	32
Fig. 1-1-5d Immeuble COR à Miami	32
Fig. 1-1-5e Tour de Strata SE1 à Londres	32
Fig. 1-1-5f Tour Shanghai	32
Fig. 1-1-6 Coûts des différents systèmes énergétiques	34
Fig. 1-3-1 Vue verticale de deux types d'éolienne.....	38
Fig. 1-3-2 Distribution des vitesses de Weibull et distribution de vitesses moyennes de vent mesuré	40
Fig. 1-3-3 Rose des vents de Toulouse.....	41
Fig. 1-3-4 Courbes de puissance et schémas de production potentielle annuelle de deux éoliennes.....	41
Fig. 1-3-5 Endroits dans la ville proposés pour disposer des éoliennes	43
Fig. 1-3-6 Conception des emplacements d'éoliennes urbaines	43
Fig. 1-3-7 Passerelle éolienne	44
Fig. 1-3-8 Toiture ombragée avec des éoliennes	44
Fig. 1-3-9a Eolienne conduite sur le toit	45
Fig. 1-3-9b Altechnica Aeolian Planar Concentrator.....	45
Fig. 1-3-9c Concept de turbine de toit	45
Fig. 1-3-9d Eolienne Sistan.....	45
Fig. 1-3-9e Eolienne PAGV : prototype et intégration imaginée dans un tour	45
Fig. 1-3-9f Concept de turbine de toit de Roberston et Leaman	45
Fig. 1-3-9g Concept de cheminée solaire qui intègre à des éoliennes pour l'électricité et la ventilation.....	45
Fig. 1-3-10b Tour d'observation avec VAWTs.....	46
Fig. 1-3-10a Pavillon tournant par le vent	46
Fig. 1-3-10c Projet de la Tour dynamique à Dubaï.....	46
Fig. 1-3-11 Micro-éolienne Windbelt et version qui peut être installée comme un garde-corps sur le toit.....	47
Fig. 1-3-12 Piezo-tree	47
Fig. 1-3-13 Eolienne Sénégal	47
Fig. 1-3-14 L'éolienne Crossflex	47
Fig. 2-1-1 Tissu du centre ancien du Caire.....	56
Fig. 2-1-2a Deux déterminants de forme bâtie.....	57
Fig. 2-1-2b Deux pistes pour la morphologie urbaine	57

Fig. 2-4-1 Visualisation du profil de vent dans la couche limite interne d'un environnement bâti	69
Fig. 2-4-2 Trois types d'écoulement du vent autour d'un bâtiment.....	73
Fig. 2-4-3 Différentes zones typiques d'écoulement du vent autour d'un bâtiment	74
Fig. 2-4-4 Régimes typiques d'écoulement du vent entre deux bâtiments.....	74
Fig. 2-4-5 Plan : vitesse normalisée de l'écoulement autour d'un bâtiment	74
Fig. 2-4-6 A : rayon de flux de coin R en fonction de W et H . B : vitesse maximale de flux en coin en fonction de W/H	75
Fig. 2-4-7 Arrangements caractéristiques de bâtiments	75
Fig. 3-2-1 Méthodes de simulation CFD et les modèles de turbulence associés.....	86
Fig. 3-2-2 Profil vertical de vitesse proche d'une paroi.....	89
Fig. 3-3-1 Exemple de l'impact du vent sur des aménagements en quinconce	96
Fig. 3-3-2 Trois types principaux des bâtiments étudiés pour la modélisation du vent.....	97
Fig. 3-3-3 Evaluation des vitesses avec la hauteur.....	98
Fig. 3-3-4 Configurations des concentrateurs de mur sur toit.....	99
Fig. 3-3-5 Différentes configurations de toiture	99
Fig. 3-3-6a Immeuble avec une paire de tourelles sur le toit	100
Fig. 3-3-6b Immeuble avec une casquette au-dessus du toit	100
Fig. 3-3-7 Différentes configurations des diffuseurs.....	101
Fig. 3-3-8 Configurations des diffuseurs (cylindres carrés) avec différents angles	101
Fig. 3-3-9 Configurations des diffuseurs (semi-cylindres) avec différents angles	101
Fig. 3-3-10 Les configurations des groupes des bâtiments de diffuseur	102
Fig. 5-1-1 Exemple de calcul de l'indicateur M	111
Fig. 5-1-2 Ecoulement du vent autour d'un groupe de bâtiments	112
Fig. 5-1-3 Comparaison entre les deux indicateurs F et F'	112
Fig. 5-1-4 Erreurs relatives entre les deux indicateurs F et F'	113
Fig. 5-1-5 Deux groupes (modèles A et B) de différentes précisions de contours de vitesse.	113
Fig. 5-2-1 Modèles des bâtiments en différents plans	114
Fig. 5-2-2 Contours de vitesse d'écoulement autour des bâtiments à différents plans	115
Fig. 5-2-3 Indicateur du potentiel éolien au-dessus du toit pour les bâtiments à différents plans	115
Fig. 5-2-4 Modèles de barre de différentes longueurs	116
Fig. 5-2-5 Densité d'énergie éolienne au-dessus du toit d'une barre de différentes longueurs	116
Fig. 5-2-6 Modèles de barre de différentes largeurs	117
Fig. 5-2-7 Densité d'énergie éolienne au-dessus du toit pour une barre de différentes largeurs	117
Fig. 5-2-8 Différents modèles de toiture.....	118
Fig. 5-2-9 Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les différentes toitures	119
Fig. 5-2-10a Vitesse du vent sur la ligne centrale dans la direction du vent à hauteur $H = 30$ m	119
Fig. 5-2-10b Vitesse du vent sur la ligne centrale dans la direction du vent à hauteur $H = 30$ m	120
Fig. 5-2-11 Différents modèles de coin de mur extérieur.....	120
Fig. 5-2-12 Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les différents modèles de coins de mur extérieur.	121
Fig. 5-2-13 Différents modèles de coin en bordure du toit	121
Fig. 5-2-14 Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les différents modèles de coins en bordure du toit	122
Fig. 5-2-15 Contours de vitesse d'écoulement au bord des toitures	122
Fig. 5-2-16 Différents modèles de cour.....	122
Fig. 5-2-17 Potentiel éolien total de surface au-dessus des toits pour les modèles de cours.....	123
Fig. 5-2-18 Différents modèles de passage du vent.....	124
Fig. 5-2-19a Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles de passage du vent	124

Fig. 5-2-19b-c Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles de passage du vent	125
Fig. 5-2-20 Différentes modèles de forme en plan pour tester l'impact de l'angle d'incidence du vent	126
Fig. 5-2-21a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 3$ m)	126
Fig. 5-2-21b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 5$ m)	126
Fig. 5-2-21c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 7$ m)	127
Fig. 5-2-21d Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents angles d'incidence du vent (à l'altitude de $Z = 10$ m)	127
Fig. 5-2-22 Positions des lignes de mesure	128
Fig. 5-2-23a Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles de différentes hauteurs	128
Fig. 5-2-23b Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles de différentes longueurs	128
Fig. 5-2-23c Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles de différentes largeurs	128
Fig. 5-3-1 Modèles de couples de bâtiments en ligne face au vent	130
Fig. 5-3-2a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes distances de séparation entre deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 0°)	131
Fig. 5-3-2b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes distances de séparation entre deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 30°)	131
Fig. 5-3-2c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs et largeurs de bâtiments dans les modèles de deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 0°)	131
Fig. 5-3-2d Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs et largeurs de bâtiment dans les modèles de deux bâtiments en ligne (angle d'incidence du vent 30°)	131
Fig. 5-3-3 Modèles de couples de bâtiments en parallèle	132
Fig. 5-3-4a Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 3$ m pour des rues de différentes longueurs	132
Fig. 5-3-4b Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 5$ m pour des rues de différentes longueurs	133
Fig. 5-3-4c Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 7$ m pour des rues de différentes longueurs	133
Fig. 5-3-4d Comparaison des valeurs du coefficient C_v sur la ligne centrale au-dessus du toit à $Z = 10$ m pour des rues de différentes longueurs	133
Fig. 5-3-5a Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse sur la ligne centrale dans la rue à $H = 10$ m pour des rues de différentes longueurs	134
Fig. 5-3-5b Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse sur la ligne centrale dans la rue à $H = 15$ m pour des rues de différentes longueurs	134
Fig. 5-3-5c Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse sur la ligne centrale dans la rue à $H = 20$ m pour des rues de différentes longueurs	134
Fig. 5-3-5d Comparaison des coefficients d'augmentation de vitesse sur la ligne centrale dans la rue à $H = 25$ m pour des rues de différentes longueurs	135
Fig. 5-3-6 Modèles de couples de bâtiments décalés	135
Fig. 5-3-7a Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 3$ m)	136
Fig. 5-3-7b Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 5$ m)	136
Fig. 5-3-7c Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 7$ m)	136

Fig. 7-1-7b Modèles de quartier étendu simplifié	192
Fig. 7-1-8 Valeurs du coefficient C_v (A) et du coefficient M' (B), comparées avec la valeur réciproque de la densité de surface frontale du modèle étendu (C).....	193
Fig. 7-1-9 Potentiel éolien total au-dessus des toits des tours de quartier Jinsong	193
Fig. 7-1-10 Potentiel éolien de toutes les tours de quartier Jinsong	194
Fig. 7-1-11 Contours de vitesse du vent superposés pour les 16 directions, sur le plan de coupe à $z = 80$ m...	195
Fig. 7-2-1 Courbe de puissance de l'éolienne Bdp-600/250 et emplacement d'éoliennes sur le toit de la tour E1	196
Fig. 7-2-2 Emplacement d'éoliennes sur le toit de la tour E1	197
Fig. 7-2-3 Contours des vitesses du vent à $Z = 10$ m au-dessus du toit de la tour E1 pour les 16 directions du vent	197
Fig. 7-2-4 Puissance d'éoliennes envisagée aux différents emplacements retenus.....	198
Fig. 7-3-1 Modèles avant et après simplification pour évaluer le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour C1	202
Fig. 7-3-2 Simplification pour choisir les obstacles effectifs avec l'angle d'incidence du vent.....	203
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).....	203
Fig. 7-3-4 Présentation des angles d'incidence avec valeurs de l'impact d'obstacle sous-estimées (ligne rouge) et celles surestimées (ligne bleue).....	204
Fig. 7-3-5 Modèles avant et après simplification pour évaluer le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour D5	205
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)	205
Fig. A1-1 Schéma d'une éolienne à axe horizontal	239
Fig. A2-1 Pyramide d'échelle spatiale	246
Fig. A2-2 Des différentes formes urbaines	246
Fig. A2-3 Types de macro-forme urbaine	247
Fig. A2-4 Evolution de l'îlot urbain.....	247
Fig. A2-5 Définitions de la densité	248
Fig. A2-6 Repérage des échantillons par leur densité	248
Fig. A2-7 Classification de zones locales climatiques pour l'environnement urbain.....	249
Fig. A4-1 Comparaison de la cohérence des différents modèles de turbulence avec l'expérience en soufflerie	258
Fig. A4-2 Comparaison de la cohérence des différentes tailles de domaine avec l'expérience en soufflerie ...	258
Fig. A4-3 Positions des lignes de test en plan	261
Fig. A4-4 Comparaisons entre les profils de vitesse théoriques et numériques dans un champ vide	261
Fig. A4-5 Erreurs relatives entre les profils de vitesse théoriques et numériques.....	262
Fig. A4-6 Différentes tailles de domaine pour une même géométrie	262
Fig. A4-7 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	263
Fig. A4-8 Représentation partielle des maillages de différentes tailles	263
Fig. A4-9 Changement de la vitesse du vent à la ligne centrale à l'altitude $Z = 15$ m.....	264
Fig. A4-10a Potentiel éolien au-dessus du toit des modèles avec différentes tailles de maillages	264
Fig. A4-10b Erreurs relatives des comparaisons entre les modèles avec différentes tailles de maillages.....	265
Fig. A5-1 Modèle pour évaluer les vents en aval à la même hauteur du bâtiment en amont.....	266
Fig. A5-2 Valeurs sur le coefficient C_v des vents en aval de la même hauteur du bâtiment en amont.....	266
Fig. A5-3 Cohérence du λ_{stable} à $Z = 10$ m entre les résultats théoriques et ceux de simulation pour l'impact de H	267

Fig. 5-3-7d Comparaison des valeurs du coefficient C_v entre les modèles des bâtiments décalés (à l'altitude de $Z = 10$ m)	136
Fig. 5-3-8 Modèle de deux bâtiments perpendiculaires	137
Fig. 5-3-9 Modèles de deux bâtiments identiques positionnés avec des angles variés	138
Fig. 5-3-10a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour le groupe de modèles $D = 45$ m	138
Fig. 5-3-10b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour le groupe de modèles $D = 90$ m	138
Fig. 5-4-1 Modèles de trois bâtiments décalés	140
Fig. 5-4-2 Contours de vitesse des modèles de trois bâtiments décalés	141
Fig. 5-4-3a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de trois bâtiments ($Z = 10$ m)	141
Fig. 5-4-3b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de trois bâtiments ($Z = 15$ m)	141
Fig. 5-4-3c Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de trois bâtiments ($\Theta = 15^\circ - 60^\circ$)	141
Fig. 6-2-1 Modèle de référence pour l'analyse de la porosité	155
Fig. 6-2-2 Disposition des modèles de porosité en plan	155
Fig. 6-2-3 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de porosité	156
Fig. 6-2-4a Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de porosité ($Z = 5$ m)	157
Fig. 6-2-4b Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les modèles de porosité ($Z = 10$ m)	157
Fig. 6-2-5 Disposition des bâtiments en plan pour l'analyse de la densité	158
Fig. 6-2-6 Comparaison des valeurs du coefficient moyen C_v pour les modèles de densité	159
Fig. 6-2-7a Comparaison des valeurs du coefficient C_v des barres situées au centre du quartier ($Z = 5$ m)	159
Fig. 6-2-7b Comparaison des valeurs du coefficient C_v des barres situées au centre du quartier ($Z = 10$ m)	160
Fig. 6-3-1 Occlusivité des modèles de quartiers	163
Fig. 6-3-2a Modèle de quartier à Paris	163
Fig. 6-3-2b Modèle de quartier à Toulouse	163
Fig. 6-3-2c Modèle de quartier à Bombay	164
Fig. 6-3-2d Modèle de quartier à Barcelone	164
Fig. 6-3-2e Modèle de quartier à New York	164
Fig. 6-3-2f Modèle de quartier à Pékin	165
Fig. 6-3-3a Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Paris)	167
Fig. 6-3-3b Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Toulouse)	167
Fig. 6-3-3c Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Bombay)	168
Fig. 6-3-3d Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Barcelone)	168
Fig. 6-3-3e Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à New York)	168
Fig. 6-3-3f Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Pékin)	168
Fig. 6-3-4 Exemple de calculer le nombre de changements d'ordre	171
Fig. 6-4-1 Occlusivité des modèles d'unité de quartier	175
Fig. 6-4-2a Modèle de l'unité 01 de Pékin	175
Fig. 6-4-2b Modèle de l'unité 01b de Pékin	175
Fig. 6-4-2c Modèle de l'unité 02 de Pékin	176
Fig. 6-4-2d Modèle de l'unité 03 de Pékin	176
Fig. 6-4-2e Modèle de l'unité 04 de Hong Kong	176
Fig. 6-4-2f Modèle de l'unité 04b de Hong Kong	176
Fig. 7-1-1 Position du quartier d'étude et paysages typiques du quartier	187
Fig. 7-1-2 Distribution des vitesses des vents aux différentes saisons	188
Fig. 7-1-3 Roses des vents pour les quatre saisons et pour l'année dans le district de Chaoyang	188
Fig. 7-1-4 Positions de géométrie dans le domaine de simulation avec différents angles d'incidence du vent	189
Fig. 7-1-5 Profils de vitesse du vent de périphérie à centre ville	190
Fig. 7-1-6 Occlusivité et densité de surface frontale des modèles de quartier Jinsong	192
Fig. 7-1-7a Modèles de quartier étendu original	192

Fig. A5-4 Modèle pour évaluer l'impact de la distance des bâtiments sur les vents au-dessus du toit en aval	268
Fig. A5-5 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes distances de séparation entre les deux bâtiments sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval	268
Fig. A5-6 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de simulation pour l'impact de D	269
Fig. A5-7 Modèle pour évaluer l'impact de la hauteur du bâtiment en amont sur les vents au-dessus du toit du bâtiment en aval	270
Fig. A5-8 Comparaison des valeurs du 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	270
Fig. A5-9 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de simulation pour l'impact de H	270
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	271
Fig. A5-11 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval	271
Fig. A5-12 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de la simulation pour l'impact de L	271
Fig. A5-13 Modèle pour évaluer l'impact de la déplacement de la tour en amont	272
Fig. A5-14 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes décalages du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval	272
Fig. A5-15 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de la simulation pour l'impact de D	272
Fig. A5-16 Modèle pour évaluer l'impact d'un bâtiment bas sur les vents au-dessus du toit d'une tour en aval	273
Fig. A5-17 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes positions d'un bâtiment bas sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval	273
Fig. A6-1a Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Paris)	274
Fig. A6-1b Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Toulouse)	274
Fig. A6-1c Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Bombay)	274
Fig. A6-1d Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Barcelone)	274
Fig. A6-1e Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à New York)	274
Fig. A6-1f Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Pékin)	275
Fig. A6-2a Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 01, Pékin)	276
Fig. A6-2b Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 01b, Pékin)	276
Fig. A6-2c Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 02, Pékin)	276
Fig. A6-2d Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 03, Pékin)	276
Fig. A6-2e Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 04, Hong Kong)	277
Fig. A6-2f Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 04b, Hong Kong)	277
Fig. A6-3a Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 01, Pékin)	277
Fig. A6-3b Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 01b, Pékin)	277
Fig. A6-3c Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 02, Pékin)	278
Fig. A6-3d Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 03, Pékin)	278
Fig. A6-3e Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 04, Hong Kong)	278
Fig. A6-3f Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 04b, Hong Kong)	278
Fig. A7-1 Simplification du modèle de quartier à Pékin	279
Fig. A7-2 Ecarts de l'indicateur M' entre les modèles du quartier à Pékin avant et après simplification	280

Table des tableaux

Tableau 1-1 Puissance éolienne cumulée dans le monde (en MW)	26
Tableau 1-2 Comparaison entre la production centralisée et décentralisée d'énergie.....	27
Tableau 1-3 Comparaison entre l'HAWT et la VAWT	28
Tableau 2-1 Classement des morphologies urbaines et faisabilité provisoire d'implanter des éoliennes	60
Tableau 2-2 Paramètres de correspondance entre l'environnement aéraulique et la forme urbaine.....	67
Tableau 2-3 Indicateurs de la morphologie bâtie et urbaine proposés pour la thèse	68
Tableau 2-5 Effets typiques du vent autour de bâtiments.....	76
Tableau 3-2 Résumé des caractéristiques des méthodes CFD et des flux correspondants	88
Tableau 3-3 Productions globales d'énergie éolienne des différents types de bâtiments en référence de la production par une éolienne indépendante de même hauteur	98
Tableau 3-4 Comparaison des ratios de concentrateur pour éoliennes dans différents environnements bâties avec un vent omnidirectionnel à 20 m avec une vitesse potentielle $U_p = 4,5$ m/s	98
Tableau 5-1 Comparaison des valeurs de l'indicateur F entre les différentes classes de vitesses	113
Tableau 5-2 Variations de vitesse du vent en fonction de paramètres du bâtiment	129
Tableau 5-3 Synthèse des paramètres morphologiques des bâtiments analysés et l'évaluation d'intérêt sur le potentiel éolien	142
Tableau 6-1 Les indicateurs de vent et les paramètres de morphologie urbaine correspondants	151
Tableau 6-2 Nombres de mailles et qualité du maillage des modèles de quartiers réels	162
Tableau 6-3 Description des indicateurs morphologiques des six quartiers	162
Tableau 6-4 Exemples de contours de vitesse de vent des modèles de quartier.....	165
Tableau 6-5 Valeurs minimale et maximale, Intervalle de variation moyen de chaque groupe de bâtiments, intervalle de variation moyenne totale et amplitude moyenne de variation du coefficient C_v pour les six quartiers	167
Tableau 6-6 Valeurs moyennes de l'indicateur M' à trois altitudes au-dessus du toit, amplitude moyenne des valeurs de M' , hauteurs des bâtiments les plus hauts dans le modèle et surface totale de toiture des modèles de quartier	170
Tableau 6-7 Valeurs moyennes de l'indicateur M' à $Z = 10$ m au-dessus des toits où les vents ont une vitesse plus élevée que la vitesse minimale exploitable du vent pour une éolienne (2 / 3 m/s), liste des hauteurs des bâtiments avec des vents exploitables et la surface totale de toiture des modèles de quartier.....	170
Tableau 6-8 Nombre de changements d'ordres entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs de performance du vent pour des modèles de quartiers	172
Tableau 6-9 Description des indicateurs morphologiques des modèles d'unité	174
Tableau 6-10 Exemples de contours de vitesse de vent des modèles d'unité	177
Tableau 6-11 Valeurs moyennes du coefficient C_v à trois altitudes d'évaluation, intervalle de variation du coefficient C_v à l'altitude $Z = 10$ m, amplitude moyenne de la variation du coefficient C_v et angles d'incidence favorables du vent pour les six modèles d'unité urbaine.	179
Tableau 6-12 Valeurs moyennes de l'indicateur M' à trois altitudes au-dessus du toit, amplitude moyenne des valeurs de M' , hauteurs des bâtiments les plus hauts dans le modèle et surface totale de toiture des modèles d'unité	180
Tableau 6-13 Nombres de changements d'ordre entre les indicateurs morphologiques et les indicateurs énergétiques éoliens pour des modèles d'unité urbaine.....	181
Tableau 7-1 Nombre de mailles et qualité de maillage des différents modèles du quartier Jinsong en changeant la position de la géométrie du quartier dans le domaine de simulation	190
Tableau 7-2 Description des paramètres morphologiques des modèles de quartier Jinsong.....	191
Tableau 7-3 Intensité de turbulence moyenne au-dessus des toits des tours les plus ventées.....	195
Tableau 7-4 Paramètres techniques des éoliennes adaptées aux vents faibles et turbulents.....	196

Tableau A1-1 Comparaison de trois sources d'énergie renouvelable principales.....	238
Tableau A1-2 Classement des éoliennes avec l'évaluation prévisionnelle de l'application en ville	240
Tableau A2-1 Résumé des indicateurs de la morphologie urbaine.....	251
Tableau A2-2 Formes urbaines adaptées aux différents types de climats	252
Tableau A3-1 Avantages et inconvénients du modèle $k - \varepsilon$ Standard	254
Tableau A4-1 Réglages des paramètres des trois modèles de référence pour étudier les paramètres.....	258
Tableau A4-2 Réglages des modèles et liste des erreurs relatives et absolues.....	259
Tableau A4-3 Modèles de différentes tailles de maillage	263
Tableau A5-1 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour les vents à l'arrière des bâtiments de différentes hauteurs.....	266
Tableau A5-2 Comparaison de la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre un certain niveau d'effet du vent par rapport à la hauteur du bâtiment.....	267
Tableau A7-1 Comparaison statistique des maillages entre le modèle original et le modèle simplifié	279
Tableau A7-2 Ecarts des résultats de simulation entre le modèle original et le modèle simplifié.....	280

Annexe

Annexe 1. Sur l'énergie éolienne urbaine

Annexe 1.1 Comparaison de trois sources d'énergie renouvelable

Tableau A1-1

Comparaison de trois sources d'énergie renouvelable principales (source : 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-bénéfique. --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 (p. ex., 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.

Annexe 1.2 Composants d'une éolienne

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. La [Fig. A1-1](#)⁶⁹ montre les composantes d'une petite éolienne à axe horizontal (HAWT) indépendante.

1) Le rotor

Pour une éolienne à axe horizontal, le rotor 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 (certains 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 la nacelle d'une VAWT se trouve souvent 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 Darrieus 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 surplus⁷⁰.

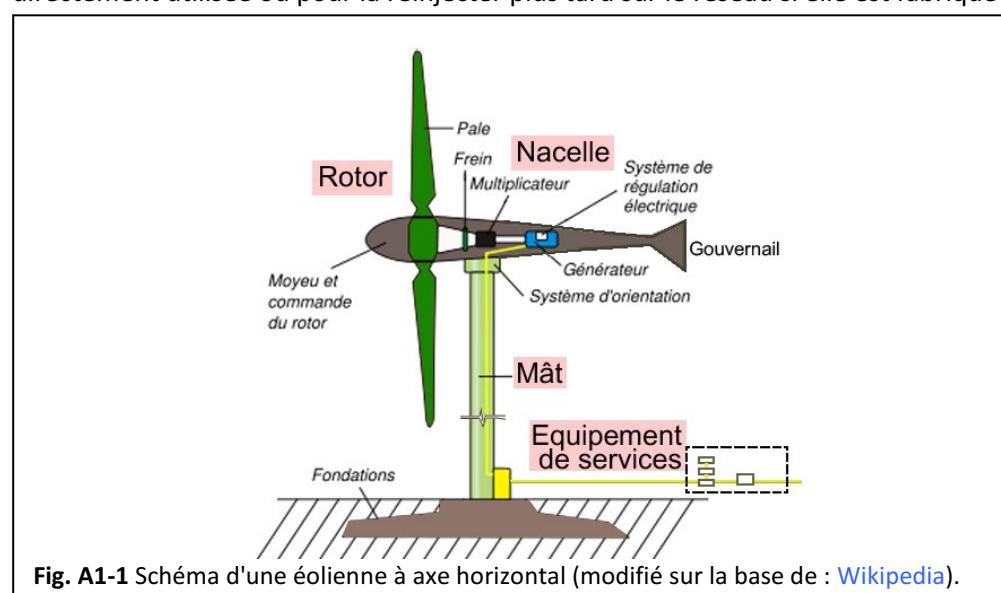


Fig. A1-1 Schéma d'une éolienne à axe horizontal (modifié sur la base de : [Wikipedia](#)).

