



**HAL**  
open science

## Géométrie et microclimat : sinuosité et vent

Houda Belgacem

► **To cite this version:**

Houda Belgacem. Géométrie et microclimat : sinuosité et vent. Architecture, aménagement de l'espace. 2015. dumas-01281685

**HAL Id: dumas-01281685**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01281685>**

Submitted on 4 May 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



**MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS**

**SPECIALITE ATMOSPHERE, EAU ET ENVIRONNEMENTS URBAINS**

**Année 2014 / 2015**

**Thèse de Master STEU**

***Diplôme cohabilité par  
l'École Centrale de Nantes,  
l'École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes  
l'École nationale supérieure d'architecture de Nantes,***

Présentée et soutenue par :  
Houda BELGACEM

Le 30 Septembre 2015

à l'École Nationale Supérieure de l'Architecture de Nantes

**TITRE**

**GEOMETRIE ET MICROCLIMAT : SINUOSITE ET VENT**

**JURY**

Président : Isabelle CALMET

Fonction : Maître de conférence

Examineurs : Thomas LEDUC  
Benjamin MORILLE

Fonction : Ingénieur de recherche  
Fonction : Chercheur postdoctoral

---

Directeurs de mémoire : Thomas LEDUC - Benjamin MORILLE

Laboratoire/Institution : CRENAU, Centre de Recherche Nantais Architectures Urbanités  
Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

## Remerciements

Ce travail de stage de mastère a été effectué au Centre de Recherche Nantais Architectures Urbanités (CRENAU) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Je dois à Monsieur LEDUC Thomas, Directeur du CRENAU de très vifs remerciements pour m'avoir accueilli dans son équipe et pour avoir suivi avec intérêt l'évolution de ce travail qu'il a inspiré. C'est grâce à ses conseils judicieux, sa disponibilité scientifique et la confiance qu'il m'a toujours témoignée que j'ai pu mener à bien ces recherches. Je remercie Monsieur Benjamin Morille qui a co-encadré ce travail et qui n'a cessé de m'accorder l'appui de son expérience. J'ai ainsi la chance de bénéficier de ses critiques enthousiastes, les discussions que nous avons eues m'ont beaucoup appris dans le domaine de la simulation aéroulque.

Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait Madame Isabelle CALMET, directrice adjointe de l'IRSTV à l'Ecole Centrale de Nantes, en s'intéressant à ce travail et en acceptant de faire partie du jury. Je n'oublie pas ses directives précieuses dès le début de ce stage, je lui exprime ma sincère reconnaissance.

A Monsieur Bassem Ehessan Abdulkader Al-Hafiz, membre au CRENAU, j'exprime mes sentiments très respectueux et reconnaissants pour ses encouragements constants, son aide efficace et suggestions relatives à la partie simulation.

Je saisis cette occasion pour adresser mes remerciements à tous les chercheurs du CRENAU, qui ont su faire régner une ambiance agréable et un bon esprit de coopération amicale.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Mes sincères respects et reconnaissances à mes très chers parents que je ne saurais trouver les mots pour les remercier.

## Résumé :

L'expansion de l'urbanisation et ses impacts sur l'environnement urbain prennent de plus en plus une importance urgente dans le domaine des recherches architecturales et urbaines. Les architectes et les urbanistes sont appelés à prendre en compte des effets de leurs conceptions sur la vie extérieure des gens. Les activités humaines dans l'espace extérieur, que nous le nommons par vide urbain, prennent une grande part dans notre vie quotidienne. L'atmosphère urbaine dedans est le facteur principal de l'agrément des usagers de l'espace. Plusieurs études ont montré que la morphologie urbaine modifie les paramètres climatologiques pour créer une 'propre' atmosphère urbaine : un microclimat. En effet le climat 'perçu' sur différentes échelles, ville, quartier, rues, est déterminé non seulement par les conditions climatiques mais aussi principalement par la géométrie de l'espace bâti. Dans le contexte du développement durable, plusieurs recherches se sont orientées vers la définition d'un système d'outil de corrélation qui traduit la relation entre ce qui est bâti et ce qui est engendré comme réaction climatique et l'atmosphère consécutive. Notre travail s'insère dans cette thématique. Le vent est une composante microclimatique et un phénomène complexe. Il engendre des anomalies graves qui affectent notre plaisance aussi bien extérieure qu'intérieure, voilà pourquoi ce volet exige un scrutateur obligatoire sur sa performance comme un champ simulé. Ce mémoire de mastère a pour but de quantifier la relation entre le mouvement du vent proche du sol et une géométrie urbaine spécifique caractérisée par du vide urbain sinueux. Nous avons établi en particulier le lien entre ces deux éléments à travers des simulations appliquées à des cas d'études théoriques. Cette recherche vise à établir un outil mathématique qui aide à identifier les zones confortables et inconfortables si bien que nous pourrions concevoir le bon endroit et l'orientation adéquate tous deux appropriés à un meilleur climat. Ceci est bénéfique pour les planificateurs, les architectes et les concepteurs pour assurer la qualité de l'ambiance dans les sites à fréquenter.

**Mots-clés** : géométrie urbaine, morphologie urbaine, vitesse du vent, microclimat, simulations aérodynamiques, confort du piéton.

## **Abstract:**

The growth of urbanization and its impact on environment has become nowadays a current issue for architects and urban planners. As a concrete image of architectural art, the urban design has to respond to several human needs in many fields. This includes comfort and his well-being overlooked the climatic conditions. In fact several researches concluded that the climate which is perceived by people, in cities, quarters and streets, is not only explained by the 'weather characteristics' but chiefly by the way the morphology of the urban framework impact on climate components. Being an integral part of our everyday lives, the climate or the 'microclimate "felt" by pedestrian, affect our comfort and our behavior in open spaces. Looking forward a sustainable development of cities, this matter has lead several works to define the relationship between the shape of urban envelope and atmosphere '*created*' within. This interaction is manifested throw the modification of the properties of microclimate's factors and the physical phenomena generated into the outer space. Our work belongs to this matter. The wind is a microclimatic component and a complex phenomenon. It leads to serious anomalies affecting our outdoor and indoor pleasance. That's why this ground requires a compulsory scrutinizing on its performance as a 'stimulated' field. This master thesis aims to quantify the relationship between the movement of wind near ground and a specific kind of urban geometry characterized by a sinuous urban void. We have established in particular the link between these two elements through simulations applied to case studies. This research on predicting a mathematical tool helps to identify areas comfortable and uncomfortable so we could design the right place and adequate orientation both appropriate to a better climate. This is beneficial for planners, architects and designers to ensure the quality of the atmosphere in the sites to frequent.

**Keywords:** urban geometry, urban morphology, wind velocity, microclimate, aerodynamic simulations, pedestrian comfort.

## Table de matière

<b>Introduction</b>	
générale.....	07
<b>Problématique</b> .....	10
<b>Chapitre I : Le vent dans l'espace urbain : Effets et usage</b> .....	12
<b>I. Introduction</b> .....	12
<b>II. Effet du vent dans le vide urbain</b> .....	12
<b>II.1. Effet du vent sur le piéton</b>	
<b>II.1.1. Impact sur le confort thermique</b>	
<b>II.1.2. Confort aérodynamique (effet mécanique)</b>	
<b>II.2. Effet du vent sur la consommation énergétique des bâtiments</b>	
<b>II.3. Effet du vent sur la qualité de l'air et la dispersion de la pollution</b>	
<b>III. Effet de la morphologie urbaine sur le vent</b> .....	17
<b>III.1. Echelles spatiales de la surface urbaine - La couche limite atmosphérique</b>	
<b>III.1.1 La sous couche de rugosité : échelle microclimatique</b>	
<b>III.1.2 La sous couche inertielle : échelle locale</b>	
<b>III.1.3 La couche limite urbaine : échelle méso-climatique</b>	
<b>III.2. Géométrie des ensembles bâtis et vent</b>	
<b>III.3. Géométrie des rues et régime de l'écoulement aérodynamique</b>	
<b>III.4. Matérialisation de la relation entre le vent urbain et la morphologie urbaine</b>	
<b>IV. Objectifs</b> .....	35
<b>V. Méthodologie du travail</b> .....	36
<b>VI. Conclusion</b> .....	36
<b>Chapitre II : La sinuosité urbaine</b> .....	37
<b>I. Introduction</b> .....	37
<b>II. Définition d'un tissu urbain - le tissu urbain organique courbé</b> .....	38
<b>II.1. Ebauche sur les ambiances dans les tissus organiques</b>	
<b>II.2. Analyse géométrique de la rue sinueuse</b>	
<b>II.2.1. Méthode métrique</b>	
<b>II.2.2. Méthode de rugosité</b>	
<b>II.2.3. Méthode fractale</b>	
<b>II.2.4. Méthode de la Syntaxe spatiale</b>	
<b>II.3. Synthèse</b>	
<b>III. Calcul de la sinuosité</b> .....	45
<b>III.1. Définition</b>	
<b>III.2. Représentation cartésienne</b>	
<b>III.3. Cas d'un trajet sinusoïdal</b>	
<b>IV. Squelettisation de l'espace urbain</b> .....	47
<b>IV.1. Définition de la squelettisation urbaine</b>	

IV.2. Méthode de représentation du squelette pour une forme donnée	
V. Conclusion.....	49
<b>Chapitre III : Cas d'étude et Simulations.....</b>	<b>50</b>
I. Introduction.....	50
II. Présentation des cas d'étude.....	51
II.1. Description de la morphologie	
II.2. Principe d'enchaînement	
II.2. Modélisation du cas d'étude	
II.2. Maillage du modèle 3D	
III. Simulation numérique.....	59
III.1. Présentation du logiciel de simulation (CFD)	
III.1.2. Code Saturne	
III.2. Données de base et paramétrage	
III.2.1. Choix du maillage (Gmsh)	
III.2.2. Données de base	
III.2.3. Choix de la direction du vent	
III.3. Mode opératoire	
IV. Résultats des calculs.....	65
IV.1 Cas initial	
IV.1 Variation de la période $\lambda$	
IV.1 Variation de l'amplitude A	
V. Conclusion.....	72
<b>Chapitre IV : Analyse des résultats et discussion.....</b>	<b>73</b>
I. Introduction.....	73
II. Effet de la sinuosité.....	74
II.1. Analyse des cas théoriques	
II.1.1 Variation de la longueur d'onde $\lambda$ , à une amplitude constante	
II.1.2 Variation de l'amplitude, pour une période $\lambda$ constante	
II.3. Evolution de la sinuosité directionnelle	
II.4. Phénomène aéraulique et forme de	
III. Liaison entre la répartition spatiale du vent et la géométrie sinueuse : Corrélation et analyse du confort.....	85
IV. Conclusion.....	87
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>88</b>
<b>Annexe 01.....</b>	<b>89</b>
<b>Annexe 02.....</b>	<b>98</b>
<b>Annexe 03.....</b>	<b>102</b>
<b>Annexe 04.....</b>	<b>105</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>110</b>

## Introduction générale

Les projets architecturaux et urbains visent à répondre aux besoins de l'homme, assurer son confort et modeler l'espace pour une vie commode et saine. Cela est valable aussi bien pour un espace intérieur ou extérieur, un milieu permanent (demeure) ou milieu éphémère (espace de travail). Le confort de l'être humain peut être sensoriel, ou physiologique par effets climatiques. Selon la deuxième approche, les bâtiments forment un abri pour l'homme et déterminent son bien-être et sa qualité de vie, comme l'a dit Winston Churchill "We shape our dwellings and afterwards our dwellings shape us." (Nous façonnons nos habitations qui façonnent en retour notre vie); c'est le cas pour les rues, les quartiers et les villes où on vit.

A cause de l'expansion de l'urbanisation galopante qui ne cesse d'augmenter sur une échelle de temps étroite, et de ses corollaires socio-économiques et environnementaux négatifs, la recherche du confort devient de plus en plus difficile et incertaine. Les centres villes ne cessent de se densifier et les limites des villes de s'élargir. Les collectivités locales, les concepteurs (architectes et urbanistes) œuvrent à trouver un compromis entre l'extension de l'urbanisation et la bonne qualité environnementale, c'est un défi d'actualité. Cette question d'impacts environnementaux et climatologiques fut une préoccupation majeure dans le domaine de la recherche. Divers axes traitant de cette problématique se développent pour comprendre et analyser cette double peine. On privilégie souvent l'espace public comme domaine de réflexion et d'action à cause de son importance en tant que bien commun et propriété attachée aux citoyens. L'espace extérieur où se manifeste l'interférence morpho-climatologique, est un espace ouvert défini comme suit:

***"L'espace ouvert est une expression utilisée par les urbanistes pour désigner les superficies non bâties intégrées dans le fonctionnement des aires urbanisées." (Mayte Banzo, 2009,P.5).***

Cet espace ouvert est un vide urbain qui témoigne des instabilités climatologiques, qualité d'air troublée par la dispersion des polluants, taux de renouvellement d'air affaibli, confort thermique et aérodynamique non assuré, consommation excessive de l'énergie par les bâtiments, apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain et la dissipation nocturne insuffisante de l'excès de chaleur diurne. L'atmosphère qui règne dans un milieu extérieur influence le ressenti des usagers, leurs comportements et influe sur la relation espace-individu. Cette ambiance urbaine est liée strictement au microclimat. Ainsi assurer une ambiance plaisante garantit l'agrément des piétons en matière de praticabilité de l'espace.

Pour comprendre les facteurs de ces perturbations microclimatiques, il faut avoir recours principalement au 'dessin urbain'. Les villes, les quartiers et les rues influent et changent les conditions climatiques, pour produire un microclimat propre à une étendue limitée. La considération de l'effet des constructions sur l'atmosphère urbaine a commencé depuis le VII<sup>e</sup> siècle dans l'historique de l'urbanisme français. En effet, les projets 'd'embellissement' ont, intentionnellement ou non, amélioré les conditions de vie à travers des nouvelles stratégies de



pensée sur la conception et le modelage de l'architecture de la ville et des quartiers. Cela a contribué également à faciliter l'accès de l'air et la lumière aux espaces entre bâtiments.

A la lumière de cela, nous avons essayé d'établir un lien entre ce qui est la forme du bâti et ce qui est généré en climatologie. Nous avons cherché des indicateurs et des moyens de prévention pour les mettre au profit des urbanistes, des architectes, des concepteurs pour s'assurer de la qualité d'ambiance qu'ils vont fournir aux usagers des lieux. La concrétisation de cette tentative se manifeste généralement sous forme de lois empiriques, simples et abrégées afin de prescrire une réaction microclimatique face à une configuration urbanistique ou architecturale.

Le but d'investiguer dans cette relation est de trouver un 'outil d'aide à la décision' qui sert à prévoir le changement des caractéristiques physiques des paramètres microclimatiques pour une conception donnée, et à la hauteur de l'homme. Pour cela, on croise des données géométriques intrinsèques et des données climatiques à travers des observations, des enquêtes et des simulations thermo-aérodynamique. On en déduit par-là la corrélation entre forme bâtie et comportement des paramètres climatiques. On instaure ensuite un lien ou une expression mathématique qui mène à une approximation de l'atmosphère urbaine future.

Le travail présenté dans ce rapport est réalisé au laboratoire de recherche CRENAU, à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. C'est dans les objectifs précisés précédemment que s'inscrivent les axes de recherche de ce laboratoire. Ses majeures orientations de recherche sont :

- La visualisation des phénomènes physiques autour des constructions à travers des simulations et des mesures.
- Leurs effets perçus par les usagers (effets sensoriels et sensibles sociaux).
- La prise en compte de la notion d'ambiance dans le processus de conception.

L'objectif de mon stage de mastère, s'inscrivant dans la thématique de l'effet de la morphologie urbaine sur le climat, est une contribution à la réflexion sur un paramètre approprié relatif à la configuration du vide urbain dans l'hétérogénéité urbaine afin de parfaire l'ambiance urbaine. Par-là, nous visons le développement d'une méthodologie permettant de modéliser l'effet de la morphologie urbaine sur la formation et la transformation des microclimats urbains et leur impact sur le confort aéraulique au niveau du piéton dans les espaces publics urbains.

Le mémoire débute par une synthèse bibliographique sur le vent dans l'espace urbain objet du premier chapitre dans lequel nous décrirons l'état d'art sur les effets du vent, la problématique et la démarche du travail. Le second chapitre constituera le support théorique du travail sur la répartition spatiale de la vitesse du vent. Nous y introduisons les indicateurs morphologiques principaux : la rugosité, la porosité et notamment le concept de la sinuosité urbaine pour laquelle nous proposerons une définition mathématique du facteur de sinuosité en l'illustrant par des exemples. Nous achèverons ce chapitre par la description d'un mode

opérateur d'évaluation de la répartition du profil de la vitesse en fonction de ces trois indicateurs.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons un calcul de simulation numérique de la vitesse moyenne du vent appliqué à des cas théoriques et existants (arrangements de pleins bâtis disposés suivent un arrangement alterné). Enfin, le quatrième et dernier chapitre sera consacré à l'analyse et au traitement des résultats obtenus. Nous tenterons de dégager une corrélation entre la répartition spatiale de la vitesse moyenne du vent et le changement des facteurs sinueux.

## Problématique

Pour faire face à l'antagonisme entre le gabarit de la ville et le climat urbain, les urbanistes disposent durant les différentes phases de l'élaboration des projets, des moyens adéquats pour prévoir la propagation des rayons solaires dans les espaces extérieurs. Ces outils évaluent qualitativement et quantitativement l'ensoleillement des zones urbaines, l'énergie directe et indirecte retenues par les parois... Cela permet par conséquent de changer l'esquisse avant de passer à l'exécution du projet ou de trouver des solutions atténuant l'inconfort produit.

Cependant, il reste un autre facteur climatologique très important en relation étroite avec l'atmosphère urbaine, qui n'a pas connu une attention suffisante : le mouvement du vent. Ce paramètre est négligé généralement par les designers bien qu'il s'est avéré que la vitesse du vent au niveau des piétons est parmi les paramètres les plus déterminants et décisifs pour leurs bien-être dans l'espace ouvert. (Stahopoulos, 2006 cité dans Moonen 2012). Le vent est un phénomène complexe qui varie au fil du temps en vitesse et en direction (phénomène de rafales). Quand l'air afflue d'un espace rural vers un espace urbanisé, il doit s'harmoniser avec les conditions 'géométriques' du nouveau milieu citadin. Il s'infiltré entre les masse bâties et crée des phénomènes aérodynamiques variés (Asimakopoulos *et al*, 2001).

La fluctuation du vent dans l'espace urbain définit l'ambiance perçue par l'individu. Elle agit sur le confort aérodynamique du piéton et est à l'origine de notre état de gêne ou d'aisance dans un espace extérieur. Le vent affecte aussi le taux d'inconfort thermique et la capacité d'adaptation du corps par rapport aux agressions de l'environnement. C'est ce qui explique éventuellement son effet biométéorologique : fréquentation d'un milieu urbain. Une évaluation du trajet du vent autour des bâtiments peut modifier radicalement notre manière de concevoir les espaces extérieurs et déterminer l'utilité de l'emplacement du mobilier urbain, ou localiser les zones qui soient adéquates à chaque type d'activité sociale. Dans l'aménagement urbain il ne suffit pas d'avoir les perspectives les plus attrayantes mais aussi les conditions les plus favorables.

L'influence du vent est importante dans le milieu extérieur de l'espace urbain, et aussi dans le milieu intérieur dans les projets architecturaux. Il est un élément prépondérant dans le transfert d'énergie à travers les parois : taux d'énergie émergente et celle réémise par les bâtiments. Il agit sur leurs performances en matière de durabilité.

Le vent agit aussi sur d'autres éléments qui touchent à la santé et la qualité de vie des individus : la pollution qui est dépendante du mouvement de l'air. La dispersion des polluants suit la trajectoire de l'infiltration de l'air autour des constructions et sa vitesse. Ainsi un profil de vent fort ou faible est le 'support' et 'l'outil' de la diffusion de la pollution dans l'atmosphère urbaine.

Donc, étudier le mouvement du vent dans la ville paraît nécessaire pour les décideurs et l'impact de leurs projets sur le plan hygiénique et sensoriel des piétons. Pour ce faire, il faut se focaliser sur l'enveloppe urbaine composite qui manie le profil du vent et sa direction. Plusieurs études sont lancées pour figurer ce lien entre la morphologie urbaine, son influence et les phénomènes aérodynamiques générés. On essayait de déduire aussi des combinaisons mathématiques qui donnent des mesures approximatives à l'estimation du changement aérodynamique. Les chercheurs ont développé des formules combinant des variables '*morphométriques*' afin de trouver un rapport entre leur altération et le changement du microclimat.

L'hétérogénéité urbaine est le moteur du développement des outils de prévision. On cherche à introduire des nouveaux paramètres géométriques qui tiennent compte de la complexité de la configuration spatiale d'une ville. En effet, dans le domaine aérodynamique, la ville est décrite comme une résistance face au vent, un champ de rugosité ou un groupement d'obstacles de hauteurs égales ou variées. Ces obstacles qui sont arrangés sous différents schémas entravent la circulation de l'air, la freinent, la ralentissent ou même l'accélèrent. C'est cette variation qu'on essaye d'interpréter. Mais le tracé de la ville est toujours considéré orthogonal et régulier, on ne prend pas en compte dans les maquettes d'expérimentation, un paramètre qui traduit la curvilinéarité du tracé urbain, c'est-à-dire si les rues ne sont pas rectilignes mais plutôt courbées, ou **sinueuses**.

Dans les revues que j'ai examinées, cette caractéristique des trajets tortueux, sinueux paraît implicitement dans quelques cas de figures. En effet lorsque on veut aborder la complexité urbaine, on a généralement recours aux projets existants comme les grands ensembles d'habitation, les quartiers avec des formes complexes, des campus universitaires... Dans ces configurations spatiales, on peut différencier des tracés courbés, sinueux ou des dispositions alternées qui entraînent un mouvement sinueux du vent. Certaines de ces études trouvent, intentionnellement, que les milieux délimités par cette caractéristique géométrique sont mieux protégés et plus homogènes en matière de vitesse du vent ressenti ou calculé par les outils de simulation.

Sur ce point, on se pose les questions suivantes :

- Comment définir la sinuosité en tant que forme géométrique ou urbaine?
- Aura-t-elle un effet distingué sur le mouvement du vent et de la répartition de sa vitesse moyenne ?

# Chapitre I

## Le vent dans l'espace urbain : Effets et usage

### I. Introduction

Le vent fait partie des éléments microclimatiques prépondérants qui affectent d'une manière significative l'atmosphère urbaine et le confort à l'extérieur. *Alain GUYOT* le définit comme étant '*Eléments d'agrément, de jeu, de nuisance et aussi de risque et de dégradation, le vent est un des facteurs climatiques qui modifie nos activités et qualifie l'ambiance de l'aménagement urbain et du confort des espaces extérieurs*'. Il touche à notre vie dans plusieurs domaines.

Dans ce chapitre, Nous passons en revue également des problématiques urbaines impliquant l'influence du vent (confort extérieur, dispersion des polluants...). Nous décrivons son comportement en milieu urbain et notamment les phénomènes aérodynamiques qui se créent autour des constructions. Ensuite, nous faisons le point sur l'état des connaissances scientifiques à propos de l'influence de la géométrie urbaine sur le microclimat urbain de manière générale et plus précisément sur le vent.

Nous abordons la problématique du travail en mettant l'accent sur les volets qui n'ont pas été suffisamment bien traités et développés. Nous décrivons en particulier les études faites sur la sinuosité dans les projets urbains. Cela nous permettra de dégager des questions qui attendent encore des réponses et dont les solutions proposées constitueront le travail envisagé que nous introduisons dans un dernier paragraphe de méthodologie.

### II. Effet du vent dans le vide urbain

Le vent est un phénomène complexe et instable. Il entre en interaction avec les autres composantes de l'atmosphère urbaine et conditionne ainsi l'ambiance dans le vide urbain. Le vide urbain est l'espace à l'extérieur des bâtiments (la voirie urbaine, les espaces communs (esplanades, parcs...) ou privés (terrasses, jardins dans les projets d'habitation...). Il contribue sur le plan du confort thermique, aéraulique des piétons et sur le plan hygiénique (qualité de l'air) et énergétique des bâtiments. Nous approfondissons ces notions dans la partie qui suit.

#### II.1. Effet du vent sur le piéton

Le vent est l'un des facteurs qui influencent le comportement piétonnier. Sa vitesse et la variation de sa vitesse (rafales) induisent des changements sur notre pratique des lieux. Il entre en interaction avec les autres composantes climatiques et change notre ressenti du confort urbain. Il agit sur la zone de contact entre le corps humain et les substances physiques (exemple : rayon solaire) l'environnement pour influencer ainsi notre perception des

ambiances climatiques. Généralement on décrit ces effets « directs » par un effet thermique et un effet mécanique.

### II.1.1. Impact sur le confort thermique

Le confort thermique exprime le bien-être physique des êtres humains exposés à une influence climatologique et traduit " *l'impression agréable qui procure la satisfaction du corps et de l'esprit* " (Dahech, 2014, P.2).

L'évaluation du confort thermique prend en considération l'interaction entre, d'une part, des éléments microclimatiques : la température, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire, et d'autre part, des éléments physiologiques : vêtements portés, métabolisme et activité physique. Le mouvement et la direction du vent agissent d'une manière prédominante sur la température. En effet '*lors d'une exposition au soleil, rayonnement d'onde courte, l'habillement et/ou la peau absorbent les rayons qui se transforment en chaleur. Un échange de chaleur s'effectue entre le corps humain et les surfaces avoisinantes par un rayonnement d'onde longue*'. (Grundström *et al*, 2003, P.45).

La vitesse du vent influe sur cet échange par convection entre le corps humain et l'air ambiant faisant du vent le deuxième paramètre climatique le plus influent sur le confort thermique (Johanson, 2006). Concernant la convection, son équation peut être déduite, de la vitesse du vent (W), la différence entre la température de l'air (T<sub>air</sub>) et celle de la personne (T<sub>per</sub>) (Brown *et al*, 1995).

$$C = F(W) * (T_{per} - T_{air})$$

Si la vitesse du vent augmente, la convection augmente à son tour. En se basant sur cela, et pendant les périodes de basses températures, la protection contre le vent est une priorité dans le processus de conception des projets architecturaux. Le pouvoir de refroidissement dépend de cet écart de température entre le corps humain et la température de l'air. Plus ce décalage est important plus la capacité de refroidissement de l'air est remarquable (Brown *et al*, 1995).

Cette chute de température perçue par l'individu est due à '*la réduction du pouvoir isolant de la couche d'air qui entoure le corps. Plus la vitesse de l'air est importante plus on ressentira un effet froid*' (Grundström *et al*, 2003, P.45).

Le vent peut également permettre des effets de refroidissement qui sont favorables en saison chaude. L'augmentation de sa vitesse peut donc être un inconvénient ou un avantage selon la région et la saison.

Le couplage de la vitesse de l'air à la température influe sur la perception de la température ambiante par l'être humain. Par exemple une température de l'air de 0°C avec une vitesse de l'air à 7 m.s<sup>-1</sup> nous fait sentir une température de -13°C" (Brown *et al*, 1995).

Suivant ce principe, dans leur rapport 'Climat et urbanisme : entre le confort thermique et le cadre bâti', Grunstrôm *et al*, (2003) ont défini la limite de la température supérieure et inférieure *ayant trait au confort thermique* de deux quartiers d'habitation, de morphologie différentes, à partir des mesures de la vitesse moyenne du vent et de l'humidité (tableau I.1).

<i>Vitesse résiduelles</i>	<i>Réactions</i>	<i>Situation</i>
<i>0 à 0,08 m/s</i>	<i>Plaintes quant à la stagnation de l'air</i>	<i>Aucune</i>
<i>0,13 m/s</i>	<i>Situation idéale</i>	<i>Installation de grand confort</i>
<i>0,13 à 0,25 m/s</i>	<i>Situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence.</i>	<i>Installation de confort</i>
<i>0,33 m/s</i>	<i>Inconfortable, les papiers légers bougent sur les bureaux.</i>	<i>Grandes surfaces et magasins</i>
<i>0,38 m/s</i>	<i>Limite supérieure pour les personnes se déplaçant lentement.</i>	<i>Grandes surfaces et magasins</i>
<i>0,38 à 0,5 m/s</i>	<i>Sensation de déplacement d'air importante.</i>	<i>Installations industrielles et usines où l'ouvrier est en mouvement.</i>

**Tableau I.1: Confort thermique à partir de la vitesse du vent, (Grunstrôm et al, 2003).**

### **II.1.2. Confort aéraulique (effet mécanique)**

Confronté aux implantations physiques de la ville, le vent, avec son caractère fluctuant et instable, génère des anomalies aérauliques autour des constructions. Ce qui met l'utilisateur dans l'obligation de résister à son écoulement fort et vent oscillatoire et retrouver l'équilibre physique et physiologique.

*Quand le vent souffle fort, on change de chemin, on cherche à se protéger, on évite de rouler à vélo, de marcher à côté d'un angle d'un haut bâtiment.* (Boussoualim, 2002, P.61).

Pour un seuil de gêne franchi, "l'obstacle humain" est sollicité et manifeste une acceptabilité ou non acceptabilité de la nuisance aérodynamique. Le vent était largement évoqué dans les enquêtes menées sur la fréquentation des lieux, des placettes, des jardins publics et différents types d'espace communs. Dans les recherches de Boussoualim (2002), sur l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur, le vent était évoqué, en première position, comme un facteur de la gêne climatique limitant l'usage de l'espace. Elle cite :

'37,5 % ont déclaré que le vent est le premier élément gênant et limitant leurs activités divertissantes, surtout place des Marronniers, 25 (24%) personnes ont évoqué le vent fort comme élément gênant' (ibid, P.133)

Face aux intempéries aérauliques, « l'acclimatation » des usagers se manifeste par une réaction mécanique du corps. Cette force exercée pour se maintenir à l'équilibre dans le déplacement, définit l'état de confort ou d'inconfort aéraulique (Ruros, 2004, cité dans Zekri, 2010). Le tableau I.2 présente l'échelle de Beaufort qui catégorise « l'agression » et la sollicitation mécanique du vent selon différents intervalles de vitesses.

<b>Force Beaufort</b>	<b>Vitesse d'air (m/s) à 2 m du sol</b>	<b>Effets « mécanique » du vent</b>
0 et 1	0 à 1,3	<i>Calme, pas de vent sensible.</i>
2	1,3 à 2,7	<i>Le vent est ressenti sur le visage, les feuilles bruissent</i>
3	2,7 à 4,5	<i>Les cheveux sont agités, Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanents Le vent déroule de petits drapeaux</i>
4	4,5 à 6,7	<i>Les cheveux sont décoiffés La poussière et les papiers sont soulevés du sol, Les petites branches s'agitent</i>
5	6,7 à 8,9	<i>La force du vent est ressentie sur le corps La neige commence à s'envoler, Les petits arbres commencent à osciller.</i>
6	8,9 à 11,2	<i>Il est difficile de marcher droit, Les parapluies sont difficiles à utiliser, Le vent soulève la neige au-dessus des têtes, Les grosses branches se mettent en mouvement, Le vent siffle dans les fils téléphoniques.</i>
7	11,2 à 13,9	<i>Il est difficile de marcher contre le vent Les arbres sont totalement en mouvement</i>
8	13,9 à 17	<i>Tempête, La marche est entravée Les branchements se cassent</i>
9	Supérieur à 17	<i>Forte tempête, Risque de perdre l'équilibre, Marche dangereuse</i>

**Tableau I.2: Echelle de Beaufort**

Cependant, le confort ou l'inconfort du piéton reste lié à d'autres fondements à « l'état subjectif » de l'individu : l'activité exercée, état physique et psychologique (exemple âge), la localisation importe aussi. Ce qui rend la délimitation des critères d'inconfort difficile. Lors



d'un débat au COST C14 "Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment" une expérimentation était lancée dans cinq institutions de recherche dans différents pays. Les instructions étaient identiques et l'objectif était d'établir le niveau du confort pour un piéton. Le travail est effectué en se référant aux critères du confort propre à chaque pays. Les résultats ont confirmé que même pour un environnement urbain simplifié, les critères du confort varient d'une manière importante d'un pays à un autre.

## II.2. Effet du vent sur la consommation énergétique des bâtiments

Ameur (2004) explique, dans le cadre de sa thèse, que les changements microclimatiques sont dus aux *'microcirculations d'air perturbant l'équilibre énergétique à deux échelles de l'urbain'*. Le vent intervient dans la consommation énergétique de deux manières :

- Lors de sa distribution autour des bâtiments, il crée des champs de surpression et de dépression répartis différemment. **Ceci renforce les pertes thermiques liées aux infiltrations de l'air** pour certaines conceptions de bâtiments.
- **de la même manière que pour ce qui se passe avec la peau du corps humain, le vent influence les pertes thermiques liées aux échanges convectifs**

Pour cela, il est souhaitable de :

- Concevoir l'arrangement des îlots urbains de manière à réduire la vitesse du vent et éviter le phénomène de perte de chaleur.
- Favoriser le potentiel de ventilation naturelle en canalisant les écoulements en adéquation avec la conception des enveloppes bâties (Brophy *et al*, 2000 cité dans Bouyer, 2009).

## II.3. Effet du vent sur la qualité de l'air et la dispersion de la pollution

En écho des actualités concernant les villes durables, certaines études se sont concentrées sur l'explication du phénomène de la pollution dans les villes, ainsi que les facteurs qui guident leur propagation. Certaines études ont montré que la concentration de la pollution de l'air dans les rues est dépendante de la morphologie. La forme de la rue influe sur la vitesse de l'air qui influe à son tour sur la répartition des polluants dans l'atmosphère. Les particules se répandent conformément à la vitesse et la direction du vent (Abdeldjouad, 2014).

Hallez *et al* (1988), ont mené des mesures in situ dans une artère à trafic intense à Bruxelles pour les corréler avec quelques paramètres météorologiques. On trouve parmi ces facteurs la vitesse et la direction du vent. Ils ont considéré que les périodes où la direction du vent est presque constante, provenant du même secteur (mesure pour une durée de 4 heures). En établissant une relation mathématique simple entre la concentration de l'agent polluant (Plomb (Pb) dans cette étude) et la vitesse moyenne, les auteurs constatent que *"Les concentrations les plus défavorables se rencontrent pendant l'année, en semaine et en fin d'après-midi lorsque la température et la vitesse du vent sont plus faibles"* (ibid, P.270).

Ce modèle élaboré est une contribution pour diriger des nouvelles stratégies de la régulation du trafic et éviter par la suite des situations de pollution néfastes aux usagers de l'espace urbain.

**Cette première partie d'état de l'art a servi à :**

- **faire ressortir l'importance de la présence du vent dans notre vie quotidienne.**
- **Enumérer les différents domaines où le vent est un facteur régulateur comme le confort des piétons dans l'espace extérieur.**

Chercher à étudier son mouvement dans les rues des villes paraît nécessaire, surtout du point de vue à l'influence morphologique.

Les perturbations du mouvement du vent et leurs impacts dans l'espace urbain sont dus aux causes thermiques et aux différentiels de pression, mais principalement à la morphologie urbaine qui conditionne la trajectoire du vent et sa fluctuation *'entre les différents quartiers à travers la forme parcellaire, et du tracé au sol et d'autre part à travers la forme et le mode de distribution des constructions.'* (Ameur, 2004).

### **III. Effet de la morphologie urbaine sur le vent**

#### **III.1. Echelles spatiales de la surface urbaine - La couche limite atmosphérique**

L'atmosphère urbaine est décomposée en plusieurs couches superposées qui définissent différentes échelles climatiques verticales (Strawbridge *et al*, 2004). Celles dont les phénomènes observés au niveau de la surface terrestre et faisant partie de la troposphère (première couche globale qui s'étend depuis le sol jusqu'à la limite de l'atmosphère libre) constituent ce qu'on appelle la couche limite planétaire (ou couche limite atmosphérique CLA), figure I.1 (Rotach *et al*, 2000).

D'un point de vue dynamique, la CLA est définie comme étant la zone de l'atmosphère où l'écoulement du fluide est influencé par l'interaction avec la surface terrestre directement. Son extension dépend ainsi directement des paramètres microclimatiques (essentiellement température, humidité et vitesse du vent) et de la nature des sites géographiques (océan, continental rural ou urbain). Elle est composée essentiellement de trois sous couches sur une épaisseur qui s'étend depuis le sol jusqu'à une limite de quelques kilomètres d'altitude.

##### **III.1.1. La sous couche de rugosité : échelle microclimatique**

Dans l'environnement à proximité immédiate du sol, les bâtiments, arbres, rues et espaces ouverts constituent des éléments isolés de dimensions relativement petites. Ces objets contribuent énormément à la variation de la température d'air et perturbent par-là les flux

d'air dans cet environnement immédiat en créant son propre microclimat. C'est dans ce contexte qu'on définit la micro-échelle comme étant la plus petite échelle caractéristique de la variation des paramètres climatiques à la surface du sol et des objets en contact avec l'air.

Le tissu urbain formé par ces irrégularités morphologiques (bâtiments, rues canyon, végétations, espaces ouverts) constitue ce qu'on appelle couche de canopée urbaine (CU) : couche atmosphérique située entre le sol et le niveau des toits. Cette canopée est considérée comme étant la base d'un environnement urbain inhomogène formant la sous couche de rugosité (sCR) dont l'épaisseur atteint en moyenne 1,5 fois la hauteur de la canopée urbaine (Oke et al, 1987). Cette sous couche est l'étendue d'influence de la canopée urbaine. Elle est caractérisée par des perturbations climatiques dont les origines sont naturellement les flux d'air turbulents engendrés par les structures urbaines irrégulières, c'est ainsi qu'elle est qualifiée de zone à fort gradient de vitesse de vent.

### III.1.2. La sous couche inertielle : échelle locale

La sous couche inertielle (sCI) surmonte la sous couche de rugosité relative aux effets microclimatiques. Elle débute des niveaux où la canopée n'a plus d'influence et est ainsi relativement homogène où les paramètres climatiques sont régulés, notamment les flux turbulents verticaux d'air sont pratiquement constants. La sous couche de rugosité et la sous couche inertielle sont deux parties adjacentes d'une même couche dite couche de surface (CS) qui s'étend en altitude jusqu'à 100 mètres à peu près. En zone rurale, la sous couche inertielle s'apparente à l'ensemble de la couche de surface (Rotach *et al*, 2000).

### III.1.3. La couche limite urbaine : échelle méso-climatique

La couche limite urbaine (CLU) est un cas particulier de la CLA vue la structure particulière des villes au-dessus desquelles elle se développe. C'est l'environnement de la couche de surface surmontée par une zone mélangée moins perturbée et qui est délimitée par l'espace de la ventilation naturelle équilibrée. Autrement dit, la CLU est une partie de la CLA où le mouvement de l'air est perturbé. Dans certaines conditions, elle peut s'étendre jusqu'à la limite de la CLA.

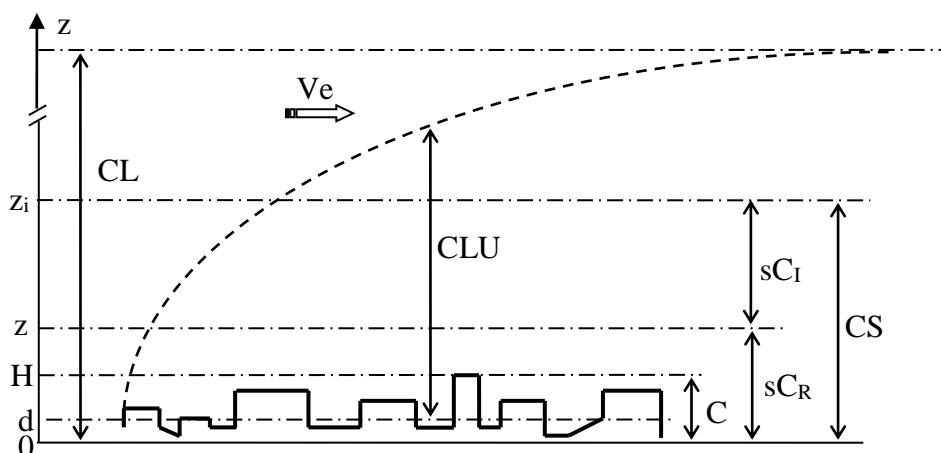


Figure I.1 Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain. source (Rotach *et al*, 2000).

**CLA** : couche limite atmosphérique      **CLU** : couche limite urbaine      **CS** : Couche de surface  
**sCI** : Sous-couche inertielle      **sCR** : Sous-couche de rugosité      **CU** : Canopée urbaine

Plus haut que la couche de surface, une zone d'équilibre aérodynamique domine où le flux de chaleur décroît avec l'altitude et le champ de vent résulte pratiquement de l'équilibre entre des forces naturelles : de pression, de frottement et de Coriolis (due à la rotation de la terre). A ce niveau, l'interaction des phénomènes météorologiques avec la surface urbaine se produit de manière plus globale dans la mesure où les influences d'une ville sur les paramètres climatiques et sur les conditions météorologiques sont analysées à grande échelle (mésos-échelle : échelle continentale ou régionale). La hauteur de celle-ci dépend des conditions générales de rugosité à l'échelle de la ville et de la stabilité des conditions atmosphériques.

Au-delà de cette couche on se retrouve dans les mêmes conditions climatiques que celles d'un site rural non influencé par les conditions de rugosité, c'est à dire celles de la couche limite atmosphérique (CLA). C'est l'atmosphère libre où les forces de frottement n'ont plus d'effet, le vent résulte uniquement de l'équilibre entre les forces de pressions et la force de Coriolis. On retrouve là une ventilation naturelle caractérisée par un vent uniforme, Est-Ouest et très peu turbulent (Abdeljaoued, 2014).

Remarquons que dans le cas où la densité des obstacles est importante (occupation plus de 25% de la surface du sol), le niveau apparent du sol par rapport à l'écoulement doit être remonté d'une hauteur dite hauteur de déplacement  $d$ . Ce concept de hauteur de déplacement  $d$  sera introduit comme on le verra au paragraphe IV dans la formulation du profil vertical de vitesse.

Dans la suite, nous limiterons notre étude à l'environnement de la canopée urbaine qui correspond bien au cadre de notre travail portant sur l'optimisation de la ventilation urbaine et par là sur le confort des espaces extérieurs.

### **III.2. Géométrie des ensembles bâtis et vent**

Bouketta *et al*, (2012) ont mis en exergue l'effet de la géométrie urbaine sur le flux de l'air, en se basant sur des mesures in situ (Jijel, Alger, figure I.2), suivies par des simulations numériques. Ils sont parvenus à montrer qu'à l'échelle humaine, la répartition des bâtiments est à l'origine des points de confort et d'inconfort sentis sur le terrain et par la suite de l'échec ou du succès d'un espace public.

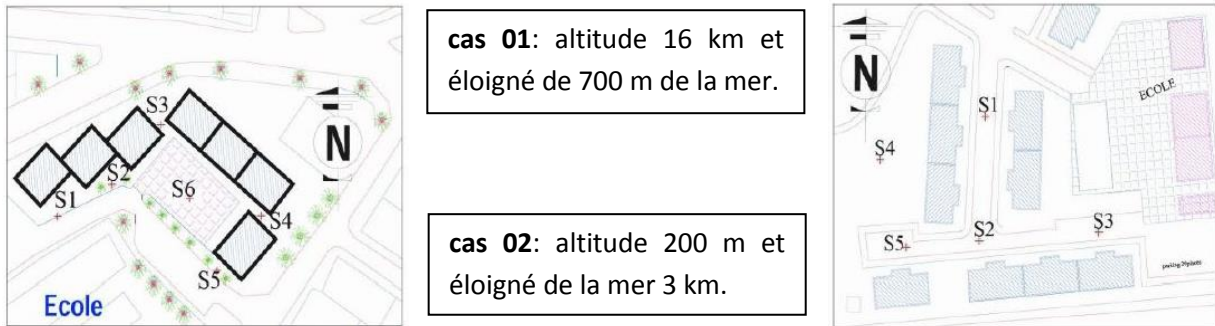


Figure I. 2 : Plan masse des deux ensembles d'habitation. source (Bouketta *et al*, 2012, P. 644 )

En outre, Ils se sont focalisés sur le modèle numérique d'un seul cas (cas 01) et ils ont effectué des transformations géométriques, figure I.3. En se référant aux points de gêne climatique venteux, ils ont remarqué que la disposition des bâtiments change, atténuée, ou augmente la vitesse moyenne du vent et par la suite l'état de désagrément en un point donné.

**L'agencement des bâtiments et leur exposition au vent conditionnent l'environnement aéraulique des espaces entre bâtiments.**

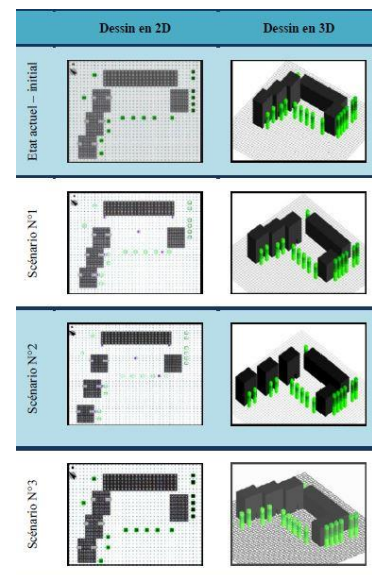


Figure I.3: modélisation et simulation du cas 01, source (Bouketta *et al* , 2012)

Dans le même contexte, Ouameur (2007) aborde la même problématique à travers l'expérimentation vécue le long d'un parcours et la révélation des ambiances visuelles et climatique perçues. Il a mesuré in situ des paramètres du climat dans trois tissus différents : un quartier dense de hauteur importante, un quartier résidentiel et un parc, les trois étant juxtaposés, figure I.4.

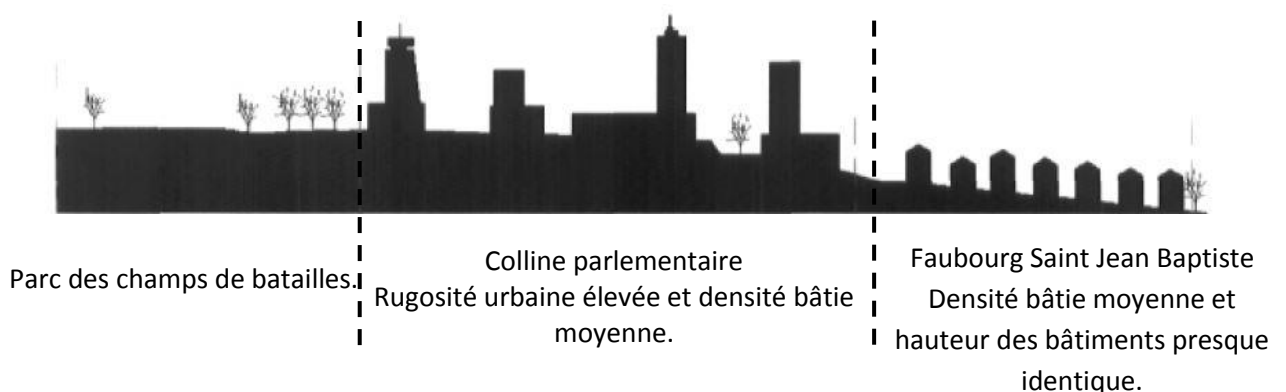
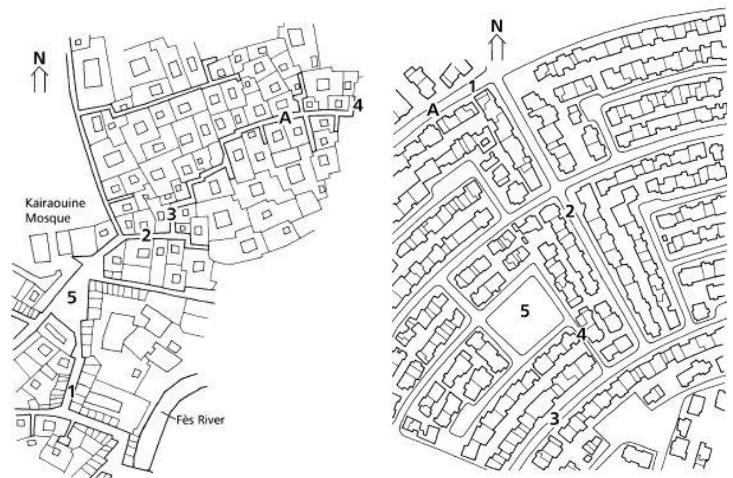


Figure I.4 : Profil des tissus urbains étudiés, Quebec - Canada (Ouameur, 2007)

Son objectif était d'étudier l'effet de cette dynamique environnementale sur la perception des ambiances thermiques et visuelles d'un piéton. Il a montré que microclimat change d'une configuration urbaine à une autre.

Par ailleurs, Johansson (2006) a contribué à l'étude de l'effet de la morphologie urbaine sur le microclimat des pays ayant un climat sec et chaud. Il s'est intéressé plus particulièrement à l'effet de la géométrie sur le confort thermique extérieur en comparant le microclimat dans deux rues canyons différentes illustrées dans la figure I.5, une appartenant à un tissu urbain 'moderne', avec une largeur relativement importante et l'autre étroite située dans un tissu médiéval. L'auteur a signalé que la vitesse du vent est plus stable dans le tissu médiéval que dans le tissu 'moderne' avec des rues plus larges : "As expected, the wind speeds were lower and more stable in the deep canyon" (Johansson, 2006).

Figure I.5 : Les deux cas d'étude, tissu médiéval (à gauche), tissu "moderne" (à droite) Fez – Maroc.  
source (E. Johansson, 2006, P.1328, P. 1329



Les trois exemples d'études cités précédemment, montrent que la composition géométrique du tissu urbain et la disposition en plan masse occasionnent l'infiltration des flux venteux. Ce qui implique par la suite un impact sur l'atmosphère microclimatique. Nous présentons dans la prochaine partie les caractéristiques du vent à une échelle plus réduite, celle de la rue.

### III.3. Géométrie des rues et régime de l'écoulement aéraulique

L'étude de l'atmosphère urbaine au niveau de la rue explique le processus d'interaction entre le gabarit de la ville et le climat. **Le design des rues est la clef des problèmes bioclimatiques urbains**, «As more than a quarter of the urban areas are usually covered by streets, designing urban streets plays an important role in creating the urban climate" (Shishegar, 2013, P.52).

La rue canyon, est le cas de figure utilisé dans la plupart des revues consultées. Shishegar a cité dans son article que la rue canyon est l'espace formé entre deux rangées de bâtiments parallèles séparés par une rue, elle constitue l'unité de base de la ville moderne (Syrios et al, 2008). En outre, les différents types de rue canyon figurant dans la publication d'Ahmed et al (2005) sont définis selon deux ratios d'aspect :

H/W et L/H.

- H : Hauteur des bâtiments
- W : Largeur de la rue
- L : la longueur des bords de la rue avant une intersection avec une grande artère.

H/W < 0.5	Rue peu profonde	Types des rues canyons	L/H = 3	Longue rue
H/W = 1	Rue uniforme		L/H = 5	Rue moyenne
H/W = 2	Rue profonde		L/H = 7	Rue courte

Selon Oke, le régime du vent peut être catégorisé à l'échelle de la rue suivant trois types de mouvement, figure I.6 :

- **rugosité isolée** (isolated roughness flow)
- **interférence de sillage** (wake interference flow)
- **rasant** (skimming flow).

Il lie l'apparition de chaque régime à une combinaison d'intervalle des deux ratios d'aspect cités précédemment. Les valeurs des bornes de ces intervalles sont évoquées souvent comme une base théorique pour les études aérauliques, mais les bornes qui cernent ces trois régimes restent expérimentales.

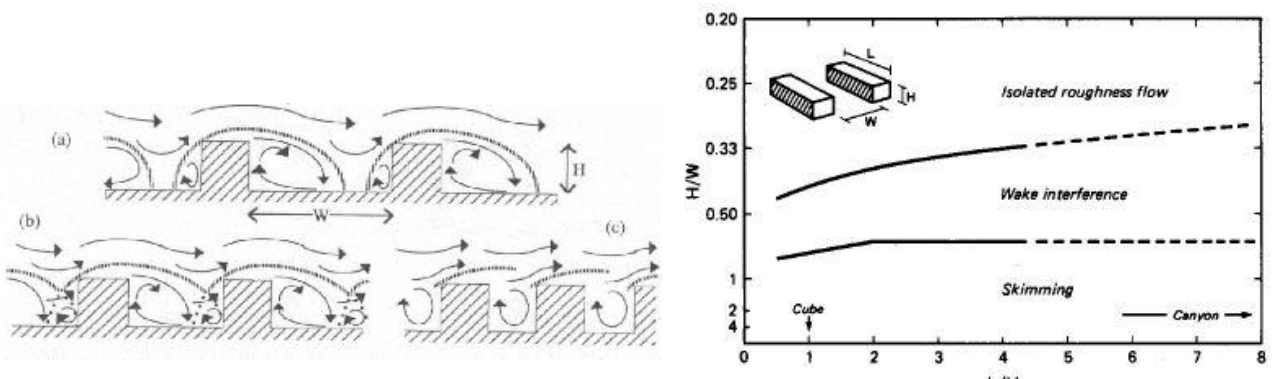


Figure I.6 : Le passage d'un régime à un autre se réalise est en fonction une combinaison des valeurs de H/W et L/W, source (Oke, 1988)

H/W	<0.3	0.3 < H/W < 0.7	>0.7
Type d'écoulement d'air	Rugosité isolée	Interférence de sillage	Rasant

Le régime de 'rugosité isolée' du vent, apparaît entre deux bâtiments bien espacés. La majorité des études le comparent à un mouvement autour d'un bâtiment isolé étant donné qu'il n'existe pas d'interférence entre les flux du vent. Quand le ratio H/W augmente l'écoulement est plus agité, et ce qui conduit à une interférence de sillage. Avec un rapprochement supplémentaire, la cavité de la rue canyon devient plus isolée du mouvement de l'air glissant sur les toits des bâtiments, figure I.7.

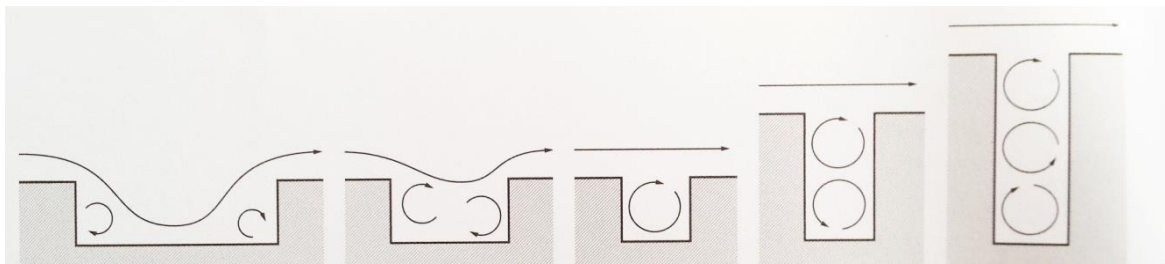


Figure I.7: profil de la rue et régime du vent: formation des vortex source (H.Wu, 1994 cité dans Krautheim *et al*, 2014)

Le dernier des régimes est le plus commun dans les contextes urbains et par conséquent il concentre l'attention des études aérauliques.