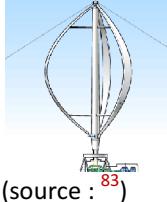
⁶⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>

⁷⁰ <http://www.info-eolien.com/energie-eolienne-composants.html>

Annexe 1.3 Classement des éoliennes

Tableau A1-2

Classement des éoliennes avec l'évaluation prévisionnelle de l'application en ville

Type d'éoliennes		Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple
Éolienne à axe horizontal	Mono-pale	Assez rare ⁷¹ car l'axe de rotation est déséquilibré et les vibrations du vent altèrent leur durée de vie ⁷² , plutôt moyennes ou grandes éoliennes comme les éoliennes pendulaires ⁷³ .	Non	 (source : ⁷⁴)
	Bipale	Normalement moins légère, moins chère, mais aussi moins équilibrée et moins de rendement que celle à 3 pales, technique compliquée, rare au marché ⁷⁵ .	Peu adaptée	 (source : ⁷⁶)
	Classique, tripale	La courante et le plus de retour d'expériences, technique simple, face au vent, besoin d'un gouvernail, bien équilibrée, bon rendement à partir d'un vent moyen, avec les pales profilées ⁷⁷ .	Neutre : Il faut bien choisir le type	 (source : ⁷⁸)
	Multi-pale	Plus équilibrée mais aussi plus lourd, 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 : ⁷⁹)
	A pales semi-coniques (Nheolis)	Sous le vent, calme, performante, robuste, pale unique profitante de l'effet de pincement qui accélère le fluide et augmente la pression sur l'autre pale. ⁸⁰	Adaptée	 (source : ⁸¹)
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. ⁸²	Adaptée à une hauteur importante	 (source : ⁸³)

⁷¹ <http://terminalf.scicog.fr/cfm/fich-1.php?IDChercher=7365&numtable=&NomBase=bd1 mdb>

⁷² <http://www.info-eolien.com/autres-eoliennes.html>

⁷³ <http://www.ades.tv/fr/produits/eolienne-pendulaire/id/24>

⁷⁴ <http://spmeoliennes.toile-libre.org/fonctionnement.html>

⁷⁵ http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower %20web/fr/tour/design/concepts.htm

⁷⁶ http://www.eoltec.com/Fr/scirocco_fr.htm

⁷⁷ http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower %20web/fr/tour/design/concepts.htm

⁷⁸ <http://www.helico-modelisme.com/eolienne.php>

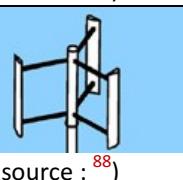
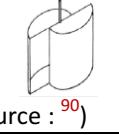
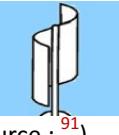
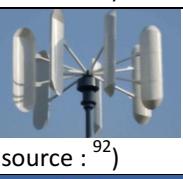
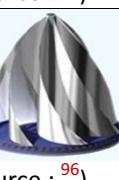
⁷⁹ <http://www.echolalie.org/wiki/index.php?ListedEoliennes>

⁸⁰ <http://www.nheolis.com/innovation-3-1.php?lang=fr>

⁸¹ <http://www.cleantechrepublic.com/2009/01/08/nheolis-leolienne-en-3d-pour-tous/>

⁸² http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

⁸³ <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power2.htm>

Type d'éoliennes	Caractéristiques principales	Application en ville	Exemple
Darrieus	Darrieus Hélicoïdale (Turby) Comme la Darrieus originale, mais intégrable au bâtiment grâce à sa plus petite taille et plus équilibrée sans haubanage, pouvant éviter les pulsations destructeur lors d'un orage. ⁸⁴	Proposée	 (source : ⁸⁵)
	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 : ⁸⁶)
	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 (p. ex., Cycloturbine). ⁸⁷	Adaptée	 (source : ⁸⁸)
Savonius rotor	Savonius originale Deux ou plusieurs godets demi cylindriques légèrement désaxés, génératrice pouvant être placée au sol, peu encombrante et peu bruyante, démarre dans un 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. ⁸⁹	Adaptée	 (source : ⁹⁰)  (source : ⁹¹)  (source : ⁹²)
	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 : ⁹³)
Maglev rotor	Environ 20 % de plus de rendement que la normale grâce à moins de friction ⁹⁴ , très calme, une vitesse minimale de démarrage comme 2,2 m/s ⁹⁵ , technologie applicable aux autres éoliennes à axe vertical.	Adaptée	 (source : ⁹⁶)

⁸⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

⁸⁵ <http://home-designswallpaper.blogspot.fr/2013/08/vertical-axis-wind-turbine-generator.html>

⁸⁶ <http://www.urbanwindenergy.org.uk/index.asp?PageID=84>

⁸⁷ <http://www.reuk.co.uk/Giromill-Darrieus-Wind-Turbines.htm>

⁸⁸ http://green-engineering.blogspot.fr/2008_05_01_archive.html

⁸⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Rotor_de_Savonius

⁹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Savonius_turbine.gif

⁹¹ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Savonius_turbine.gif

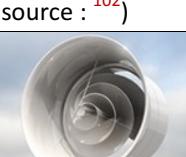
⁹² <http://home-designswallpaper.blogspot.fr/2013/08/vertical-axis-wind-turbine-generator.html>

⁹³ http://www.arkitekt0.net/P2_aeraulique.htm

⁹⁴ <http://www.treehugger.com/renewable-energy/chinese-maglev-wind-turbines-enter-mass-production.html>

⁹⁵ <http://www.greengeek.ca/magnetic-levitation-residential-wind-turbines/>

⁹⁶ <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. ⁹⁷	Adaptée	 (source : ⁹⁸)
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. ⁹⁹	Adaptée	 (source : ¹⁰⁰)
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 démarre dans un vent faible. ¹⁰¹	Adaptée à une famille	 (source : ¹⁰²)
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. ¹⁰³	Adaptée	 (source : ¹⁰⁴)
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). ¹⁰⁵	Adaptée	 (source : ¹⁰⁶)
Eolienne volante	Avec câble au lieu de mât, captante 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 ¹⁰⁷ , 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. ¹⁰⁸	Non	 (source : ¹⁰⁹)

⁹⁷ <http://energies-renouvelables.consoneo.com/actualite/2010-08-26/eolienne-elena/2559/>

⁹⁸ http://www.dta.be/detail_ps.asp?page=prod_0100_turbolienne&ls=fr

⁹⁹ <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/>

¹⁰⁰ <http://toutlesolaire.com/p/Eolienne---axe-horizontal-WindTronics-BTPS6500-2,2-kW--pour-reseau-/697.html>,

¹⁰¹ <http://www.home-energy.fr/>

¹⁰² <http://www.cleantechrepublic.com/2009/02/04/des-eoliennes-dans-le-vent/>

¹⁰³ <http://www.dearchimedes.nl/>

¹⁰⁴ <http://www.bpo.nl/en/portfolio/archimedes-turbine/>

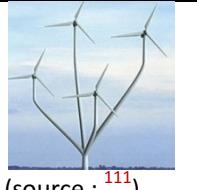
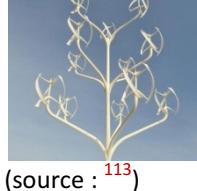
¹⁰⁵ <http://www.windenergysystemsllc.com/vortex-wind-funnel.aspx>

¹⁰⁶ <http://www.engineeringexchange.com/profile/JerryDesaulniers>

¹⁰⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_wind_turbine

¹⁰⁸ Eolienne volante, Le Journal de l'éolien, hors-série N° 11-2012. pp. 6.

¹⁰⁹ <http://images.scientencedaily.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 foncée extérieure, pouvant être construite indépendamment ou intégrée à un immeuble comme une cage d'escalier (Wang et al. 2014).	A développer	 (source : ¹¹⁰)
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 : ¹¹¹)  (source : ¹¹²)
	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 voisines, beaucoup de moyens pour l'intégrer, p. ex., 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 : ¹¹³)
	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 : ¹¹⁴)
Intégrée avec les autres fonctions	Avec panneaux solaires	Intégrée avec des panneaux solaires (p. ex., au poteau d'éclairage urbain) en profitant les avantages de ces deux sources naturelles.	Proposée : bien choisir le type	 (source : ¹¹⁵)

¹¹⁰ <http://quathomme.free.fr/energieencore/carnet14.htm>

¹¹¹ <http://www.ecogeek.org/wind-power/156>

¹¹² <http://wertel.blogspot.fr/2011/02/concurrent-cfd.html>

¹¹³ <http://www.gizmag.com/power-flowers-project-aims-to-bring-wind-turbines-closer-to-home/18049/>

¹¹⁴ <http://www.tjskl.org.cn/darrieus-turbines-images>

¹¹⁵ <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. ¹¹⁶	Proposée	 (source : ¹¹⁷)
Installée sur les constructions existantes	Adaptée aux milieux bâties (autour d'un immeuble, un pont, une tour de stockage d'eau, dans un tunnel, etc...). Il faut considérer avec soin la position d'installation, l'angle du vent d'entrée et le type d'éoliennes avec des structures accessoires qui pourraient optimiser l'effet de concentration du vent.		 (source : ¹¹⁸)
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.		 (source : ¹¹⁹)
		Proposée	 (source : ¹²⁰)

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, p. ex., l'intégration avec des différents types d'éolienne.

¹¹⁶ <http://www.eolewater.com/>

¹¹⁷ <http://www.eco-bio.info/ecobioinfo57.html>

¹¹⁸ <http://www.ubergizmo.com/2008/06/aerovironment-architectural-wind/>

¹¹⁹ <http://www.telovation.com/articles/turbine-skyscraper.html>

¹²⁰ <http://www.echolalie.org/wiki/index.php?ListedEoliennes>

Annexe 2. Sur la morphologie urbaine

Annexe 2.1 Notions voisines de morphologie urbaine

La morphologie urbaine utilise plusieurs termes que nous définissons 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 fournit 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 le lien entre les gens et les lieux, le mouvement et la forme urbaine, la nature et le tissu bâti¹²¹.

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 s'implanter 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. 2-1). Il s'agit d'une composition cohérente de la morphologie (espaces ouverts, bâtiments) et des fonctions (activités humaines) de quartier. Les quartiers présentent des motifs reconnaissables dans l'ordre des bâtiments, espaces et fonctions (ou thèmes), au sein desquels la variation a renforcé un ensemble de principes d'organisation. (Stephen Kendall¹²²)

7) Forme urbaine

Pierre Merlin définit la forme urbaine 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) le dispositif topologique : la distribution urbaine qui « cristallise un modèle idéologique de cité », b) la configuration géométrique : la conformation urbaine (axialités, tracés, etc...), qui régularisent et soutiennent l'implantation urbaine, c) l'expression physique : le tissu urbain, qui serait un système dont les éléments constitutifs sont le réseau viaire, le parcellaire, le bâti, l'espace ouvert et le climat du site (Merlin 1988, pp. 14-26).

¹²¹ <http://www.urbandesign.org>

¹²² Voir website: open-building.org/gloss/unb.html.

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. A2-1](#)). [Edussuriya \(2007\)](#) développe ses recherches sur la dispersion des polluants dans la rue avec une échelle de 200 m × 200 m. [C. Weber et al. \(2001\)](#) ont 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.

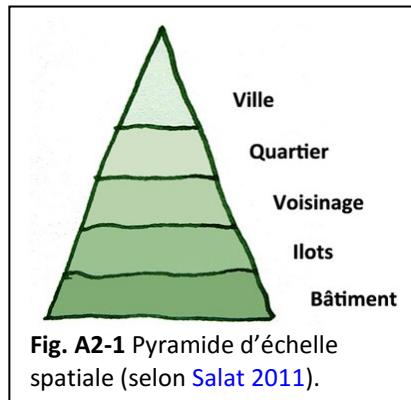


Fig. A2-1 Pyramide d'échelle spatiale (selon [Salat 2011](#)).

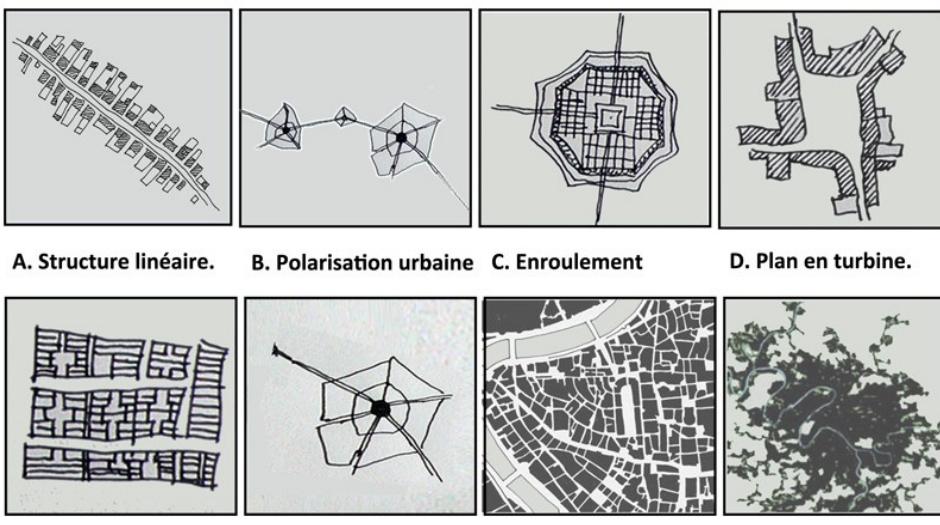
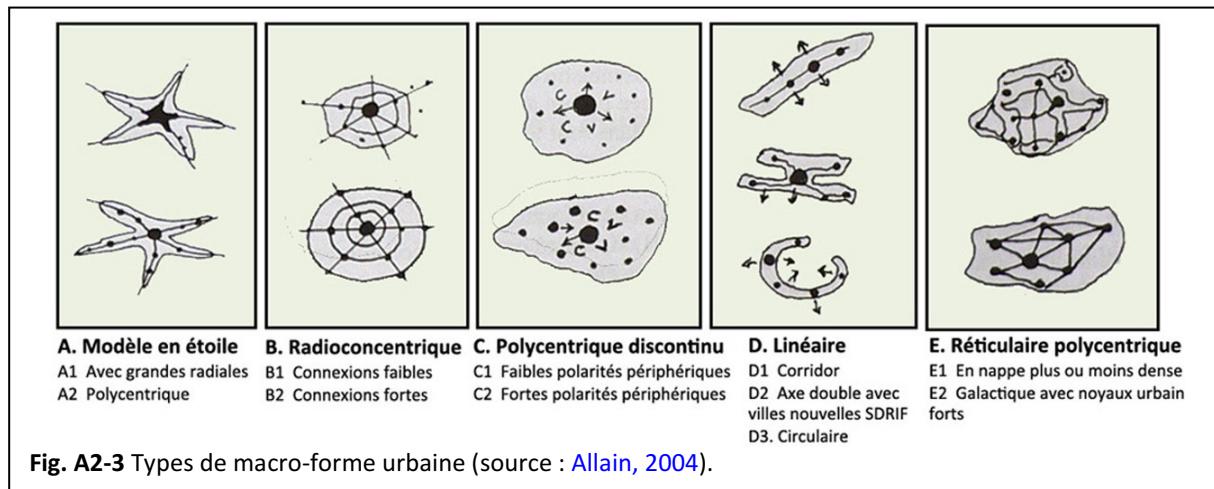


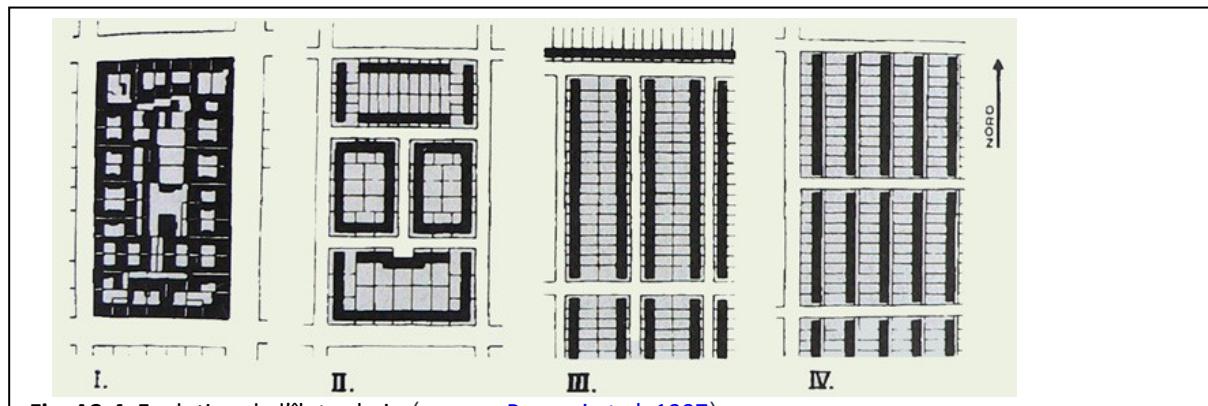
Fig. A2-2 Différentes formes urbaines (selon [Gauthiez 2003](#)).

Dans le livre « Espace urbain : vocabulaire et morphologie », on peut trouver des définitions de différentes formes urbaines ([Gauthiez 2003](#), pp. 198-202) ([Fig. A2-2](#)).

- Structure linéaire : unité de plan composée d'une fibre linéaire ([A](#)).
- Polarisation urbaine : structuration urbaine autour d'un ou plusieurs nœuds en 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, p. ex. 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 droits entre elles ([E](#)).
- Radio-concentrique ou plan en étoile : se dit d'une trace urbaine où les principales voies rayonnent d'un même point et sont reliées entre elles par des voies concentriques à ce point ([F](#)).
- Labyrinthe ou dédale : trace urbaine issue d'une planification ou non, aux parcours complexes et aux dispositions architecturales ne suivant aucun repère ([G](#)).
- Forme spontanée : se dit des agglomérations ou des tissus 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 façon pédagogique dans le contexte de la géographie, de l'aménagement et de l'architecture. Il a indiqué cinq types de macro-formes urbaines : modèle en étoile, radio-concentrique, polycentrique discontinu, linéaire et réticulaire polycentrique (Fig. A2-3). A l'échelle de quartier, il a aussi résumé cinq types de formes urbaines : 1) les plans quadrillés orthogonaux qui sont les plus nombreux, 2) les plans circulaires relativement rares, avec une préférence pour le cercle qui est le 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 dont 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, caractérisés par des formes fermées, par une organisation arborescente, par l'irrégularité et la sinuosité des rues et par la 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. A2-4 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. Il y a plusieurs définitions de la densité dans le cadre de l'urbanisme (Fig. A2-5). Parmi elles, 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'Ile de France. Dans ce cas, la densité est la densité nette (D), qui est égale à la surface de plancher bâti par la surface de l'îlot. De plus, le coefficient d'emprise au sol (CES) et la hauteur moyenne du bâti 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. A2-6](#)).

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. A2-5 Définitions de la densité (source: [IAURIF 2005](#)).

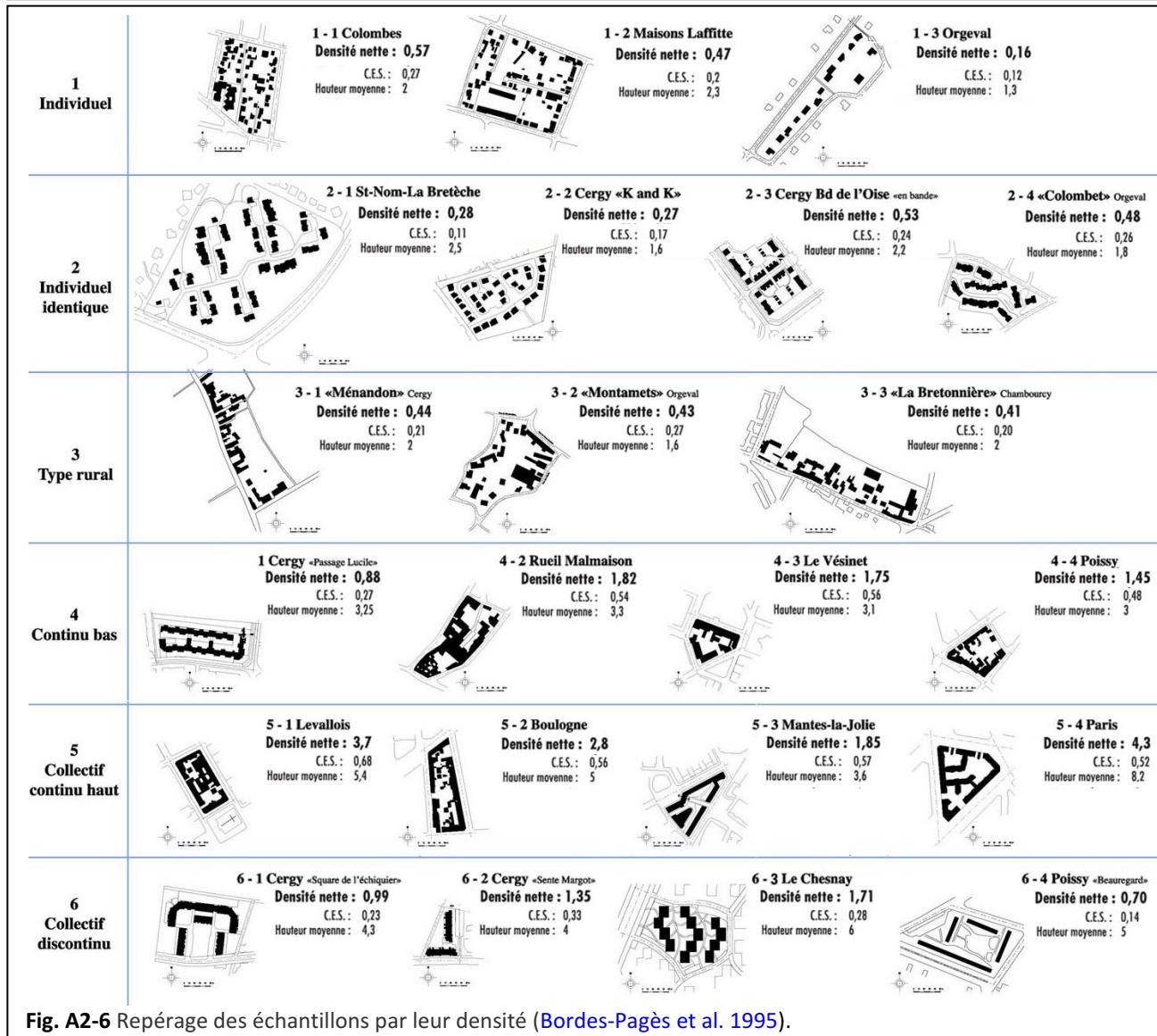
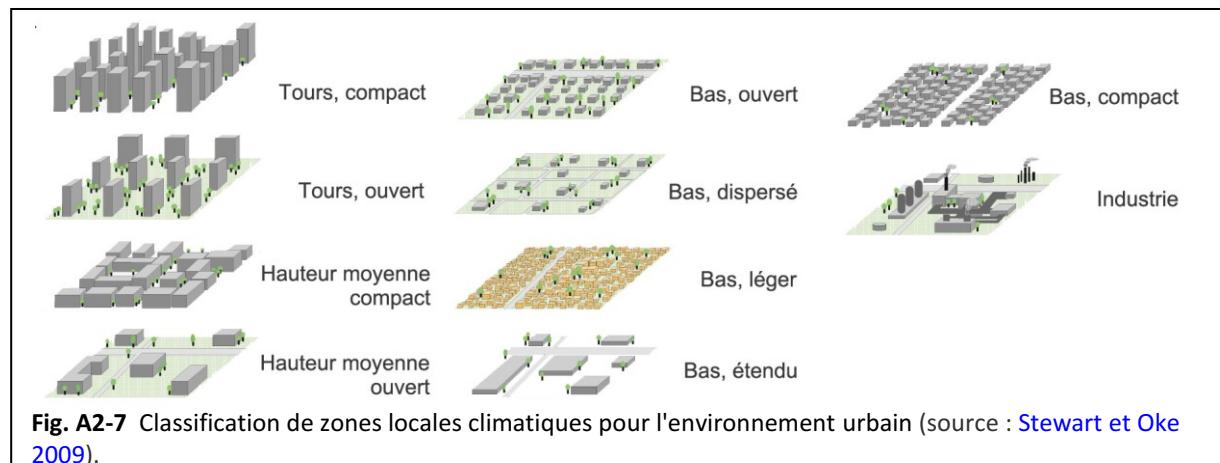


Fig. A2-6 Repérage des échantillons par leur densité ([Bordes-Pagès et al. 1995](#)).

Donc, au lieu de classifier les formes bâties uniquement par l'indicateur de densité, des recherches ([Stewart et Oke, 2009](#)) ont été faites pour classifier les formes urbaines par les hauteurs¹²³ ainsi que la densité de bâtiments comme dans la [Fig. A2-7](#). Pourtant, les auteurs bien que

¹²³ Selon les *Normes de base prévention incendie (AR 19/12/1997)*, on distingue : les bâtiments bas dont la hauteur $h < 10$ m, les bâtiments moyens avec $10 \text{ m} < h < 25$ m et les bâtiments hauts avec $h > 25$ m.

concentrés sur les formes différentes de bâtiments, rajoutent le critère de consommation d'énergie. C'est pourquoi ils ont défini des 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 il suit (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 aux 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 "mixte" qui rassemble plusieurs typologies d'habitat collectif et individuel, continu ou discontinu, au sein de la même opération,

4) Classements par la méthode diachronique

Dans la méthode diachronique, la morphologie urbaine est identifiée par les évolutions au fil du temps. Généralement, les quatre périodes sont relevées (Rochel 2007) :

- au Moyen-Age : compacte, dense, fine (petite taille), hauteur moyenne (12~15 m), grande rugosité, peu d'espaces ouverts étendus avec des rues souvent étroites et peu d'ordre, caractère distinctif,
- entre le XVIII^e et le XIX^e siècle : compacte, dense, hauteur moyenne (12~20 m), avec des rues structurées et plutôt rectilignes, un peu plus grandes qu'au moyen âge et avec des trames géométriques, caractère lisible,
- après la deuxième guerre : grande taille (grand bâtiment, grand espace ouvert, grande rue), résidences collectives ou tours de bureaux, formes très structurées et géométriques, urbanisme destiné à l'image, fonctionnelle et efficace, caractère peu lisible,
- contemporaine : formes variées, denses mais dispersés, hauteurs grandes ou moyennes (20-50 m), structurées, ordonnées et dessinées avec humanité, caractère lisible.