Afin de déterminer les procédés d'amélioration du confort du piéton, actuellement des études s'enchaînent sur d'autres aspects des rues canyon : profils symétriques ou asymétriques, axes d'orientation différents, variation de H/W... D'ailleurs certaines recherches ont confirmé que le ratio d'aspect H/W et l'orientation de la rue sont les paramètres urbains les plus influents sur la microclimatique dans une rue canyon (Todhunter *et al*, 1990 cité dans Shishegar, 2013).

Puisque notre travail est orienté plus vers les aspects géométriques planimétriques, on présente l'étude suivante de Abu Sufian Kushol et al (2013) qui ont travaillé sur l'influence des réglementations de la construction (FAR), à la cité de Dhaka - Bangladesh sur le microclimat dans les zones résidentielles. L'enquête in situ est menée dans un quartier d'habitation, le long de deux rues orthogonales, de directions respectives N-S, E-W, figure I.8. Les constatations qui nous intéressent sont les suivantes :

Pour une direction de vent dominant N-S, l'écoulement moyen du vent est plus faible dans la rue E-W que dans les rues N-S, pour cela une modification des ratios d'aspect H/W peut aider à mieux introduire l'air et améliorer les conditions climatiques.

Dans cette optique, les auteurs ont effectué trois simulations aérauliques sur le cas existant en changeant l'agencement des bâtiments, figure I.9 :



- a) Le premier cas avec les dimensions existantes.
- b) le deuxième avec une diminution du H/W.
- c) Le troisième avec une augmentation du H/W.

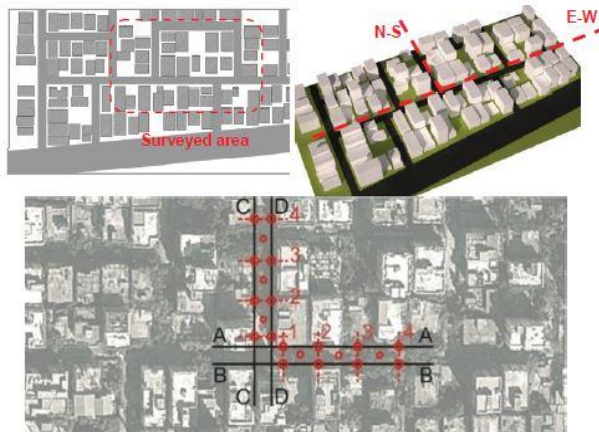


Figure 1.8 : Cas d'étude, source AbuSufian Kushol et al (2013)

Case 1: Existing situation (figure 1) under developing phase i.e. not all plots are developed.  
 Case 2: Modelled by placing the buildings to generate canyons with low H/W ratio (figure 5a) assuming the development under FAR Rule.  
 Case 3: Modelled by placing the buildings to generate canyons with high H/W ratio (figure 5b), assuming the buildings construction under FAR Rule.

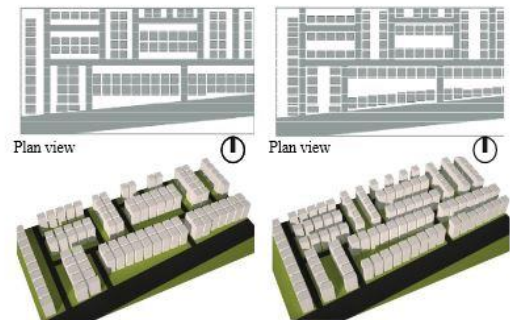


Figure 1.9 : Transformations numériques de l'agencement des bâtiments

De la comparaison entre les résultats des trois simulations, nous notons :

- une corrélation négative (de l'ordre de -0.66) entre le ratio H/W et la vitesse de l'air dans la direction E-W de la rue canyon. En effet, pour augmenter la vitesse de l'air au niveau piéton il faut diminuer le ratio H/W.
- Dans les rues N-S, qui sont parallèles à la direction du vent, H/W n'a pas d'impact remarquable sur la vitesse de l'air.

Cette étude permet de mieux définir les limites des retraits entre les bâtiments et par rapport à la rue adjacente selon l'orientation de la rue et la direction des vents forts, et ce pour obtenir un ratio H/W plus soucieux du confort des piétons

**Il ressort de cette partie d'état de l'art que le mouvement du vent est défini selon la géométrie qu'on impose sur le territoire. Face aux barrières de la ville et du quartier ou de la rue (construction, végétation, mobilier urbain), le flux du vent se perturbe en contournant ces obstacles et change de caractéristiques aérodynamiques (trajet, vitesse).**

La recherche de cette 'interdépendance' ne s'arrête pas à l'exposition des phénomènes de rafales dans la ville, mais dans le but d'améliorer la qualité de vie des usagers, on essaye de concrétiser cette relation avec des outils mathématiques simples. Ils forment l'appareil du système d'aide à la décision et facilitent l'aboutissement d'un projet architectural ou urbain du point de vue environnemental.

### III.4. Matérialisation de la relation entre le vent urbain et la morphologie urbaine

Le lien entre la géométrie urbaine et le vent local est rarement explorée même dans les revues d'aérodynamique (Wisse *et al*, 2007). Les documents qui traitent de problème rapportent des détails techniques compliqués pour les concepteurs. Les planificateurs urbains ont besoin de simples méthodes directrices et d'outils de conception appropriés pour une meilleure estimation de l'écoulement d'air dans l'environnement urbain.

On appelle ces outils simples des '*indicateurs urbains*' qui *indiquent* une information climatique face à une géométrie précise. Ce sont des formulations hypothétiques ou une combinaison de paramètres géométriques à l'aide desquels on peut imaginer les circonstances microclimatiques. Ils prescrivent une situation dans différents domaines pour aider à prendre décision. L'indicateur urbain est une formule empirique qui interprète la réalité et ne présente pas une réalité en elle-même ni une estimation exacte du sujet étudié. Son intérêt est d'évaluer un environnement urbain pour figurer les causes de gêne qui existent ou peuvent exister afin d'améliorer le vécu de l'individu.

- Fonction principale : quantification, simplification et communication.
- Types : objectif et subjectif.

Dans ce contexte, Ameur (2002) a présenté la morphologie urbaine en tant que *domaine actif*, et le vent, le rayonnement solaire et la température en tant que *domaine stimulé*. Elle a étudié les deux interférences 'morphologie-microclimat' et 'microclimat-confort' et elle a formulé un système d'indicateurs combinant « *la morphologie urbaine en tant que domaine actif et le climat en tant que domaine stimulé* ».

Benzerzour (2009) définit l'indicateur en tant que '*méthode de transmission didactique et d'application projectionnelle*'. Dans le cadre de sa thèse, il propose que les éléments de la surface urbaine caractéristiques de l'échelle climatique locale soient :

- la classe de rugosité
- le prospect des canyons
- la fraction de surfaces bâties

Selon sa classification des indicateurs, on peut situer notre recherche dans l'axe des indicateurs de l'interaction physique. Parmi ceux avec un effet s'opposant au mouvement du vent, nous citons principalement **la porosité et la rugosité** définis par Adolphe (2001). Il les a établis comme une solution pour l'irrégularité ou l'organicité des tissus des villes.

*'La rugosité fait varier l'intensité des forces de frottement auxquelles le vent est exposé. Ces forces sont dues essentiellement à l'action du substratum défini par les aménagements urbains et la nature des surfaces.'* (Ameur, 2002)

La porosité est le pourcentage du volume vide par rapport au volume plein d'un solide. La ville étant comparée à un matériau urbain, la porosité décrit le pourcentage du vide urbain, de

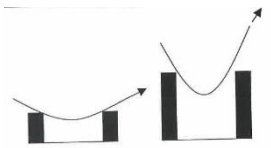

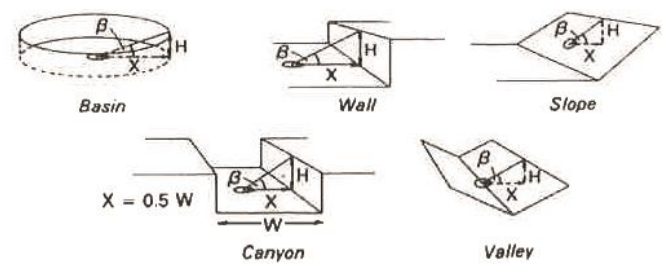
l'espace non occupé par les constructions, par rapport à l'ensemble des masses bâties. La rugosité décrit l'état ou le degré d'aspérité d'une surface. La rugosité urbaine est la dureté construite opposante au vent. C'est l'encombrement urbain, incluant le vide et le plein qui affronte le mouvement du vent.

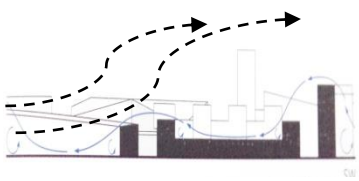
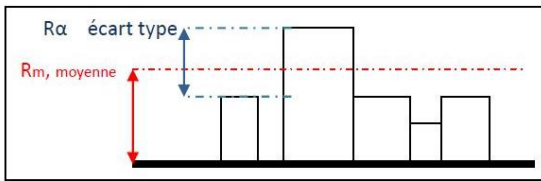
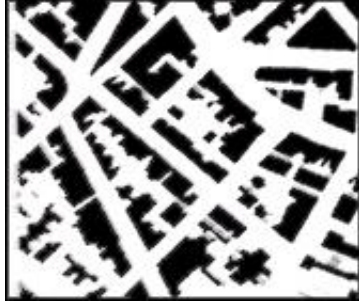

En se basant sur la grille des travaux cités antérieurement, nous avons regroupé dans le tableau I.3 les indicateurs morphologiques caractéristiques du mouvement d'air dans la trame urbaine. Ce tableau de synthèse nous a permis de hiérarchiser les variables géométriques sur le plan vertical et le plan horizontal. En plan de coupe, les dimensions de la rue sont largement déployées :

- H : hauteur des bâtiments.
- W : largeur des rues.
- Angle de vision
- SVF

Sur le plan horizontal :

- Distance de projection suivant la direction du vent - Search angle ( $D, \alpha$  - Fetch)
- L ; la longueur des bords de la rue canyon.
- Avec une approche volumétrique la Porosité avec des pourcentages de surfaces bâties et non bâties.

Critères morphologiques	Formule – Source	Influence sur le vent
<p><b>le taux de percement horizontal du tissu urbain :</b></p> <p>C'est le calcul du vide urbain et sa distribution. Il fait notion au creux urbains publics et au creux urbains privés</p> <p>(Ameur, 2002)</p>	$PH = \frac{(S. \text{ creux publics} + S. \text{ creux privés})}{S. \text{ totale}}$	<p>'la dimension des creux urbain, leur disposition, leur forme et leur orientation conditionne la pénétration du vent dans le tissu.' (Ameur, 2002).</p>
<p><b>Le prospect équivalent de l'espace :</b></p> <p>Un rapport entre la hauteur moyenne de l'espace et la largeur. Etant donné que l'espace entre les bâtiments n'est pas parfaitement rectiligne, l'auteur propose de prendre en compte la largeur la plus petite.</p> <p>(Ameur, 2002)</p>	$Pe = \frac{H_m}{L_p}$ <p><b>H<sub>m</sub></b> : hauteur moyenne de l'espace</p> <p><b>L<sub>p</sub></b> : plus petite largeur des rues</p>	 <p>Figure I.10 : source (Ameur, 2002)</p> <p>Modification du trajet et de la vitesse + mouvement tourbillonnaire au pied des constructions.</p>
<p><b>La longueur équivalente de l'espace:</b></p> <p>C'est un outil pour simplifier les géométries complexes (forme polygonale) de la rue en la ramenant à 'une espace homogène de type rectangle'</p> <p>(Ameur, 2002)</p>	$Le = \frac{St}{L_p}$ <p><b>St</b> : surface totale de l'espace</p> <p><b>L<sub>p</sub></b> : plus petite largeur de l'espace</p>	 <p>Figure I.11 : source (Ameur, 2002)</p>
<p><b>Le facteur vue du sol :</b></p> <p><math>\Psi_{\text{terrain}} = 1 - \Psi_{\text{ciel}}</math></p> <p>Cas d'une rue canyon et vallée</p> <p><math>\Psi_{\text{ciel}} = \cos \beta</math>, <math>\Psi_{\text{terrain}} = 1 - \cos \beta</math> avec <math>\beta = H/X</math>,</p> <p>H : la hauteur du bassin</p> <p>X : la distance du point de vue au mur vertical</p> <p>(Oke, 1988, cité dans Ameur, 2002, P.106)</p>		<p>Figure I.12 : source (oke, 1987)</p>

<p><i>Taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace</i></p>	$Te = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Si \cdot Hi}{\sum_{i=1}^{i=n} Si}$ <p><b>Si</b> : surface de l'élément i <b>Hi</b> : hauteur de l'élément i</p>	
<p><i>Densité du bâti :</i></p> <p>Occupation des parcelles par le bâti.</p>	$Ds = \sum_{i=1}^{i=n} Api / As$ <p>(Merlin, Choay, (1998) cité dans Ameur, 2002, P.152)</p>	
<p><i>Rugosité moyenne du tissu urbain:</i></p> <p>Hauteur global du tissu tridimensionnel.</p>	$Rm = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Ai \cdot hi}{\sum_{i=1}^{i=n} Ai + \sum_{j=1}^{j=n} Aj}$ (m) (Adolphe, 2001) <p><b>Ai</b> : surface hors œuvres du bâtiment i (emprise au sol) <b>Aj</b> : surface de l'espace extérieur j <b>hi</b> : hauteur du bâtiment i</p>	 <p>Figure I.13 : source (Krautheim et al, 2014)</p>
<p><i>Rugosité relative du tissu urbaine</i></p>	$Ra = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (hi - h\alpha)^2 \cdot li^2}{\sum_{i=1}^{i=n} li}}$ (m) (Adolphe, 2001) <p><b>hα</b> : hauteur moyenne de la canopée dans une direction <b>hi</b> : hauteur de l'élément i de la canopée (bâti ou non bâti) <b>li</b> : largeur de la canopée</p>	
<div style="text-align: center;">  <p>Figure I.14 : schéma explicatif de la différence entre la rugosité absolue et la rugosité relative du tissu urbain, source (auteur)</p> </div>		
<p><i>Porosité urbaine</i></p>	$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \pi \cdot rhi^2 \cdot Li}{\sum_{i=1}^{i=n} Vi + \sum_{j=1}^{j=n} Vj}$ <p>(Adolphe, 2001)</p> <p><b>Li</b> : longueur de l'espace ouvert i. <b>rhi</b> : rayon hydraulique de l'espace ouvert i. <b>Vj</b> : volume moyen de l'espace bâti j <b>Vi</b> : volume moyen de la canopée au-dessus d'un espace ouvert i.</p>	 <p>Figure I.15 : source (Ameur, 2002)</p> <p>Vide - espace ouvert Plein - espace bâti</p> 

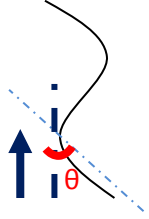
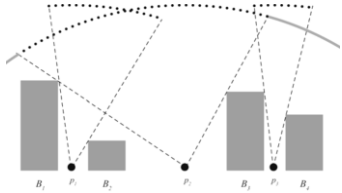
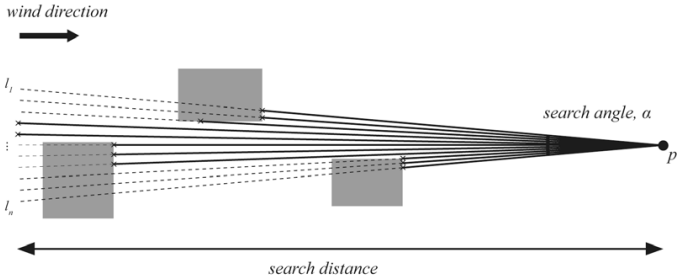
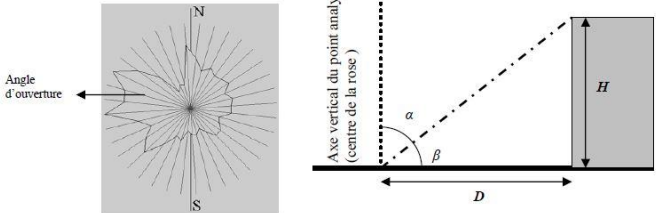
<p><i>Sinuosité urbaine</i> (Adolphe, 2001)</p>	$S_{\theta} = \frac{\sum L_i * \cos^2(\theta_i)}{\sum L_i}$ <p>Segments des rues</p> <p><math>L_i</math> : la longueur du segment de la rue  <math>\theta</math> : angle entre l'azimut du flux et l'azimute du tronçon local de rues.</p>	 <p>Figure I.16 : source (auteur)</p>
<p><i>Facteur de visibilité du ciel (Sky View Factor (SVF))</i></p>	<p>C'est la proportion de ciel est vue depuis un point. C'est un indice qui varie entre 0 et 1, s'il est nul l'observateur ne voit pas de ciel, et s'il vaut 1 l'observateur voit l'hémisphère céleste en entier.</p>	 <p>Figure I.17 : source (Johansson, 2012)</p>
<p><i>Fetch :</i></p> <p>distance d'un point p au proche obstacle (bâtiment) dans la direction contre vent.</p> <p>(cité dans Johansson, 2012)</p>	<p>La valeur résultante Fetch pour un point p : valeur moyenne des distances d1 à dn représentées par les lignes continues (entre le point p et les marques x) pour l1 à ln , où n=alpha normalisé par la distance de recherche ds :</p> $Fetch_p = \frac{1}{d_s} \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad n = \alpha \text{ (valeur entre 0 et 1).}$  <p>Figure I.18 : source (Johansson, 2012)</p>	
<p><i>Indicateur synthétique :</i></p> <p>Indice d'ouverture directionnelle du vide urbain ou le concept de canyon selon un réseau polaire'</p> <p>(Benzerzour, 2004)</p>	 <p>Figure I.19 : source (Benzerzour, 2004)</p>	

Tableau I.3 : Liste des indicateurs morphologiques caractéristiques du mouvement d'air dans la trame urbaine

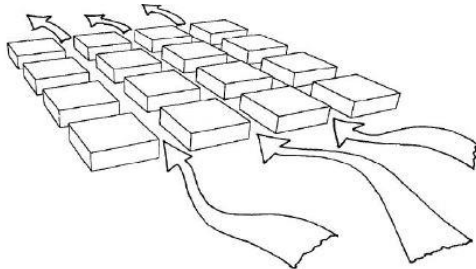
Finalement, dans l'ensemble des paramètres géométriques invoqués, on peut déduire l'absence d'un paramètre qui informe sur la répartition du vide dans l'espace bâti. Que ce soit dans les indicateurs ou leurs variables utilisées. On se contente de calculer un pourcentage de l'espace

ouvert sans tenir en compte de la richesse de la trame urbaine et de ce qu'elle peut révéler en matière d'influence sur l'infiltration du vent et sa vitesse. Tout en reliant cela au ressenti de l'usager et à la destination fonctionnelle de ces espaces. A ce niveau d'analyse, une question s'impose :

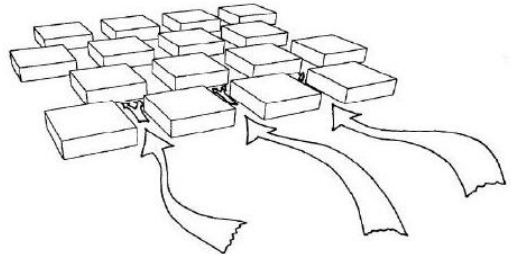
***Est-ce-que le pourcentage du vide par rapport au plein bâti suffit à lui seul à décrire l'impact sur le vent sans considérer sa disposition au sein de la "trame urbaine"?***

La mosaïque des espaces bâtis et non bâtis de l'urbain peut s'opposer de manières différentes au vent, figures I.20 et I.21. Cette résistance au vent peut faire figure d'une *rugosité planimétrique*. Face à cela, on a élargi le champ de recherche pour découvrir la rugosité plus dans le domaine aérodynamique en se référant à trois articles (Holland *et al*, 2008 ; Macdonald, 1998 ; Kim *et al*, 2011). Nous trouvons que les paramètres utilisés pour l'estimer sont selon Kutzbach, 1961; lettau, 1969 et Counihan, 1971 :

- la hauteur moyenne des bâtiments,
- la façade frontale,
- l'emprise au sol des bâtiments,
- la hauteur de déplacement du profil de la vitesse de l'air suivant (Theurer, 1993; Grimmond et Oke, 1999; Hanna et Britter, 2002).



**Figure I.20 : Disposition orthogonale des obstacles source (Shishegar, 2013)**



**Figure I.21 : Disposition alternée des obstacles source (Shishegar, 2013)**

Le tableau I.4 suivant, résume globalement les essais de formulation de la rugosité dans un ordre chronologique (illustration des paramètres appliqués ; figure I.22).

Source année	Formule d'évaluation de la rugosité	Echelle morphologie	Paramètres appliqués	dimensions horizontales ou Sinuosité ?
<b>Kutzbach (1961)</b> cité dans (Holland et al, 2008, P.2616)	$Z_0 = \lambda_p^{1.13} * Z_H$  avec $\lambda_p \leq 0.29$		$Z_H$ : Hauteur moyenne $\lambda_p$ : Densité planimétrique	Densité surfacique
<b>Lettau (1969)</b> , cité dans (Holland et al, 2008, P.2616)	$Z_0 = 0.5 H \frac{A_f}{A_d} = 0.5 H * \lambda_f$	<b>Trame orthogonale</b> régulière  Obstacles uniformes	$A_f$ : Surface frontale $A_d$ : Surface totale du lot $H$ : Hauteur moyenne des obstacles $\lambda_f$ : Index de la surface frontale	Surface du lot
<b>Counihan (1971)</b> cité dans (Macdonald,1998), P.1858)	$\frac{z_0}{H} = 8.2 \frac{H}{X_f} + 1.08 \frac{A_p}{A_d} - 0.08$  Quand ; $A_f = 0.6 A_p$ et $H/X_f$ tend vers 0  $\frac{z_0}{H} = 1.8 \lambda_f - 0.08$	<b>Trame orthogonale</b> régulière  Obstacles uniformes	$H$ : Hauteur moyenne des obstacles $X_f$ : Fetch $A_p$ : Emprise au sol des obstacles $A_d$ : Surface totale du lot	Fetch
<b>Theurer (1993)</b> cité dans (Macdonald,1998), P.1858)	$\frac{z_0}{H} = 1.6 \lambda_f (1 - 1.67 \lambda_p)$  $\frac{d}{H} = 1.67 \lambda_p$ et $\frac{z_0}{H-d} = 1.6 \lambda_f$	<b>Trame orthogonale</b> régulière equidistante  Obstacles uniformes	$d$ : Hauteur de déplacement $H$ : Hauteur moyenne des obstacles $\lambda_f$ : Index de la surface frontale $\lambda_p$ : Densité planimétrique	Ratio d'aspect de la surface planimétrique
<b>Raupach (1994)</b> cité dans (Holland et al, 2008, P.2617)	$Z_{0Ra} = \overline{Z_H} \left( 1 - \frac{Z_d}{Z_H} \right) \exp \left( -k \frac{U}{u_*} \right) + \psi_h$		$U$ : Vitesse en un point. $u_*$ : Vitesse de référence. $K$ : Facteur de Van Karaman Paramètre de confort $\Psi_h$	
<b>Macdonald (1998)</b> Derivation de la relation de Lettau  $\frac{z_0}{H} = \left( 1 - \frac{d}{H} \right) \exp \left( - \left( 0.5 \beta \frac{C_D}{\kappa^2} (1 - d/H) \lambda_f \right)^{-0.5} \right)$		<b>Deux Trames; Orthogonales</b>  <b>Alternées (staggered)</b> d'obstacles uniformes	$CD$ : Coefficient de la trainée Facteur correctif $\beta$	Le terme correctif peut-il-être lié à la trame du vide ?



<b>Grimmond et Oke (1999)</b>	$\frac{z_0}{H} = 0.1$ $\frac{d}{H} = 0.7$		<b>H</b> : Hauteur moyenne des obstacles <b>d</b> : Hauteur de déplacement	<i>Bien qu'elle soit simple elle donne des valeurs efficaces.</i>
<b>Hanna and Britter (2002)</b> Cité dans (Kim et al, 2011, P.471)	$\frac{z_0}{H} = \lambda_f$ pour $\lambda_f < 0.15$ $\frac{z_0}{H} = 0.15$		$\lambda_f$ : Index de la surface frontale <b>H</b> : Hauteur moyenne des obstacles	
<b>Kim et al (2011)</b>	<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> <math>\frac{z_0}{H} = 0.164 \lambda_f</math> </div> avec $H = \frac{\sum_{i=1}^N a_p^i h^i}{\sum_{i=1}^N a_p^i}$	<b>Trame orthogonale</b>	<b>N</b> : nombre de bâtiment $a_p^i$ : l'emprise au sol d'un bâtiment	<i>Peut-on considérer cette formule la plus adéquate pour en déduire une autre qui tient compte de la sinuosité des rues ?</i>

Tableau I.4 : Formulation de la rugosité par ordre chronologique

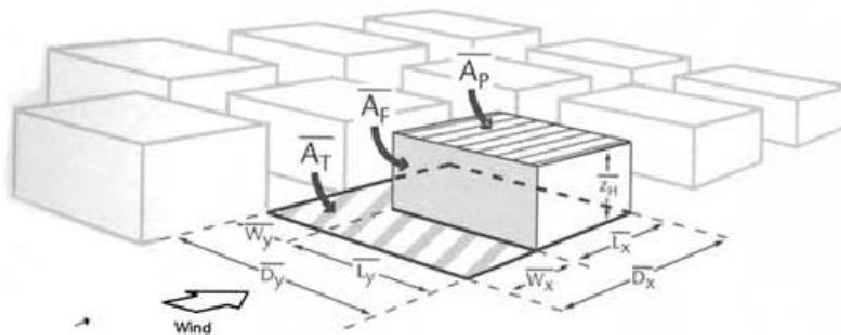


Figure I.22 : Légende des paramètres géométriques source (Grimmond et al, 1999)

Les figures I.23 et I.24 montrent des exemples de l'enchaînement des travaux en soufflerie pour l'élaboration de ces règles.



Figure I.23 : Maquette du cas d'études en expérimentation pour dégager des relations théoriques simples et basiques source (Kim *et al*, 2011)



Figure I.24 : Maquette d'une zone urbaine pour la vérification des théories dégagées (F16), source (Kim *et al*, 2011)

Les différentes maquettes employées (à part celles des cas réels) retracent couramment des alignements orthogonaux. Nous n'avons pas essayé de faire introduire d'autres notions comme la grille organique urbaine. D'ailleurs, le concept d'irrégularité ou de complexité urbaine n'a été le motif de l'investigation, qu'en termes de variation des densités surfaciques, des façades frontales, hauteurs des bâtiments, formes des obstacles et largeurs des artères.

**Le tissu tortueux et sinueux n'a pas été un centre d'intérêt pour les chercheurs comme un second type d'agencement des obstacles.** Bien qu'Adolphe (2001), et dans le cadre d'une enquête de l'environnement aéraulique d'un tissu ancien à Toulouse, a évoqué **la sinuosité** comme indicateur morphologique. Cet indicateur traduisait un quotient impliquant les variables géométriques suivantes :

- L'azimut de la rue (inclinaison par rapport au Sud).
- L'azimut du vent incident.
- La longueur de chaque segmentation composant l'axe courbe de la trajectoire.

Eventuellement dans d'autres études, la sinuosité existe d'une manière implicite dans quelques cas de figure ou quelques formes complexe. Des espaces ouverts arqués distingués dans leurs simulations aérauliques, figure I.25.

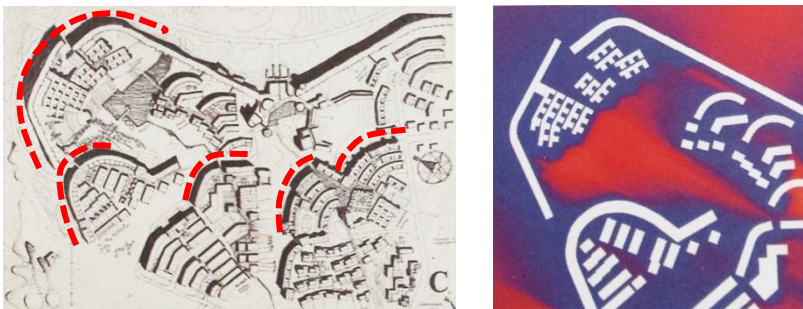
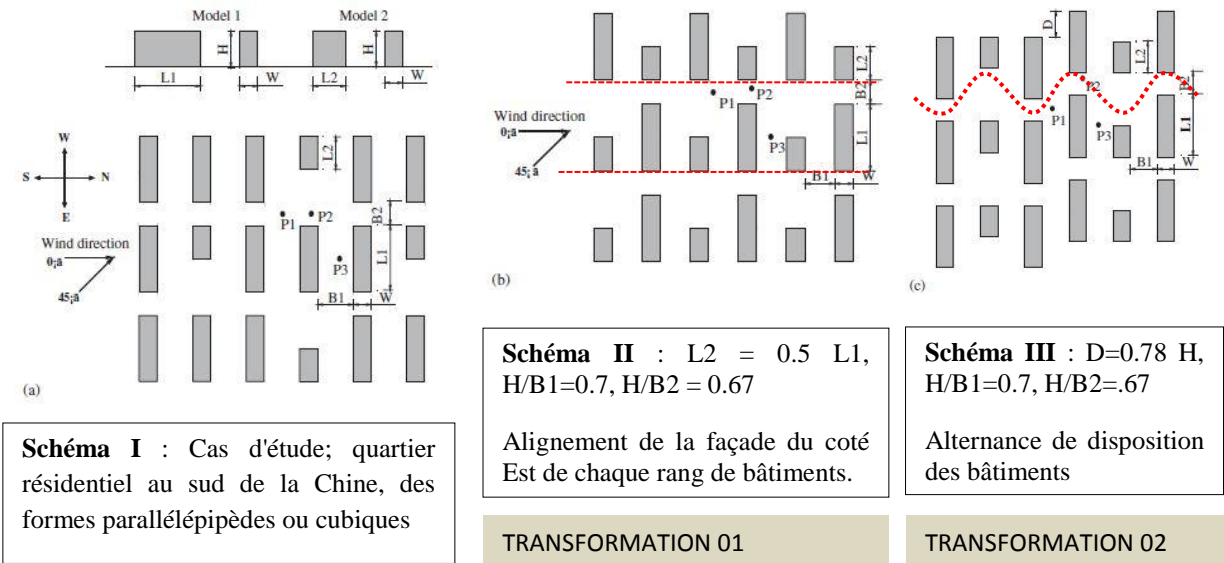


Figure I.25 : Ormen Långe par Ralph Erskine source (Kautheim *et al*, 2014)

La sinuosité a été citée sous un autre terme : la disposition ‘**alternée**’ ou ‘**en quinconce**’, staggered array, un déphasage entre les obstacles qui dessine un vide courbé tacite. Zhang *et al* (2005) ont développé des transformations numériques sur un modèle 3D d'un quartier résidentiel au sud de la Chine (figure I.26) dans le but d'examiner selon des schémas de répartition des vitesses moyennes numérisées, la configuration qui pourra donner une atmosphère plus homogène. Ils ont constaté que celle de la trame ‘alternée’ aide à introduire le vent, offre un confort aéraulique et facilite la ventilation naturelle.

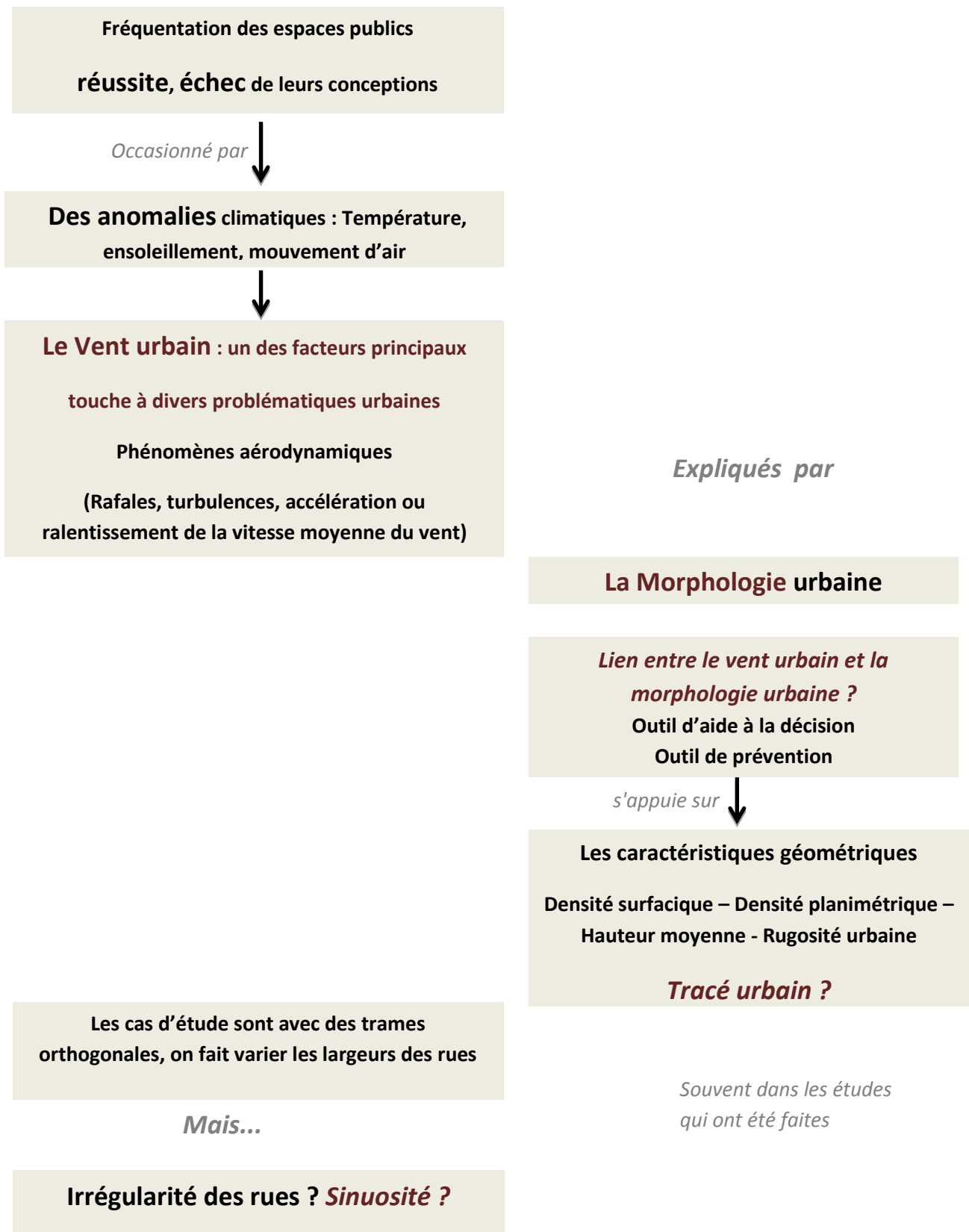


**Figure I.26 : Configuration de la trame alternée, source (Zhang *et al*, 2005, P. 893)**

Bensalma (2004) a examiné les ambiances microclimatiques dans les grands ensembles. Il a choisi comme corpus d'étude trois projets différents dans leurs plans masse. Il a analysé les résultats de ses simulations numériques en les rapportant aux pratiques spatiales des usagers et il a conclu que "*Au niveau des espaces publics, ceux de Malakoff profitent d'une meilleure exposition au soleil (plein sud) et d'une meilleure protection des vents assurée par la présence des barres-bananes*". Oke (1988) vérifie qu'on peut trouver une sorte de concordance entre les dimensions géométriques des rues et le climat pour éviter l'insuccès des espaces ouverts. Il remarque également que du point de vue du confort climatique les formes urbaines traditionnelles européennes sont plus favorables que les formes modernes. En contrepartie, Benzerzour expose des résultats d'une simulation aéraulique faite au quartier de Bouffay à Nantes - France : quartier ancien de morphologie urbaine médiévale. Il est caractérisé par des ruelles étroites, des profils profonds et des trajectoires sinueuses. L'auteur explique que dans le cas d'une ouverture au vent amont (Est du quartier) le vent est 'détourné, brisé, et canalisé vers les autres rues' avec des vitesses importantes. Il note aussi que la discontinuité des rues sinueuses augmente les effets de brise et le détournement du vent.

A la lumière de ce qui est montré dans la dernière partie et ce qui précède dans la synthèse bibliographique, nous présentons une récapitulation du déroulement des idées et la démonstration de notre problématique de notre sujet :

## Schéma simplifié de la problématique



### IV. Objectifs

De cette réflexion découlent les objectifs suivants du stage :

- Définir les paramètres géométriques.
- Étudier la circulation de l'air dans un couloir urbain sinueux.
- Dégager la différence entre son comportement dans une trame orthogonale et une trame sinueuse du point de vue de la répartition spatiale de la vitesse moyenne.
- Identifier un paramètre géométrique ou une loi empirique qui traduit cette relation et transmet une information prévisionnelle vis à vis de l'écoulement de l'air dans l'espace urbain. Cela ne veut pas dire l'anticipation exacte des phénomènes physiques, mais un moyen pour prévoir le comportement général.

## **V. Méthodologie du travail**

### **V.1. Approche théorique**

- Proposer une expression du facteur de sinuosité
- Introduction de ce concept dans la répartition spatiale de la vitesse du vent.

### **V.2. Calcul et simulation**

- Définir les différents cas d'étude qui vont être introduits dans une veine numérique : des arrangements alternés d'obstacles parallélépipédiques. Ces dispositions doivent donner l'image d'une forme sinueuse qu'on traite comme sujet de recherche.
- Appliquer des simulations aérodynamiques selon une vitesse moyenne donnée du vent et différentes directions.
- Comparer l'évaluation du comportement du vent à son écoulement dans un cas existant appuyé par des enquêtes in situ.

### **V.3. Résultats et discussion**

- Analyser et traiter les résultats obtenus.
- Dégager la corrélation entre la répartition spatiale de la vitesse moyenne du vent et le changement des facteurs sinueux.

## **VI. Conclusion**

A partir d'une analyse détaillée des travaux antérieurs faits sur l'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat urbain et plus précisément sur la répartition du vent, nous avons constaté qu'il y'a moins d'intérêt porté à un facteur climatologique important en relation étroite avec l'atmosphère urbaine qu'est le mouvement du vent. De même, le contrôle approprié de ce mouvement par des vides urbains (rues, places, ...) non rectilignes et présentant une certaine curvilinéarité n'a pas été abordé. Pour cela, nous proposons d'introduire dans la suite du travail le concept de sinuosité des rues dans l'étude de la répartition spatiale du vent.

## **Chapitre II**

### **La sinuosité urbaine**

#### **I. Introduction**

D'après la synthèse bibliographique portant sur la relation morpho-climatique, nous signalons l'absence de l'étude de l'effet des caractéristiques planimétriques des tissus urbains sur le mouvement du vent. Plus précisément, nous avons marqué, selon nos lectures, l'absence de la considération de la curvilinearité des rues. Pour atteindre notre objectif de trouver un lien entre cette forme et le mouvement du vent, nous définissons en première partie du deuxième chapitre, cette configuration géométrique planimétrique dans les tissus urbains réels. Nous nous commençons par une comparaison de quelques tissus existants, en parcourant un exemple d'évolution spatiale et de la distribution des trames urbaines sur le territoire d'une ville (figure II.1). Ceci nous permet de définir le tissu urbain sinueux, de recenser ses caractéristiques et le positionner entre les autres types de grilles urbaines. De même, et pour rapprocher l'image de la sinuosité urbaine au niveau du piéton, nous parlons brièvement de la manière dont elle est perçue par un piéton qui parcourt un trajet sinueux. Nous évoquons ce qu'elle apporte d'exceptionnel. Ensuite nous présentons quelques méthodes d'analyse de la morphologie urbaine et testons leur adaptabilité à notre recherche sur les paramètres géométriques de la sinuosité urbaine. Enfin, la dernière partie porte sur les méthodes de calcul choisies comme support théorique pour la matérialisation des trajets de courbes sinueuses.

### Type A :

Ce type de tissu correspond généralement aux villes anciennes. Sa trame viaire se distingue par des rues incurvées orientées différemment. Ces mailles sont construites sous la logique de la centralité : c'est à dire "*convergence des flux et des voies majeures en provenance de l'extérieur de la ville vers le point focal... Celui-ci peut être le port, le pont, la place centrale, et ses édifices symbolisant la centralité religieuse ou marchande...*" (Salat *et al*, 2011, P.254). Ce type de maillage favorise le déplacement de proximité et forme un réseau complexe. Enchevêtrées intensément, il assure un système interconnecté qui le rend parmi les formes les plus recommandées (ibid.).

### Type B :

Correspond aux extensions de la ville ancienne. Il se dote d'un caractère bidirectionnel (trame orthogonale). Salat *et al* (2011) trouvent que cette "*grille viaire présente un instrument de conquête foncière*"(ibid, P.255).

### Type C :

Correspond à l'armature centrale d'un village ou d'une extension en banlieue. Cette configuration est un mélange d'orthogonalité et d'organicité.

### Type D :

Correspond aux banlieues, en particulier aux banlieues américaines. Cette structure d'aménagement suit une disposition moderniste, ultra-hiérarchisée. Les bâtiments sont dispersés. Cela cause des problèmes d'accessibilités et de connectivité très faible. Ce qui rend ce type de tissu consommateur de grandes quantités d'énergie.

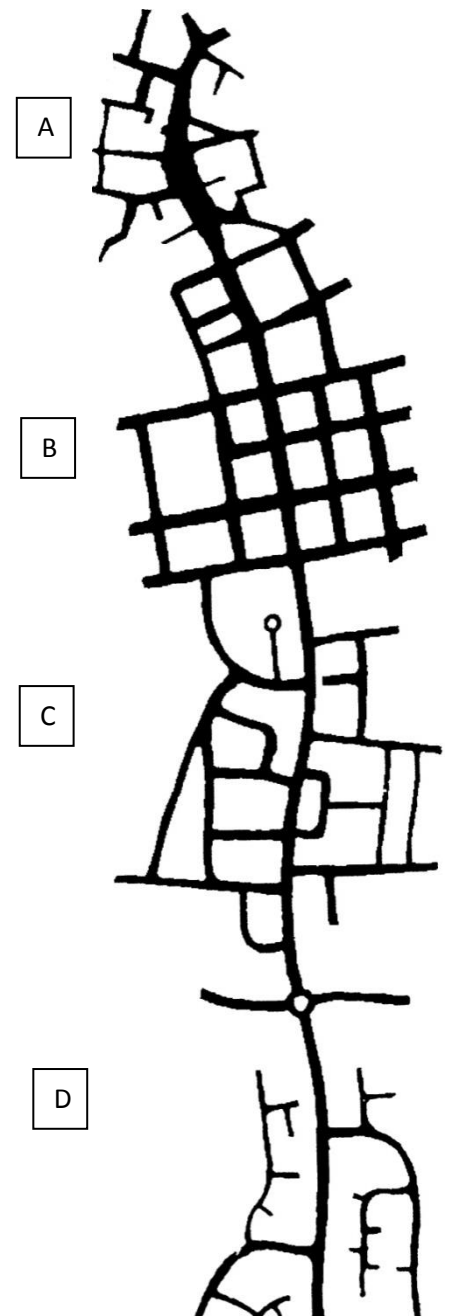


Figure II.1: source Stephen Marshall, Streets and Patterns, cité dans Salat *et al*, 2011, P.254.)

## II. Définition d'un tissu urbain - le tissu urbain organique courbé

Selon, André Moutsara (1986, P.1), le tissu urbain est "*la forme visuelle caractéristique d'une ville qui permet d'établir des différences par type d'occupation et d'organisation de l'espace*",

ou encore la définition donnée par Salat et al, (2011, P.38), "*échelle intermédiaire entre l'architecture et les grands tracés de l'urbanisme*". Il est une conséquence spatiale, une figure d'appropriation du territoire et un mode d'occupation au sol. Le tissu sinueux est souvent appelé « tissu organique » ou « tissu traditionnel ». C'est un réseau urbain caractérisé par des formes courbées et arborescentes. Ce sont les contraintes sociales et rituelles qui font aboutir à ce type de conception urbaine.

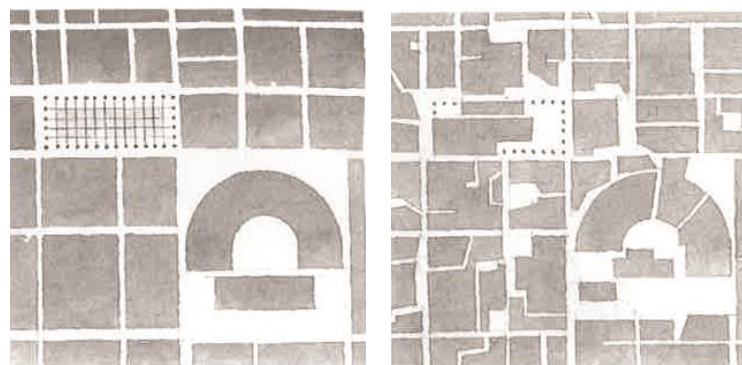
Nous projetons de faire une analyse géométrique de cette forme. Mais pour commencer, nous présentons quelques significations importantes données par des chercheurs sur le vécu spatial des piétons au sein de ces rues courbées. Nous exposons l'impression qu'on peut avoir lorsqu'une forme sinueuse nous englobe.

## **II.1. Ebauche sur les ambiances dans les tissus organiques**

Nous abordons brièvement dans cette partie une approche du ressenti dans un parcours. Avec son appareil sensoriel, l'homme interagit avec le trajet parcouru et produit un souvenir sur le milieu. Ce souvenir est la combinaison de plusieurs séquences visuelles. Elles découlent de son mouvement dans l'espace et dans le temps. Elles sont engendrées par la mémorisation et l'interaction de l'appareil sensoriel avec des éléments fixes, comme les façades des rues, et les éléments mobiles, comme les autres usagers du lieu, la lumière et la fraîcheur de l'air. Dans une analyse 'séquentielle' des trajets dans un tissu organique, trois critères clés sont exploités, le mouvement, la position et le contenu (Salat *et al*, 2011). En effet, et contrairement à la rue droite monotone, le parcours dans une rue courbe influence d'une manière différente le piéton.

Sur ce, on dégage l'effet des rues sinueuses à travers des études sur des villes médiévales. **Le mouvement** dans les rues organiques aboutissant généralement à des placettes, change notre manière d'assimiler les lieux, "*la petitesse de la rue a conditionné notre regard pour qu'il appréhende la grandeur relative de la place*" (ibid, P.387). Quant à **la position, et le contenu**, ils qualifient les villes médiévales comme Tolède - Espagne, par l'unicité dans ses séquences. Les rues sinueuses, tracées d'une manière spontanée et vernaculaire sont variées au niveau de la largeur de la rue et ont créé des espaces concaves et convexes, des espaces étroits et larges, ce qui a donné par la suite une image planimétrique "*riche de sens d'ouverture et de fermeture de l'espace*"(ibid.) (figure II.3).





Etape 01

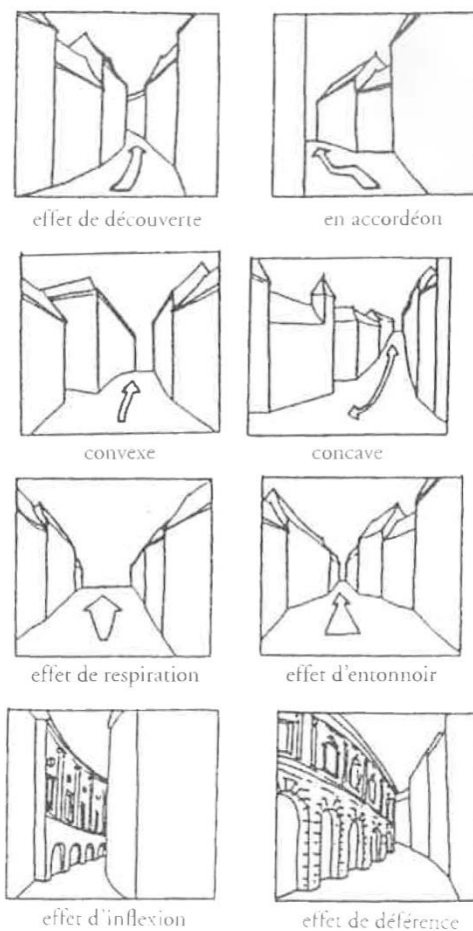
Etape 02



Etape 03

**Figure II.2: Evolution du plan rectiligne d'une ville à un plan organique, source (Salat et al, 2011, P.110)**

*"Dans de nombreux cas d'évolution sur la longue durée, des plans initialement rectilignes, comme les plans romains, ont été considérablement déformés pour se rapprocher de ces plans organiques convergents."(Salat et al, 2011, P.110).*



**Figure II.3 : Parcours dans des ruelles tortueuses et leurs effets, source (Pierre Pinon et al, D'après De Wolfe, cité dans Salat et al 2011, P.386-376).**

Nous concluons que le tissu urbain sinueux est doté d'un mode d'implantation particulier avec un alignement irrégulier et une liberté dans la largeur de la rue. La sinuosité urbaine offre une fluidité de déplacement et un effet de découverte aux piétons.

Nous présentons quelques méthodes d'analyses géométriques du tissu urbain. Ceci est dans le but de voir si ces méthodes peuvent nous servir de moyen pour paramétrer la géométrie sinueuse.

## II.2. Analyse géométrique de la rue sinueuse

Les méthodes d'analyse géométrique sont une forme de simplification et une abstraction formelle. Stephen Marshall (2004) explique, dans son œuvre *Streets and Patterns*, (figure II.4) que :

"L'analyse géométrique des motifs des rues comprend trois niveaux d'abstraction progressive :

**La composition (01)<sup>1</sup>**

**La configuration (02)<sup>2</sup>**

**La constitution (03)<sup>3</sup>**

Chaque niveau d'abstraction met successivement en évidence la géométrie, la topologie, puis la hiérarchie du système viaire" (Stephen Marshall, 2004, cité dans, Salat et al, 2011, P.232).

Ainsi nous présentons dans la partie suivante des méthodes d'analyse de la morphologie urbaine basées sur l'abstraction des formes, plus précisément le réseau viaire.

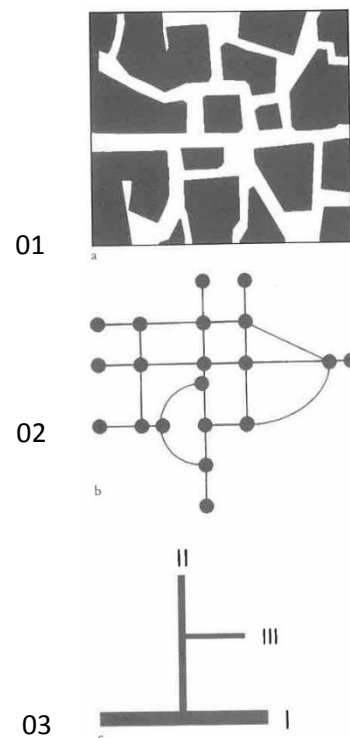


Figure II.4 : Niveaux d'abstraction géométrique, source Stephen Marshall, cité dans (Salat et al, 2011, P.232)

## Procédés géométriques d'évaluation de la morphologie urbaine :

### II.2.1. Méthode métrique :

Selon Manon Raimbault (1998), La méthode métrique s'appuie sur des variables invariantes, quantifiables et qualifiables pour décrire une configuration géométrique euclidienne (mesures, typologie, morphologie, topologie). Elle cite ' *La métrique est une science qui compose avec la largeur, la longueur et l'épaisseur*' (ibid, P.13). La démarche métrique utilise comme instrument les indicateurs de compacité, de découpage, de configuration (ibid, P.7). Le support d'information qu'elle vise est la projection en deux dimensions (façades, plan, coupe).

### II.2.2. Méthode de rugosité :

Une méthode qui est largement appliquée pour les études de l'aérodynamique dans un milieu, comme déjà expliqué dans le chapitre (I). Elle utilise des paramètres de densité, d'occupation au sol, d'aspérités et de répartition spatiale (Raimbault,1998, P.12).

<sup>1</sup>Cette méthode "conserve tous les éléments métriques de la géométrie euclidienne" (Stephen Marshall, 2004, cité dans, Salat et al, 2011, P.232).

<sup>2</sup> ne conserve que les nœuds et les liens de la théorie des graphes" (ibid.)

<sup>3</sup> ne conserve plus que la description qu'en termes de profondeur hiérarchique"(ibid.).

### II.2.3. Méthode fractale :

Définition de l'adjectif fractal dans le dictionnaire est : "*se dit d'objets mathématiques dont la création ou la forme ne trouve ses règles que dans l'irrégularité ou la fragmentation*".

La dimension fractale du tissu urbain révèle un aspect d'hétérogénéité vis à vis de "*la distribution des éléments pleins d'une surface, ou d'une courbe ou d'un volume*" (ibid, P.18) dans une zone urbaine. Cette méthode informe sur le dispatching des surfaces construites d'une *configuration spatiale hiérarchisée* (ibid, P.18), à savoir, l'agencement, le morcellement et le degré d'harmonie.

L'analyse fractale fait partie du domaine d'analyse des images (aériennes, topographiques). La prise en compte de l'échelle d'observation en analyse fractale est spécifique par rapport aux autres méthodes. Mandelbort, comme cité dans le rapport de Raimbault (1998), définit l'objet 'fractal', comme un objet "*fragmenté, pouvant contenir des similarités de forme selon la distance d'observation*" (ibid, P.18), ou encore Raimbault l'interprète comme un indicateur qui "*informe sur la division, la cohérence et l'agencement d'une configuration*"(ibid). Par conséquent, et contrairement aux "*indicateurs géométriques classiques*" qui sont dépendant de l'échelle d'étude, la dimension fractale permet une analyse "*à plusieurs échelles simultanées*".

D'une manière plus simplifiée, la géométrie urbaine fractale est une géométrie qui transmet des caractéristiques formelles qu'on peut distinguer sur une grande échelle (échelle d'une ville) ou une tout petite échelle allant jusqu'au détail architectonique (détail d'une colonne, d'une frise...). A une valeur importante de cet indicateur, on conclue une multiplicité des liens qui tissent la conception urbaine.

La recherche effectuée par Raimbault, dans le cadre de son DEA a eu comme objectif de discriminer trois tissus urbains, à Nantes – France, selon les trois méthodes présentées. La figure II.5 présente une synthèse des résultats obtenus.

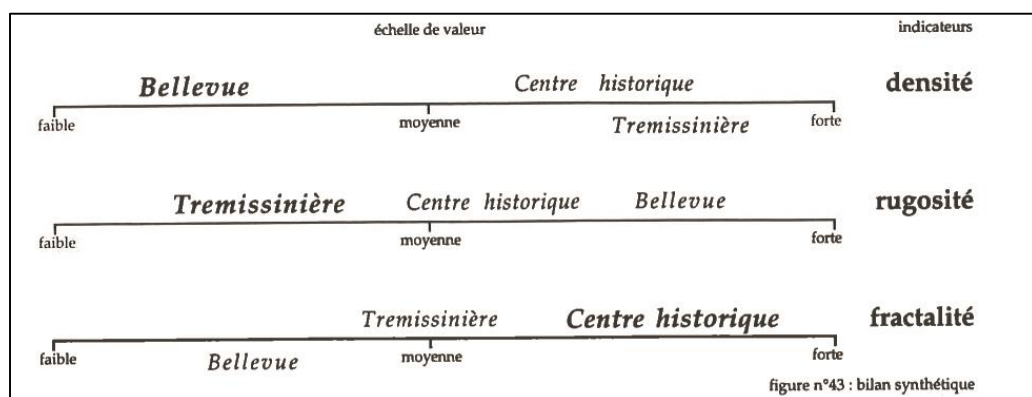


Figure II.5 : Classification des tissus selon les trois méthodes d'analyse, source (Raimbault, 1998)

Le centre historique de la ville de Nantes est sinueux et organique. Salat *et al*, dans leur livre 'Les villes et les formes sur l'urbanisme durable', (2011), décrivent le centre historique comme dense, rugueux et composé de masses complexes. Selon la récapitulation de l'évaluation de Raimbault, sur la figure précédente, un degré important de la dimension fractale décrit le tissu organique. Nikos Salingaros, cité dans Salat *et al*, 2011 "*S'il existe un grand nombre de manières différentes de traverser une ville en passant par les différends, alors couper un lien entre deux nœuds n'empêche pas le réseau de fonctionner*".