5) Classements selon la culture et la région

On peut aussi identifier les formes urbaines selon les catégories de culture et selon la région du 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 autours des points de convergence,
- ville européenne : densité du bâti élevée, compacté 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, places principales bordées d'arcades, monuments, dualité récente marquée de verticalisation des centres, également périphérique et forts contrastes entre de riches « communautés » et des bidonvilles,
- ville africaine : pré-coloniales et même pré-islamiques, souvent polynucléaires, basses, faites d'argile, sans monuments, ports développés, centre d'origine coloniale autours par des lotissements en mosaïque,
- ville asiatique : basse, quadrillé et faible espace public, villes politiques avec des caractéristiques socialistes marqués par des larges avenues de parades, des places immenses et des 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 2.3 Résumé des indicateurs de la morphologie urbaine

Tableau A2-1

Résumé des indicateurs de la morphologie urbaine (source : [Edussuriya et al. 2011](#))

Affect variables	Independent variables	
	Development factors	Built form factors
1 Regional factors	1 Land coverage/utilisation	1 Street and building dimensions
- 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)	- Plot ratio, packing ratio (Theurer, 1999) - Mineralisation factor/percentage of impervious surface (Cionco and Ellefsen, 1998; Adolphe, 2001)	- 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	2 Land-use intensity	2 Canyon/building orientation
- 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	- 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)	- Wind angle to longer-street axis of buildings (Golany 1996; Cionco and Ellefsen, 1998; Theurer, 1999; Santamouris, 2000)
3 Site composition/locality factors	3 Roughness related intensity	
- Population density quotient - Urban land-use - Traffic load - Location	- 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 2.4 Formes urbaines adaptées aux différents types de climats

Tableau A2-2

Formes urbaines adaptées aux différents types de climats (source : [Golany 1996](#))

Type de climat	Profil principal	Type de forme urbaine proposée	Pour l'éolienne
<i>Chaud-humide</i> (p. ex. zone équatoriale)	<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</i> (p. ex. sud Canada)	<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</i> (p. ex. Moyen-Orient et Afrique du Nord)	<ul style="list-style-type: none"> ● Fort rayonnement solaire ● Grande amplitude de température entre le jour et la nuit ● Tempêtes et pluies torrentielles ● Nuages bas ● Déshydratation intense ● Salinisation élevée ● Evaporation supérieure aux précipitations. 	<i>Forme compacte</i>	Adapté
<i>Froid-sec</i> (plaines intérieures)	<ul style="list-style-type: none"> ● Stressant ● Inconfortable ● Fort vent froid et sec 	<i>Forme compacte, forme en cluster</i>	Adapté
<i>Côtes</i> (d'une rivière, d'un désert)	<ul style="list-style-type: none"> ● Venteux et orageux ● Brise systématique ● Humidité élevée ● Erosif 	<ul style="list-style-type: none"> ● Pour les régions humides : forme moyenne dispersée ● Pour les régions sèches : ouvert à la mer, forme compacte et protégée vers intérieur 	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 3.1 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 écoulements cisaillés, des écoulements séparés, ou des turbulences en décomposition ([Frei 2013](#)).

2a) Modèle $k - \varepsilon$ Standard

Initialement proposé par [Harlow et Nakayama \(1968\)](#), ce modèle $k - \varepsilon$ 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 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 déformation moyenne est la même dans toutes les directions. La relation peut être décrite (pour un écoulement incompressible) comme suit :

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{Equation A3-1})$$

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 :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}) \quad (\text{Equation A3-2})$$

ε est le taux de dissipation de l'énergie cinétique k , donné par :

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i \partial u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{Equation A3-3})$$

Dans le modèle $k - \varepsilon$ standard, l'énergie cinétique (k) et le taux de dissipation de la turbulence (ε) sont décrits comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Equation A3-4})$$

et a

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{Equation A3-5})$$

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 $G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho P r_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$,

g_i est la composante du vecteur gravitationnel dans la i ème direction,

$P r_t$ est le nombre de Prandtl (par défaut $P r_t = 0,85$),

Y_M représente la dilatation produite par la fluctuation de la turbulence compressible pour un taux de dissipation global. Elle est définie 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 A3-1** ci-dessous :

Tableau A3-1

Avantages et inconvénients du modèle $k - \varepsilon$ Standard

Avantages	Inconvénients
<p>1) Relativement simples à mettre en œuvre ; 2) Conduisant à des calculs stables qui convergent relativement facilement ; 3) Prévisions raisonnables pour de nombreux écoulement.</p>	<p>1) Valable uniquement pour le écoulement turbulent ; 2) Mauvaises prévisions pour les cas suivants : -- Tourbillonnement et écoulement tournant ; -- Écoulement avec forte séparation ; -- Jets axisymétriques ; -- Certains écoulement non confinés ; -- Écoulement entièrement développés dans des conduits non-circulaires. 3) Nécessite la mise en œuvre de la loi de paroi (Wall Function) ; 4) Modifications pour le écoulement avec des lignes de courant à forte courbure ; 5) La turbulence produite par des écoulements très tendus est surestimée.</p>

Pour l'écoulement 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 ;
- Écoulement transitoires et écoulement séparé ;
- Transfert de chaleur et masse proches de la paroi ;
- Écoulement dépendant du temps avec des mouvements à grande échelle (structures cohérentes)

Selon les 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 écoulement au-dessus du toit d'un cube (maquette d'étude, 6 m d'arrêté) 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 forts 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'ils s'appuient sur le calcul de l'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 : $\nu_t = \frac{k}{\omega}$ où ν_t 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. Les taux de propagation des écoulements de cisaillement libre sont en accord étroit avec les mesures pour les sillage lointains, les couches de mélange et les jets plans, ronds et radiaux. Donc il est applicable aux écoulements limités par des parois et des écoulements 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 loin des parois. Il permet donc d'éviter le problème commun du modèle $k - \omega$: un modèle trop sensible aux propriétés turbulentes dans le champ lointain. Ce modèle 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 écoulements complexes.

Néanmoins, la fidélité des prédictions de ce modèle est encore limitée par les hypothèses de complétude utilisées pour modéliser différents termes (p. ex., 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 écoulement correspondant à une anisotropie des contraintes de Reynolds, par exemple, des écoulement cycloniques, des écoulements 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 3.2 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 :

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{\rho U^*} \quad (\text{Equation A3 - 6})$$

où y^+ représente la distance de paroi non-dimensionnelle pour un écoulement de paroi délimitée. L'écoulement de Couche Limite Atmosphérique (ABL) sur un terrain rugueux est considéré comme un écoulement entièrement rugueux, qui doit satisfaire à la condition $30 < y^+ < 500 \sim 1000$ pour arriver un écoulement 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 :

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_f \frac{1}{2} \rho U_\infty^2}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_f}{2}} U_\infty \quad (\text{Equation A3 - 7})$$

où τ_w est la contrainte de cisaillement à la paroi,

U_∞ est la vitesse loin de la paroi,

C_f est le coefficient de frottement. Pour le écoulement externe, 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 :

$$Re = \frac{\rho U_\infty L_{BL}}{\mu} \quad (\text{Equation A3 - 8})$$

où L_{BL} représente 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 (voir Fig. 2-4-1) $Z_g = 550$ m et la vitesse du vent libre $U_\infty = U_g = 10$ m/s, avec les Equations A3-6, A3-7, A3-8 et la condition $30 < y^+ < 500 \sim 1000$, on trouve :

$$0,0032 \text{ m} < D_{ter} < 0,054 \sim 0,11 \text{ m}$$

De 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 4.1 Etude 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 changé quand des autres paramètres interviennent. En fait la meilleure valeur d'un nouveau paramètre est souvent renouvelée. Un jugement raisonnable provisoire peut éviter certaines grandes erreurs, mais est toujours limité. De nombreux essais ont été faits et trois modèles de références ont été gardés pour montrer la trace complète de cette recherche. Les données du modèle de référence en soufflerie sont toujours la référence. Le **Tableau A4-1** montre les valeurs des trois modèles de référence (A, B et C), alors que le **Tableau A4-2** montre des comparaisons des erreurs entre les autres modèles et ces trois modèles de référence. Pour économiser l'espace et concentrer les informations essentielles, les paramètres en étude sont marqués dans la liste pour chaque modèle et les autres paramètres avec de même valeurs que le modèle de référence sont négligés. Dans le tableau les modèles de référence sont marqués par un fond foncé et les meilleures modèles sont marqués en rouge.

Pour les résultats des comparaison, les conclusions suivantes peuvent être proposées.

1) Pour le domaine à l'échelle d'un rayon de 200 m peut être un meilleur choix, tandis que l'augmenter à 250 m ou 300 m ne modifie pas beaucoup l'erreur.

2) Pour le maillage :

- parmi différentes épaisseurs d'inflation de la première couche pour la construction ($T_b = 0,06$ m - 0,1 m), plus petite est la taille meilleur est le résultat. Cependant, avec l'examen du nombre de cellule de maillage (Q) une valeur équilibrée comme $T_b = 0,08$ m est choisi ;
- il n'y a pas de nombre optimal 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 : $N = 10$;
- parmi les différentes premières épaisseurs de couche d'inflation du sol ($T_g = 0,2m - 0,5 m$), 0,5 m semble le meilleur choix ;
- parmi les différents taux de transit d'inflation du sol ($rg = 1,1 - 1,15$), 1,13 a la meilleure performance ;
- 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 ;
- pour l'option de contrôle général du maillage, le centre moyen de pertinence (Relevance Centre , RC) et un niveau bas de lisse 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 ont peu d'influence sur le résultat final. Toutefois, une plus grande C_s semble produire un meilleur résultat et quand $K_s > 0,1$ m le résultat semble fixe. Nous prenons donc un $K_s = 1m$ 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 de nombreuses critiques.

En outre, pour les détails des comparaisons parmi les différents choix de valeur (ou mode) d'un paramètre, la **Fig. A4-1** montre la cohérence des différents modèles de turbulence aux résultats d'expérimentation. Le modèle k- ϵ Standard (ligne verte) apparaît comme le meilleur modèle. Par contre, dans la **Fig. A4-2** où les modèles de différentes tailles du domaine sont comparés, il est vraiment difficile de juger lequel est le meilleur 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 A4-1

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, Lisse : medium ($Q=1,84 \times 10^4$), $K_s=1$ m, $C_s=0,99$, $l=10$ %, $L=1$ m, k- ϵ réalisable, 2 précision, Schème: Simple, Discréétisation : 2 order (pressure), Quick (momentum m, k, e)	0,270	37	0,099	64
B	L=1,25 m, N=10, $T_g=0,5$ m, $r_g=1,13$, $r_b=1,25$, Lisse : bas ($Q=1,146 \times 10^4$)	0,252	39	0,082	68
C	L=1,25 m, N=10, $T_g=0,5$ m, $r_g=1,13$, $r_b=1,25$, Lisse : bas ($Q=1,146 \times 10^4$), k- ϵ Standard	0,253	46	0,072	70

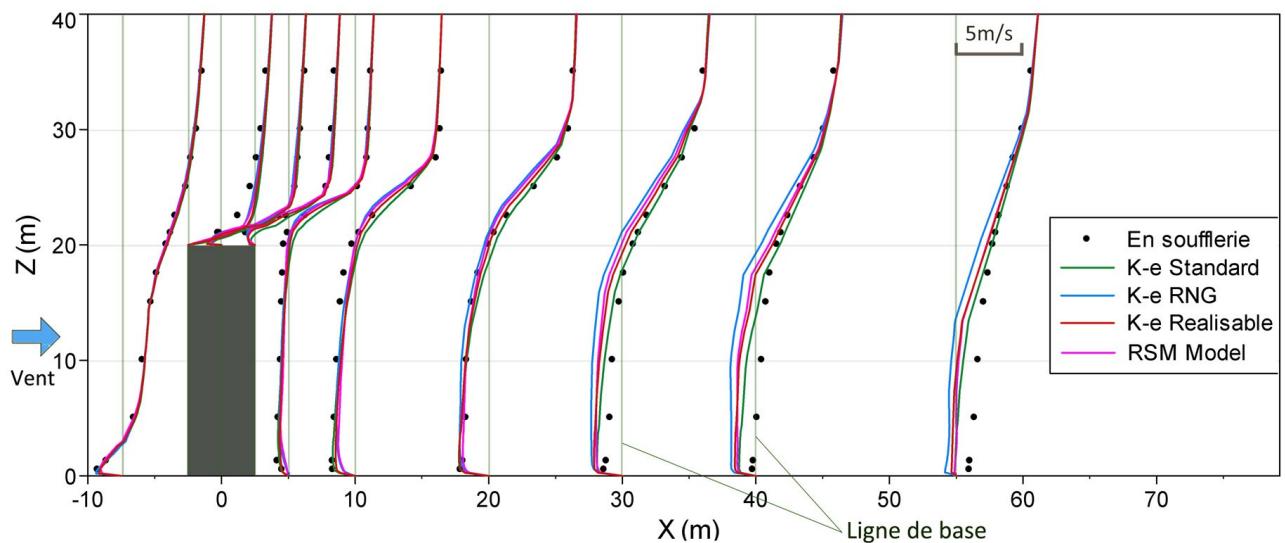


Fig. A4-1 Comparaison de la cohérence des différents modèles de turbulence avec l'expérience en soufflerie.

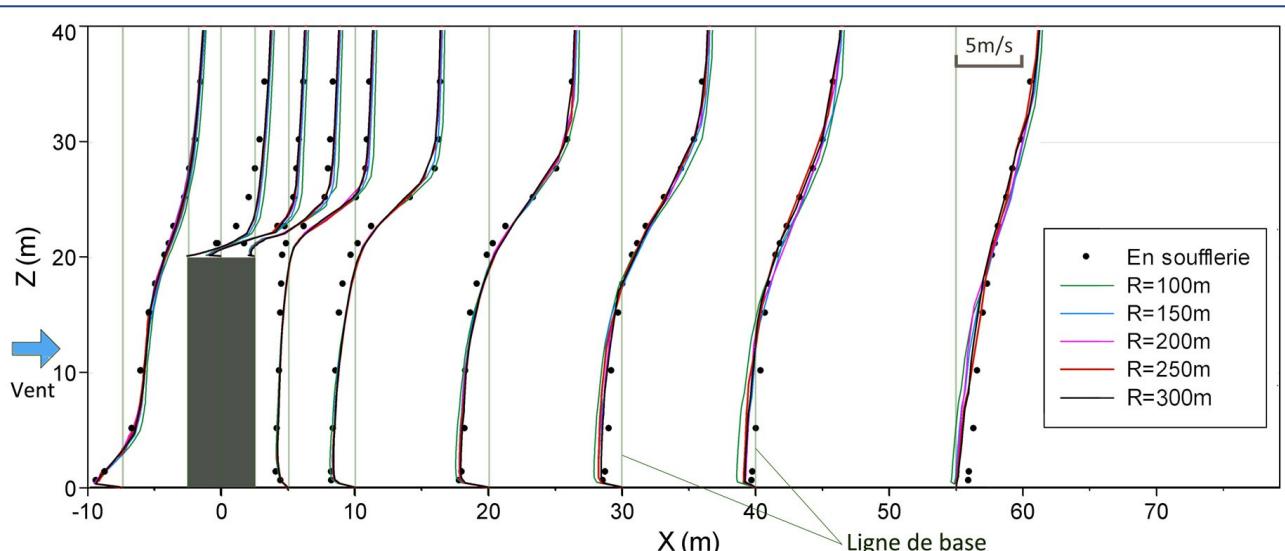


Fig. A4-1 Comparaison de la cohérence des différentes tailles de domaine avec l'expérience en soufflerie.

Tableau A4-2

Régagements des modèles et liste d'erreurs relatives et absolues

Rubrique	Modèle	Paramètre	Erreurs horizontale		Erreurs 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 =0,2 m (Q=1,87×10 ⁴)	0,277	37	0,106	63
	A3b	T _g =0,4 m (Q=1,81×10 ⁴)	0,270	39	0,098	67
	A4a	T _b =0,1 m (Q=1,78×10 ⁴)	0,277	38	0,111	57
	A4b	T _b =0,06 m (Q=1,91×10 ⁴)	0,267	37	0,098	62
	A5a	L=0,6 m (Q=2,26×10 ⁴)	0,263	39	0,095	66
	A5b	L=1 m (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	Lisse: haut (Q=1,836×10 ⁴)	0,267	37	0,103	68
	A7b	Lisse: bas (Q=1,834×10 ⁴)	0,268	40	0,096	64
Condition de la couche limite	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
	A	K _s =1 m, C _s =0,99	0,270	37	0,099	64
	Aa	K _s =0 m	0,286	37	0,104	60
Modèle de turbulence et de la solution	Ab	K _s =0,1 m	0,271	37	0,100	63
	Ac	K _s =0,5 m	0,270	37	0,099	64
	Ad	K _s =0,8 m	0,270	37	0,099	63
	Ae	K _s =1,2 m	0,270	37	0,099	64
	Af	K _s =1,5 m	0,270	37	0,099	64
	Ag	C _s =0,5	0,273	36	0,100	62
	A	k-ε réalisable, Quick (momentum m, k, e)	0,270	37	0,099	64
Taille du domaine	A1	Discrétisation 2 order (momentum 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
	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 la première 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 (Blocken *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. A4-3).

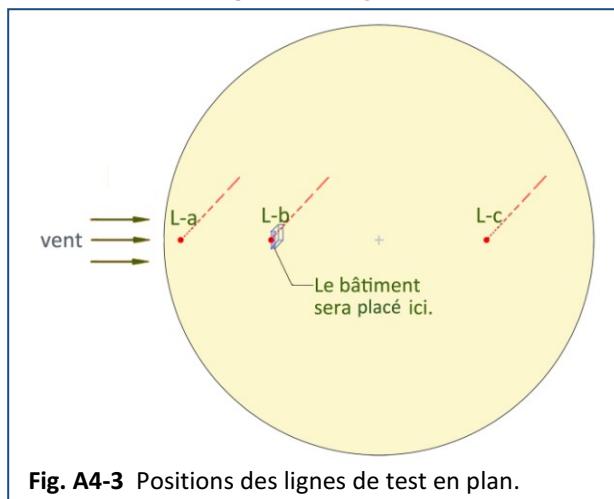


Fig. A4-3 Positions des lignes de test en plan.

Les résultats de la simulation CFD montrent que les trois lignes se sont conformes généralement au profil puissance théorique (condition initiale), et la ligne la plus proche de l'entrée est la plus conforme (Fig. A4-4). 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. A4-5). 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.

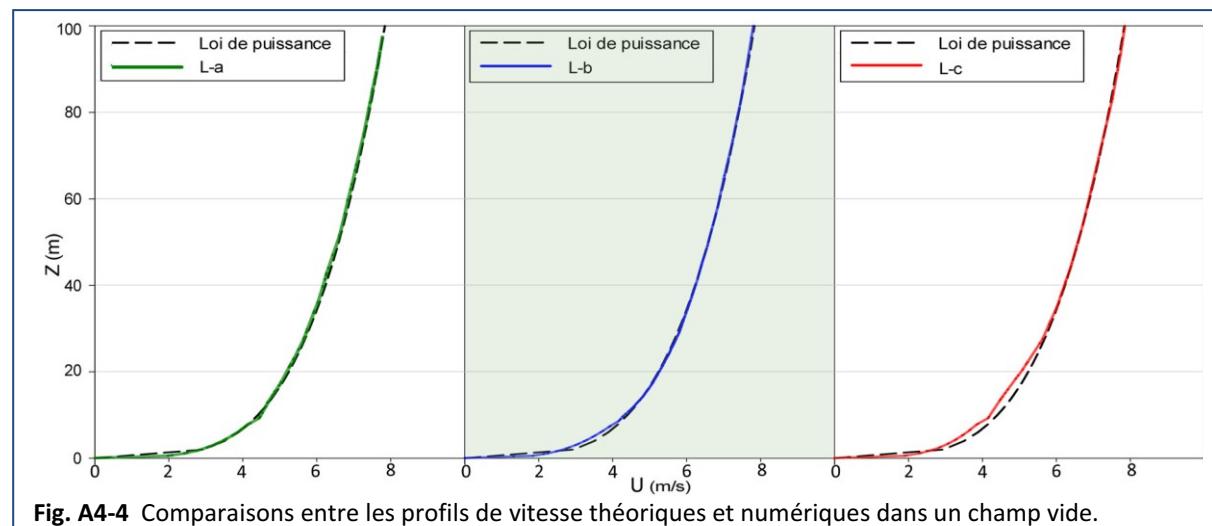


Fig. A4-4 Comparaisons entre les profils de vitesse théoriques et numériques dans un champ vide.

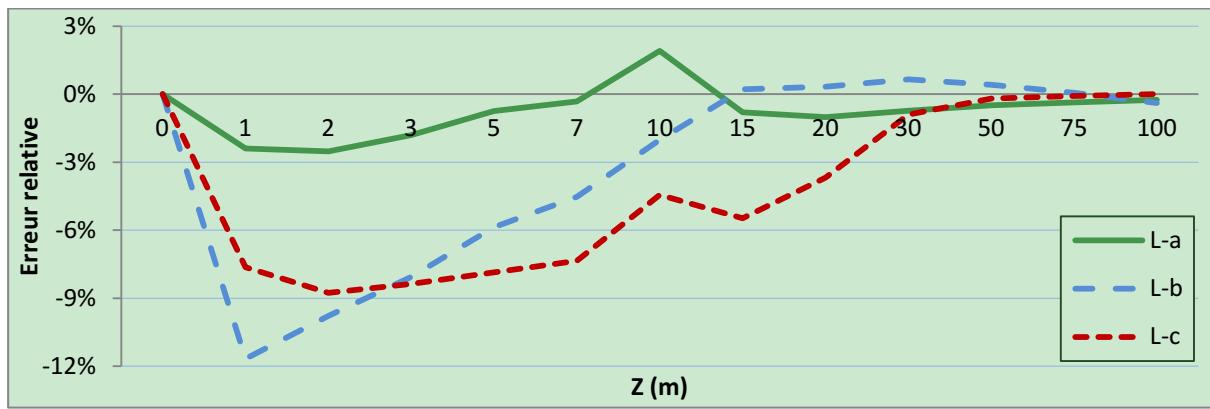


Fig. A4-5 Erreurs relatives entre les profils de vitesse théoriques et numériques.

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 pour éviter trop de temps de calcul, ni trop petite en limitant le développement de la turbulence et en nuisant à la précision du calcul. Ici nous prenons l'exemple d'un couple de barres perpendiculaires ($W \times L \times H$ ¹²⁴ = 6 m × 15 m × 10 m) 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. A4-6). L'énergie éolienne sur les toits des bâtiments est évaluée par l'indicateur M , qui est expliqué dans le [Chapitre 5.1](#). La description détaillée de la simulation du modèle de deux barres perpendiculaires symétriques est donnée dans le [Chapitre 5.3.4](#). Pour tester la sensibilité de la taille du domaine, nous appliquons différents angles d'incidence du vent en 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).

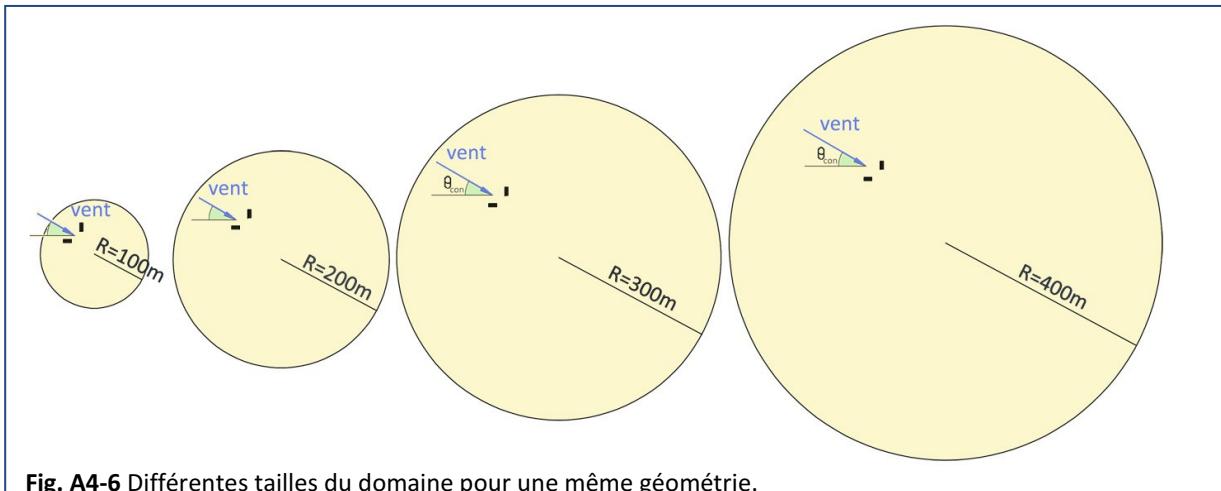


Fig. A4-6 Différentes tailles du domaine pour une même géométrie.

Dans la Fig. A4-7, 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 du 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 2 % de différence sur M entre cette échelle et l'échelle $R = 400$ m. Il faut remarquer 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.

¹²⁴ Largeur (W) × Longueur (L) × Hauteur (H), ci-après le même.

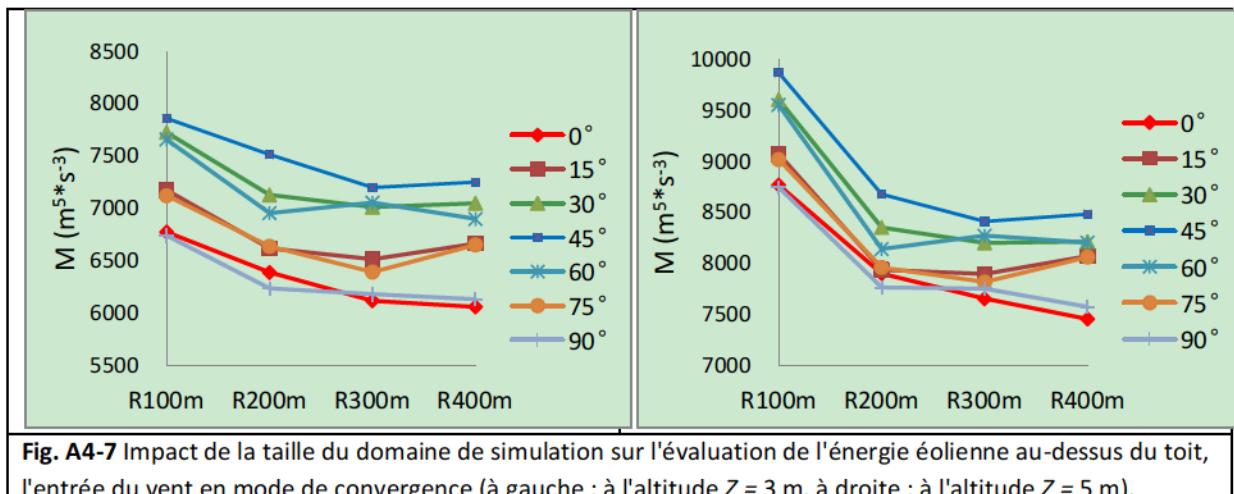


Fig. A4-7 Impact de la taille du domaine de simulation sur l'évaluation de l'énergie éolienne au-dessus du toit, l'entrée du vent en mode de convergence (à gauche : à l'altitude $Z = 3$ m, à droite : à l'altitude $Z = 5$ m).

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. A4-8). Les informations sur les maillages et les temps de calcul correspondant (dépend de la puissance de l'ordinateur utilisé¹²⁵) sont données dans le Tableau A4-3. On voit que le temps de calcul pour un certain nombre d'itérations semble être en relation linéaire avec le nombre d'éléments du maillage. En outre, un maillage plus fin a besoin généralement de plus nombreuses d'itérations pour obtenir la convergence. Celà rend donc le temps de calcul total beaucoup plus important.

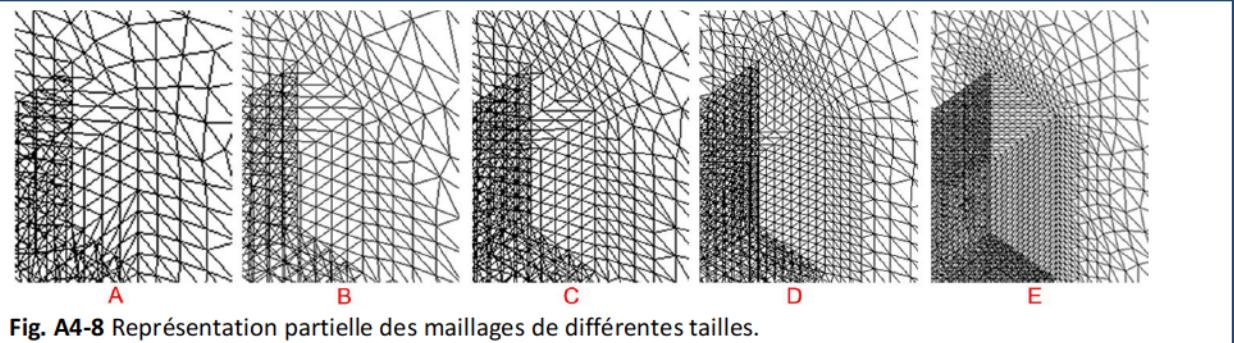


Fig. A4-8 Représentation partielle des maillages de différentes tailles.

Tableau A4-3

Modèles de différentes tailles de maillage

Modèle	A	B	C	D	E
Taille du maillage des cotés de bâtiment	$L = 2\text{m}$	$L = 1,5\text{ m}$	$L = 1,25\text{ m}$	$L = 0,8\text{m}$	$L = 0,5\text{ m}$
Taille maximale du maillage du domaine	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m
Nombre d'éléments du 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

¹²⁵ 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. A4-9 montre les changements de vitesses 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 du vent 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 soufflerie, nous ne pouvons pas juger quelle taille de maillage est la plus adaptée à la réalité.

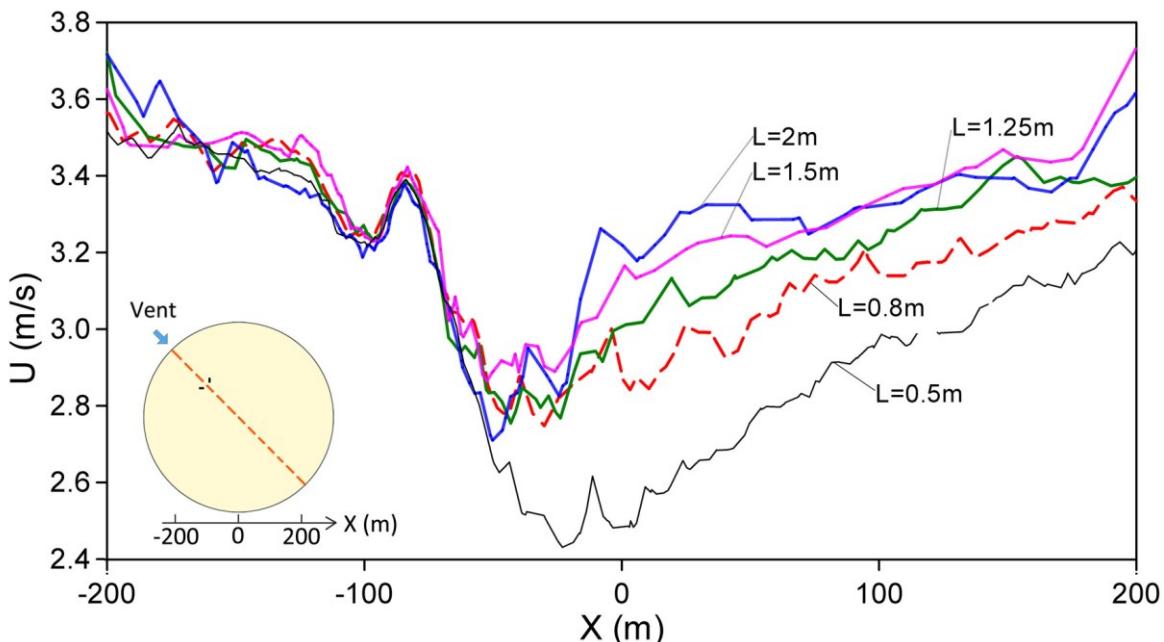


Fig. A4-9 Changement de la vitesse du vent à la ligne centrale à l'altitude $Z = 15$ m.

Pourtant, les résultats d'évaluation du potentiel éolien sur le toit sont convaincants. La Fig. 4-10a 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. A4-10b). 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 l'erreur moyenne est de 4,0 % et pour le modèle D l'erreur 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.

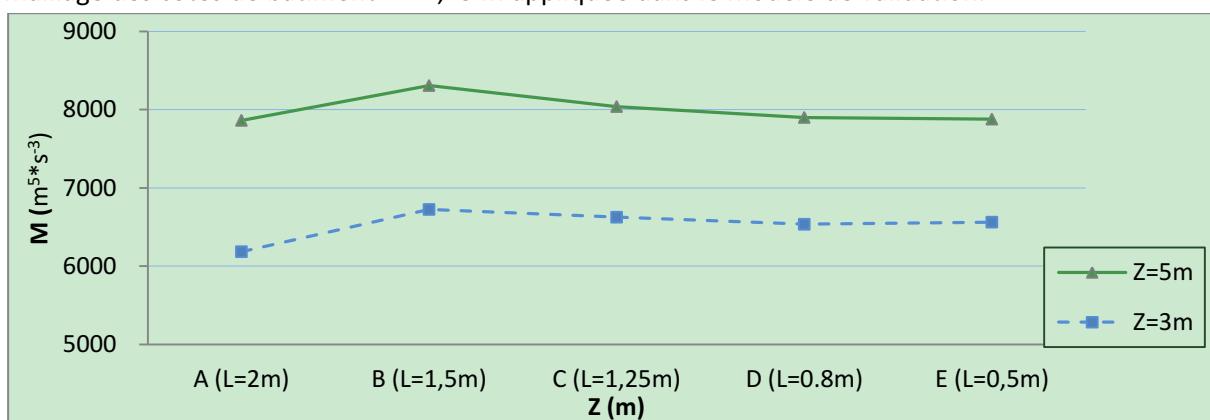


Fig. A4-10a Potentiel éolien au-dessus du toit des modèles avec différentes tailles de maillages.

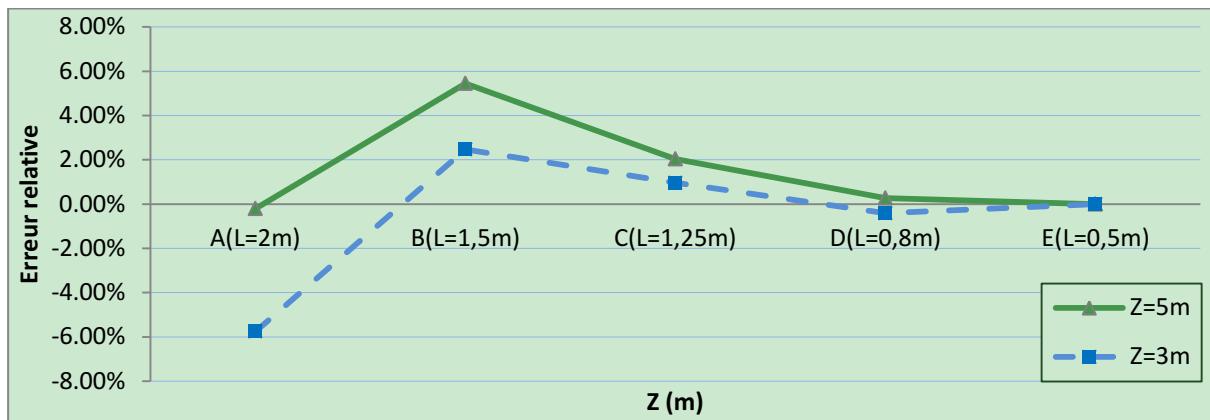


Fig. A4-10b Erreurs relatives des comparaisons entre les modèles avec différentes tailles de maillages (modèle E choisi comme la référence).

Annexe 4.2.4 Eviter des erreurs fortuites

Une autre partie du travail qui vise à vérifier la pertinence de la simulation CFD, est d'évaluer la stabilité et le sens des résultats trouvés en évitant les erreurs fortuites, p. ex., ceux causées par l'incertitude de la convergence et les mauvaises manipulations. En général, des simulations répétées avec des petites modifications 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), ont une erreur relative inférieur 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 \times largeur = 30 m \times 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 vent 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).

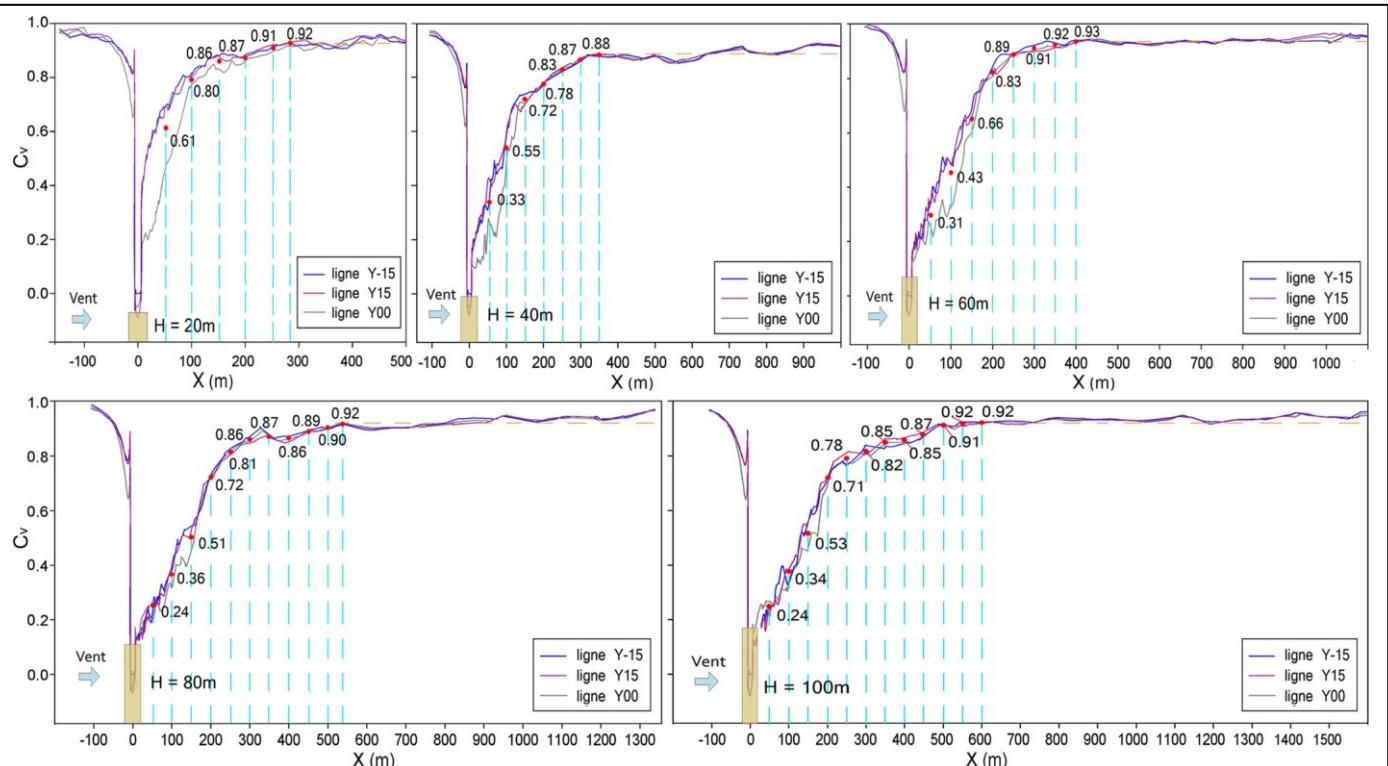
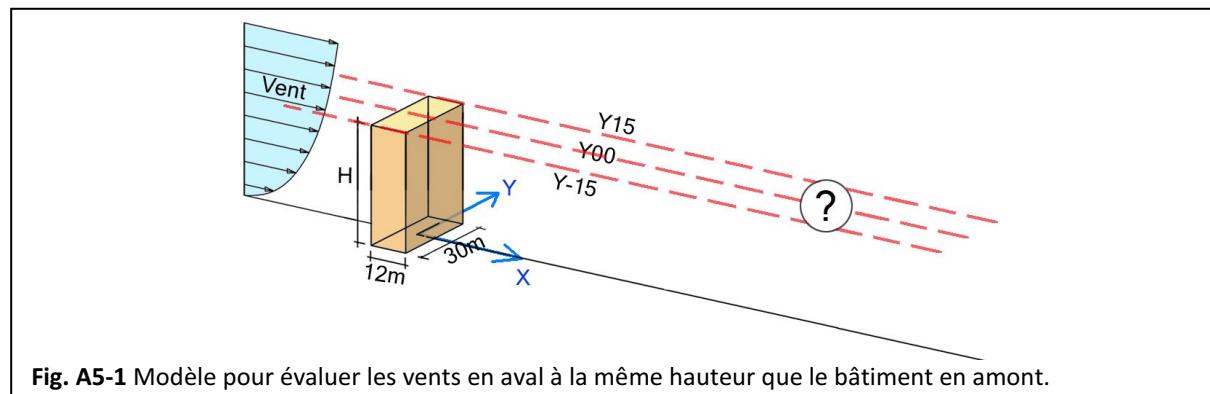


Fig. A5-2 Valeurs du coefficient C_v pour des vents en aval à la même hauteur que le bâtiment en amont.

Tableau A5-1

Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour 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 un certain niveau d'effet du vent par rapport à la hauteur du bâtiment.

	$H = 20 \text{ m}$	$H = 30 \text{ m}$	$H = 40 \text{ m}$	$H = 50 \text{ m}$	$H = 60 \text{ m}$	$H = 80 \text{ m}$	$H = 100 \text{ m}$
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 pour différentes distances à l'arrière du bâtiment jusqu'à une valeur stable (Fig. A5-1). Les valeurs sont résumées dans le Tableau A5-1. Par rapport à certaines valeurs du coefficient, la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre ces niveaux est ainsi présentée pour différents modèles (Tableau A5-2). Les conclusions suivantes peuvent être apportées :

- 1) Une valeur d'environ 0,92 sur le coefficient C_v correspond à l'apparition de conditions stables pour la 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 haut.
- 3) Si on définit un taux λ , rapport de la distance à l'arrière du bâtiment pour atteindre le vent stable (D_{stable}), divisée par la hauteur du bâtiment, soit $\lambda = D_{stable}/H$, ce coefficient diminue avec l'augmentation de H . En fait, on peut chercher une fonction de H pour le décrire :

$$\lambda_{stable} = \frac{84}{H^{0,6}} \quad (\text{Equation A5 - 1})$$

Alors,

$$D_{stable} = \frac{84}{H^{0,6}} H \quad (\text{Equation A5 - 2})$$

La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-1 et ceux de la simulation dans le Tableau A5-2 est présentée dans la Fig. A5-3.

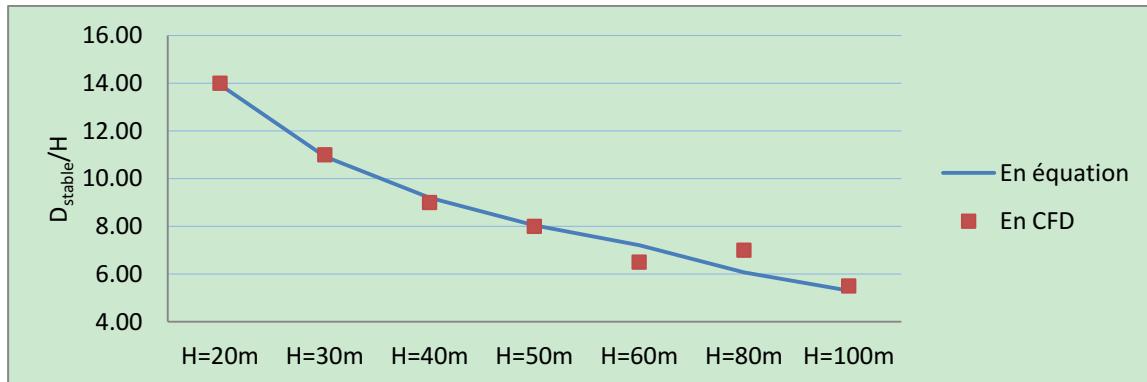


Fig. A5-3 Cohérence du λ_{stable} entre les résultats théoriques et ceux de simulation pour l'impact de H (à $Z = 10 \text{ m}$).

Annexe 5.2 Impacts morphologiques sur les vents au-dessus du toit d'une grande tour

Dans cette partie, plusieurs géométries simples avec différentes tailles devant une tour de taille longueur \times largeur \times hauteur = 30 m \times 12 m \times 80 m sont simulées. 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 de même taille que celle en aval est considérée ici. Plusieurs distances entre les deux tours dans la direction du vent sont considérées ($D = 30 / 50 / 80 / 160 / 240 / 480 / 640$ m) (Fig. A5-4).

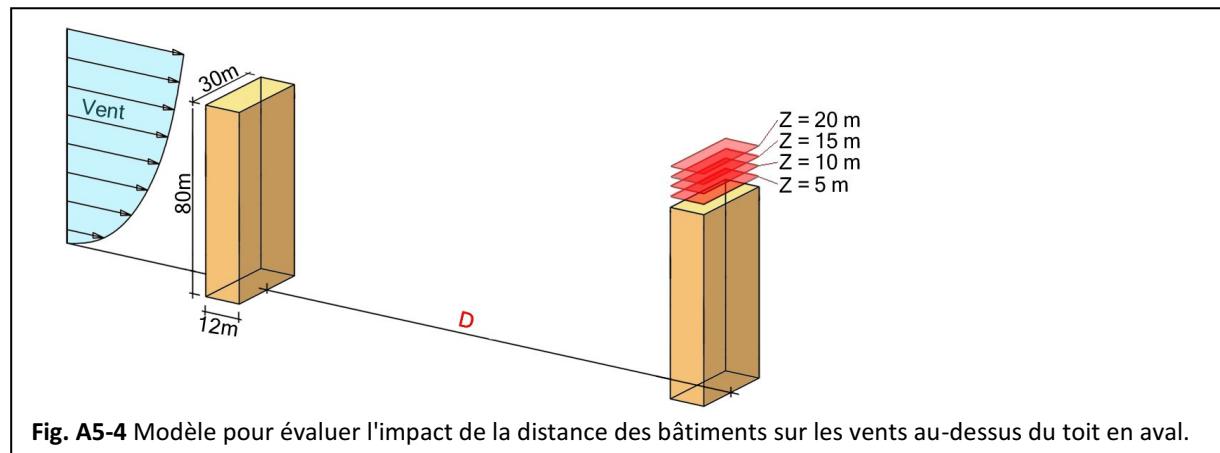


Fig. A5-4 Modèle pour évaluer l'impact de la distance des bâtiments sur les vents au-dessus du toit en aval.

Les résultats sur l'augmentation de la vitesse du vent sont comparés entre 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 diminue d'abord et augmente après. Vers une distance de 160 m, le C_v a une valeur minimale, c'est-à-dire une distance de 2H. Entre le modèle $D = 640$ m et le modèle de référence ($D = \infty$), la variation des valeurs du C_v est environ 10 %. On peut donc dire, à partir d'une distance de 8H, pour deux tours de même hauteur 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.
- 2) Comparé au modèle de référence, les modèles avec une distance assez importante ($D > 320$ m), correspondant à quatre fois la hauteur de la tour en amont (H), ont des valeurs du coefficient C_v plus élevées.
- 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.

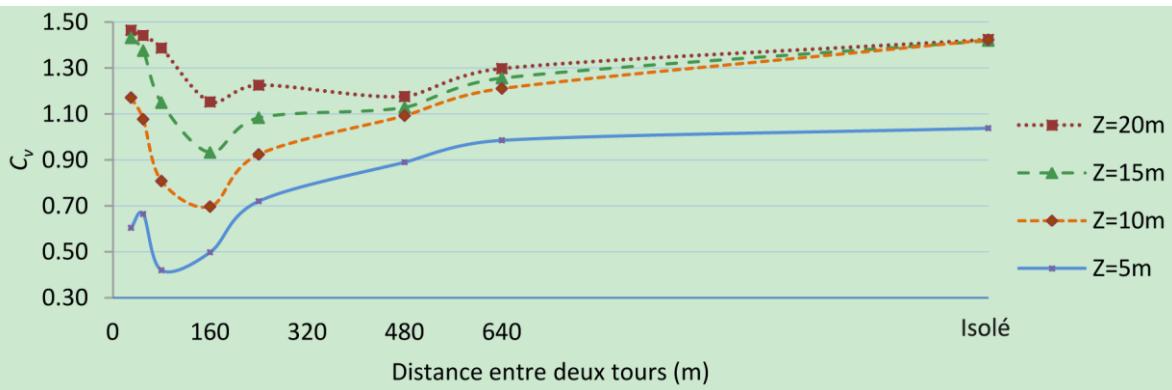


Fig. A5-5 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes distances de séparation entre les deux bâtiments sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Si on cherche la relation entre la valeur du coefficient C_v et la distance entre les deux tours D , une fonction peut être trouvée :

$$\begin{cases} C_{v(D)} = 1,31 \cos\left[\frac{(DH_0+20560)}{10400}\right] + 1,97, & D < 3H_0 \\ C_{v(D)} = 9 * 10^{-6}(DH_0 - 19200) + 0,92, & D \geq 3H_0 \end{cases} \quad (\text{Equation A5-3})$$

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 A5-3](#) et ceux de la simulation dans la [Fig. A5-5](#) est présentée dans la [Fig. A5-6](#).

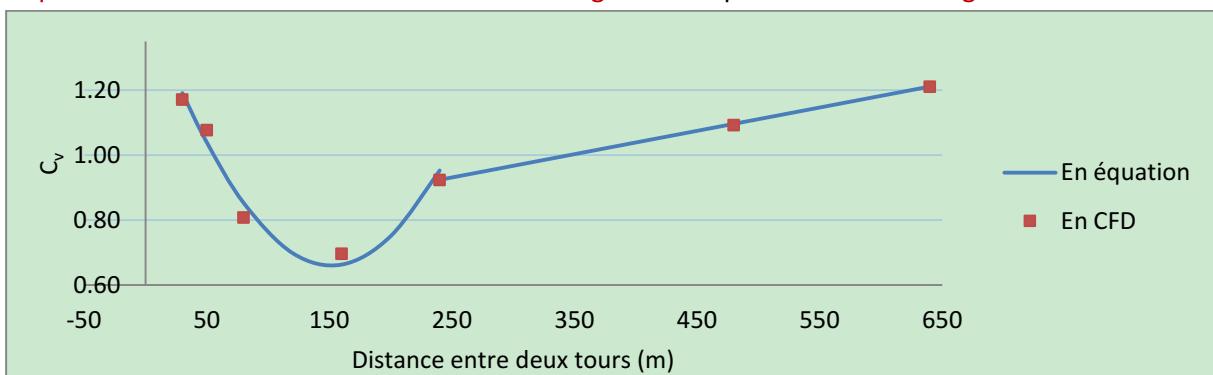
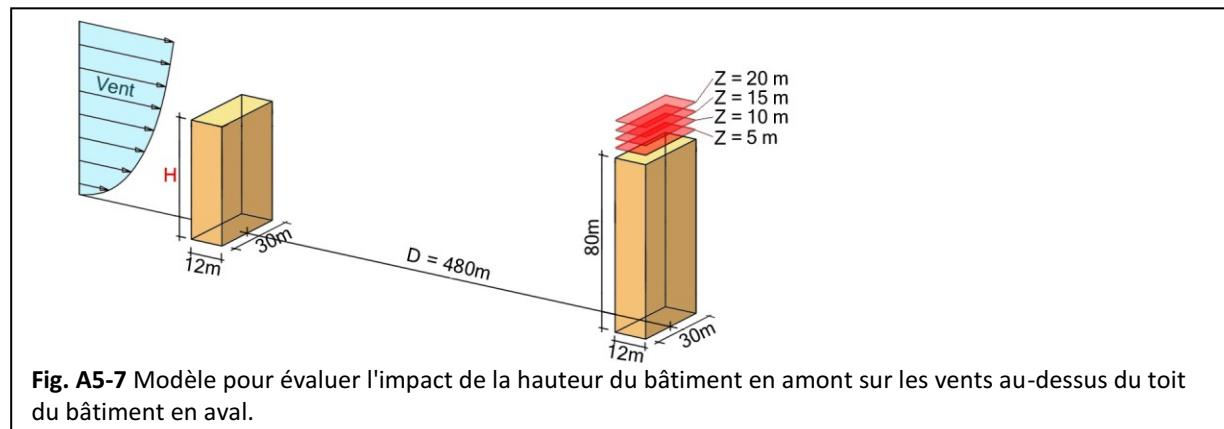


Fig. A5-6 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de simulation pour l'impact de D (à $Z = 10$ m).