La sinuosité urbaine assure une forte connectivité entre les bâtiments et le fonctionnement du réseau urbain. Dans ce qui suit nous présentons des méthodes d'analyse qui utilisent des lignes rectilignes droite pour structurer les tissus urbains. C'est en opposition avec le caractère souple, tortueux de la sinuosité urbaine.

#### II.2.4. Méthode de la Syntaxe spatiale:

Daas (2013), a effectué une analyse formelle d'une géométrie urbaine locale (vernaculaire et organique) en appliquant la syntaxe spatiale. C'est une méthode qui se focalise sur l'espace "*qui englobe la forme du bâti*". Dans son modèle présenté dans la figure II.6, l'espace extérieur englobant c'est y et l'espace contenu x.

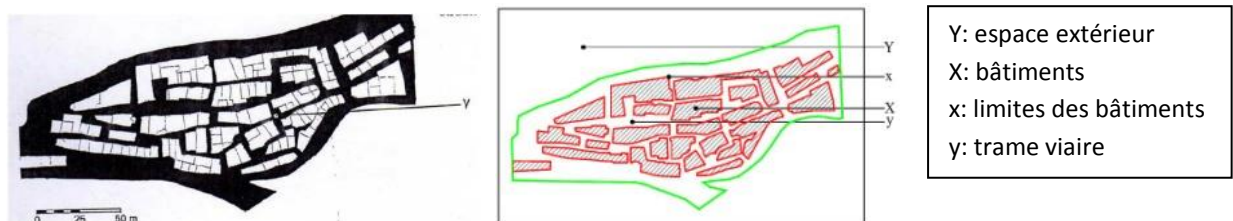


Figure II.6 : Ville française dans la région du Var, source (Bill Hillier, 1984 cité dans Daas, 2013)

L'analyse syntaxe spatiale traite l'espace urbain comme une seule entité 'continue'. Par opposition à la nature sinueuse du trajet courbé, elle lui accorde une analyse avec des lignes rectilignes (figure II.7.a). Les relations qui surgissent les différents composants sont explorées selon deux notions de bases : axialité et convexité, ce qui est expliqué dans la figure II.7.a et II.7.b.

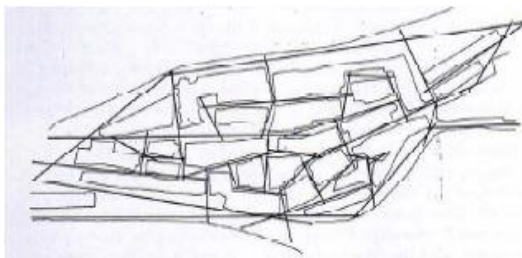


Figure II.7.a : carte axiale d'une ville française dans la région du Var, source (ibid)

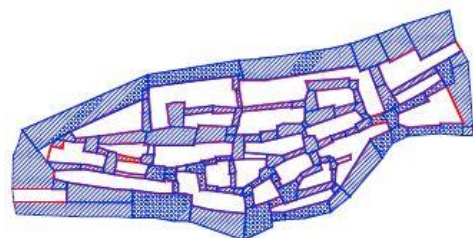


Figure II.7.b : carte convexe d'une ville française dans la région du Var, source (ibid)

Des lignes droites qui traduisent le mouvement de l'homme dans l'espace et la limite de son champ de visibilité

Fractionner le tissu en segments convexes avec la plus grande valeur du rapport surface/périmètre.

Autres facteurs qui structurent l'analyse de la syntaxe spatiale : la Perméabilité, la Profondeur, le Génotype, l'Intelligibilité, la Connectivité et l'Intégration. Ce qui retient notre attention parmi ces facteurs la notion de la profondeur, qui traduit une proportion de complexité du trajet parcouru pour arriver à un endroit donné.

**Profondeur:** nombre d'étapes franchies pour aller d'un espace à un autre (cela évoque une notion de contrôle social par rapport à l'étranger, notion d'introverti ou extraverti)

**Espace profond** est un espace isolé difficile à y accéder (nombre de virages importants à dépasser) un espace ségrégué.

**Espace peu profond** est un espace intégré.

Daas a travaillé sur trois agglomérations situées à Aures, en Alger (Menaâ/ Haidouss/ Amandane). L'analyse était faite à travers une application théorique et des simulations numériques à l'aide du DEPHTEMAP<sup>4</sup> (figure II.8).

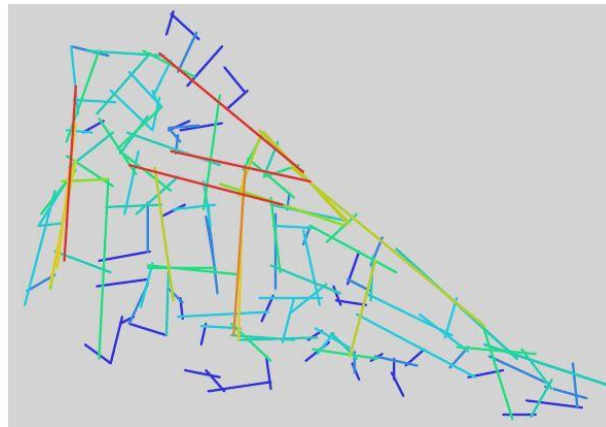


Figure II.8 : Connectivité par analyse d'axialité  
source (Daas Nawel, 2013, P107)

L'auteur a constaté une identité commune pour les trois tissus caractérisés par une compacité et une complexité. Pour des raisons culturelles et sociales, le tracé des rues des trois régions se caractérise par des champs de visibilité limitée, des lignes axiales courtes, des espaces profonds, *un mouvement contrôlé*. (ibid, P.76).

### II.3. Synthèse

L'objectif de la présentation des méthodes d'analyse est de :

- **Premièrement, chercher à décrire le tissu sinueux à partir de différentes approches.**
- **Deuxièmement, chercher à lister, dans le domaine d'analyse des tissus urbains, les méthodes les plus utilisées pour détailler géométriquement les trames**

<sup>4</sup>Outil qui aide à interpréter la forme urbaine via implémentation des concepts de la VGA (analyse graphique de la visibilité).

urbaines. Cela afin de trouver, s'il existe, un paramètre qui traduit la sinuosité urbaine.

D'après cela, on déduit que les méthodes analytiques qu'on trouve ici sont un peu compliquées et interviennent surtout pour des configurations existantes. Elles ne donnent pas une information précise sur la trame urbaine. Elles relatent des proportionnalités, des relations d'articulation entre les entités urbaines et leur enchevêtrement. Cela signifie qu'on est loin de notre but d'évaluation environnementale aéraluque par le biais d'un outil géométrique simple, et qui sert d'application dès les phases de conception.

### III. Calcul de la sinuosité

La sinuosité urbaine est un concept très large qui peut traduire un caractère sinueux d'un canyon, d'une chaussée, d'un cours d'eau, etc. Elle est considérée comme un indicateur morphologique de la géométrie urbaine. Nous présentons dans ce qui suit une approximation du coefficient de la sinuosité, l'enchaînement de son développement se trouve plus détaillé en annexe (01), avec d'autres exemples d'application.

#### III.1. Définition

Pour définir et illustrer cet indicateur, nous considérons dans le plan  $xOy$  un trajet sinueux plan ( $\mathcal{C}$ ) constitué par  $n$  tronçons périodiques ( $\mathcal{C}_i$ ) ( $i=1$  à  $n$ ) dont chacun est caractérisé par une longueur d'onde  $\lambda_i$  et une largeur  $W_i$  comme indiqué sur la figure II.9. Désignons par  $L^5$  la longueur curviligne entre deux points ( $P_1, P_2$ ) du trajet ( $\mathcal{C}$ ) et par  $\ell$  la longueur qui les joint directement.

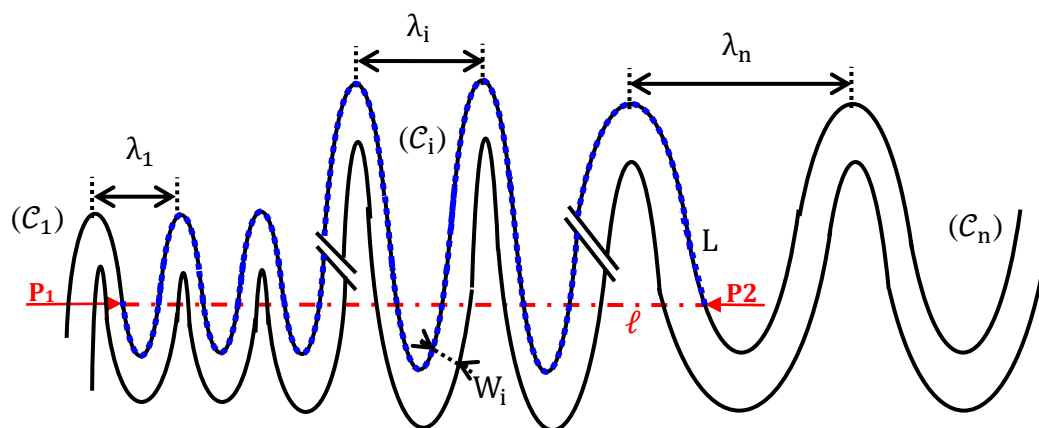


Figure II.9 : Illustration du calcul du coefficient de sinuosité d'un trajet sinueux.

<sup>5</sup>  $L$  est la longueur effectivement parcouru par un piéton qui arpenterait le trajet courbure après courbure.

Pour quantifier le caractère sinueux du trajet, nous proposons la formulation suivante que nous appelons coefficient de sinuosité :

$$Si = \frac{L}{\ell} \quad (1)$$

$L$  étant la somme de toutes les longueurs effectives  $L_i$  des différents tronçons (i) ( $\sum_{i=1}^n L_i$ ), et  $m_i$  est le nombre de périodes du tronçon ( $\mathcal{C}_i$ ), nous pouvons confondre en première approximation la longueur  $\ell$  à la somme totale des longueurs d'ondes ( $\ell = \sum_{i=1}^n m_i \lambda_i$ ) si bien que le coefficient  $Si$  s'écrit :

$$Si = \frac{L}{\ell} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n m_i \lambda_i} \quad (2)$$

### III.2. Représentation cartésienne

$L_i$  peut s'exprimer en fonction de l'abscisse curviligne  $s$  de la courbe ( $\mathcal{C}_i$ ), figure II.9. Etant donnée  $x_{i1}$  et  $x_{i2}$  les limites inférieure et supérieure de l'intervalle où s'étend la courbe ( $\mathcal{C}_i$ ) le coefficient de sinuosité sera donné ainsi par la relation :

$$Si = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}{\sum_{i=1}^n m_i \lambda_i} \quad (3)$$

La connaissance de la forme de courbe des différents tronçons ( $\mathcal{C}_i$ ) et donc la dépendance de  $y=f(x)$  (paramétrage de courbe) permet d'évaluer la longueur effective  $L$  et par là le coefficient de sinuosité  $Si$ .

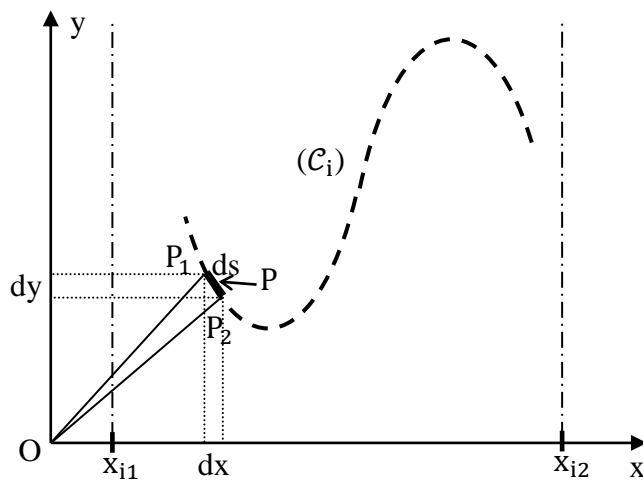


Figure II.10 : Graphe d'un élément curviligne considéré sur l'axe du tronçon de courbe ( $\mathcal{C}_i$ ) en représentation cartésienne.

### III.3. Cas d'un trajet sinusoïdal

Considérons maintenant un trajet sinusoïdal constitué par  $m$  périodes de période  $\lambda$  et d'amplitude  $A$  et qui est décrit par l'équation cartésienne, figure II.11 :

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad (4)$$

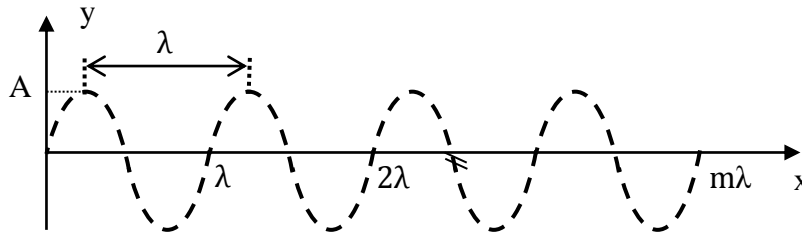


Figure II.11 : Graphe d'un trajet plan sinusoïdal, source (auteur).

Comme développé dans l'annexe (01) nous proposons pour le coefficient de sinuosité du trajet sinusoïdal en fonction du rapport amplitude de la sinusoïde sur sa longueur d'onde  $\left(\frac{A}{\lambda}\right)$  la formulation suivante :

$$S_i = \frac{L}{1} \cong 2\pi \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2} \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\left(\frac{A}{\lambda}\right)^2}{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2}\right)\right) \quad (5)$$

Le rapport  $\frac{A}{\lambda}$  décrit l'ampleur de la sinusoïde en crête-crête qu'on définit ainsi comme étant le degré de sinuosité ou indice de forme. D'ailleurs, nous remarquons bien que le facteur de sinuosité varie dans le même sens que le degré de sinuosité dans la mesure où si le degré de sinuosité diminue, la sinuosité diminue et vice versa.

Nous appliquerons  $\frac{A}{\lambda}$  et  $S_i$  pour caractériser la sinuosité des cas d'étude en simulation. Il existe une autre méthode d'analyse des tissus urbains : la squelettisation. Elle donne une présentation plus simple d'un réseau urbain en gardant les attributs géométriques principaux. Elle lui accorde une nouvelle image composée par des axes et des points selon le cas de figure. Cela nous permet d'obtenir une configuration réduite d'un réseau viaire tout en gardant les critères géométriques nécessaires. Nous définissons encore cette notion dans la partie suivante.

### IV. Squelettisation de l'espace urbain

La méthode de squelettisation fait appel aux équations mathématiques pour construire une géométrie 'secondaire' propre à une forme donnée. Elle est largement utilisée dans le



domaine de la biologie pour simplifier les structures organiques complexes en un ensemble de branches ou ossatures.

#### IV.1. Définition de la squelettisation urbaine

Le travail de Sarradin (2005) nous sert de référence pour donner une définition de la méthode de squelettisation : "En quelque sorte, dans le cas de formes fermées, un squelette est le résultat de l'amincissement d'une forme jusqu'à l'obtention d'un ensemble de lignes centrées dans cette forme" (Sarradin, 2005, P.91). La figure II-12, montre des exemples de formes et de leurs squelettisation.

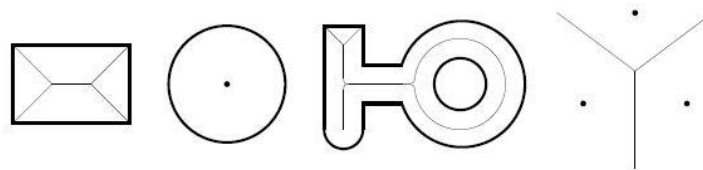


Figure II.12 : squelettisation des formes, source (Sarradin, 2005)

#### IV.2. Méthode de représentation du squelette pour une forme donnée

Pour comprendre l'aboutissement à une synthèse formelle pareille, Sarradin nous explique cette notion par la définition de la squelettisation écrite par Blum, le fondateur de ce concept :

"Soit un plan couvert de manière homogène par de l'herbe sèche et  $W$  un ensemble de points de ce plan. À l'instant initial  $t_0$ , tous les points du contour de  $W$  sont enflammés simultanément. Le feu se propage de manière homogène et s'étend à travers l'herbe à vitesse constante. Le squelette de l'ensemble des points  $W$  (noté  $MA(W)$ ) est défini comme le lieu des points où les fronts enflammés se sont rencontrés" (Blum cité dans Sarradin, 2005, P.90) figure II-13.

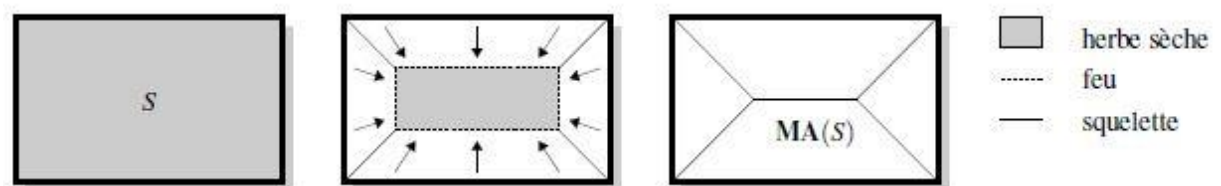


Figure II.13: Explication du concept de squelettisation par Blum, source (Sarradin, 2005)

Imaginons que la forme rectangulaire dessinée sur la figure II-13, représente les bords des rues d'une zone urbaine où le trait noir est la limite des façades du bâti, et l'espace blanc est l'espace extérieur (rue, placette, intersection...). La liaison des différents points équidistants des bâtiments des deux côtés, posés tout au long de l'espace blanc, forme le 'squelette' de l'espace extérieur urbain, plus précisément et suivant notre but de l'étude, le squelette de la

trame viaire. Elle présente une sorte de *réduction dimensionnelle* de la forme à travers son partitionnement :

- la squelettisation offre le concept « *réduction dimensionnelle* », *c'est-à-dire que les formes sont transformées en un ensemble de branches qui représente un potentiel pour la compression de données et la concentration d'informations.* (Sarradin, 2005, P.99).

Elle nous donne une information complète à propos de chaque déviation, pointe, extrema de courbure, tout type de fragmentation du contour qui borne le squelette de part et d'autre. La squelettisation est utilisée dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme. Elle est exploitée pour calculer un cheminement à l'intérieur d'un plan. Notre application sera semblable à cela. Nous essayons dans notre prochain travail de faire évaluer les trajets sinueux à l'aide de leur squelettisation.

Dans le cadre de sa thèse Sarradin a déterminé le squelette comme un descripteur de forme pour représenter l'espace ouvert, à travers des projections sphériques de la vue du ciel le long d'un parcours. Nous nous intéressons à l'utilisation du même descriptif, comme un deuxième outil de calcul de sinuosité des rues.

## **V. Conclusion**

Nous avons décrit dans ce chapitre le tissu urbain sinueux coté forme et ambiance visuelle. Nous avons traduit la sinuosité par une formulation mathématique que nous avons appelé coefficient de sinuosité. Cette expression théorique sera déployée dans l'analyse des résultats des simulations afin de dégager la corrélation entre ce type de trajet et l'environnement aéraulique. Nous avons abordé aussi la squelettisation comme autre moyen pour présenter la sinuosité urbaine. Elle sert à calculer le cheminement d'un point à un autre. Dans la partie suivante, nous déterminons les cas d'étude et la procédure du travail.

## **Chapitre III**

### **Cas d'étude et Simulations**

#### **I. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons la structure géométrique sur laquelle nous appliquerons la simulation. Nous fixons les cas de figure, leur morphogenèse et la logique de la composition. Nous présentons la modélisation des cas d'étude en deux dimensions et trois dimensions. Nous consacrons une partie à une brève présentation du logiciel et de la méthode appliquée. Nous parlons dans une partie suivante du paramétrage et du mode opératoire où nous expliquons l'enchaînement des simulations. A la fin du chapitre nous présentons les résultats des simulations.

## II. Présentation des cas d'étude

### II.1. Description de la morphologie

Nous avons choisi de mettre en application un **enchaînement de plusieurs échantillons théoriques** avec une logique de succession des figures. L'échelle de l'étude sera dans les limites d'un quartier, une échelle intermédiaire. Les échantillons d'études seront circonscrits dans une forme carrée.

La sinuosité qu'on cherche à dessiner est liée à la disposition des bâtiments, à la géométrie urbaine. C'est une **sinuosité intrinsèque**.

Pour esquisser les illustrations de cette configuration urbaine nous nous sommes posé les questions suivantes :

- Dessin de sinuosité, comment présenter sa forme, ou son allure?
- Est-ce que la sinuosité dont nous parlons est bordée par des façades courbées (figure III.1, III.2) ou non alignées? est ce qu'elle est la concavité d'une chicane (figure III.3) ou le vide d'un rassemblement de bâtiments en quinconce (figures III.3 et III.5.a)?

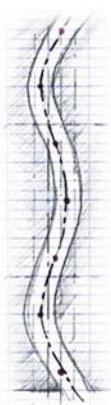


Figure III.1 :  
rue canyon  
courbe.

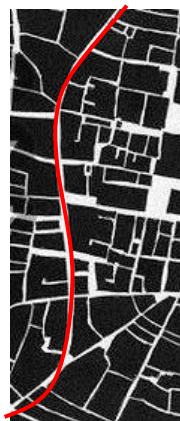


Figure III.2:  
Bologne-Italie  
source,  
<https://urbabillard.wordpress.com/>

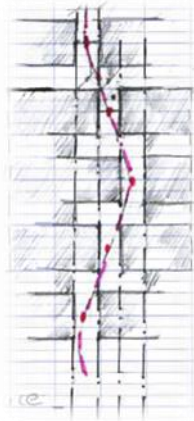


Figure III.3 :  
alternance des  
bâtiments.



Figure III.4 :  
disposition en  
damier.

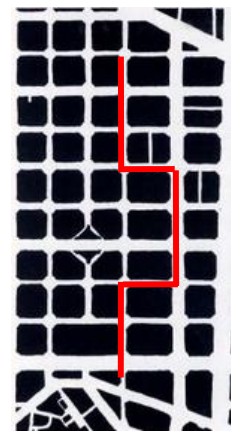


Figure III.5.a:  
plan Barcelona -  
Espagne, source,  
<https://urbabillard.wordpress.com/>

Restons dans l'intention de commencer toujours par le cas le plus simple et clair en matière de mode d'occupation du sol : une rue canyon sinueuse. Nous présentons dans la figure III.5.b des esquisses de courbes sinusoïdales. Nous avons eu recours à son équation mathématique :

$$f(x) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

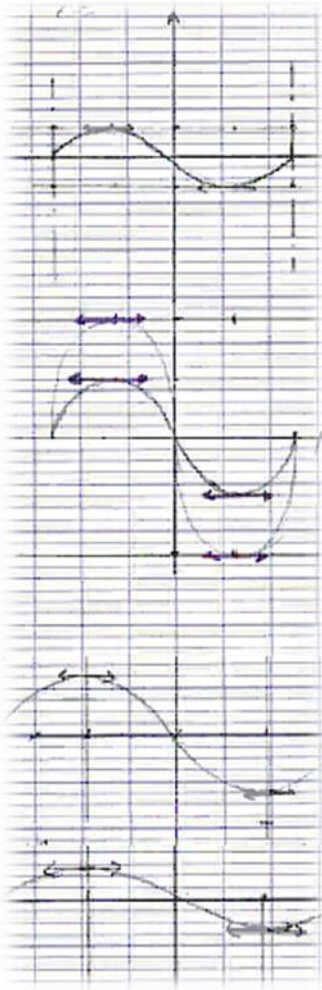


Figure III.5.b : essai de variation de l'amplitude et la période.

Nous avons cherché les valeurs de  $A$  et  $\lambda$  les plus proche des configurations sinueuses urbaines. Nous avons diversifié l'amplitude  $A$  pour une période  $\lambda$  fixe, et vice versa, (figure III.5). Nous avons noté que le rapport  $A/\lambda$  ou l'inverse, pour n'importe quelles valeurs **défini le degré de sinuosité : nous pouvons le considérer comme un indice de forme de sinuosité.**

Nous avons constaté que dans le cas urbain réel, le rapport  $A/\lambda$  prend généralement sa valeur dans l'intervalle  $[0,08 ; 0,16]$ . Nous commençons par une rue sinueuse d'indice de forme  $A/\lambda = 0.12$ .

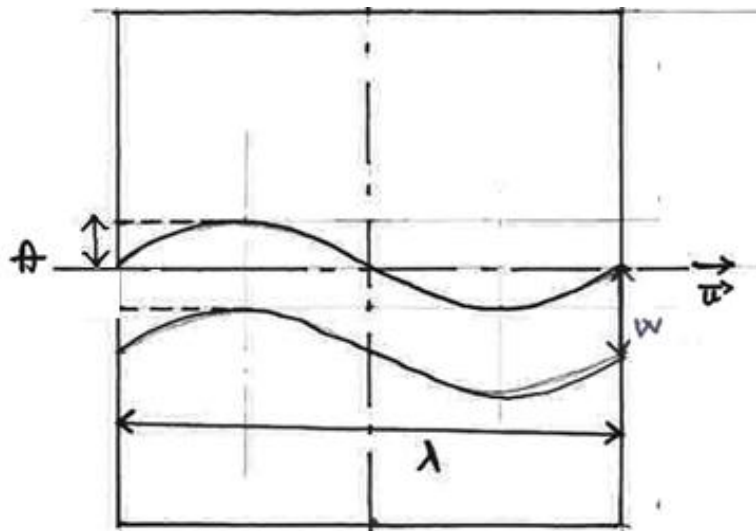
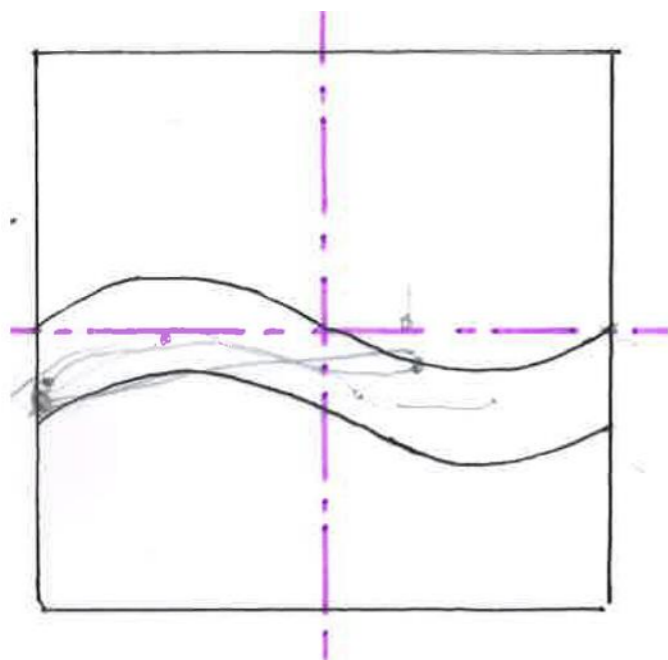


Figure III.6: rue canyon sinueuse de  $A/\lambda = 0.12$

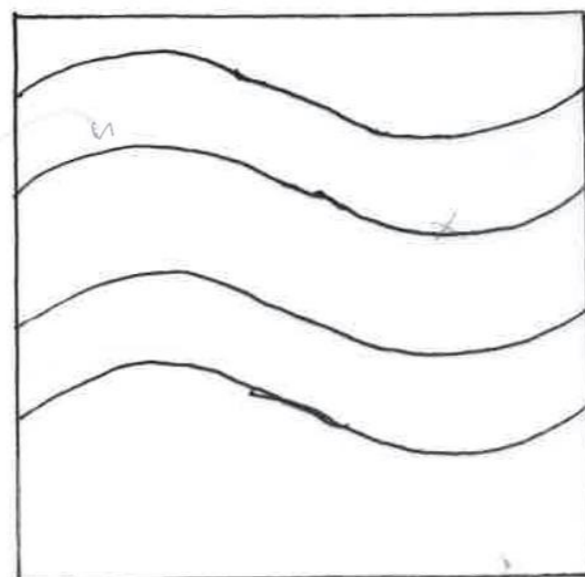
Après intégration du facteur forme dans l'expression du coefficient de la sinuosité (voir paragraphe III.3 du chapitre II), nous avons pensé à la série des cas d'études que nous introduisons dans la veine numérique. Nous présentons l'enchaînement comme suit :



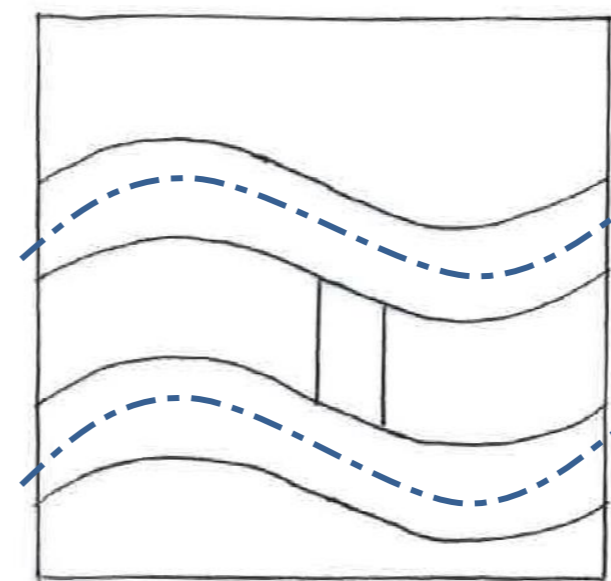
**Cas 01** : Rue sinueuse avec des concavités faibles, une sinuosité douce.

$$S_i = 1.129$$

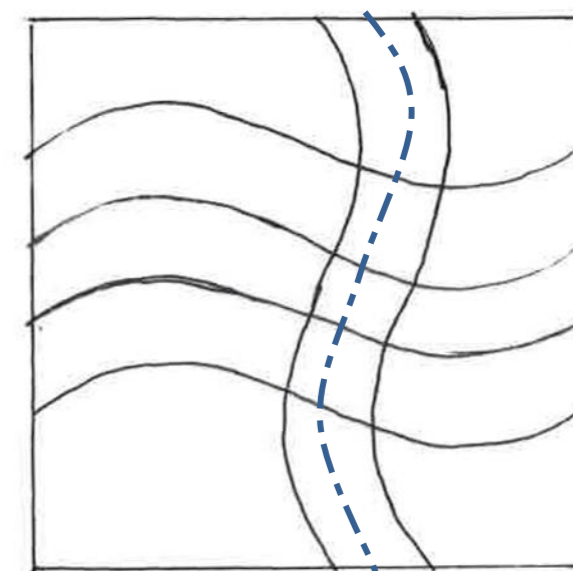
$$\frac{A}{\lambda} = 0.12$$



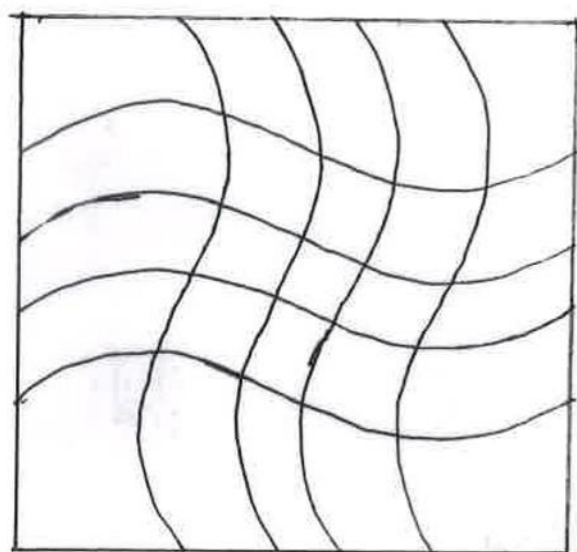
**Cas 02** : Dédoubler la rue courbe pour avoir deux entrées face au vent. Les rues sont parallèles avec aucune liaison entre les deux.



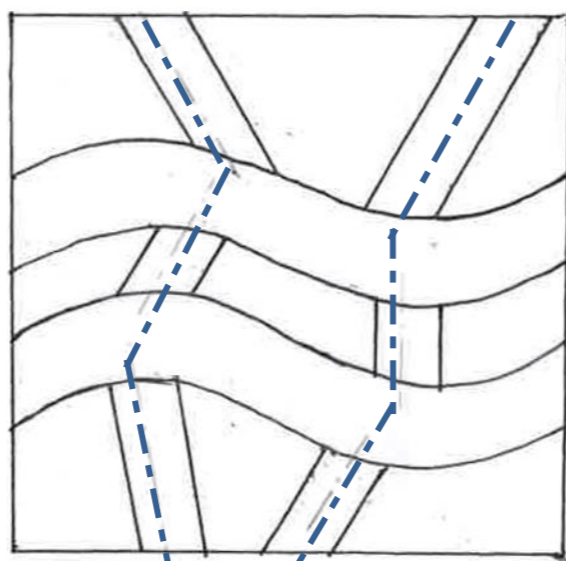
**Cas 03** : liaison des deux sinusoïdes parallèles par un segment rectiligne (impasse). Qu'est-ce que cela apporte au sens de l'écoulement lors de l'infiltration du flux de vent des deux sens opposés?



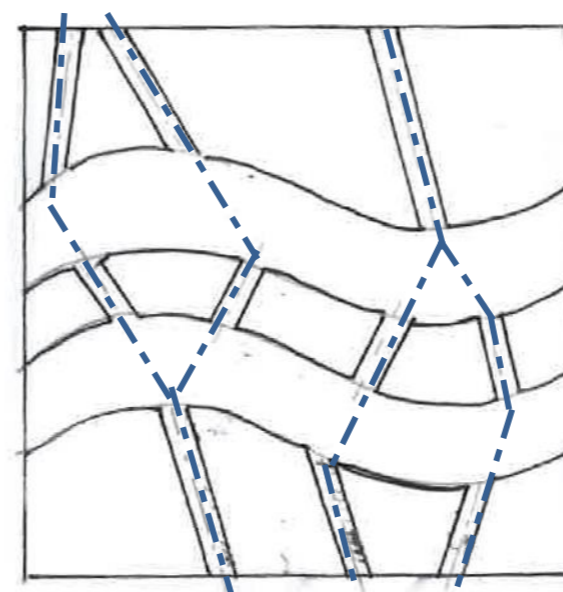
**Cas 04** : on passe à une liaison plus étendue et qui dépasse les limites des rues pour s'élaner sur tout l'échantillon. Le changement de direction commence à complexifier l'exemple d'étude.



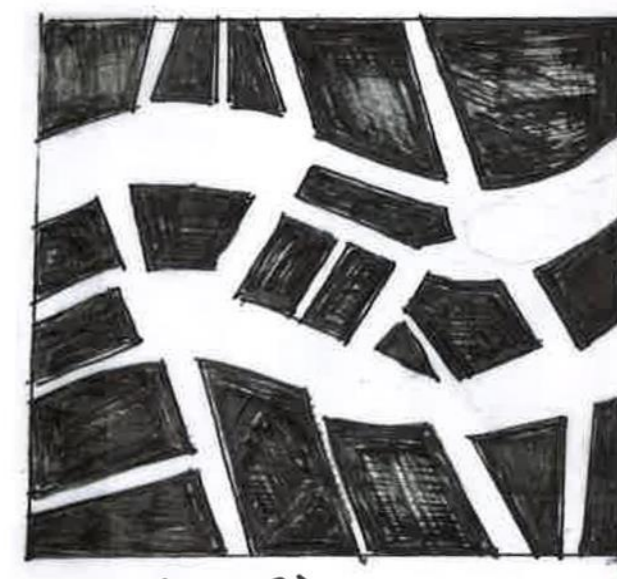
**Cas 05** : Intersection entre deux sinusoïdes d'axes Est-Ouest et Nord-Sud. Apparition d'une grille de rues sinueuses, génération de quatre intersections (carrefours).



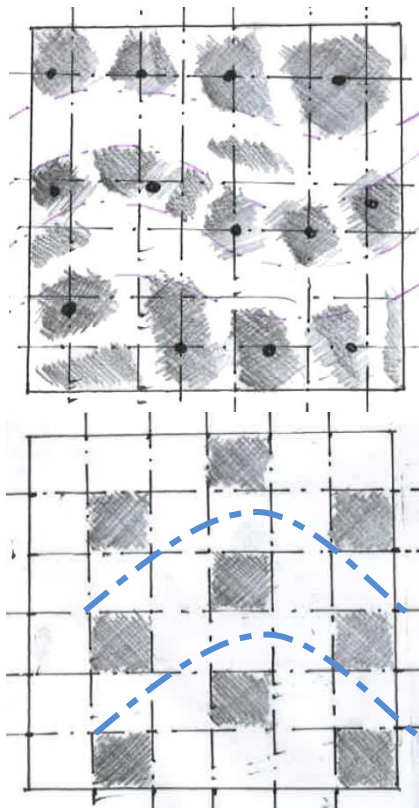
**Cas 06** : Certes notre but est d'avoir des cas simples et théoriques, mais tout en ayant une arrière-pensée sur la morphologie urbaine. Pour cela, le cas précédent s'avère très rare, quasiment inexistant avec cette composition. Nous avons choisi de s'approcher de la forme urbaine encore plus en introduisant des directions Nord-Sud rectilignes.



**Cas 07** : les largeurs des passages droits appliquées sont réduites pour imiter les plans des ruelles. Les rues munies d'une sinuosité plus prononcée sont généralement des grands boulevards, les éléments qui les interceptent sont des artères routières qui assurent la connectivité du tissu urbain. Ils sont généralement moins espacés et discontinus.



**Cas 08** : Nous décomposons encore le cas d'étude afin de retrouver la complexité et l'irrégularité des zones urbaines, plus d'îlots, de parcelles déformées avec des délinéaments rectangulaire, trapézoïdal, triangulaire, carré... Les vides sont des places, des croisements, des esplanades, des continuités de boulevards.



**Cas 09 :** d'après le cas 08 nous pouvons donner une représentation plus abstraite pour le tracé du quartier. Une image de taches noires, un espace blanc et des lignes directrices qui lient entre eux. Cette représentation est une sorte de combinaison des niveaux 1 et 2 de l'abstraction formelle définie par Steven Marshall (2004), notée dans le chapitre II.

**Cas 10 :** Pour exécuter un travail de paramétrage et faire une corrélation de variables mathématiques, nous avons choisi de passer à la configuration suivante:

- **Un damier :** plan urbain.
- **des obstacles uniformes** de base carrée (zone construite).
- une disposition **alternée** des obstacles qui met l'espace extrinsèque en sinuosité.

**Définition extrinsèque :** *Qui est tiré, non de la chose elle-même, mais de choses avec lesquelles elle a un rapport plus ou moins direct (wikitionnaire).* L'espace extrinsèque ici est celui qui entoure les plots, c'est le vide émergent entre eux.

Les dimensions de la trame doivent garantir un mouvement sinueux du vent. Les plots doivent être rapprochés de manière à imposer au flux du vent de les contourner et donc suivre un trajet courbé (figure III.8.a). Au cas où les obstacles sont très éloignés, on risque d'avoir un degré de sinuosité très faible (figure III.7).

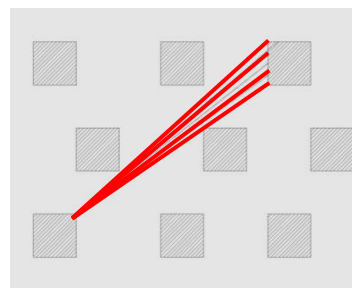


Figure III.7: disposition éloignée des obstacles

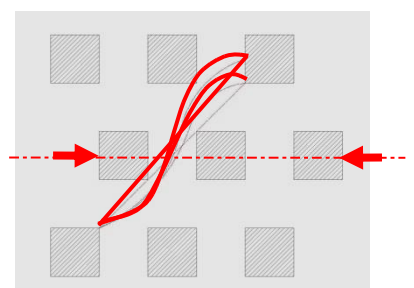


Figure III.8.a: disposition rapprochée des obstacles

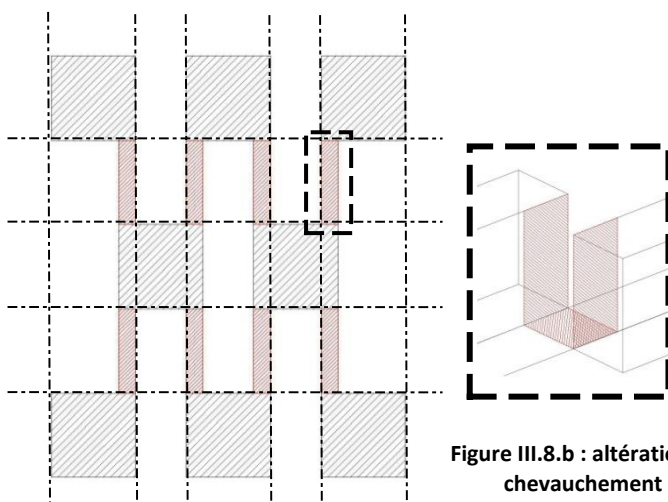


Figure III.8.b : altération et chevauchement

Le rétrécissement du vide crée des interfaces communes entre les obstacles, des chevauchements, qui rendent le trajet d'un point à un autre plus tortueux (figure III.8.b).

A partir de ce point nous allons présenter le mécanisme d'enchaînement d'un cas à un autre en simulation.

## II.2. Principe d'enchaînement

En se basant sur les paramètres géométriques de la fonction sinusoïdale, d'amplitude  $A$  et de période  $\lambda$ , nous exécutons :

- une 'compression horizontale' qui signifie une réduction au niveau de l'amplitude (figure III.9 et figure III.10)
- une 'compression verticale' qui signifie une réduction de la période. (figure III.11, et figure III.12)

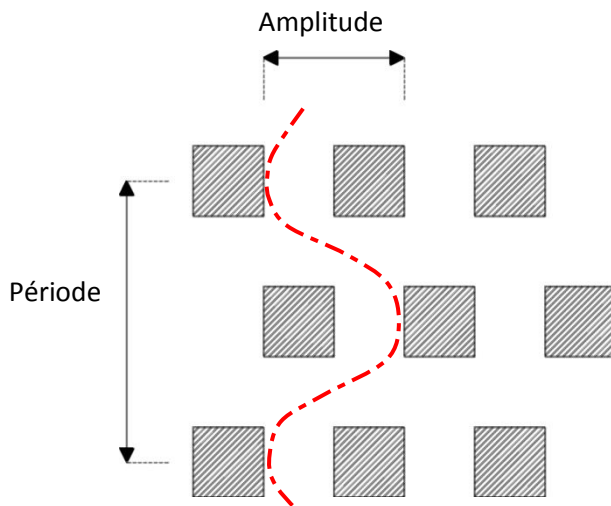


Figure III.9 : Etat initial

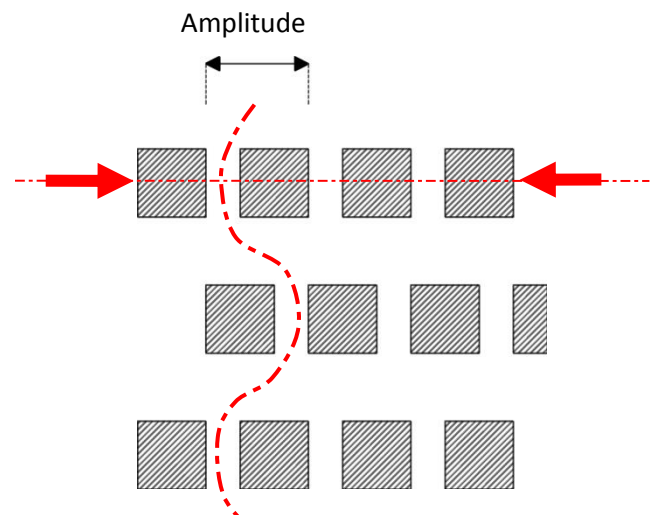


Figure III.10: réduction de A

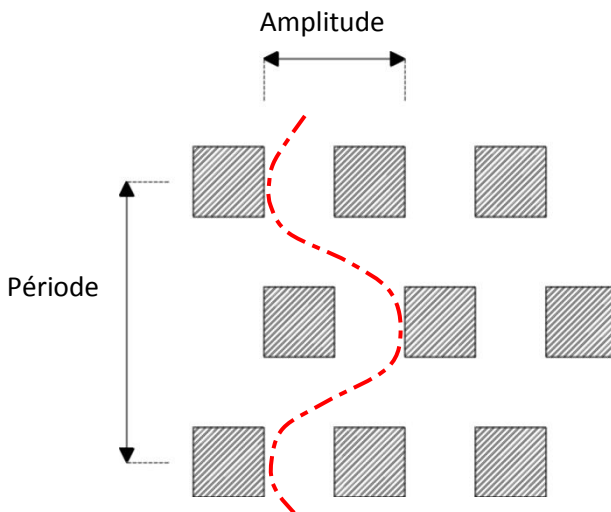


Figure III.11 : Etat initial

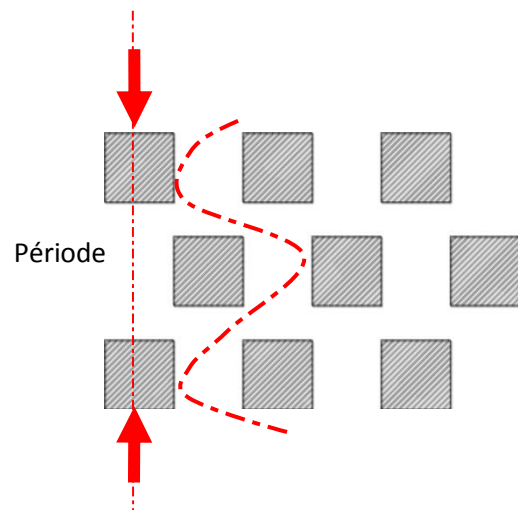


Figure III.12: réduction de la période

Nous allons varier les cas selon un 'compactage vertical' ou un 'compactage horizontal', puis comparer le changement du mouvement du vent. Nous essayerons d'établir une relation entre la forme et l'écoulement aéraulique, puis nous le vérifierons avec une simulation aéraulique d'un cas réel pour voir si cela peut être réaliste.



Remarque: Ce choix de méthodologie de travail est issu de la série de dessins présentée en page 49. Et aussi le travail des 'plots' et l'altération de leur agencement est inspirée des cas de figure que nous avons rencontrés (Zhang et al, 2005 ; Kim et al, 2011).

### II.2.1. Modélisation du cas d'étude :

Les étapes de la modélisation géométrique :

- Modélisation sur Sketchup (modélisation 3D des cas d'étude).
- Exportation sous forme d'un fichier python contenant des instructions à l'attention du modèle salomé (un script, les fichiers correspondant des géométries sont dans l'annexe 02).
- Télécharger le fichier sur Salomé pour l'exporter de nouveau sous la forme Med.
- Nous passons par Gmsh, pour définir le maillage (une discrétisation du volume 3D).
- Simulation avec le Code Saturne couplé à Solene (la forme compatible avec le logiciel de simulation est Med.salomé).

Nous présentons la configuration spatiale de notre modèle d'étude et ses caractéristiques géométriques :

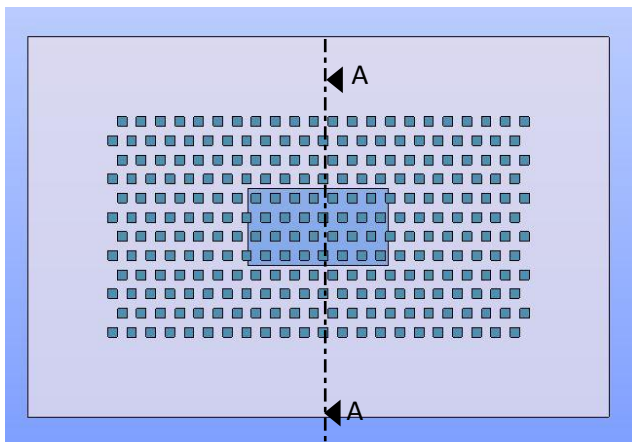


Figure III.13 : géométrie d'étude sur Salomé

#### a. Disposition des plots :

Nous travaillons sur un modèle 3D composé d'obstacles (parallélépipède de base carrée) disposés en alternance suivant une trame en damier. L'ensemble des plots est circonscrit dans une emprise rectangulaire.

- 12 rangées sur l'axe Nord-Sud
- 44 rangées sur l'axe Est-Ouest

Nous nous concentrons dans notre analyse d'après sur la zone d'intérêt centrale (28 plots circonscrits dans le rectangle bleu, figure III.13). Le reste des obstacles tiennent lieu de Rugosité (obstacle urbain), c'est ce qui est montré dans la figure III.15.

#### b. Plan et profil des plots :

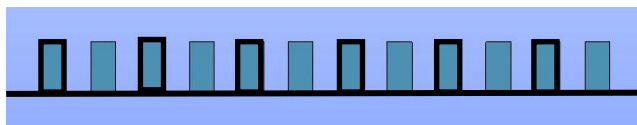
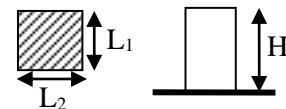


Figure III.14 : coupe transversale A - A



$$H = 24 \text{ m}$$

$$L_y = L_x = l_1 = l_2 = 12 \text{ m}$$

$$H/L_y = 2 : \text{ratio d'aspect}$$

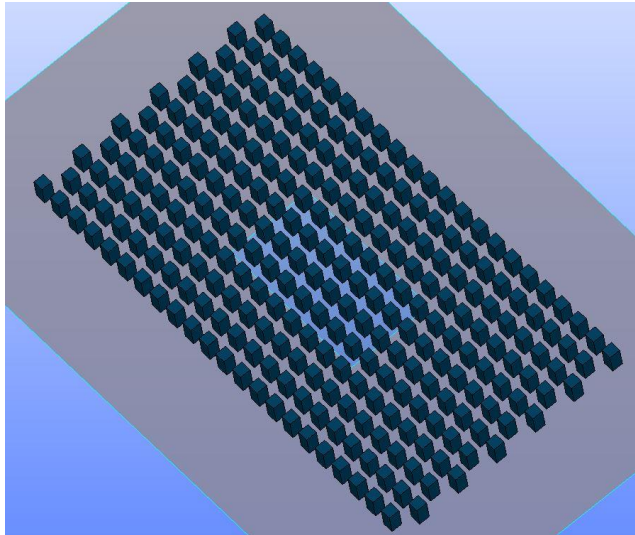


Figure III.15: modélisation volumétrique

### c. Dimension de la trame du vide

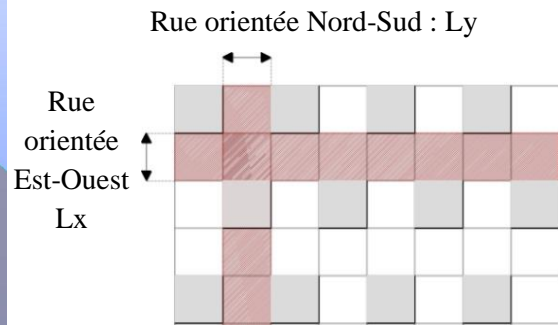


Figure III.16: trame du vide.

Les hauteurs sont identiques. Les largeurs des rues Est-Ouest et Nord-Sud sont égales (12 m).

### La disposition répond aux conditions suivantes :

La hauteur des obstacles est 24 mètres, ce qui est équivalent approximativement à la hauteur d'un bâtiment de 7 niveaux (RDC + 6 étages). Selon les critères de (Oke, 1988) notre cas d'étude nous fournit un régime d'écoulement aéraulique 'rasant' ( $H/W > 0.7$ ). Généralement c'est le cas qu'on étudie dans les revues bibliographiques sur les phénomènes aérauliques dans les rues canyons, parce que sa forme est la plus proche de celles des rues dans le centre-ville. C'est à cette échelle qu'on note souvent les problématiques urbaines comme la dispersion de la pollution qui demande une recherche sur les trajets des courants d'air autour des bâtiments.

### II.2.2. Maillages des modèles 3D

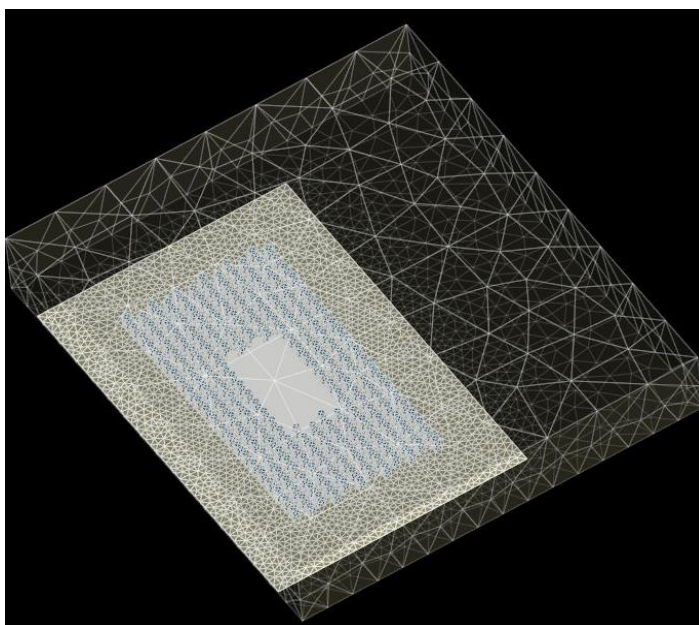


Figure III.17: Maillage

"Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis." (Wikipédia). Le maillage appliqué est un maillage 3D, tétraédrique, linéaire (figure III.18).

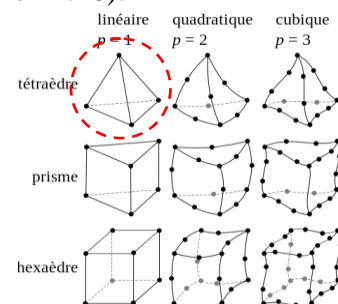
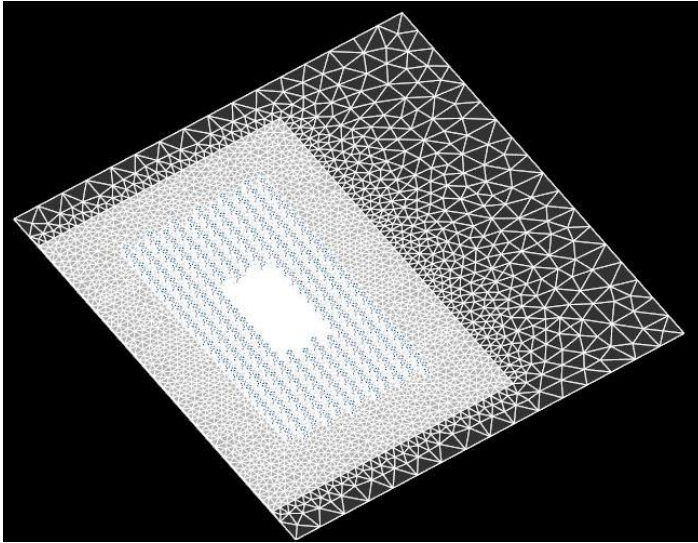


Figure III.18 : source (wikipédia)



Nous avons fait varier les maillages de différentes surfaces (figure III.19). Nous avons lancé plusieurs combinaisons en simulations pour voir la différence des résultats.