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 ($D = 480$ m) avec la tour en arrière. Plusieurs hauteurs du bâtiment en amont ($H = 20$ m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 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). Les conclusions 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 ($Z > 10$ m).
- 2) La diminution de la valeur du coefficient C_v s'arrête lorsque la hauteur du bâtiment en amont atteint une certaine valeur (ici $H = 90$ m).

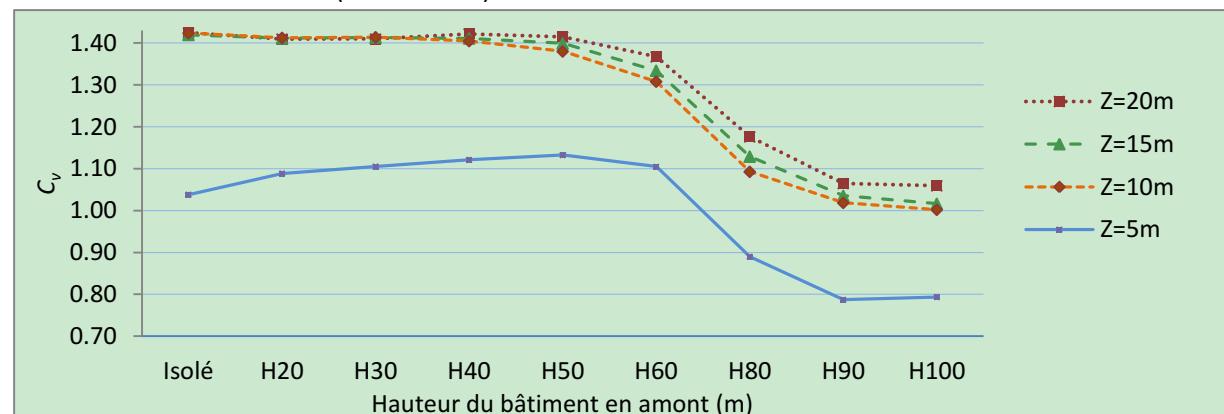


Fig. A5-8 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes hauteurs du bâtiment en amont sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Si on cherche la relation entre la valeur du coefficient C_v avec la hauteur du bâtiment en amont H , une fonction peut être déterminée :

$$C_v(H) = 1,3 \cos \left[\frac{(HH_0 - 2400)}{6440} \right] + 0,1 \quad (\text{Equation A5 - 4})$$

où H_0 est la hauteur de la tour d'étude. La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-4 et ceux de la simulation dans la Fig. A5-8 est présentée dans la Fig. A5-9.

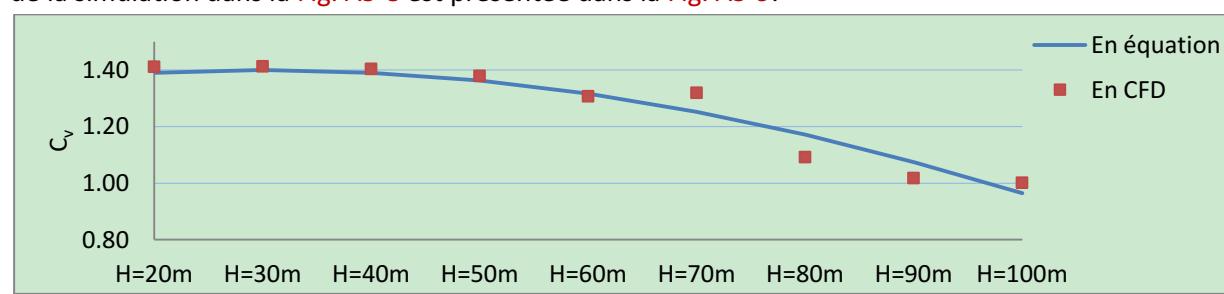
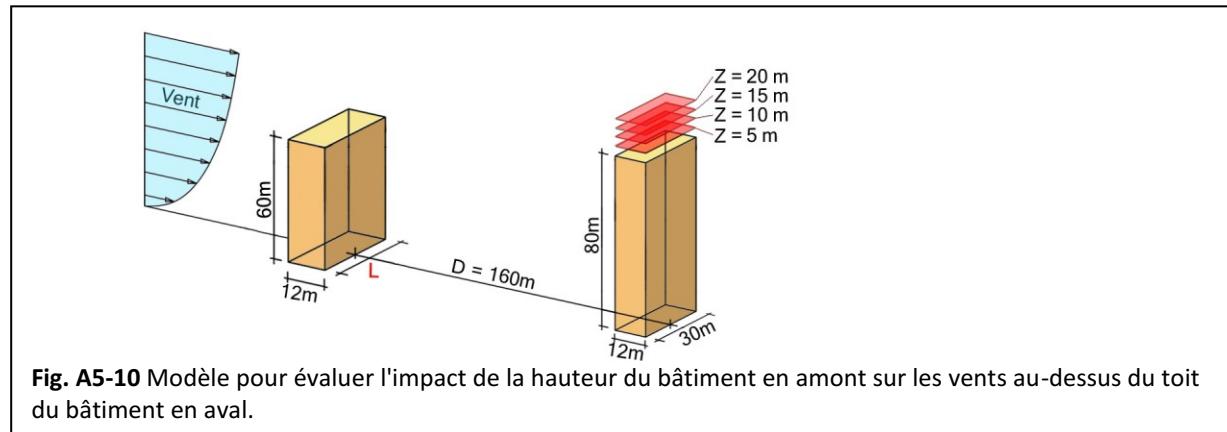


Fig. A5-9 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de la simulation pour l'impact de H (à $Z = 10$ m).

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).



Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés entre les différents modèles (Fig. A5-11). Les conclusions 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, quelque soit sa longueur, ralentit les vents au-dessus du toit de la tour en aval, à une altitude élevée.

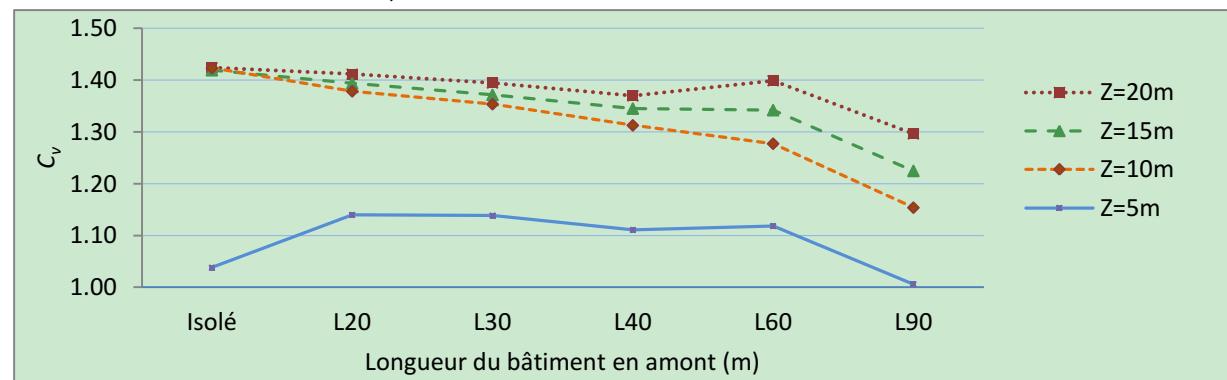


Fig. A5-11 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes longueurs du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

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 :

$$C_{v(L)} = \cos\left(\frac{L L_0}{3600}\right) + 0,4 \quad (\text{Equation A5 - 5})$$

où L_0 est la hauteur de la tour d'étude, $L_0 = 30 \text{ m}$. La cohérence entre les résultats de l'Equation A5-5 et ceux de la simulation dans la Fig. A5-11 est présentée dans la Fig. A5-12.

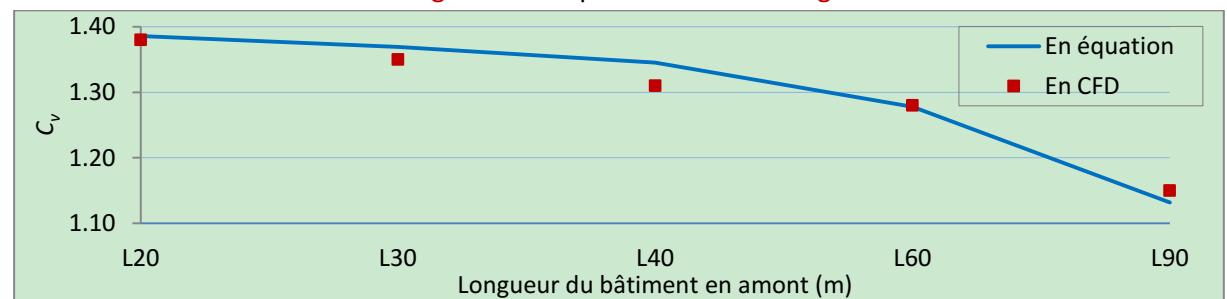
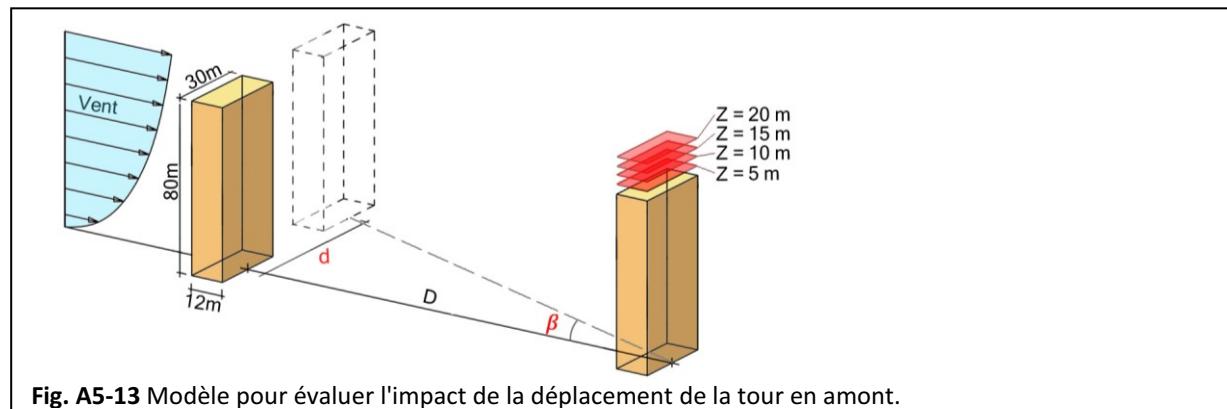


Fig. A5-12 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de la simulation pour l'impact de L (à $Z = 10 \text{ m}$).

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 ($d = 15 \text{ m}, 30 \text{ m}, 60 \text{ m}, 90 \text{ m}, 120 \text{ m} \text{ et } 180 \text{ m}$) et plusieurs distances de séparation entre les deux tours ($D = 160 \text{ m}, 320 \text{ m} \text{ et } 640 \text{ m}$) sont considérées (Fig. A5-13).



Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés entre les modèles avec différentes distances entre bâtiment bas et la tour en amont et le modèle de référence sans le bâtiment bas (Fig. A5-14). Les conclusions suivantes peuvent être apportées :

1) Pour les trois groupes de modèles (D160, D320 et D640), la valeur du coefficient C_v augmente généralement avec le décalage jusqu'à une distance de 60 m. Puis elle se 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 (dans la direction du vent) de la tour en amont.

2) A partir d'un décalage de 60 m, lorsque l'écoulement se stabilise, les valeurs du coefficient C_v se stabilisent à une valeur de 1,4 à plusieurs altitudes au dessus du toit.

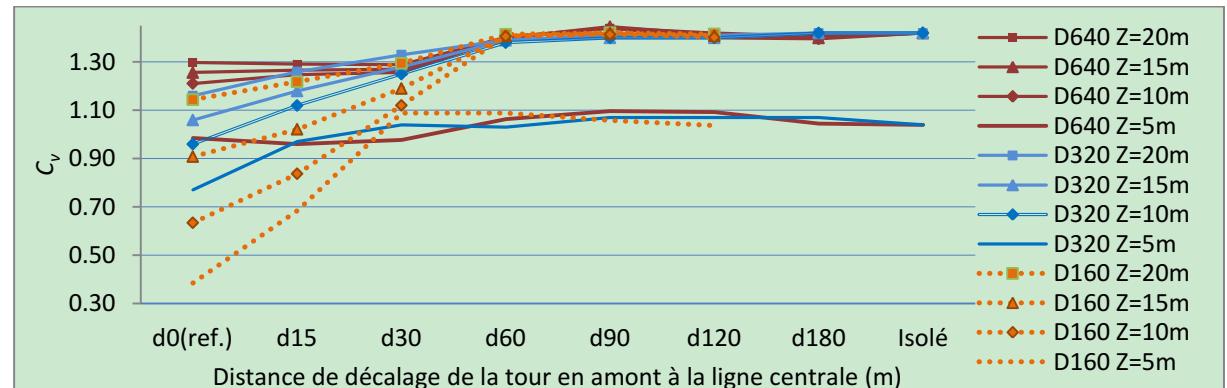


Fig. A5-14 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différents décalages du bâtiment en aval sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

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 :

$$C_{v(d)} = 1,8\cos\left(\frac{\beta-28}{39}\right) - 0,34 \quad (\text{Equation A5 - 6})$$

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 A5-6 et ceux de la simulation est présentée dans la Fig. A5-15.

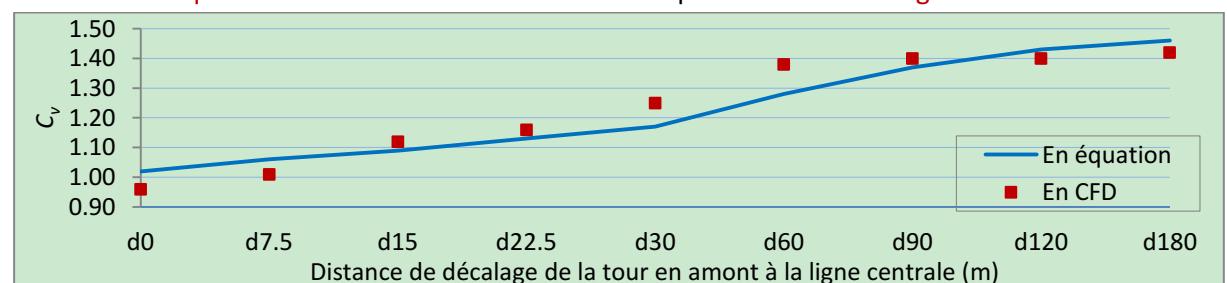
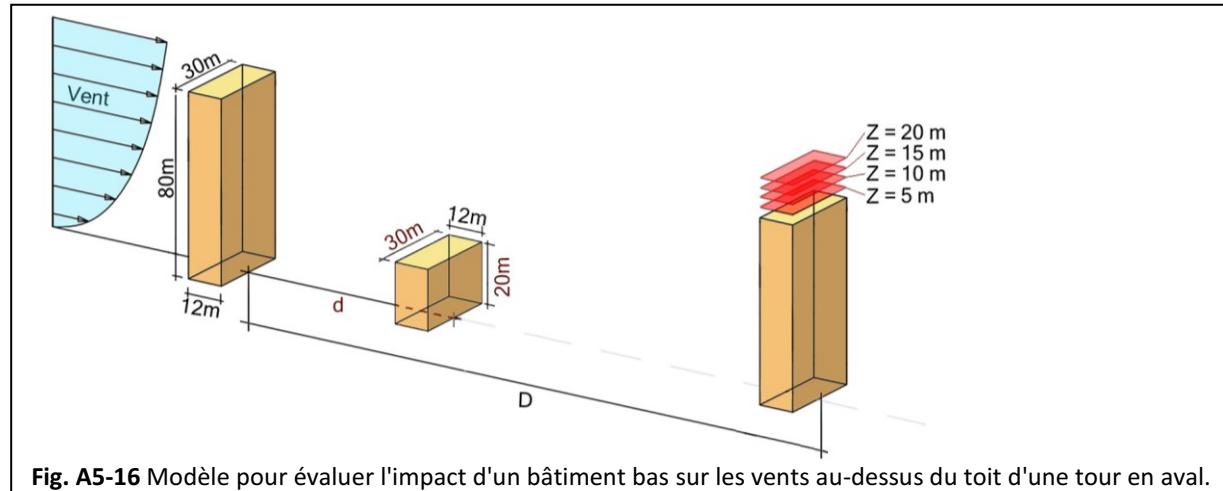


Fig. A5-15 Cohérence du C_v entre les résultats théoriques et ceux de la simulation pour l'impact de D (à $Z = 10 \text{ m}$).

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 \times largeur \times hauteur = 30 m \times 12 m \times 20 m) qui 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).



Les résultats sur le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent sont comparés entre les modèles avec différentes distances du bâtiment bas à la tour en amont et le modèle de référence sans le bâtiment bas (Fig. A5-17). Les conclusions suivantes peuvent être apportées :

1) La valeur du coefficient C_v présente une faible variation entre les modèles avec différentes positions du bâtiments bas pour les trois distances de séparation entre les tours. Pour le groupe de D640 m, le taux de variation moyen (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 modèle de référence sont toujours la plus faibles parmi celles des modèles avec 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 avec positions du bâtiment bas entre les tours (d_{30} , d_{80}) ont une valeur du coefficient C_v un peu plus élevée que ceux de positions avant la première tour (d_{-30} , d_{-80}).

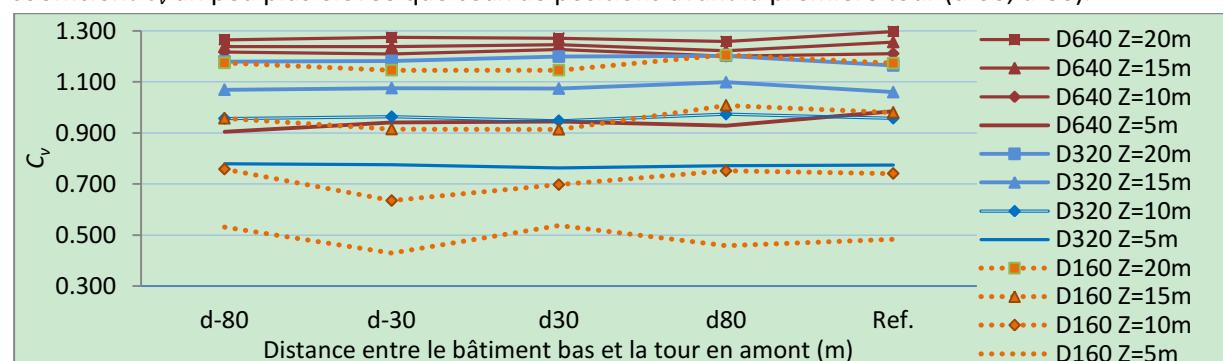


Fig. A5-17 Comparaison des valeurs du coefficient C_v pour différentes positions d'un bâtiment bas sur le potentiel éolien au-dessus du toit de la tour en aval.

Annexe 6. Sur la simulation des modèles de quartier

Annexe 6.1 Résultats du coefficient C_v et de l'indicateur M' pour les modèles de quartier

Les valeurs de l'indicateur M' pour les modèles de quartier avec différents angles d'incidence du vent sont données dans les Fig. A6-1 a à f.

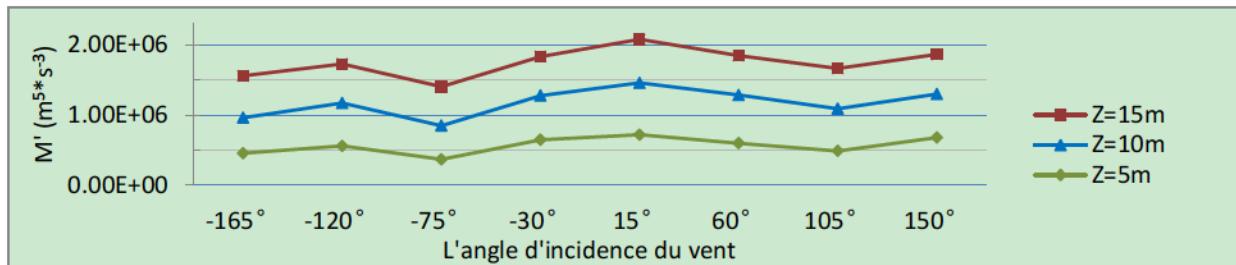


Fig. A6-1a Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Paris).

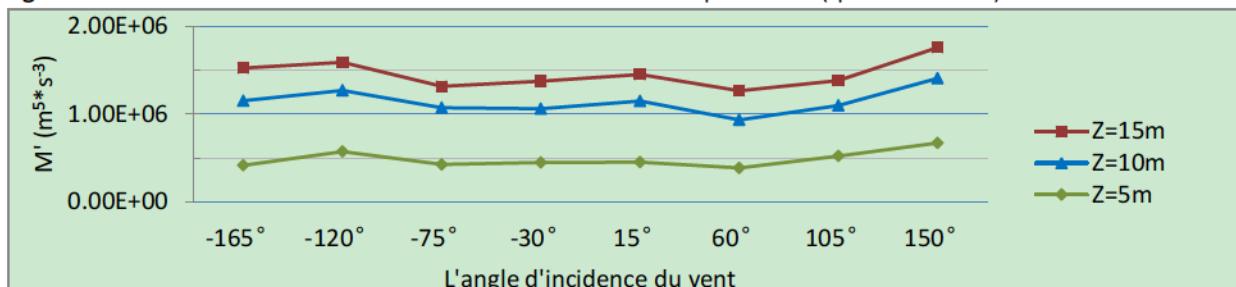


Fig. A6-1b Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Toulouse).

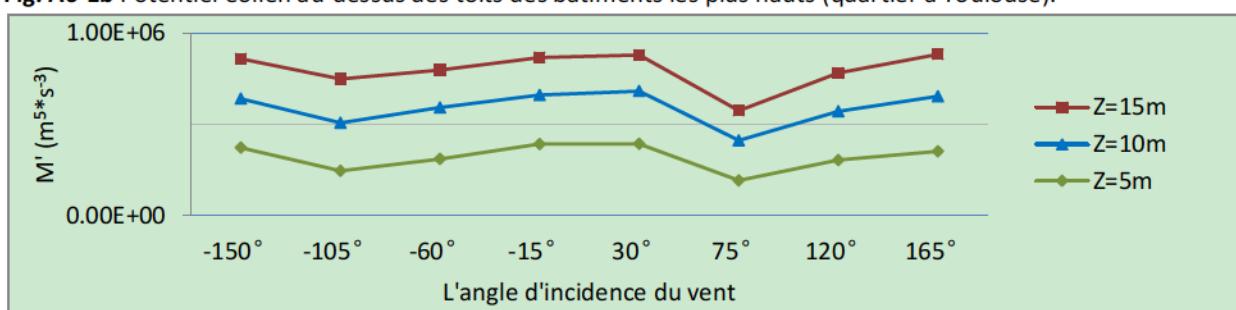


Fig. A6-1c Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Bombay).

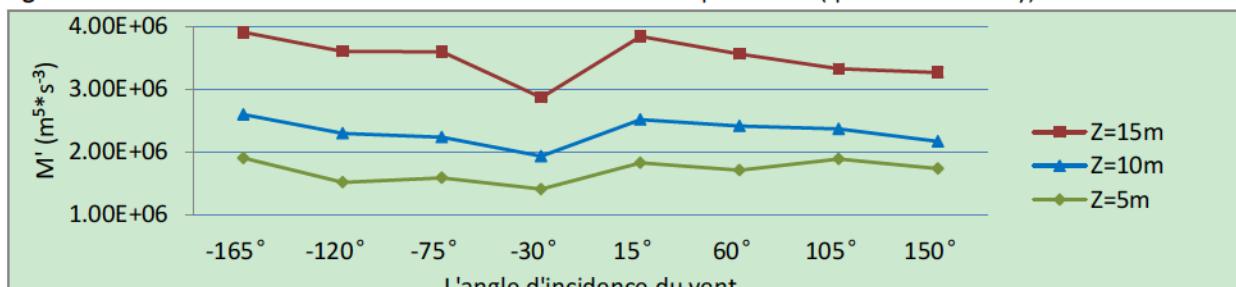


Fig. A6-1d Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Barcelone).

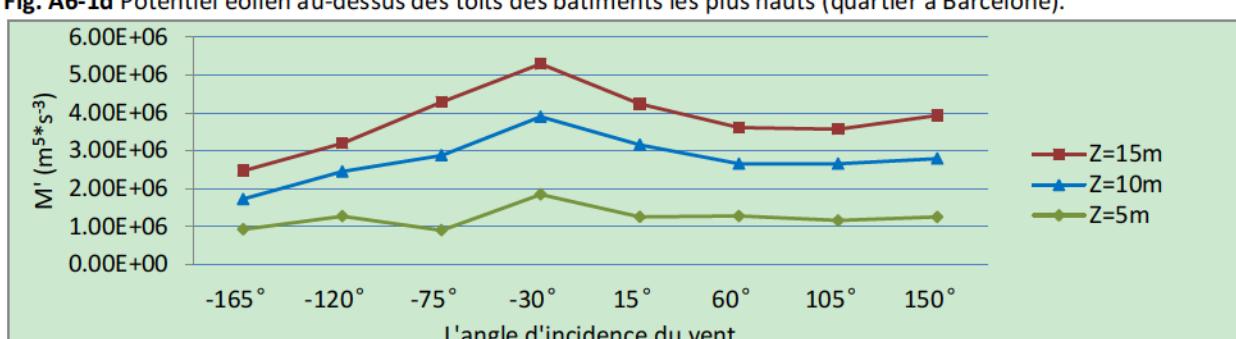


Fig. A6-1e Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à New York).