Figure III.19: maillage différent pour chaque groupe de surface. Un degré de raffinement plus important dans la zone d'étude.

Les groupes de surfaces que nous avons construits sont présentés dans le tableau III.1.

Maillage du cas d'étude		
Groupes physiques de surfaces	Notation	La longueur caractéristique ( $L_c$ )
Surface supérieure de la veine	a	100
Surface inférieure de la veine	b	50
Zone Urbaine	c	5
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	2
Bâtiments de la zone d'étude	f	2

Tableau III.1 : exemple de maillage des groupes de surfaces.

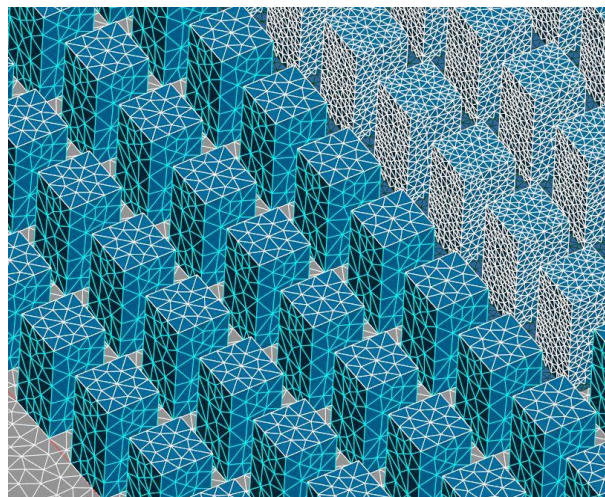


Figure III.20: modèle 3D et maillage accordé à chaque groupe de surfaces

### **III - Simulation numérique:**

#### **III.1. Présentation du logiciel de simulation (CFD)**

Les codes de simulation aérouique CFD (*Computational Fluid Dynamics*), sont des outils qui permettent de résoudre les équations de la mécanique des fluides, calculer, entre autres, les champs de vitesse, et donc au final de visualiser l'écoulement de l'air autour des obstacles, bâtis ou d'aménagement urbain sur une petite échelle ou une grande échelle. Cet outil de simulation numérique est adapté à notre but de travail : le paramétrage d'une relation entre volumes simples construits et écoulement d'air. Mais nous pouvons rencontrer des limites qui peuvent ralentir notre travail comme le temps de calcul pour des géométries complexes ou d'emprise importante.

##### **III.1.2. Code Saturne**

Code saturne est un logiciel de simulation numérique. Son fonctionnement est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes pour modéliser plusieurs aspects d'écoulement, "*écoulements incompressibles ou dilatables, avec ou sans turbulence ou transfert de chaleur*" (site web EDF). Les régimes d'écoulements, 2D ou 3D, peuvent être stationnaires ou instationnaires, laminares ou turbulents. Il s'appuie sur une approche des *volumes finis localisés*, c'est ce qui permet une adaptation à tout type de maillage. D'un point de vue théorique, ce logiciel se base sur la formulation du profil logarithmique de la vitesse du vent que nous avons rappelé dans l'annexe(03). Dans notre travail nous allons utiliser le code saturne suivant la manière dont il est préprogrammé dans Solene, qui est un logiciel de simulation thermo-aérouique développé par le CRENAU.

#### **III.2. Données de base et paramétrage**

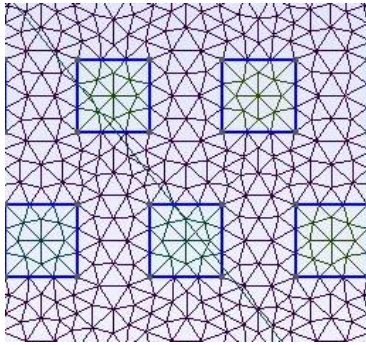
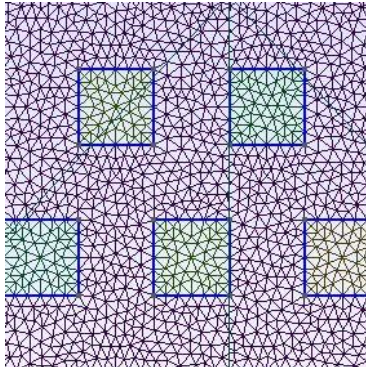
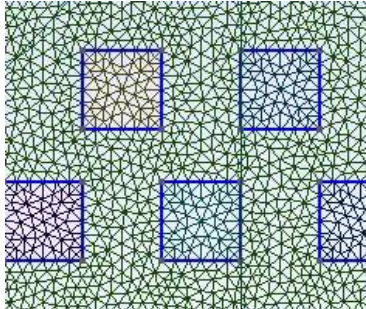
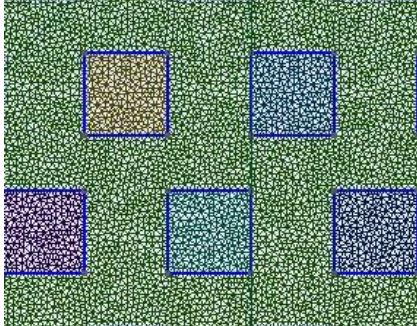
Après la modélisation géométrique, nous utilisons Gmsh pour faire le maillage. Dans le but de garantir l'indépendance des résultats au dimensionnement du maillage et son degré de raffinement, on attribue à ce dernier au moins 3 configurations différentes (Tominaga et al. 2008, cité dans Wang, 2015). Pour cela nous avons appliqué des combinaisons multiples de maillage, et nous avons examiné le degré de précision des résultats qui répond à nos objectifs (tableau III.2).

##### **III.2.1. Choix du maillage (Gmsh) :**

Le but de cette section est de produire un maillage tel que ;

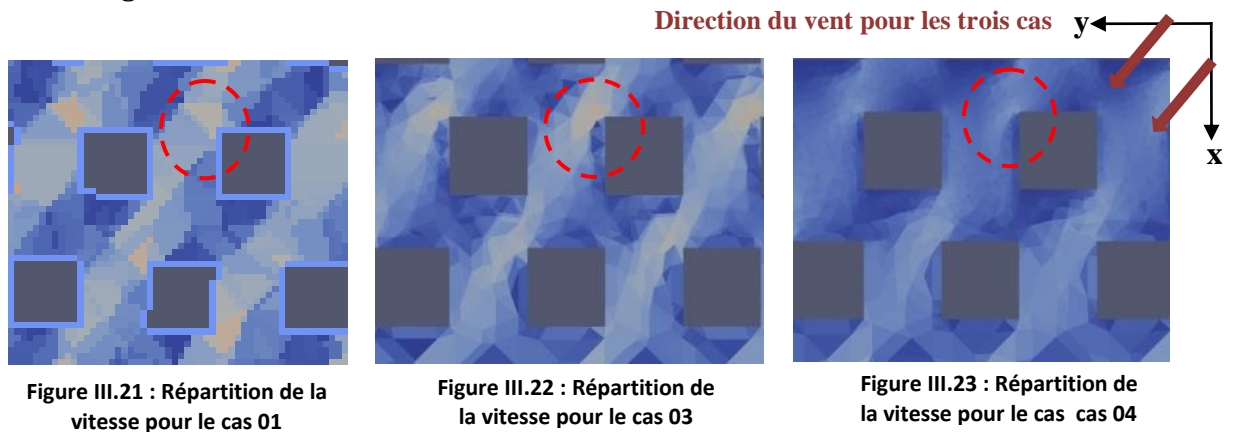
- le nombre de triangles sont minimal (réduire le temps de calcul).
- la granularité d'un niveau suffisant pour mettre en évidence les disparités de la vitesse à proximité des plots.

Nous nous sommes concentrés sur la zone d'intérêt (zone centrale). Les échantillons présentés dans le tableau suivant sont zoomés sur cette zone.

Maillage (géométrie 01)	Paramétrage		
	Maillage 01		
	Surface supérieure de la veine	a	100
	Surface inférieure de la veine	b	50
	Zone Urbaine	c	20
	Bâtiments de la zone urbaine	d	15
	Zone d'étude	e	5
	Maillage 02		
	Surface supérieure de la veine	a	100
	Surface inférieure de la veine	b	50
	Zone Urbaine	c	2
	Bâtiments de la zone urbaine	d	2
	Zone d'étude	e	2
Maillage (géométrie 02)	Paramétrage		
	Maillage 03		
	Surface supérieure de la veine	a	100
	Surface inférieure de la veine	b	50
	Zone Urbaine	c	2
	Bâtiments de la zone urbaine	d	2
	Zone d'étude	e	2
	Maillage 04		
	Surface supérieure de la veine	a	100
	Surface inférieure de la veine	b	50
	Zone Urbaine	c	2
	Bâtiments de la zone urbaine	d	2
	Zone d'étude	e	1
Bâtiments de la zone d'étude	f	1	

**Tableau III.2 : Variation du maillage selon une coupe horizontale (vue de dessus), les obstacles sont maillés avec une même longueur caractéristique ( $L_c$ ) pour les toits et les surfaces latérales.**

Nous avons appliqué des simulations aérauliques sur les échantillons présentés dans le tableau III.2, les résultats des simulations des cas de maillages 01, 02, 03 sont donnés dans les figures III.21, III.22 et III.2



Étant donné que les vortex apparaissent de manière plus évidente dans la figure III.23, nous avons arbitrairement décidé de privilégier dans nos travaux le paramétrage correspondant :  $L_c$  appartient à l'intervalle [1,2]

### III.2.2. Données de base :

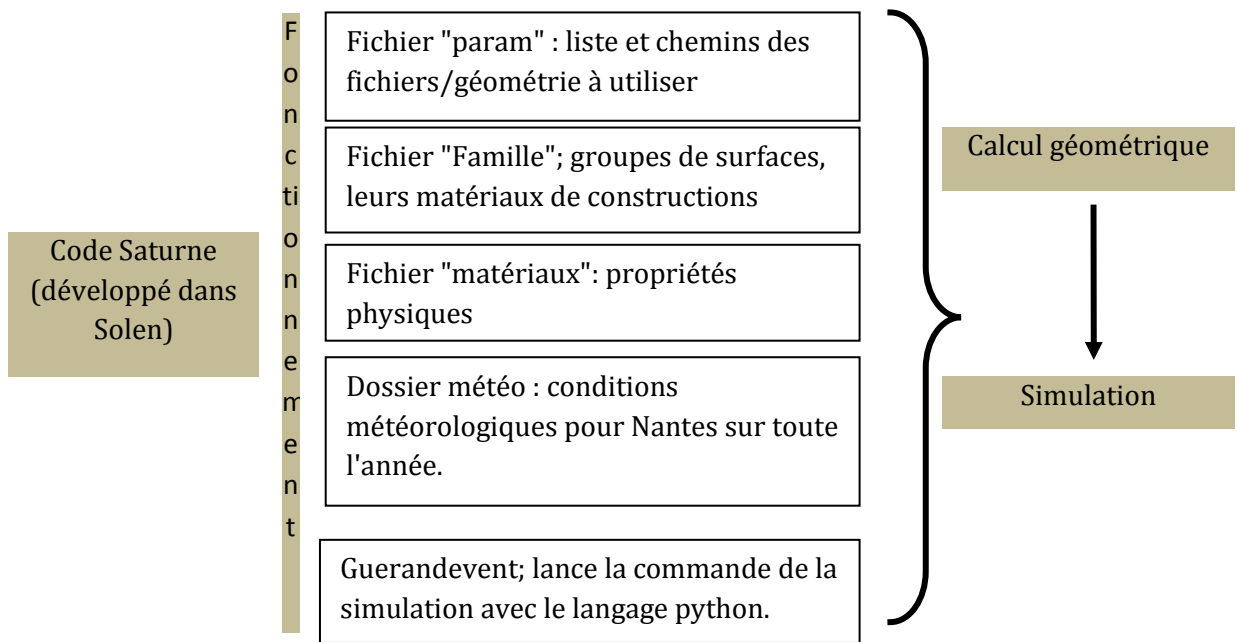
La version Code\_Saturne que nous avons employée suit la manière dont il est préprogrammé dans Solene. Normalement pour une version non modifié, les paramètres qu'on doit introduire avant de lancer une simulation sont :

- les conditions initiales,
- les caractéristiques du fluide : régime tourbillonnaire, modèle thermique, propriétés physiques (pression, densité, viscosité, température spécifique, pesanteur, pression hydrostatique),
- les hypothèses et les modèles de calcul : nombre d'itérations, la fréquence de mise à jour du listing<sup>6</sup>, conditions aux limites.

Dans notre cas, la plupart de ces conditions sont déjà fixes, on les trouve détaillées dans le fichier listing. Mais principalement, nous pouvons :

- introduire la direction du vent, la vitesse du vent, l'humidité, la température ambiante.
- changer dans les valeurs des paramètres : nombre d'itérations, fichier météo.
- préciser les caractéristiques des matériaux de construction des surfaces.

<sup>6</sup> "un document test qui rapporte l'avancement du calcul".



Nous joignons en annexe (04) le fichier 'familles' qui décrit les matériaux de constructions et leurs caractéristiques pour chaque groupe de surfaces. Sachant que dans notre travail on néglige les effets thermiques sur le mouvement du vent. Les paramètres expliqués dans ce fichier n'ont pas d'influence. Les deux paramètres qui nous importe sont la vitesse du vent et sa direction ( $V = 5\text{m/s}$  à une altitude  $z_0 = 10\text{m}$  et angle d'incidence =  $45^\circ$ ).

### III.2.3. Choix de la direction du vent :

Nous avons effectué deux simulations avec deux directions différentes :

- La direction du vent est parallèle à l'axe de l'amplitude (axe Est-Ouest, figure III.24).
- La direction du vent est parallèle à l'axe de la période (axe Nord-Sud, figure III.25) .

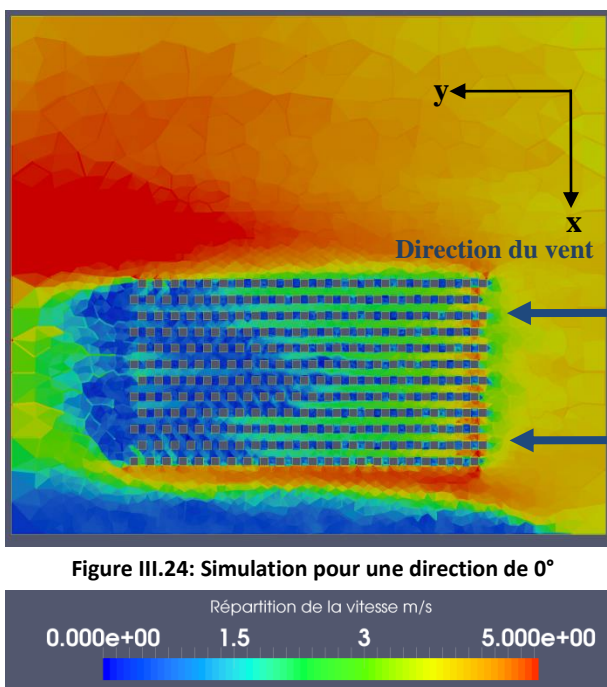


Figure III.24: Simulation pour une direction de  $0^\circ$

Température de l'air	$20^\circ$
Vitesse du vent	$5 \text{ m.s}^{-1}$
Direction du vent	$0^\circ$
Humidité	5.5
Nombre d'itérations	200

Tableau III.3: Données de base pour un angle d'incidence de  $0^\circ$

Le vent se comporte avec la géométrie comme si c'était un ensemble de rues canyons (figure III.24). La disposition alternée n'exerce pas d'effet sur le vent. Les rangées des obstacles jouent le rôle d'une barre discontinue.

### Direction du vent

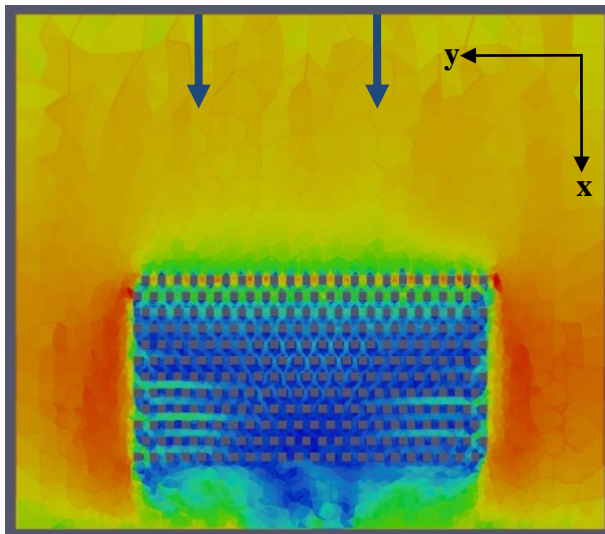


Figure III.25 : Simulation pour une direction de 90°



Température de l'air	20°
Vitesse du vent	5 m.s <sup>-1</sup>
Direction du vent	90°
Humidité	5.5
Nombre d'itérations	200

Tableau III.4 : Données de base pour angle d'incidence de 90°

L'incidence du vent n'est pas convenable (figure III.25). Une direction parfaitement N-S peut engendrer des fautes de calcul lors de la simulation.

**Nous avons opté pour la direction 45°.**



### III.3. Mode opératoire :

Le travail des simulations est divisé en deux phases. La première phase est présentée dans la suite du présent chapitre. Il s'agit de faire varier  $A$  et  $\lambda$  et on produit les champs de vitesses du vent correspondants. Les caractéristiques géométriques des cas théoriques sont présentées dans le tableau III.5 et III.6 :

- 1) trois variations de la période ( $\lambda$ ) de la sinusoïde géométrique (sinuosité intrinsèque).

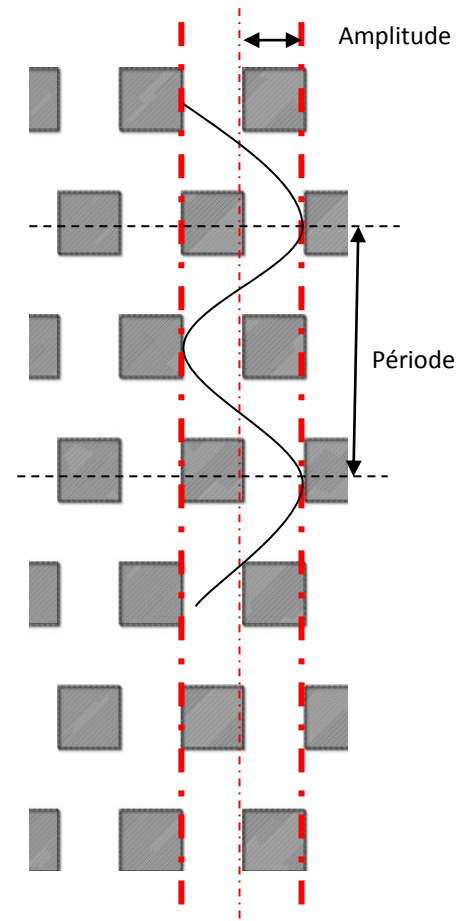
Cas théorique	00	01	02	03
$\lambda = (2 * l_x) + (2 * W)$	48	40	36	33.6
A	12	12	12	12
H/W	2	3	4	5
A/ $\lambda$	0.25	0.3	0.33	0.35
S <sub>i</sub>	1.52	1.713	2	2.57

**Tableau III.5 : Variation de la période  $\lambda$**

- 2) trois variations de l'amplitude ( $A$ ) de la sinusoïde géométrique (sinuosité intrinsèque).

Cas théorique	00	04	05	06
A (m)	12	8	6	4.8
(m)	48	48	48	48
H/W	2	3	4	5
A/ $\lambda$	0.25	0.166	0.125	0.1
S <sub>i</sub>	1.52	1.25	1.14	1.09

**Tableau III.6 : Variation de l'amplitude A**



**Figure III.25 : configuration de la sinuosité intrinsèque de notre cas de figure, source**

Dans le chapitre suivant, nous réaliserons la deuxième phase qui consistera à :

- trouver le lien entre le changement géométrique et le changement spatial de la vitesse de l'air.

Nous présentons dans ce qui suit les différents cas simulés et leur paramétrage. Nous rappelons que nous nous intéressons à la répartition de la vitesse moyenne au niveau du piéton (1.75m).

## IV. Résultats des calculs

### IV.1 Cas initial :

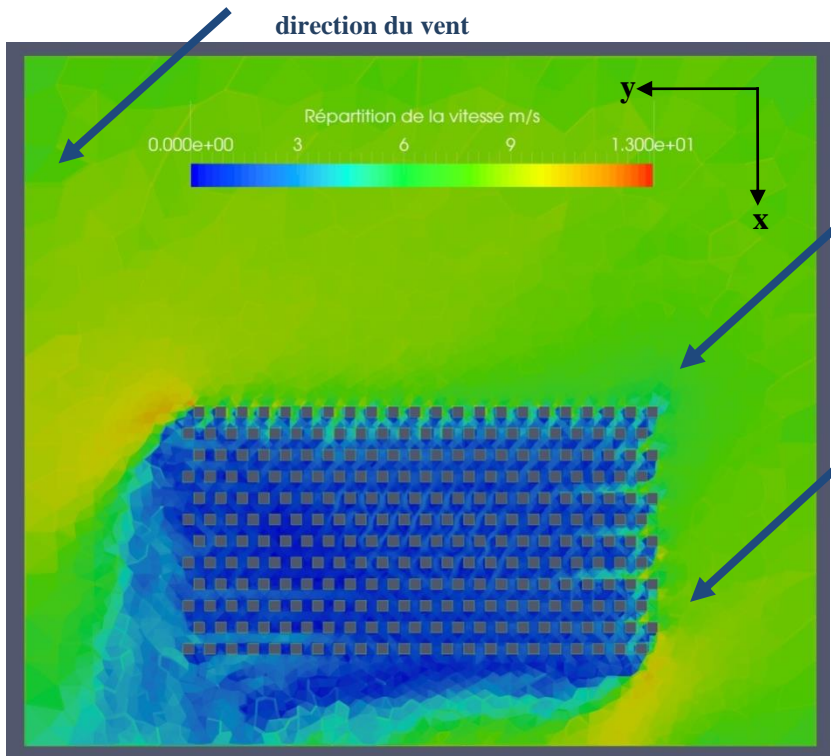


Figure III.26 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique	00	
$\lambda = (2 * l_x) + (2 * W)$	48	
A	12	
H/W	2	
A/ $\lambda$	0.25	
S <sub>i</sub>	1.52	
Caractéristiques de la grille géométrique		
R <sub>x</sub> (sur l'axe ox)	12	
R <sub>y</sub> (sur l'axe oy)	12	
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent	45°	
Vitesse du vent incident	5 m/s	
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	20
Bâtiments de la zone urbaine	d	15
Zone d'étude	e	5
Bâtiments de la zone d'étude	f	5

Tableau III.7 : Paramétrage du cas initial

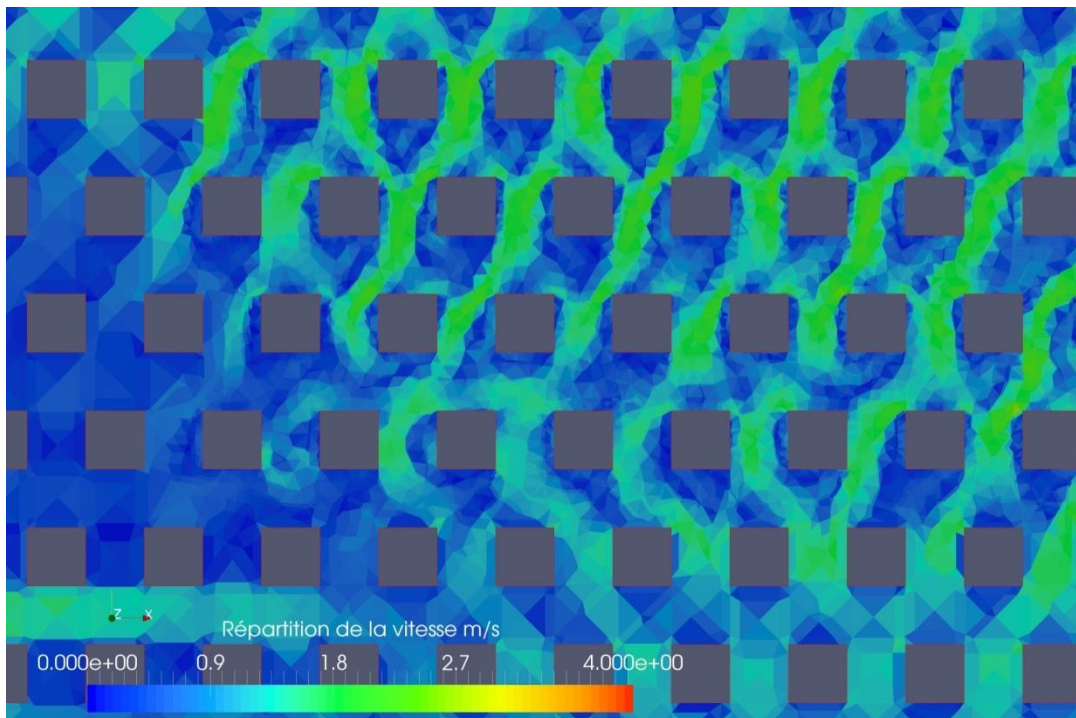


Figure III.27 : écoulement du vent dans la zone centrale

La figure III.27 nous permet de constater que cette configuration spatiale freine l'infiltration du vent. Nous remarquons aussi un aspect sinueux des trainées.