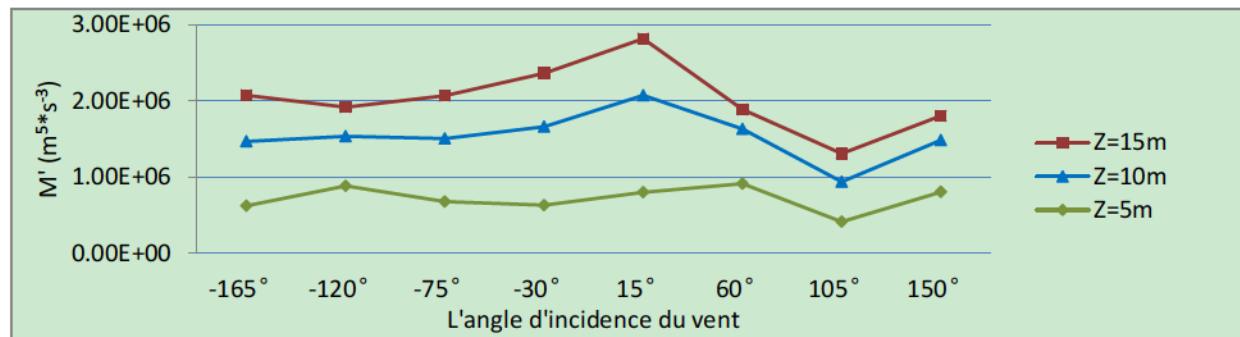


Fig. A6-1f Potentiel éolien au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (quartier à Pékin).

Annexe 6.2 Résultats du coefficient C_v et de l'indicateur M' pour les modèles d'unité

Les valeurs de l'indicateur C_v des modèles d'unité avec différents angles d'incidence du vent sont données dans les Fig. A6-2 a à f.

Les valeurs de l'indicateur M' de modèles d'unité avec différents angles d'incidence du vent sont données dans les Fig. A6-3 a à f.

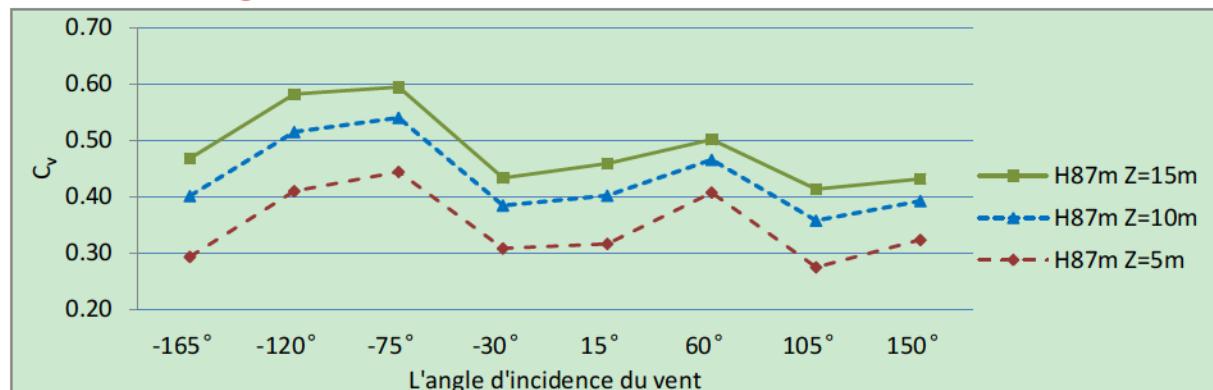


Fig. A6-2a Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 01, Pékin).

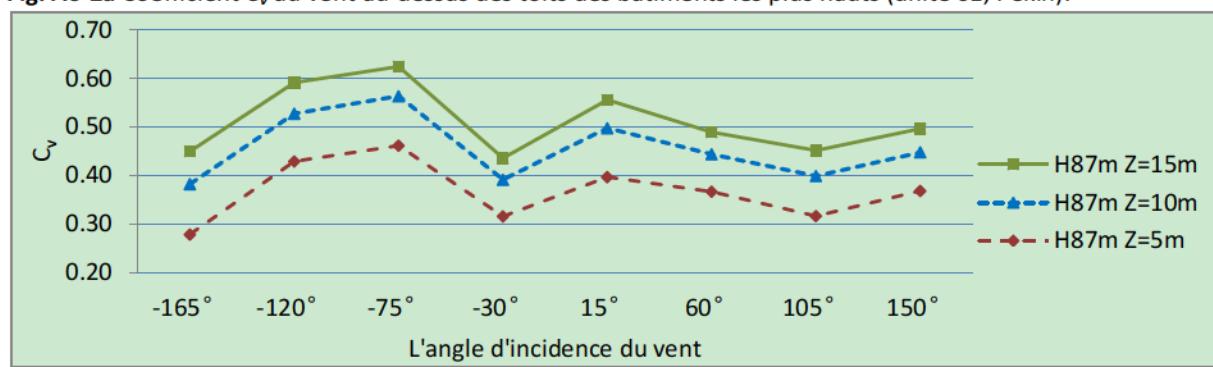


Fig. A6-2b Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 01b, Pékin).

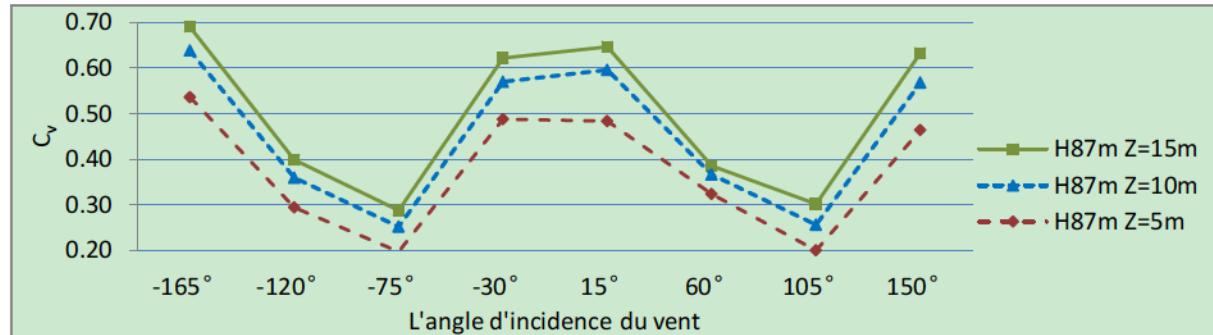


Fig. A6-2c Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 02, Pékin).

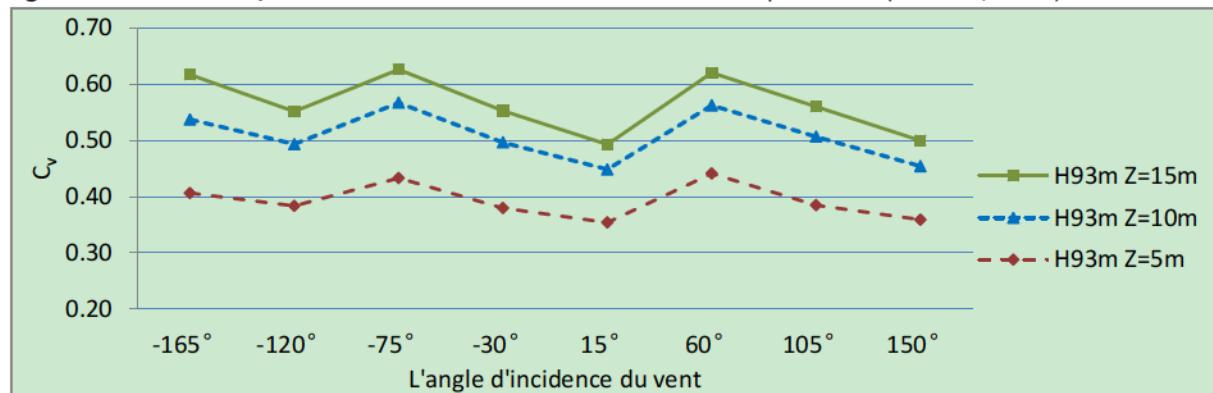


Fig. A6-2d Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 03, Pékin).

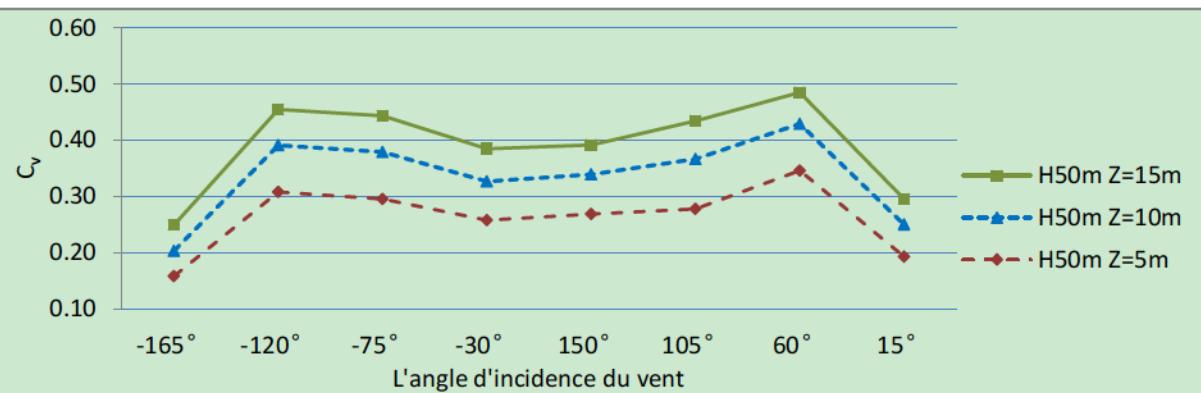


Fig. A6-2e Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 04, Hong Kong).

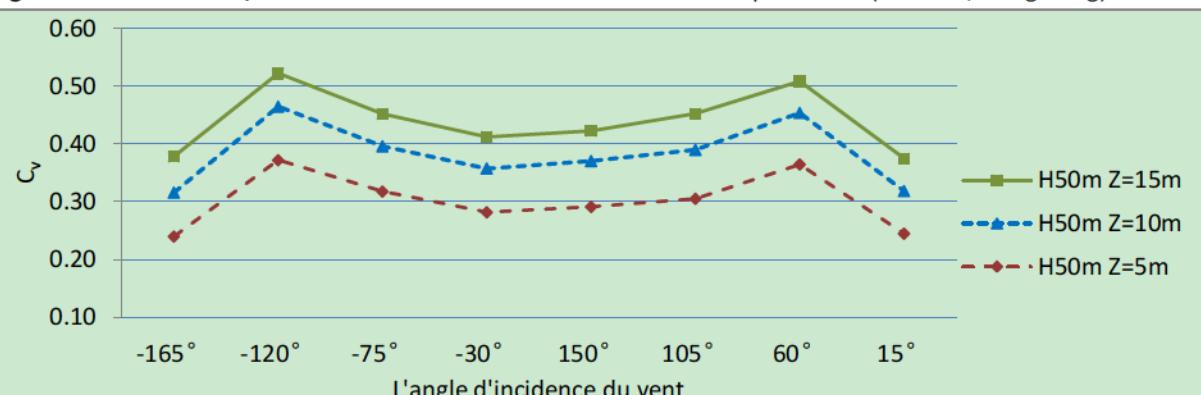


Fig. A6-2f Coefficient C_v du vent au-dessus des toits des bâtiments les plus hauts (unité 04b, Hong Kong).

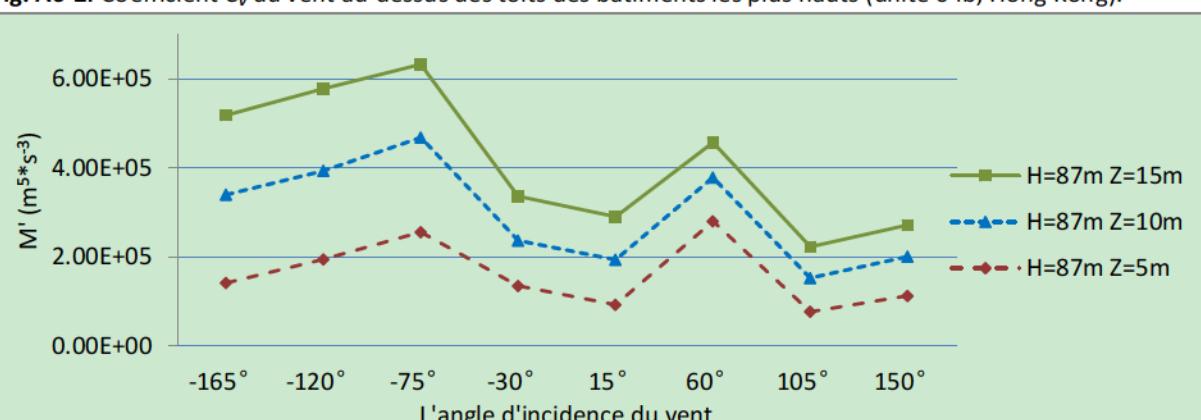


Fig. A6-3a Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 01, Pékin).

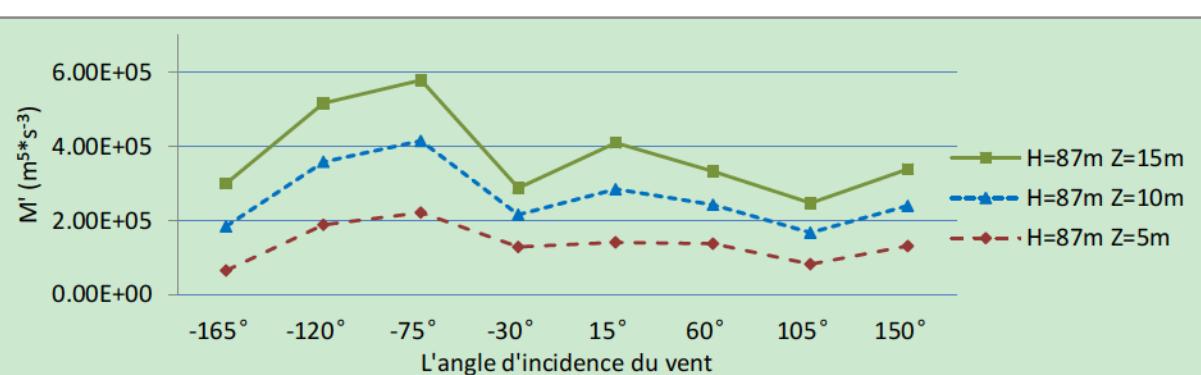


Fig. A6-3b Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 01b, Pékin).

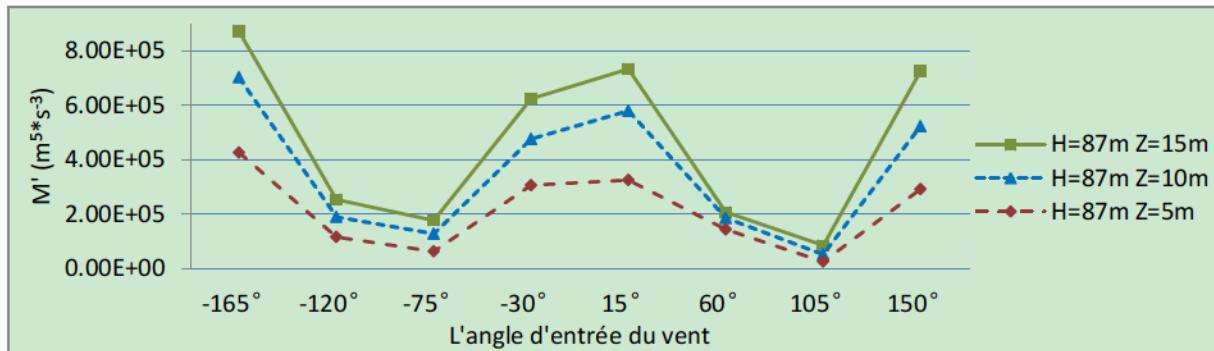


Fig. A6-3c Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 02, Pékin).

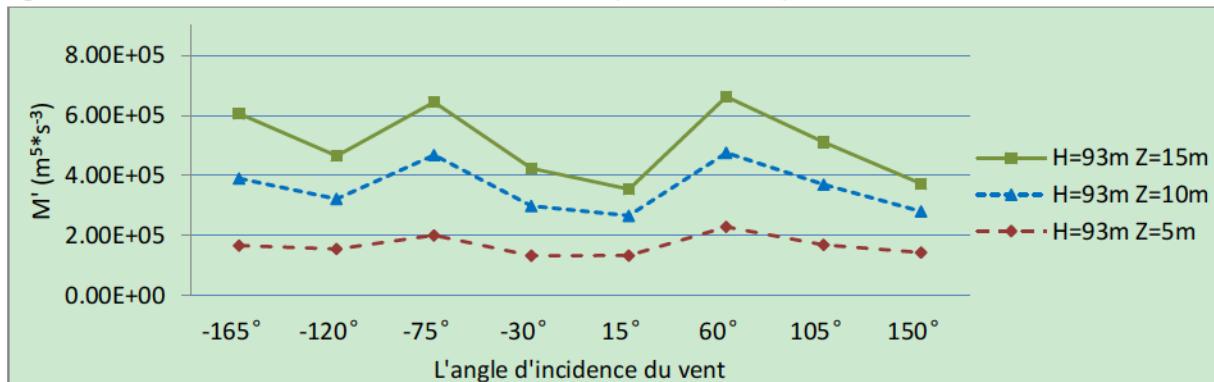


Fig. A6-3d Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 03, Pékin).

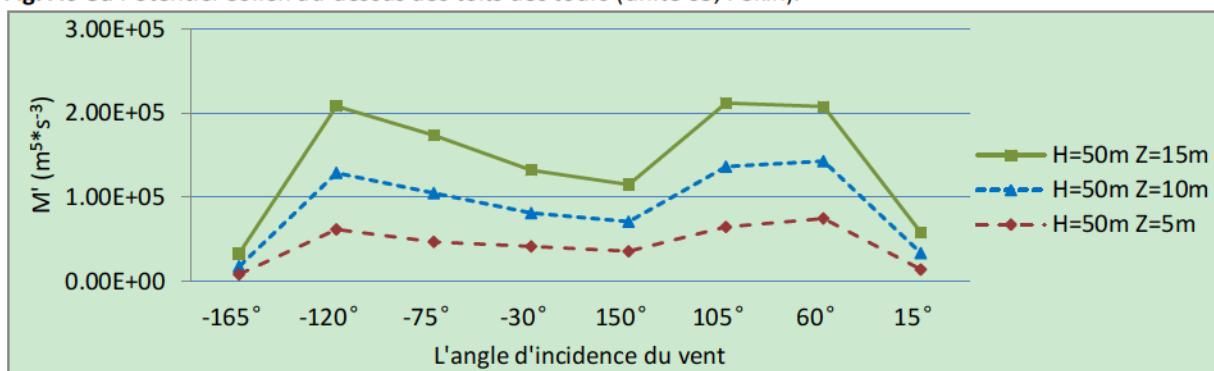


Fig. A6-3e Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 04, Hong Kong).

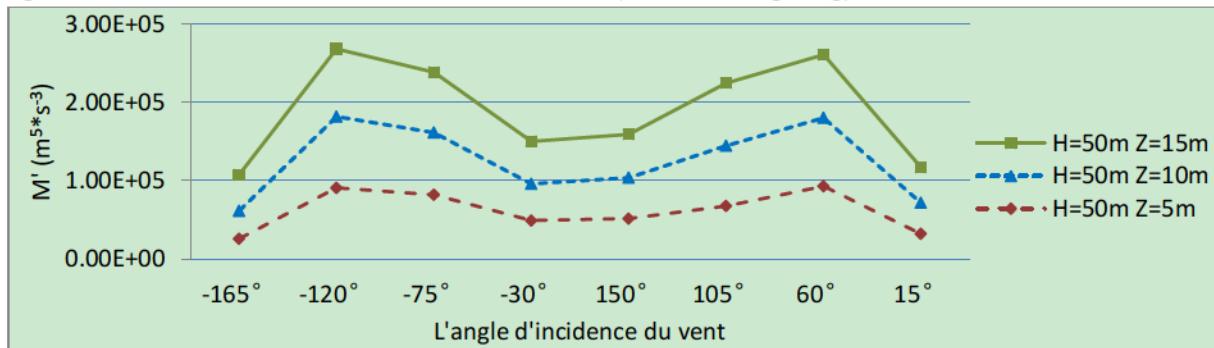


Fig. A6-3f Potentiel éolien au-dessus des toits des tours (unité 04b, Hong Kong).

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 du quartier. Sur la base du modèle de quartier à 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 négligées. Une comparaison en plan entre les deux modèles est présentée dans la [Fig. A7-1](#).

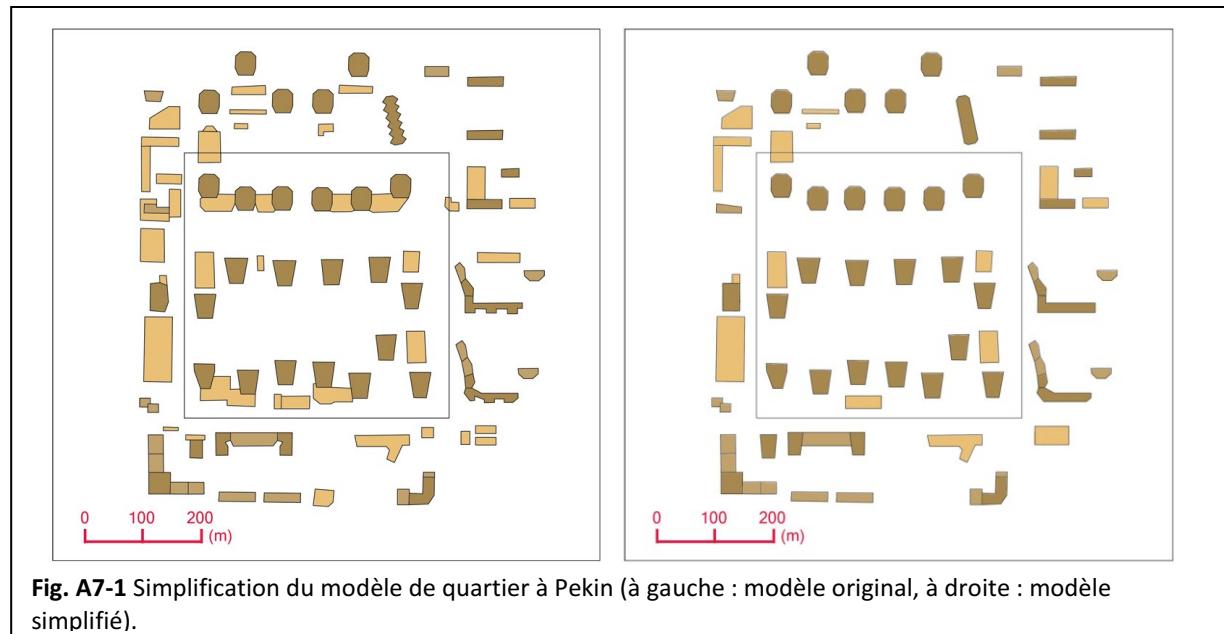


Fig. A7-1 Simplification du modèle de quartier à Pékin (à gauche : modèle original, à droite : modèle simplifié).

Une comparaison statistique entre les maillages des deux modèles est donnée dans le [Tableau A7-1](#). Nous pouvons voir que le nombre de mailles 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. 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 [Fig. A7-2](#).

Tableau A7-1

Comparaison statistique des maillages entre le modèle original et le modèle simplifié

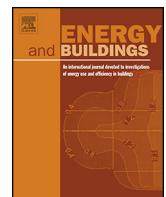
	Modèle original	Modèle simplifié	Ecart		Modèle original	Modèle simplifié	Ecart
Nombre de mailles	2 796 897	2 124 931	-24.03 %				
Qualité moyenne des éléments	0,5706	0,5742	0,63 %	Ecart-type	0,3463	0,3538	2,17 %
Asymétrie moyenne	0,2971	0,2870	-3,40 %	Ecart-type	0,1423	0,1380	-3,02 %
Qualité orthogonale moyenne	0,8049	0,8084	0,43 %	Ecart-type	0,1504	0,1562	3,86 %

Tableau A7-2

Ecarts des résultats de simulation entre le modèle original et le modèle simplifié

	$Z = 5 \text{ m}$	$Z = 10 \text{ m}$	$Z = 15 \text{ m}$	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** Ecarts de l'indicateur M' entre les modèles du quartier à Pékin avant et après simplification.



Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings

B. Wang^{a,*}, L.D. Cot^b, L. Adolphe^c, S. Geoffroy^a, J. Morchain^d

^a Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135, Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse, France

^b Université de Toulouse, UPS, INSA, ISAE, ENSTIMAC, ICA (Institut Clément Ader), 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse Cedex, France

^c Université de Toulouse, ENSA, LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture), 83, Rue Aristide Maillol, BP 10629, 31106 Toulouse, France

^d Université de Toulouse, INSA, LISBP (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés), 135, Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse, France



ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 July 2014

Received in revised form

25 November 2014

Accepted 29 November 2014

Available online 9 December 2014

Keywords:

Wind energy

CFD

Built environment

Building configuration

ABSTRACT

Wind energy development in a built up environment will be an important subject for future sustainable cities. Maturing CFD technology is making more wind flow simulation experiments available, which can be validated by in situ and wind tunnel measurements. Starting from research on wind accumulation by the Venturi effect in built environment, this paper tries to establish the relationship between wind energy potential and the configuration of two perpendicular buildings by performing parametric CFD wind tests. Two reference buildings (width \times length \times height = 6 m \times 15 m \times 10 m) forming a symmetrical corner are chosen and different building lengths, widths, heights, corner separation distances, angles of inlet and altitudes of assessment are considered. Results show that, in converging inlet mode, wind energy potential over the roof generally increases sensibly as the corner separation becomes larger, while in diverging inlet mode it decreases rather slowly with corner enlargement. Meanwhile, compared with a single, isolated reference building, most of the corner configuration cases studied here show greater wind energy density over the roof.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Faced with environmental issues like depletion of resources, greenhouse gas emissions and the dramatic climate changes they cause, the as yet unfulfilled mission of developing green energy will be of increasing importance for future generations. Wind energy as one of the renewable energy sources is relatively cheap and available over great areas. Over the last 15 years, the wind industry has shown an accumulative growth of around 28% [1]. However, as the windy areas remaining to be exploited are decreasing, and as energy demand is much less dynamic than energy production in such usually rural areas, the issue has been raised of avoiding great energy losses due to transportation by developing energy where it is to be consumed. In addition, the installation of small turbines in cities has also shown benefits like raising public awareness and the effects of projecting a “green” image.

In 1998, a European Commission project named WEB (*Wind Energy for the Built Environment*) was launched and a new architectural and aerodynamic model was invented as the prototype of UWECS (Urban Wind Energy Conversion Systems) [2].

Later, the UK looked into the feasibility of the BUWTs (*Building Mounted/Integrated Wind Turbines*) project in 2003–2004 [3]. BUWTs and another European Commission project named WINEUR (*Wind energy integration in the urban environment, from 2005 to 2007*) were elected for more detailed investigation of wind energy development in an urban environment: suggestions for turbine installation, economic analysis and detection of potential social problems associated with the implementation of small wind generators in urban areas [4]. In a global view, IEA (International Energy Agency) has united 25 countries and organizations in the Task 27 project for the research of small wind energy development (small wind turbine labels development and deployment from 2008 to 2011, and small wind turbine in high turbulence sites from 2012 to 2016). Apart from that, some other research organizations also made efforts on urban wind-energy environment evaluation and micro-wind turbine trials in the built environment [5–8]. While the projects mentioned are oriented towards an overview of the real world situation (market, policy, social and economic aspects), other research has explored the technical domains such as turbine design [9,10] or numerical simulation of sites [11–14].

Wind in urban areas is a complex phenomenon. Normally there is little power that a wind turbine can use because the urban environment usually has great turbulence and low velocity. However, some features of the built environment can concentrate wind flow: building edges, passage under elevated bottom elevated or between

* Corresponding author. Tel.: +33 0 7 87 27 64 46.

E-mail addresses: bwang@insa-toulouse.fr, wangbiao1839@gmail.com
(B. Wang).

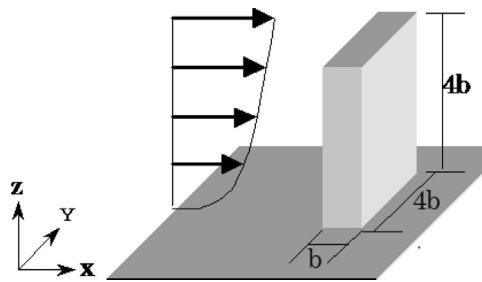


Fig. 1. Schematic view of tunnel test model.

two buildings, to name a few. Here we focus on the form of two perpendicular cornered buildings and consider the wind potential over the building roofs, where advantage could be taken of the building height to use zones of higher wind speed and wind concentration. Research found that, “the concentration effect of buildings and the heights of buildings could enhance wind power utilization by increasing the wind power density by 3–8 times under the given simulation conditions.” [15]

Exploring the relationships between wind flow and building shape and configuration often required the use of wind tunnel tests in the past but the development of computer science and, in particular, computational fluid dynamics (CFD) has greatly increased the types of cases that can be treated with numerical simulation. However, neither a turbulence model nor a numerical solution method can guarantee stability, exactitude or convergence, when solving the differential non-laminar equations and partial equations. Each turbulence model has its own advantages and limits for specific cases. Therefore, some best practice guidelines (BPG) have been drawn up at least for the case of wind flow in a built environment by researchers through their CFD simulations validated by wind tunnel results [16–22].

Many papers can be found on the simulation of flow around buildings, in simple idealized forms or real city contexts, focusing on problems like wind pressure on building structure, outdoor ventilation quality, and wind comfort at pedestrian level [16,17,23–28]. Beranek [29] simulated the pedestrian-level wind environment around single buildings and some basic building configurations by using wind discomfort maps and streamline maps. He discussed building configurations with weak and strong interaction and gave some general rules for creating a good wind environment. He found that the “wind catching” shape (with so called Venturi effect) led to less strong wind in the centre corner than the “wind spreading” shape. More recently, wind tunnel tests have been conducted to study the Venturi effect in the passage between two perpendicular buildings [30]. They show that the wind speed amplification

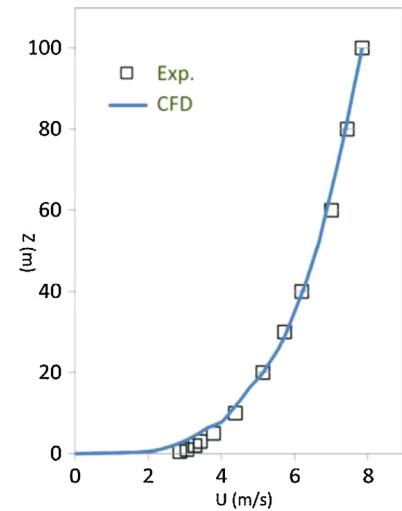


Fig. 2. Inlet velocity comparison between experiment and CFD simulation in the vertical section.

factors in diverging passages (wind spreading shape) are generally larger than in converging passages (wind catching shape). They also reveal that the maximum wind amplification factors in both diverging and converging passages increase monotonically with decreasing aspect ratio (width-to-height) in the passage. The problem of wind discomfort around buildings and concerns about the amplification factor can provide inspiration for wind energy utilization. However, all the papers found on wind discomfort in the built environment consider the pedestrian level, whereas satisfactory wind energy potential can only be found at greater heights, where the wind speed is sufficient. In the present paper, CFD simulations are used to continue working with the configuration of two perpendicular buildings that has already been discussed, but the focus is on wind potential over the roof and the impact of building configuration on wind energy development.

2. Validation methodology

To ensure that the parameters used in the numerical simulation were reasonable, a number of parameter impact tests were undertaken for error analysis between our CFD simulations and a reference wind-tunnel experiment performed by the Architectural Institute of Japan [31]. The experiment results are accessible online at www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm [21]. The test model was a building of width 5 m × length 20 m × height 20 m with a scale $R_s = 1:100$ for the tunnel test. The schematic view of

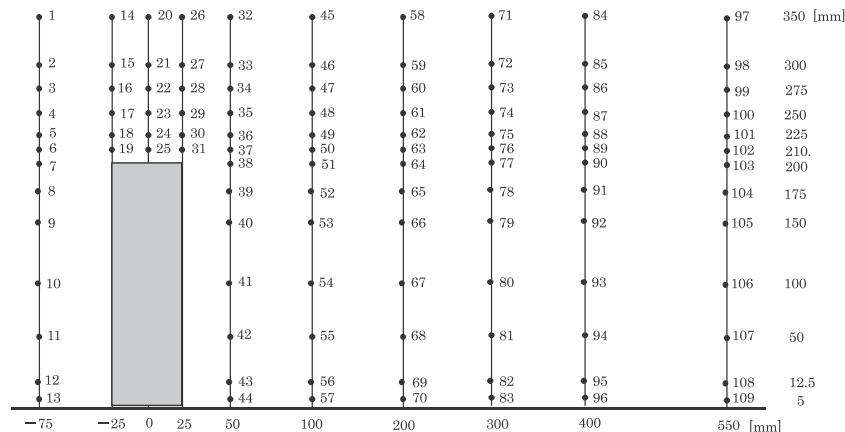
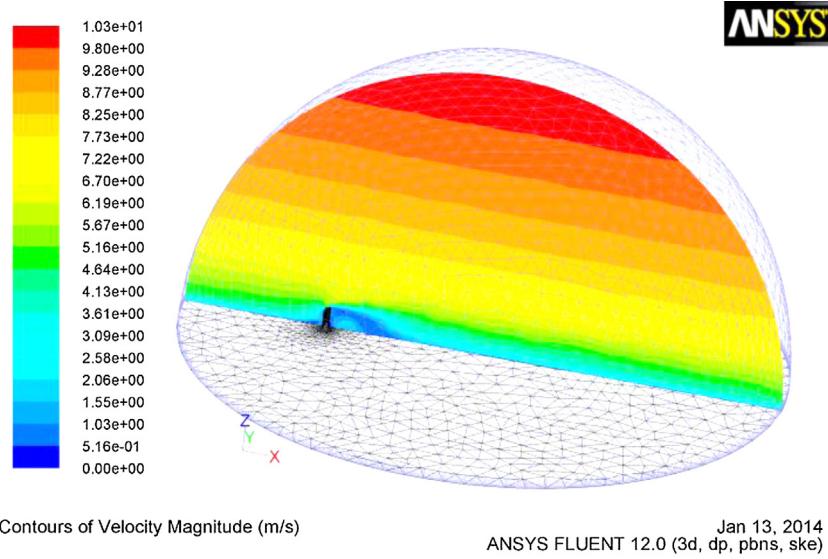


Fig. 3. Vertical section ($Y=0$ m) and its 109 test points for the experiment.

**Fig. 4.** 3D view of CFD domain.

tunnel test model is shown in Fig. 1. Inlet flow data can be simplified as a power law:

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{H_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

where U is the inlet velocity (horizontal, of axis X) at height Z , $U_0 = 7.84$ m/s is the reference velocity at height $H_0 = 100$ m and $\alpha = 0.25$ is the power law exponent. The comparison between the power law profile and the actual tunnel inlet values is given in Fig. 2. 109 test points were selected in the central vertical section parallel to the wind for the experiment (Fig. 3 [31]).

The ANSYS 12.0 Workbench integrated with the code Fluent was used for the CFD simulation. A semi-sphere was applied as the test domain in order to simplify the operation process for frequent changes of inlet direction (Fig. 4). The mesh formed by applying the best parameter settings is shown in Fig. 5. For parameter studies in which results of CFD simulation were compared with those of the wind-tunnel experiment, 57 tests were conducted in four main groups of parameters, which included geometry, mesh, boundary condition, turbulence models and solution method. The variants of different parameters are listed in Table 1 and the best choice setting is given in Table 2.

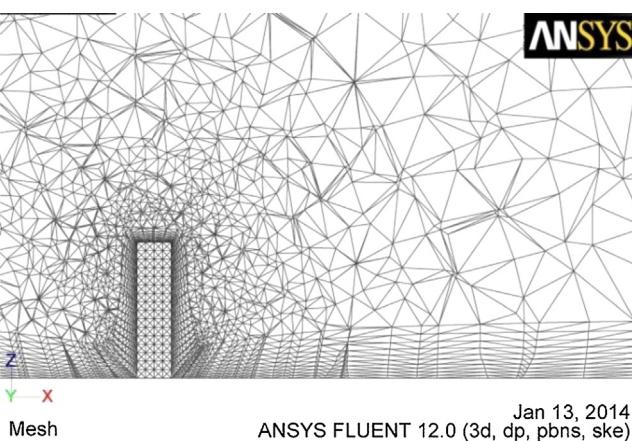
Since there are many uncertainties and influential elements in wind engineering, the best parameters found here may simply be

suited to our particular case. For example, some best practice guidelines conclude that the $k-\varepsilon$ standard model should not be used in simulations for wind engineering problems, and recommend the improved two-equation models or differential stress models [19,21]. However, some other researchers found that the $k-\varepsilon$ standard model maybe better [32]. The results found here show that the $k-\varepsilon$ standard model gives rather better performance than the realizable $k-\varepsilon$, Reynolds stress models (RSM) or renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$.

To evaluate the outcome of different values for the selected principal parameters, two indicators were chosen: E_a , the average absolute error in percentage of the reference velocity of tunnel, and E_r , the average relative error of velocity between CFD and

Table 1
Variants for parameter studies in CFD simulation.

	Parameters	Value
Geometry	Domain size (radius)	$R = 100/150/170/200/250/300$ (m)
Mesh	Cell size for the faces of the building	$L = 0.6/1/1.25/1.5$ (m)
	Number of inflation layers for both ground and building	$N = 5/8/10/14$
	First layer thickness from the ground inflation	$T_g = 0.2/0.3/0.4/0.5$ (m)
	Ground inflation transition ratio	$r_g = 1.1/1.13/1.15$
	First layer thickness from the building inflation	$T_b = 0.06/0.08/0.1$ (m)
	Building inflation transition ratio	$r_b = 1.1/1.2/1.25/1.3$
	Relevance centre (RC) Smoothing	Coarse/medium/fine Low/medium/high
Boundary condition	Roughness height (m) for wall function	$K_s = 0/0.1/0.5/0.8/1/1.2/1.5$ (m)
	Roughness constant for wall function	$C_s = 0.5/0.99$
Turbulence models and solution method	Launcher option	Single/double precision
	Turbulence model	$k-\varepsilon$ Standard/ $k-\varepsilon$ RNG/ $k-\varepsilon$ realizable/RSM
	Spatial discretization	Pressure: 1/2 order, momentum, k, ε : 2 order upwind/QUICK

**Fig. 5.** Vertical section of mesh.

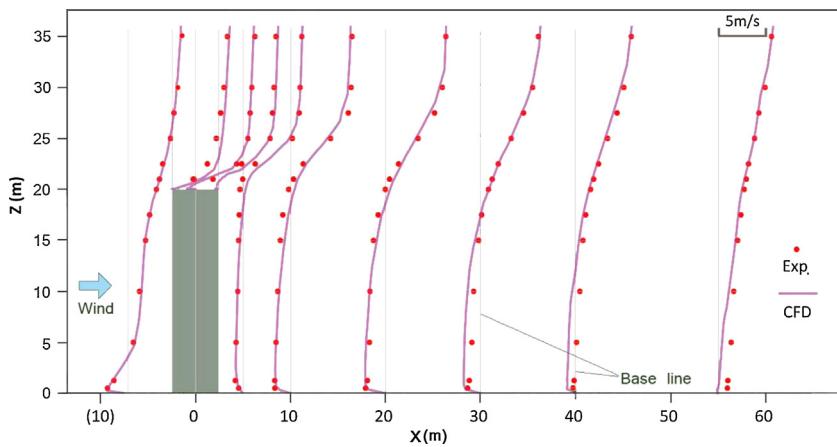


Fig. 6. Velocity comparison (absolute error) between experiment and CFD simulation in the vertical section.

experiment (the smaller the better for both). Note that all the velocity data analysed here are in vector, with its components in three dimensions, and the error can be found via a simple wind direction change in a turbulence. In case of impertinence caused by some points with high relative error (e.g., the error between 0.01 m/s and 0.2 m/s), we inspected both E_a and E_r to arrive at a pertinent choice of parameter. As the tunnel experiment offered results in both a horizontal plane ($Z=1.25$ m for full scale) and a vertical section ($Y=0$, central line section), we studied both the errors. However, since our project concerns wind energy, which often appears at higher level rather than at pedestrian level, our analysis here mainly assesses the vertical section performance.

The diagram of Fig. 6 compares the velocities U_x (X-component, the principal component in three dimensions) measured in the experiment and calculated in the CFD simulation, in the central-line vertical section. Note that the horizontal distance from the vertical base line represents the magnitude of the velocity and a reference length of 5 m/s is given. Results to the right of the base line signify positive values and results to the left are negative. Agreement between the CFD simulation and the experiment is generally good. In fact, the general average absolute error of the velocity magnitude is 0.37 m/s for an object velocity averaged 3.05 m/s in measurement (varies from 0.10 to 6.48 m/s). From Fig. 6 we can see that, the points of greatest separation appear in the leeward near-ground area around a distance H away from the building and in the vicinity of the building roof. In fact, a well-known problem of the standard $k-\varepsilon$ model is that it cannot reproduce the separation and reverse flow at the roof top of a building due to its overestimation of turbulence energy k at the impinging region of the building wall [21].

Table 2
CFD Parameter settings for the best case found.

CFD setting	Geometry Mesh	Domain size $R = 250$ m Tetrahedrons method, $L = 1.25$ m, $N = 10$, $T_g = 0.5$ m, $r_g = 1.13$, $T_b = 0.08$ m, $r_b = 1.25$, advanced size function: proximity and curvity, RC: medium, smoothing: low, number of cells element for the mesh $Q = 1.136 \times 10^4$
Boundary condition		$K_s = 1$ m, $C_s = 0.99$, turbulent intensity $I = 10\%$, turbulent length scale $L_t = 1$ m
Turbulence model		$k-\varepsilon$ Standard
Solution		Launcher option: double precision; algorithm scheme: SIMPLE; discretization: 2 order (pressure), QUICK (momentum, k, ε)
Error found	General average absolute error	$E_a = U_{CFD} - U_{Exp} = 0.047 \times U_0 = 0.37$ m/s

In addition to the problem of the turbulence model and the parameter setting of the code, some part of the errors should come from the imprecision of the inlet wind profile between the power law applied for CFD simulation compared to the actual test values in tunnel (Fig. 1). In reality, at the height of the building (20 m for real size) the relative error was 10% and at the half of building height it arrived around 20%.

Regarding the overall relative error of the X-component velocity as mentioned above, Fig. 7 gives an X-Y distribution map for the comparison between the numerical simulation and the wind tunnel experiment. Most points of high velocity are found in the zone of <5% of relative error (between the two yellow lines). The zone where error is greater than 50% is highlighted in red, and the velocity is actually rather small here (between -1 m/s and 2 m/s). Precisely, results of general relative error of velocity magnitude are found as follows:

- 33% of the measurements lead to an error smaller than 5%,
- 61% of the measurements lead to an error smaller than 20%,

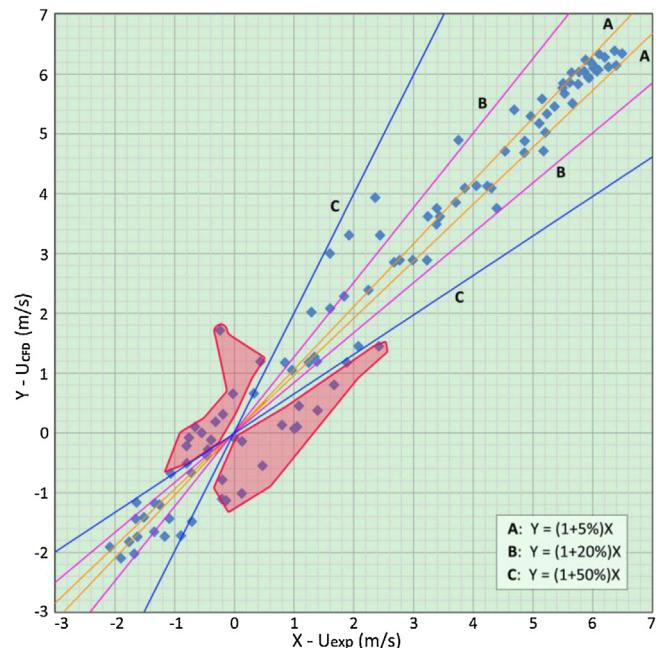


Fig. 7. Zones of different relative error ranges of velocity X-component ($E_r = 5\%, 20\%, 50\%$). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

- 85% of the measurements lead to an error smaller than 50%.

Fig. 8 displays the relative errors (velocity magnitude) of each measurement in the vertical section and those badly simulated areas are shown in red. In fact, as **Fig. 9** shows, there is a big vortex behind the building and, as the turbulence moves and changes with time, it is difficult for the time-average turbulence model $k-\varepsilon$ to anticipate the form of the vortex and the position of flow separation precisely. From **Fig. 7** we can also see that our $k-\varepsilon$ standard model has predicted the leeward flow separation distance as a little longer ($X=55$ m at near-ground) than the situation in tunnel experiment ($X=40$ m).

3. Simulation of two perpendicular buildings

After the parameters of the CFD simulation had been validated, the best parameter settings were used for simulations of some similar situations. Here a set of symmetrical pairs of buildings were chosen and the wind energy potential was studied later. Two identical reference buildings of width (W) \times length (L) \times height (H) = 6 m \times 15 m \times 10 m were considered. Different corner separation distances ($D=5$ m, 15 m, 30 m, 45 m and 60 m), different building lengths ($L=10$ m and 30 m), different building widths ($W=4$ m and 10 m) and a different building height ($H=20$ m) were considered. Our purpose was to find the relationship between the resulting wind energy and various configurations of the set of symmetrical corner configuration. To precisely determine the influence of the inlet wind direction, a series of $\theta(0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ and 90°) for both converging case and diverging case were studied as shown in **Fig. 10(a)**. We intentionally chose a round test angle (90°) for the symmetrical corner (usually a half is enough) for numerical errors monitor and results verification. Here if an error larger than 5% appeared, a repeat simulation was run by making a small change in the model position in the wind domain. This usually managed to reduce the error.

Wind turbine power is generally given by the following equation:

$$P = C_p \times 0.5 \times \rho \times S \times v^3 \quad (2)$$

where C_p is the coefficient of performance, ρ the air density, S the area swept by the blades and v the free wind velocity. Therefore, in our case, to evaluate wind energy, a simplified indicator M was defined as:

$$M = \sum_{i=1}^n (A_i \times v_i^3) \quad (3)$$

where A_i represents the area of the corresponding velocity v_i . As shown in **Fig. 10(c)**, the red rectangular outlines over roof areas of a certain height ($Z=3$ m, 5 m or 10 m, shown in **Fig. 10(b)**) are the boundaries of our interesting area and the sub-areas are summed with their corresponding average velocities. Velocity is graduated in steps of 0.1 m/s, as a good compromise between precision and working time. We calculated the value M with the two buildings together and compared the general performance of the various corner configurations.

To analyse the productivity of configurations with different plane areas, a wind energy density, D , was introduced as:

$$D = \frac{M}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times v_i^3)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

Table 3
Additional parameters setting for corner case simulation.

CFD sections	Parameter setting
Geometry	Domain size $R=300$ m
Mesh	Typical number of tetrahedral mixed cells: 145,000 (case D15 m) skewness average value smaller than 0.28 orthogonal quality value bigger than 0.8
Inlet conditions	Eq. (1), where $U_0 = 3$ m/s, $H_0 = 10$ m and $\alpha = 0.4$ which means a more dense urban context
Under-relaxation factors	Momentum: 0.2, turbulence kinetic energy: 0.3
Number of iterations	$N > 3000$
Residue	Continuity $< 5 \times 10^{-6}$, velocity $< 5 \times 10^{-8}$

To evaluate the wind energy potential over the roof compared with that of the same area at the same altitude in the free wind, an amplification factor F was defined as:

$$F = \frac{M}{A \times (U_H)^3} \quad (5)$$

where A is the total area of the plan over the roof, U_H is the reference velocity at height H in the free wind (without buildings) with the same simulation condition, which can be calculated directly from Eq. (1).

3.1. General setting

Most of the detailed setting of CFD was the same as the best case of validation as shown in **Table 2**, except for some adjustments for our specific situation, as follows (**Table 3**).

As the simulation model size was different from that in the tunnel experiment, it was necessary to choose a proper domain size that was not so large as to take too long to run, nor so small that the turbulence development was restricted. Hence, the influence of domain size was analysed to assess the wind flow stabilization with changing domain sizes. From **Fig. 11**, a case of reference building corner with different inlet angles of converging mode, it can be seen that, when the domain radius is enlarged from $R=100$ m to $R=400$ m, the M value gradually stabilized. From $R=200$ m the results show little change with increasing domain size. Considering the economy in number of mesh elements and some enlargement of model size later on applied in the parameter study, we finally adopted the scale $R=300$ m, which has a general difference of 2% of M with respect to $R=400$ m. However, for the models with height $H=20$ m we applied $R=400$ m. As the leeward turbulence size is more sensitive to H than to L or W , these models need much more space than the reference case to allow for the full extent of turbulence.

3.2. Results of different parameters for the symmetrical corner

Here, the result of M in relationship to the corner distance D , building length L , building width W and building height H are shown within both converging and diverging inlet modes. In order to control velocity stability and conformity over different altitudes, two or three altitude planes were chosen over the roof of the studied building as shown in **Fig. 10(b)**. A detailed list of category of variables for the configuration parameter study is given in **Table 4**.

3.2.1. Impact of corner separation and building height

Here a set of symmetrical corner shapes in various corner separations was studied (**Fig. 12**). First, we took two reference buildings ($H=10$ m) and examined the change of wind energy M over roofs of

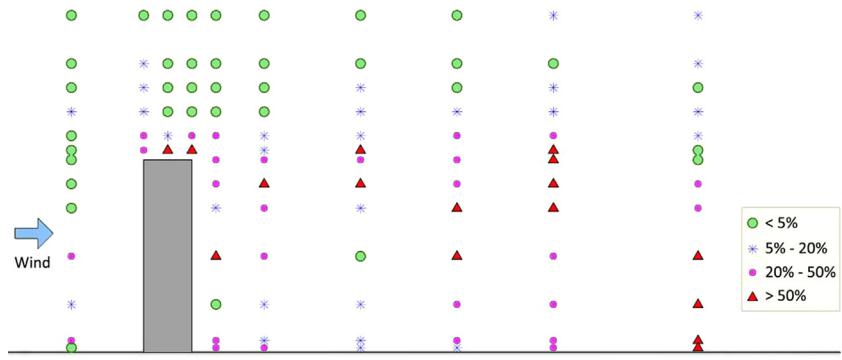


Fig. 8. Different relative error ranges of velocity magnitude shown at the test points in vertical section.

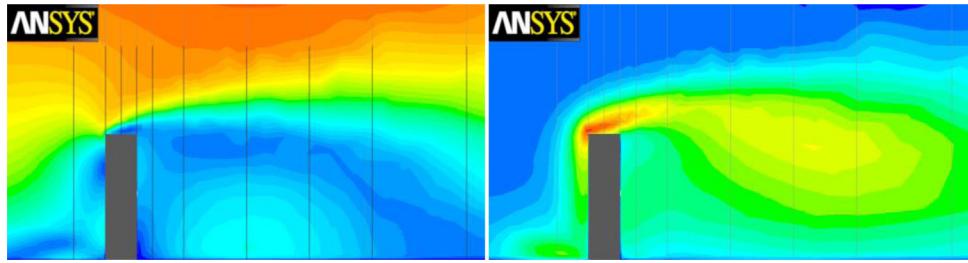


Fig. 9. CFD representation of velocity contours (left) and turbulent intensity (right).

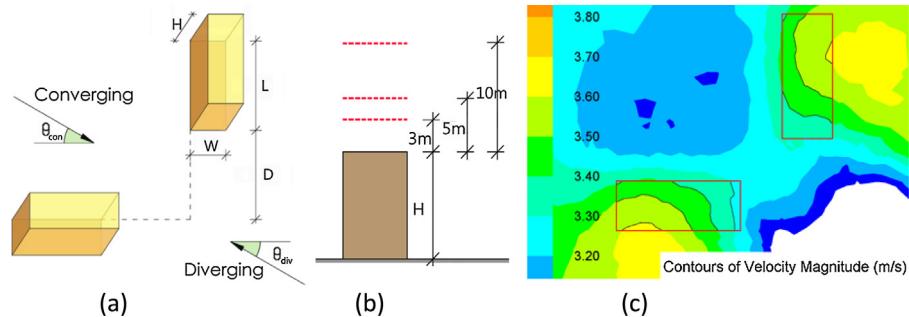


Fig. 10. (a) Model of symmetrical corner shape. (b) Test plan heights above roof (in section). (c) Example of test plan over roof with divided velocity sub-areas by contour.

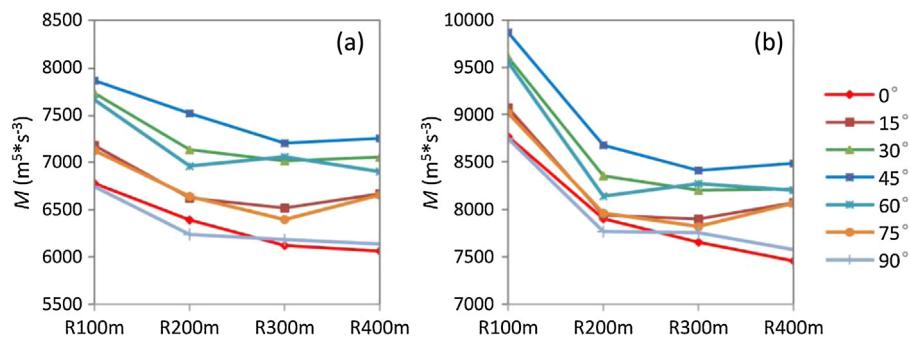


Fig. 11. Influence of domain scale for wind energy outcome M , converging inlet: (a) plane $Z = 3$ m, (b) plane $Z = 5$ m.

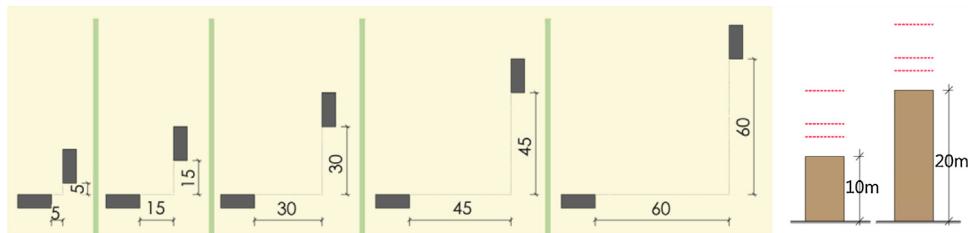


Fig. 12. Corner configurations with different separations (left), models with different building heights (right).

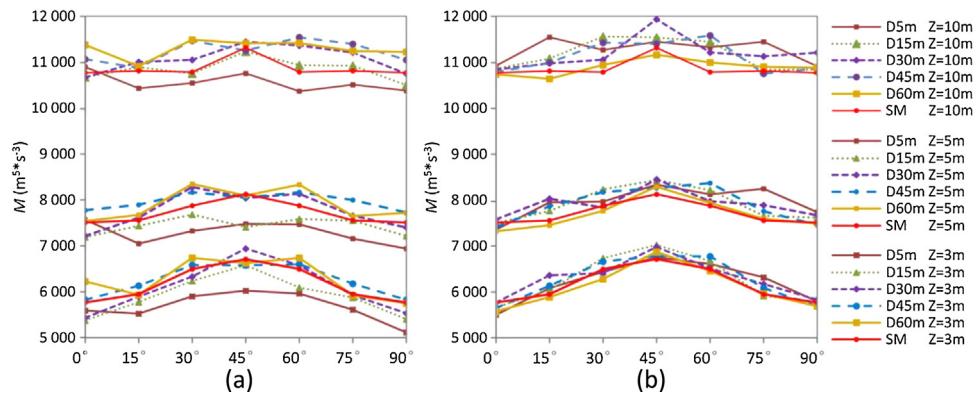


Fig. 13. Wind energy M on plane $Z=3$ m/5 m/10 m above roof, $H=10$ m: (a) converging mode, (b) diverging mode.

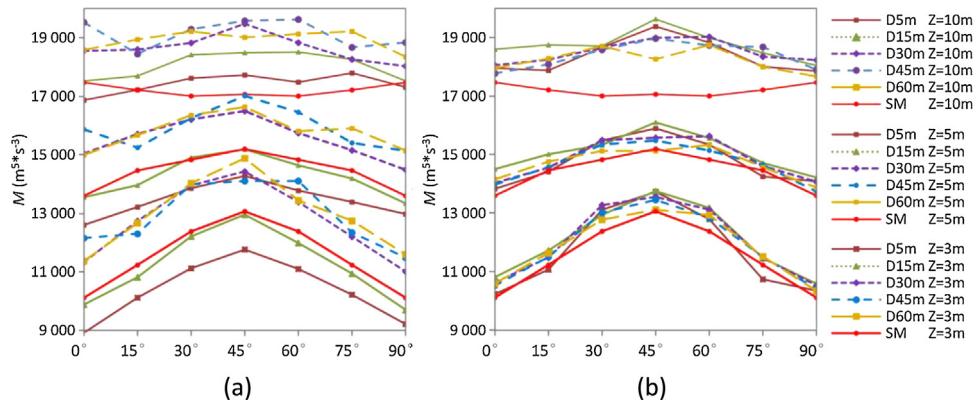


Fig. 14. Wind energy M on plane $Z=3$ m/5 m/10 m above roof, $H=20$ m: (a) converging mode, (b) diverging mode.

three different heights and in various directions for both converging and diverging mode (Fig. 13). Then two buildings with height $H=20$ m (no change in length or width) were tested in the same way (Fig. 14). The performance of models of both heights was compared with that of an identical isolated building in the same wind conditions, to assess the effect of wind interaction with the corner configuration. As M was taken as the sum of the two perpendicular buildings, for the isolated reference building we calculated M as the sum in two equivalent wind conditions, as assumed in a corner configuration (simplified in case SM).

A comparison of the wind energy outcome M for different building heights and corner separations (Figs. 13 and 14) shows that:

1. In the model with $H=10$ m in both converging and diverging modes, there is no specific separation distance that shows obviously better performance than the others. For converging inlet, cases $D5$ m and $D15$ m are always worse than others; whereas, for diverging inlet, case $D15$ m can be quite productive. In the model with $H=20$ m, the best case for converging inlet is, again, not very clear but may well be $D45$ m, while for diverging inlet it is certainly $D15$ m. In all, for converging inlet,

the best case of separation is rather unclear but, for diverging inlet, $D15$ m is the most promising.

2. Comparison with the performance of a single, identical building under the same wind conditions (red line) shows that, most of the corner cases in diverging inlet and a certain number of cases (when separation $D > 15$ m) in converging inlet, for both building heights, lead to greater concentration of the wind over the roof. More precisely, we find that the best corner cases for the model with $H=10$ m have [1.9–3.7%] higher wind energy potential than the single reference building while, for $H=20$ m, the advantage of the best cases can reach [4.4–12.7%].
3. As the evaluation altitude increases (from $Z=3$ m to $Z=10$ m), the best wind direction for these best distance cases changes from 45° to $30^\circ/60^\circ$. Meanwhile, as turbulent intensity increases with altitude, the higher altitude plane shows more fluctuation and asymmetry on M values, and this is more pronounced in cases where $H=10$ m than $H=20$ m. In addition, for model with $H=20$ m in both inlet modes, the higher the test altitude is, the more obvious is the advantage of a corner configuration over that of two isolated identical buildings. For $H=10$ m this phenomenon does not exist.

Table 4
Category of variables for the configuration parameter study.

Configuration parameters	Variables (m)	Cross-assess parameters			
		Converging inlet angle θ_{con}	Diverging inlet angle θ_{div}	Corner distance D (m)	Test altitude over roof Z (m)
Building height (H)	$H10, H20$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$	$D5, D15$	$Z=3$
Building length (L)	$L10, L15, L30$	$45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$	$45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$	$D30, D45$	$Z=5$
Building width (W)	$W4, W6, W10$	90°	90°	$D60$	$Z=10$

4. For both models $H=10$ m and $H=20$ m, the curves of the value of M in converging inlet mode are more dispersed than those in diverging inlet mode. This means that wind energy potential is more sensitive to differences in corner separation in converging mode than in diverging mode. This can be attributed to the configuration: wind flow in converging mode tends to show more interaction in the corner centre than wind flow in diverging mode. However, as the corner separation changes, the interaction can show a concentration effect or a counteraction effect.

Summing M for all the inlet directions gives a general image of wind potential without a dominant wind direction (Fig. 15). It can be seen that:

1. For converging modes, both heights show a distinct advantage of the case $D45$ m (average 14% between the best and the worst) while, for diverging modes there is very little difference among the cases of different distances (average 3% between the best and the worst, the best cases being $D5$ m for $H=10$ m and $D15$ m for $H=20$ m).
2. For cases in converging inlet, wind energy concentration over the roof generally decreases with increasing corner separation while, for diverging inlet, it generally increases with the separation distance up to $D45$ m.
3. For the model with $H=10$ m, the point where the converging and diverging inlet show the same wind energy potential is around $D40$ m while, for the model with $H=20$ m, the point can be taken as $D20$ m. This means that for high buildings in corner shape, only at small separation distances that the diverging mode captures more wind energy than the converging mode; while for low buildings of the same plane, the diverging mode can remain superior over large separation distances.
4. Both converging and diverging mode show more fluctuation of M values for the model with $H=20$ m than that with $H=10$ m. This can be explained by the influence of ground roughness, which tends to have a bigger influence on the flow performance on the same evaluation plane over a low roof than over a high roof. That could explain why the model with $H=20$ m shows more advantage over case SM when the evaluation plane altitude increases than the model with $H=10$ m does.

3.2.2. Impact of building length and width

Here, in addition to the reference building ($W \times L \times H = 6$ m \times 15 m \times 10 m) another two building lengths ($L = 10$ m, 30 m) and two building widths ($W = 4$ m, 10 m) were studied (Fig. 16). For all the cases, we get an extensive inspection of M corresponding to the change of inlet direction, test altitude above the roof and corner separation, as the same as the results got for the reference building case shown above. However, to save space and make the trends of results clearer, only the sum of the values of M over all inlet directions is shown, for converging and diverging inlet modes (Fig. 17).

By comparing the sum of value M (over all inlet angles) for different building lengths and different building widths, it can be seen that:

1. Results in planes $Z=3$ m and $Z=5$ m show similar tendencies.
2. For building length change: (1) all the curves first rise and then fall as corner separation increases; (2) the most profitable corner separation is generally $D = 30$ m (for all cases of converging inlet and case $L10$ m in diverging mode) or probably $D = 15$ m (for case $L30$ m in diverging mode); (3) for both converging and diverging inlet, corners with building length $L = 10$ m more advantageous than those with other lengths most of time.

3. For building width change: (1) the curves cross each other and the best width differs somewhat between evaluation plane $Z=3$ m to plane $Z=5$ m. However, the model $W4$ m generally shows more potential density than other widths; (2) the most profitable corner separation varies: for model $W4$ m it is $D30$ m, for $W6$ m is rather $D45$ m while for $W10$ m it is $D45$ m or higher. So it seems that the best corner separation increases when wider buildings are considered.

4. Discussion

4.1. Verification of simulation

Since there are no tunnel experiment data available for direct validation with our perpendicular corner configuration models, we made an extensive CFD parameter study validated by published tunnel experiment data. In addition, a full inlet angles (0–90°) for these symmetrical corner models were intentionally applied for error control. Results show that 95% of the cases had an error smaller than 5% of the outcome between two symmetrical angles (see Fig. 18(a)). Some large relative error points appear in the group 0°/90°. In a global view, Fig. 18(b) shows the average square root of all these relative errors, and can be seen that the general relative error of value M is less than 2.5% except for some cases of 0°/90°. In addition, for both converging and diverging cases, the error decreases monotonically from the 0°/90° group to the 30°/60° group. This is good news as we see that in most cases, the value of wind energy indicator M increases from 0°/90° to 30°/60°. Therefore, for the most favorable wind capture inlet angle (rather 45° or 30°/60°), the expected error of the simulation is very small (generally under 2%).

4.2. Assessment of wind energy amplification effect

To evaluate the wind energy concentration effect over the roof, we apply the amplification factor F (see Eq. (5)) to compare the wind potential of the corner configuration models with the free field wind potential (without building). Models of reference buildings with $H=10$ m and $H=20$ m were chosen for assessment here. To clarify the differences among different inlet angles, values of M from two symmetrical angles were averaged. Variations of the factor F between converging and diverging inlet mode and among three assessment altitudes are shown.

From Fig. 19 we can see that:

1. Most of the time, the amplification factor increases monotonically with changing inlet angle from 0° (90°) to 45°.
2. The amplification factor of model $H=20$ m, compared with that of $H=10$ m, shows obvious larger values when the test altitude is high enough to develop wind energy ($Z=5$ m and 10 m).
3. The plane $Z=3$ m is generally discouraging as $F < 1$, and so does the model with $H=10$ m in converging inlet. It seems that the corner-shape buildings need to reach a certain height to make the wind energy development over their roofs profitable and possible.
4. For $H=10$ m, the diverging inlet mode always has a higher factor F than the converging mode, while for $H=20$ m, the difference in F between them is quite small.
5. As assessment altitude increases, the general amplification factor increases and then decreases. This means there should have an optimum altitude for wind energy development over roof. More altitudes can be evaluated for some specific cases if necessary.

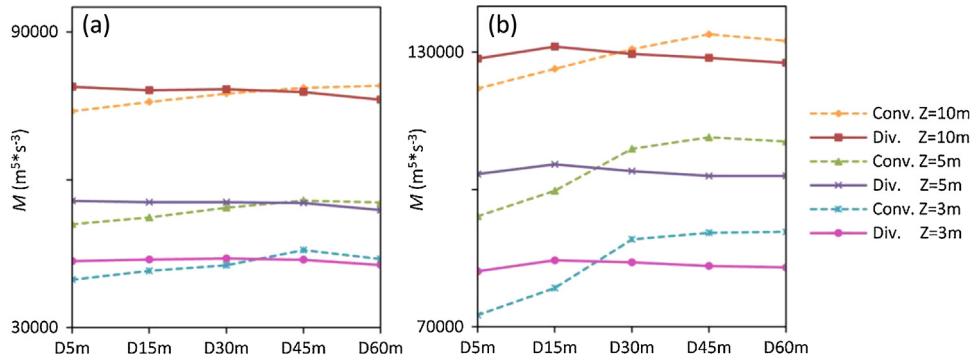


Fig. 15. Wind energy M comparison between converging and diverging inlet: (a) $H = 10$ m, (b) $H = 20$ m.

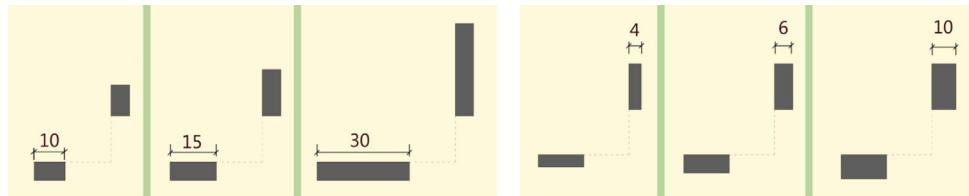


Fig. 16. Symmetrical corner forms with different building lengths (left) and group with different building widths (right).

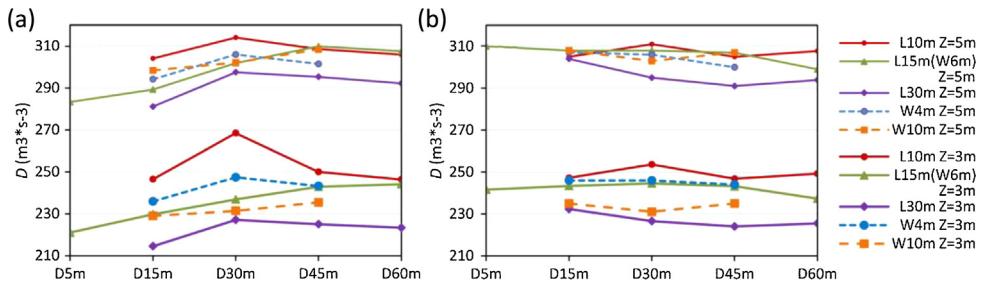


Fig. 17. Sum of wind energy M on plane $Z = 3$ m/5 m above roof: (a) converging mode, (b) diverging mode.

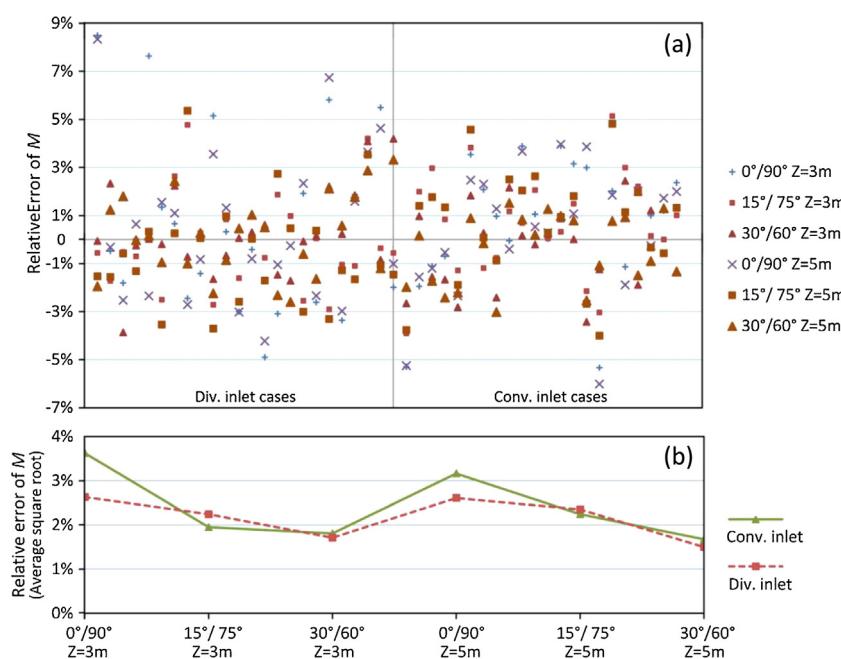


Fig. 18. Relative error of M between two symmetrical angles: (a) individual, (b) averaged.

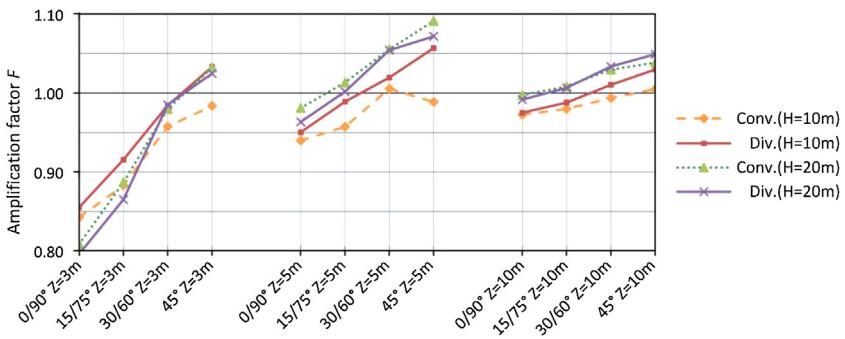


Fig. 19. Wind energy amplification at different inlet directions.

5. Conclusion

In this paper, a close CFD parameter study was performed and validated by a previous wind tunnel experiment, before starting our planned simulation for wind energy assessment. A set of parameters were considered for two symmetrical perpendicular buildings forming a corner. Different building lengths, widths, and heights, size of corner openings, inlet angles and modes, and assessment altitudes were applied. The simulation was partially verified by the acceptable discrepancies found between the results for two symmetrical angles.

The main points from our simulation can be summed up as follows:

1. 45° is the best inlet direction in most cases. Some cases show that $30^\circ/60^\circ$ can also be a good choice, but hardly show any great advantage over 45° .
2. In converging inlet mode, the wind energy over the roof generally increases sensibly with larger corner separation, while in diverging inlet mode it decreases rather slowly with corner enlargement.
3. For low buildings, the converging inlet mode should be avoided for wind energy development. For high buildings there is very little difference between the two inlet modes.
4. Compared with a single, isolated reference building, most of the corner cases studied here showed greater wind energy density over the roof.
5. Generally, buildings covering a small plan area (with small length or small width) had more wind energy density than buildings covering a big plan area. However, the total amount of energy produced and the economic efficiency needs to be considered in actual situation.
6. There appears to be an optimum altitude over the roof where the maximum energy amplification factor is attained.

This paper is limited on the study of two-perpendicular-building configuration. General tends are provided for various configurations rather than precise parameter choices for each particular case. Further simulations and evaluation are needed for practical application of wind turbine into architecture. In addition, as this paper is part of ongoing research on wind energy development with respect to urban morphology, future work will use some other building configuration types and more complex models, e.g., at community scale, to contribute to urban planning proposals on wind energy development.

References

- [1] L. Fried, S. Shukla, S. Sawyer, S. Teske, S. Bryce (Eds.), *Global Wind Outlook*, Global Wind Energy Council and Greenpeace International, Amsterdam, 2012.
- [2] N.S. Campbell, S. Stankovic, Final Report of the Project WEB (Wind Energy for the Built Environment), BDSP Partnership, London, 2001.
- [3] A.G. Dutton, J.A. Halliday, M.J. Blanch, The feasibility of building mounted/integrated wind turbines (BUWTs): achieving their potential for carbon emission reductions, in: Final Report, Under Contract of Carbon Trust (2002-07-028-1-6), Energy Research Reference, CCLRC, 2005.
- [4] WINEUR, Wind energy integration in the urban environment. Deliverable 1.1, Technology inventory report, EIE/04/130/S07.38591, Project WINEUR, 2005.
- [5] Centre for Sustainable Energy of UK, Final Report, Ealing Urban Wind Study, Centre for Sustainable Energy of UK, 2003, (<http://www.cse.org.uk/pdf/pub1027.pdf>) (accessed on 6 Nov, 2014).
- [6] Energy Task Force, Windmill Power for City People: A Documentation of the First Urban, ARENE Ile-de-France, Paris, 2006.
- [7] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Butthion, Eoliennes en milieu urbain—Etat de l'art, ARENE Ile-de-France, Paris, 2006.
- [8] EnCraft, Final Report of the Warwick Wind Trials Project, 2009, (www.warwickwindtrials.org.uk) (accessed on 6 Nov, 2014).
- [9] S. Mertens, Wind Energy in the Built Environment: Concentrator Effects of Buildings, Technology University of Delft, Published by Multi-Science, Delft, 2006 (Ph.D. Thesis).
- [10] W.T. Chong, A. Fazilizan, S.C. Poh, K.C. Pan, W.P. Hew, F.B. Hsiao, The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omnidirection-guide-vane, *Appl. Energy* 112 (2013) 601–609.
- [11] L. Campos-Arriaga, Wind Energy in the Built Environment: A Design Analysis Using CFD and Wind Tunnel Modelling Approach, University of Nottingham, Nottingham, 2009 (Ph.D. Thesis).
- [12] D.R. Drew, J.F. Barlow, T.T. Cockerill, Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: a case study for Greater London, UK, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 115 (2013) 104–111.
- [13] J.T. Millward-Hopkins, A.S. Tomlin, L. Ma, D.B. Ingham, M. Pourkashanian, Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model, *Renewable Energy* 60 (2013) 701–710.
- [14] D. Perwita Sari, W. Banar Kusumaningrum, A technical review of building integrated wind turbine system and a sample simulation model in central Java, Indonesia, *Energy Procedia* 47 (2014) 29–36.
- [15] L. Lu, K.Y. Ip, Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 13 (2) (2009) 450–461.
- [16] F. Bonneaud, *Ventilation naturelle de l'habitat dans les villes tropicales: Contribution à l'élaboration d'outils d'aide à la conception*, L'Ecole d'Architecture de Nantes, Nantes, 2004 (Ph.D. Thesis).
- [17] B. Blocken, W.D. Janssen, T.V. Hooff, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus, *Environ. Modell. Softw.* 30 (2012) 15–34.
- [18] M. Casey, T. Wintergerste (Eds.), ERCOFTAC SIG "Quality and Trust in Industrial CFD": Best Practice Guidelines, ERCOFTAC, 2000, London, 2000.
- [19] J. Franke, C. Hirsch, A.G. Jensen, H.W. Krüs, M. Schatzmann, P.S. Westbury, S.D. Miles, J.A. Wisse, N.G. Wright, Recommendations on the use of CFD in wind engineering, in: J.P.A.J. van Beeck (Ed.), Proc. Int. Conf. Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment, 5–7 May, von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 2004.
- [20] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen, B. Carissimo, Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, in: COST 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 2007.
- [21] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, AJI guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (10–11) (2008) 1749–1761.
- [22] B. Blocken, J. Carmeliet, T. Stathopoulos, CFD evaluation of the wind speed conditions in passages between buildings—effect of wall-function roughness modifications on the atmospheric boundary layer flow, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95 (9–11) (2007) 941–962.
- [23] M. Bottema, *Wind Climate and Urban Geometry*, Technology University of Eindhoven, Netherlands, 1993 (Ph.D. Thesis).
- [24] P.S. Edusseriya, *Urban Morphology and Air Quality: a Study of Street Level Air Pollution in Dense Residential Environments of Hong Kong*, University of Hong Kong, Hong Kong, 2006 (Ph.D. Thesis).

- [25] S. Reiter, Validation process for CFD simulations of wind around buildings, in: 2008 European Built Environment CAE Conference, 2008.
- [26] A.A. Razak, A. Hagishima, N. Ikegaya, J. Tanimoto, Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment, *Build. Environ.* vol. 59 (2012) 56–65.
- [27] T. van Hooff, B. Blocken, L. Aanen, B. Bronsema, Numerical analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: influence of building width, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104–106 (2012) 419–427.
- [28] P. Gousseau, B. Blocken, G.J.F. van Heijst, Quality assessment of large-eddy simulation of wind flow around a high-rise building: validation and solution verification, *Comput. Fluids* 79 (2013) 120–133.
- [29] W.J. Beranek, Wind environment around building configurations, *Heron* 29 (1) (1984) 33–70.
- [30] B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, Wind environmental conditions in passages between two long narrow perpendicular buildings, *J. Aerosp. Eng.–ASCE* 21 (4) (2008) 280–287.
- [31] R. Yoshie, 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, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95 (2007) 1551–1578.
- [32] J. Hang, Z.W. Luo, M. Sandberg, J. Gong, Natural ventilation assessment in typical open and semi-open urban environments under various wind directions, *Build. Environ.* 70 (2013) 318–333.