## IV.2 Variation de la période $\lambda$ :

Transformation 01:

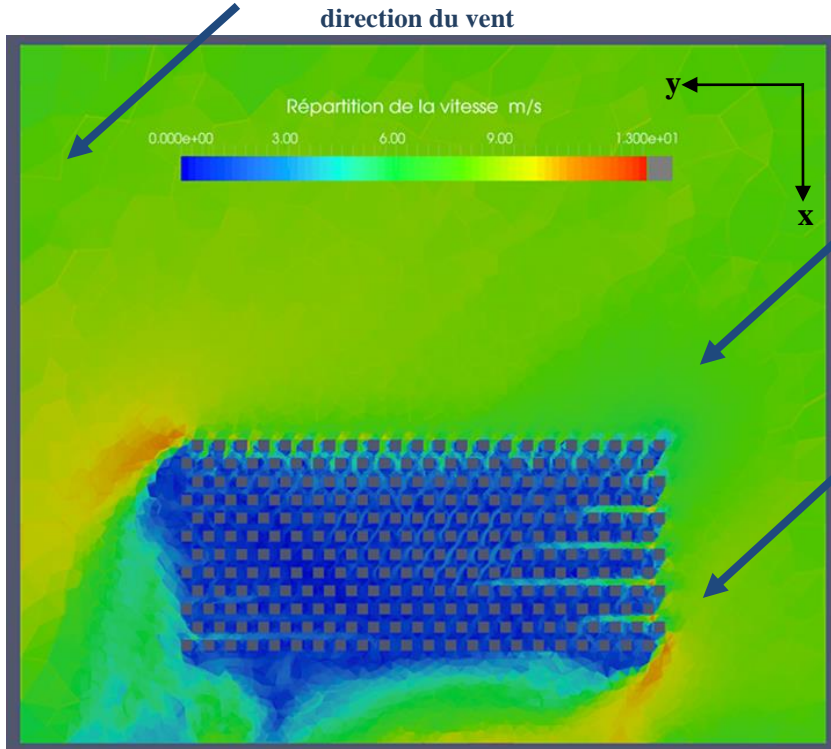


Figure III.28 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique	01	
$\lambda = (2 * l_x) + (2 * W)$	40	
A	12	
H/W	3	
A/ $\lambda$	0.3	
$S_i$	1.713	
Caractéristiques de la grille géométrique		
Rx (sur l'axe ox)	12	
Ry (sur l'axe oy)	8	
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent	45°	
Vitesse du vent incident	5 m/s	
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	10
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	1
Bâtiments de la zone d'étude	f	1

Tableau III.8: Paramétrage du cas 01

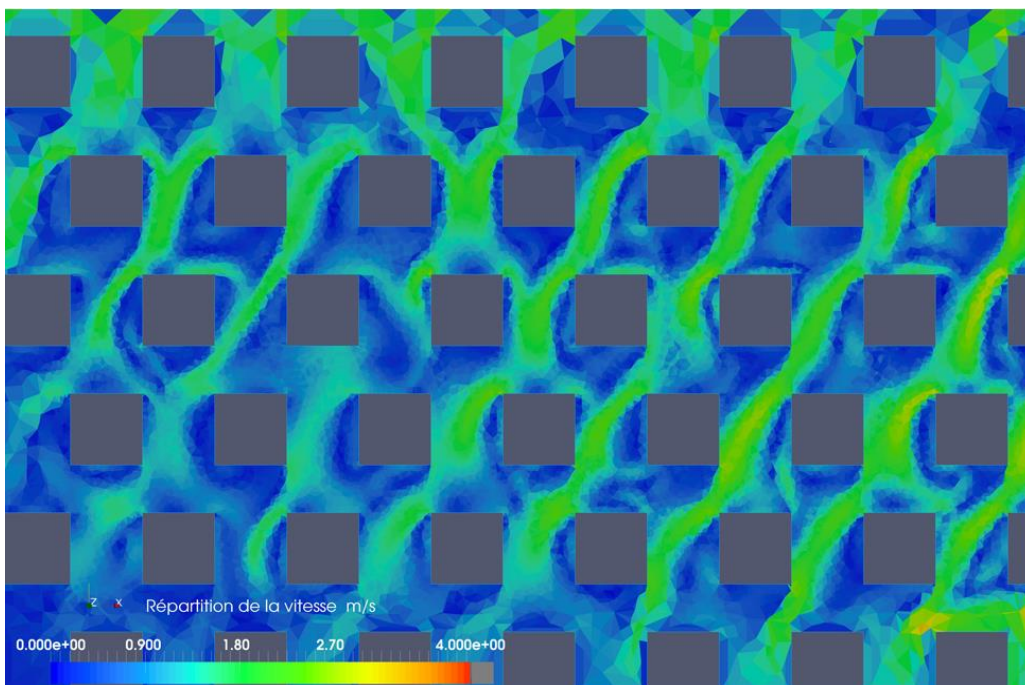


Figure III.29 : écoulement du vent dans la zone centrale.

La figure III.29 montre un ralentissement de la vitesse du vent moins important que celle du cas précédent. Le trajet du vent est encore sinueux.

Transformation 02:

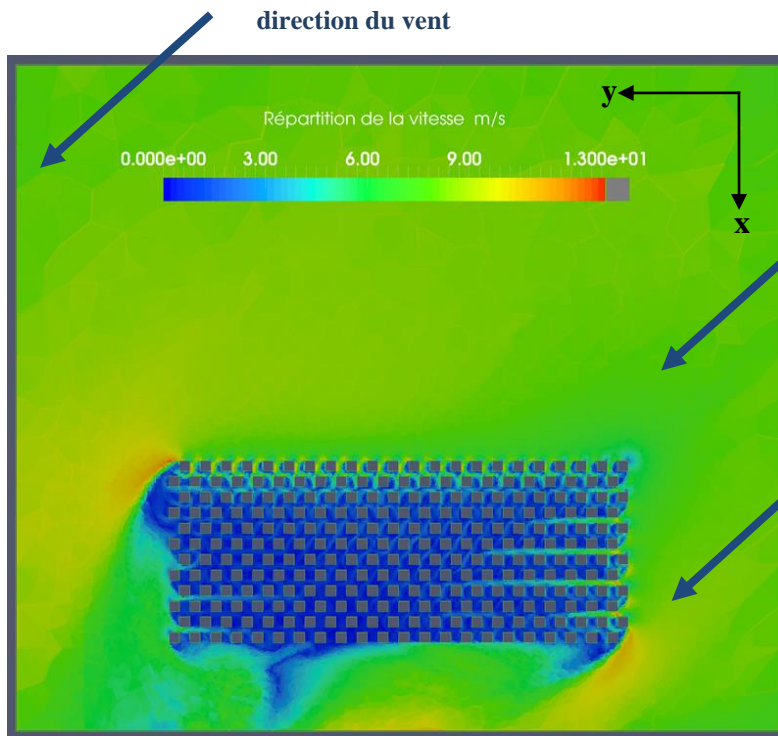


Figure III.30 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique	02	
$\lambda = (2 * l_x) + (2 * W)$	36	
A	12	
H/W	4	
A/ $\lambda$	0.33	
$S_i$	2	
Caractéristiques de la grille géométrique		
Rx (sur l'axe ox)	12	
Ry (sur l'axe oy)	6	
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent	45°	
Vitesse du vent incident	5 m/s	
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	10
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	2
Bâtiments de la zone d'étude	f	1

Tableau III.9 : Paramétrage du cas 02

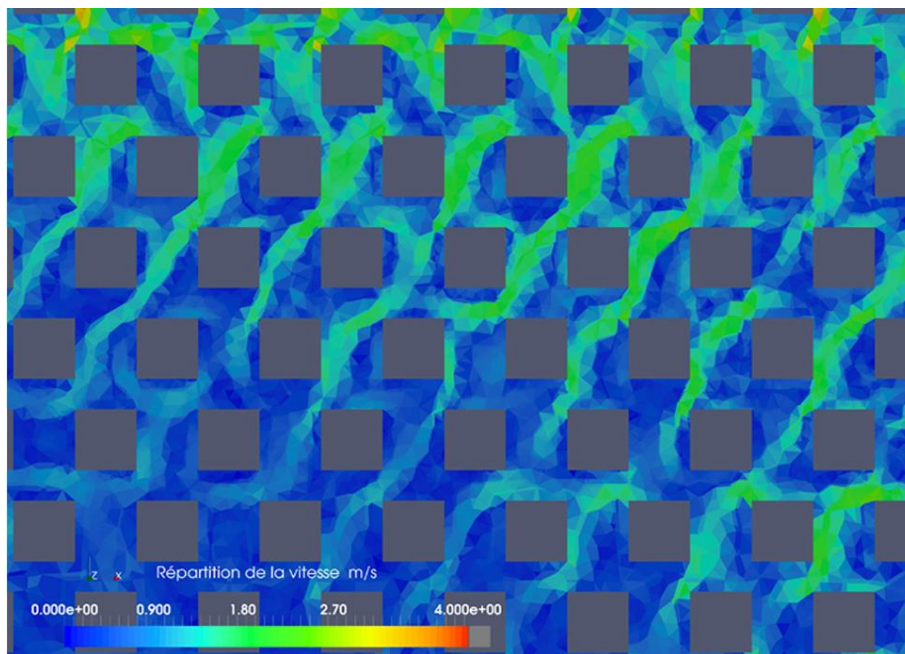


Figure III.31 : écoulement du vent dans la zone centrale.

La variation faible de la vitesse du vent nous renseigne sur un effet de protection que l'on veut imputer en première approche, au rapprochement des rangées des bâtiments. Les champs de vitesse commencent à s'unifier.

Transformation 03:

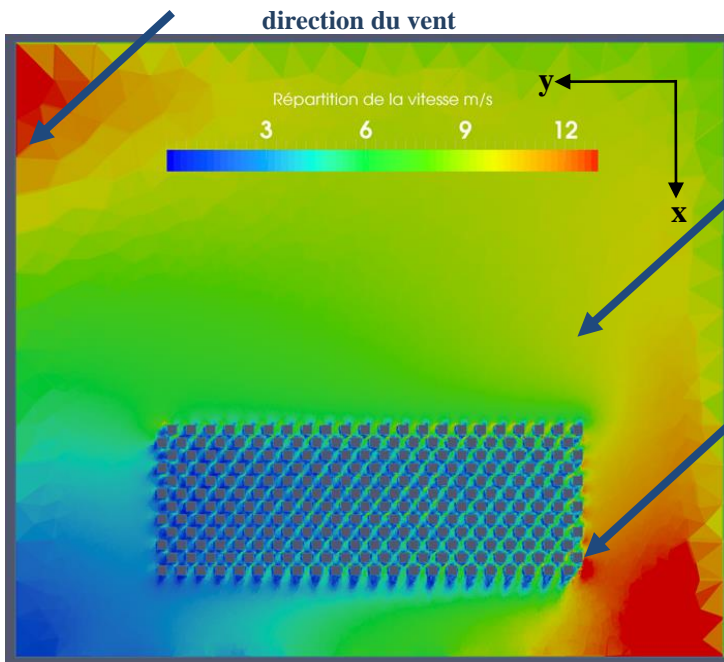


Figure III.32 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique		03
$\lambda = (2 \cdot l_x) + (2 \cdot W)$		33.6
A		12
H/W		5
A/ $\lambda$		0.35
S <sub>i</sub>		2.57
Caractéristiques de la grille géométrique		
Rx (sur l'axe ox)		12
Ry (sur l'axe oy)		4.8
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent		45°
Vitesse du vent incident		5 m/s
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	10
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	1
Bâtiments de la zone d'étude	f	1

Tableau III.10 : Paramétrage du cas 03

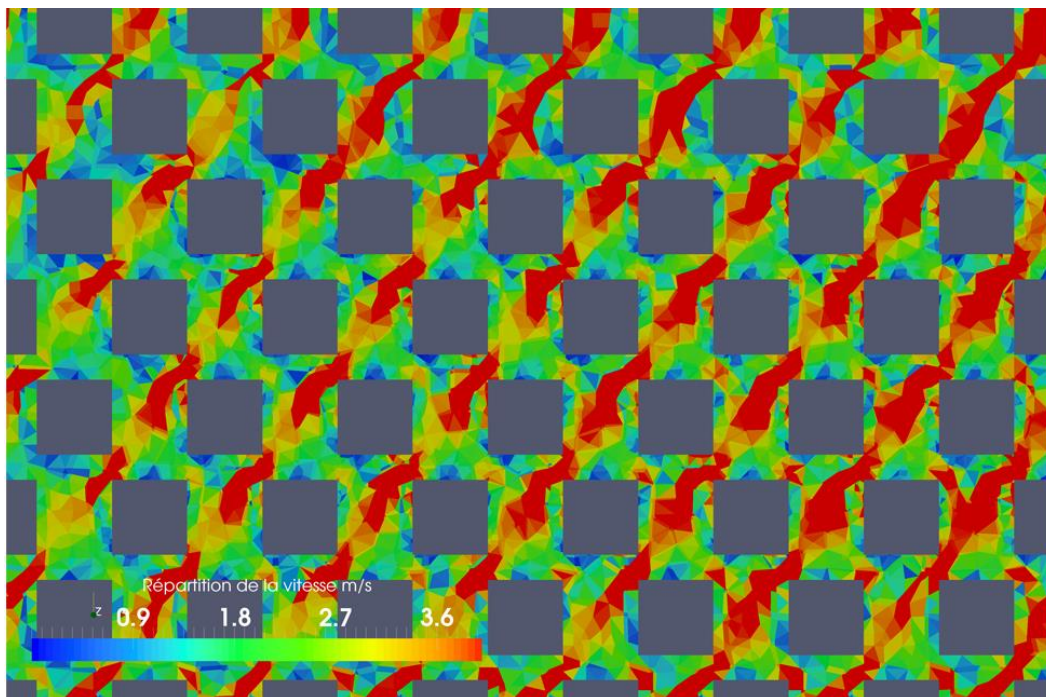


Figure III.33 : écoulement du vent dans la zone centrale.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure III.33 une inversion de tendance au niveau des champs de vitesse, totalement contraire à notre intuition. La vitesse du vent augmente entre les obstacles.

### IV.3 Variation de l'amplitude A:

Transformation 04:

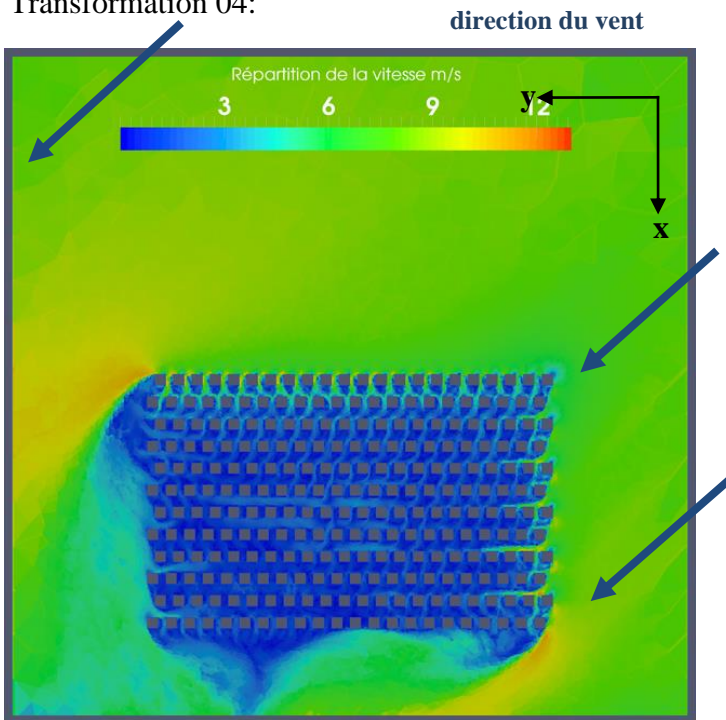


Figure III.32 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique	04	
A (W)	8	
$\lambda$	48	
H/W	3	
A/ $\lambda$	0.166	
$S_i$	1.25	
Caractéristiques de la grille géométrique		
Ry (sur l'axe oy)	12	
Rx (sur l'axe ox)	8	
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent	45°	
Vitesse du vent incident	5 m/s	
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	10
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	2
Bâtiments de la zone d'étude	f	2

Tableau III.10 : Paramétrage du cas 04

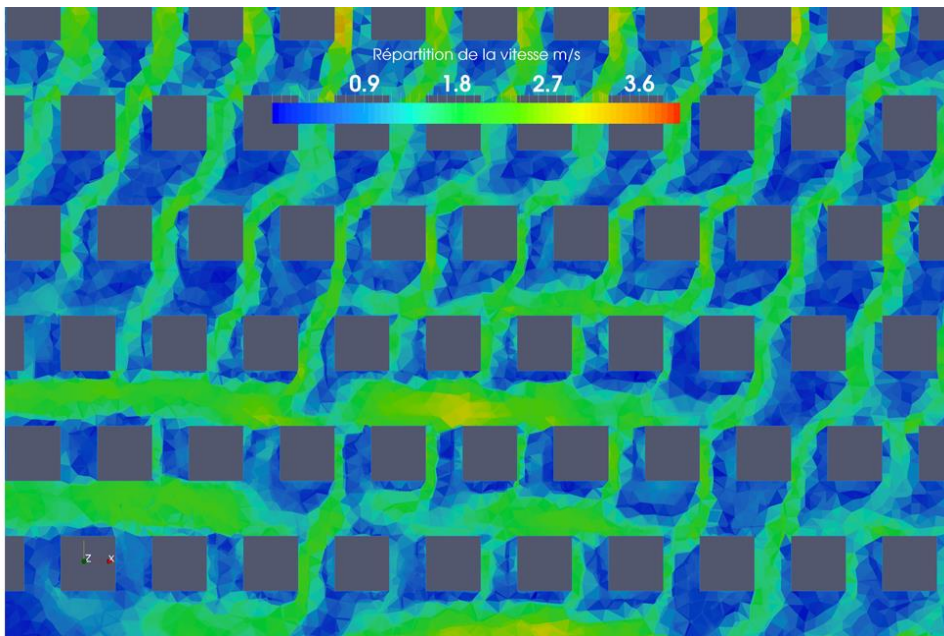


Figure III.33 : écoulement du vent dans la zone centrale.

Dans ce cas et plus encore dans les deux suivants, nous constatons que la variation de l'amplitude altère conséquemment l'infiltration de l'air par les espacements verticaux.

Transformation 05:

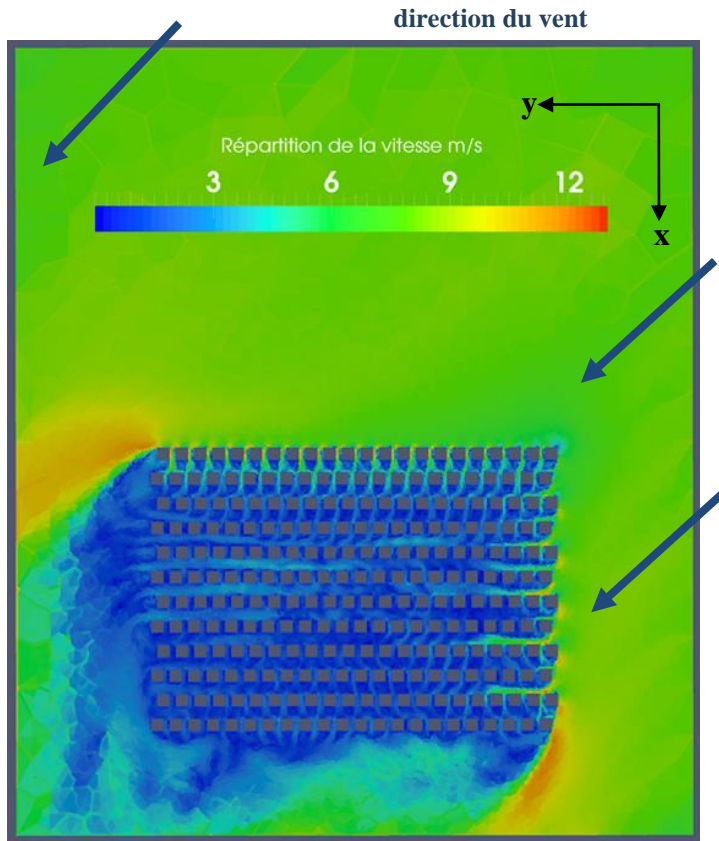


Figure III.34 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique	05	
A (W)	6	
$\lambda$	48	
H/W	4	
A/ $\lambda$	0.125	
$S_i$	1.14	
Caractéristiques de la grille géométrique		
Ry (sur l'axe oy)	12	
Rx (sur l'axe ox)	6	
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent	45°	
Vitesse du vent incident	5 m/s	
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	10
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	2
Bâtiments de la zone d'étude	f	2

Tableau III.11 : Paramétrage du cas 05

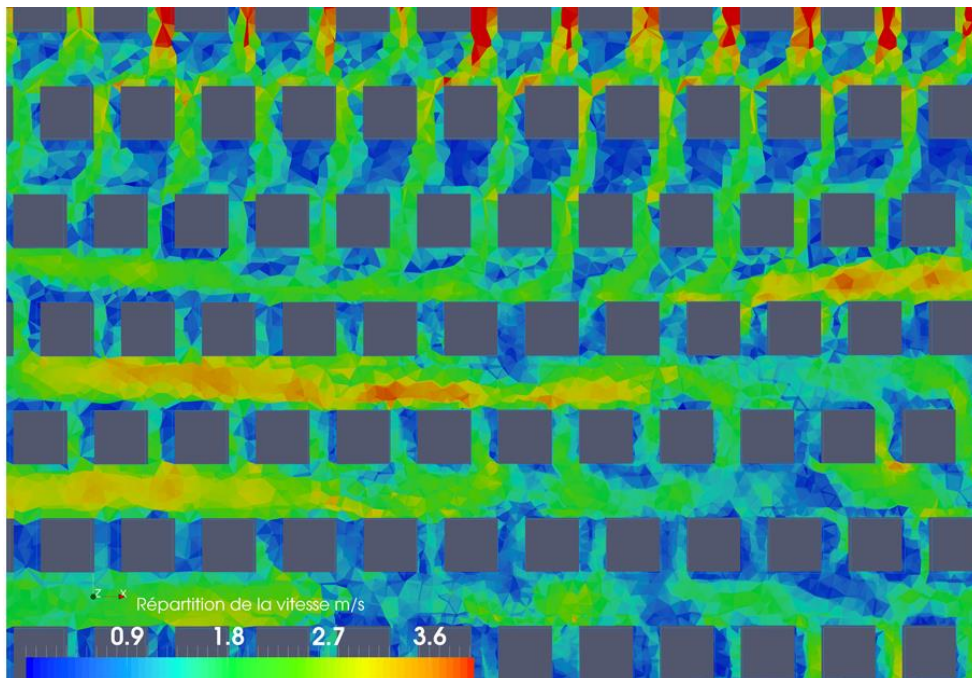


Figure III.35 : écoulement du vent dans la zone centrale.

L'altération énoncée dans le cas qui précède est plus évidente sur la figure III.44. Un effet de canalisation EW se met en place.

Transformation 06:

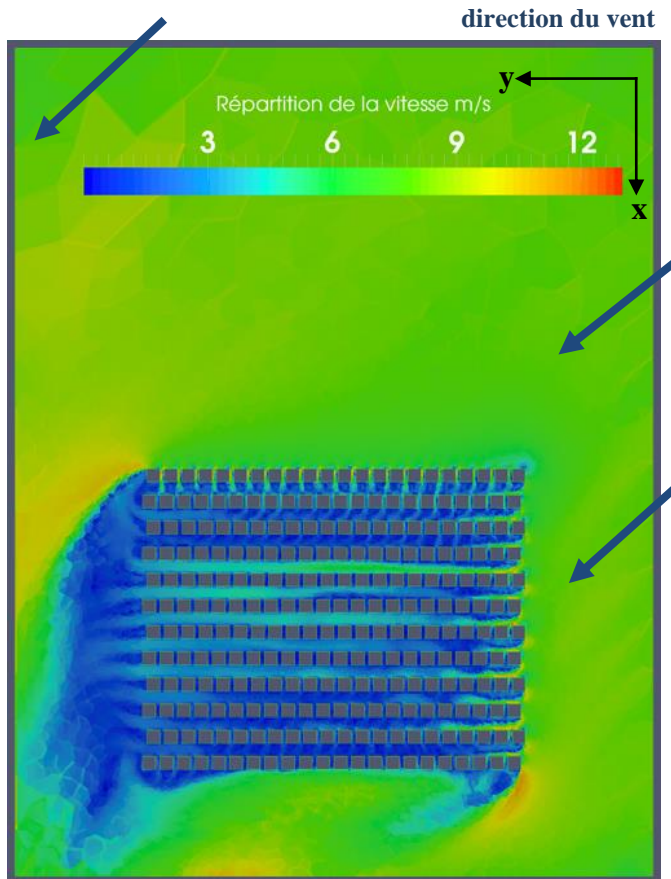


Figure III.36 : écoulement du vent dans la veine numérique à une hauteur de 1.75m du sol (niveau piéton).

Cas théorique	06	
A (W)	4.8	
$\lambda$	48	
H/W	5	
A/ $\lambda$	0.1	
$S_i$	1.09	
Caractéristiques de la grille géométrique		
Ry (sur l'axe oy)	12	
Rx (sur l'axe ox)	4.8	
Caractéristiques physiques du vent		
Direction du vent	45°	
Vitesse du vent incident	5 m/s	
Maillage		
VeineSup	a	100
VeineInf	b	50
Zone Urbaine	c	10
Bâtiments de la zone urbaine	d	5
Zone d'étude	e	2
Bâtiments de la zone d'étude	f	2

Tableau III.12 : Paramétrage du cas 06

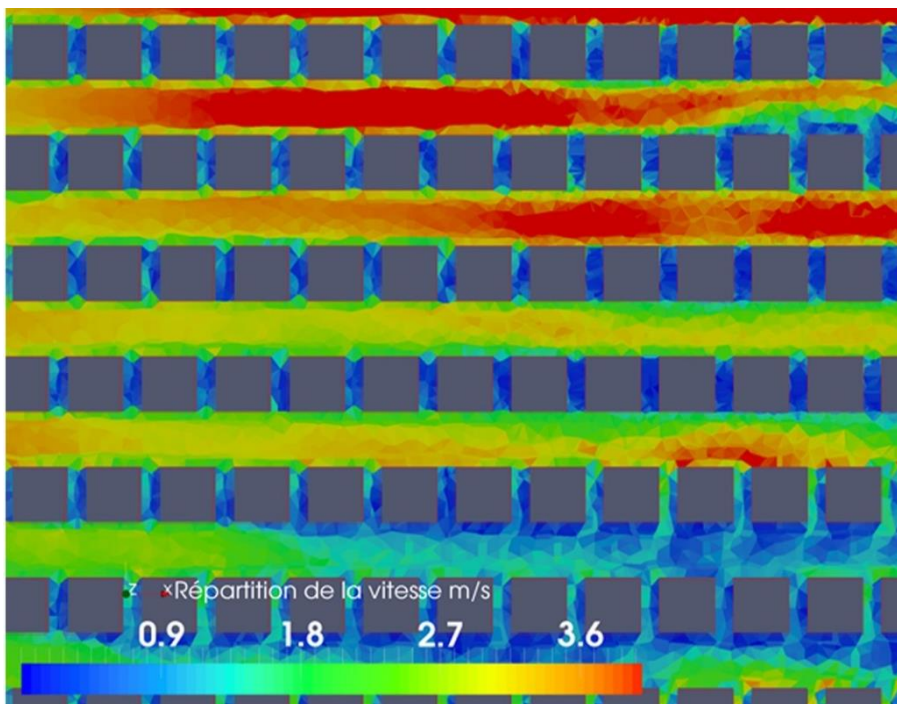


Figure III.37 : écoulement du vent dans la zone centrale.

L'effet de canalisation est plus accentué dans ce cas, la trajet sinueux du vent est absent.



## V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'outil de simulation numérique que nous avons utilisé pour la détermination de la répartition spatiale du vent, il s'agit du *Code\_Saturne Solene* (modèle dynamique CFD - modèle radiatif). De même, nous avons conçu les maquettes des cas étudiés et décrit le mode opératoire suivi pour la simulation. Moyennant des données de base servant de paramètres d'entrée (température de l'air, vitesse moyenne du vent et sa direction, humidité), nous l'avons appliqué à deux séries de cas pour lesquels l'indice de forme de la sinuosité  $\frac{A}{\lambda}$  est variable avec A fixe pour la première et  $\lambda$  fixe pour la seconde. Les résultats obtenus pour le champ de vitesse simulé seront discutés dans le chapitre suivant.

## **Chapitre IV**

### **Analyse des résultats et discussions**

#### **I. Introduction**

Dans ce chapitre, nous analysons les résultats de simulation de la répartition spatiale du vent appliquée à des cas de sinuosité variable. Nous proposons une formulation empirique de la vitesse moyenne du vent en fonction du coefficient de sinuosité. Nous cherchons également à identifier les conditions favorables fournissant le meilleur confort d'un point de vue répartition spatiale du vent.

## II. Effet de la sinuosité

L'étude montre que la disposition alternée des bâtiments a une influence significative sur l'écoulement du vent. En effet, le mouvement du vent autour d'un seul bâtiment engendre des dépressions et des surpressions, c'est ce qui lui donne un caractère fluctuant dans l'espace. Comme montré dans la figure IV.1, pour deux entités adjacentes ou plus avec des espacements variés, la répartition de pression se schématise de manière différente. C'est la première étape qu'on doit considérer pour comprendre la variation du champ de vitesse dans nos exemples d'étude (augmentation ou atténuation).

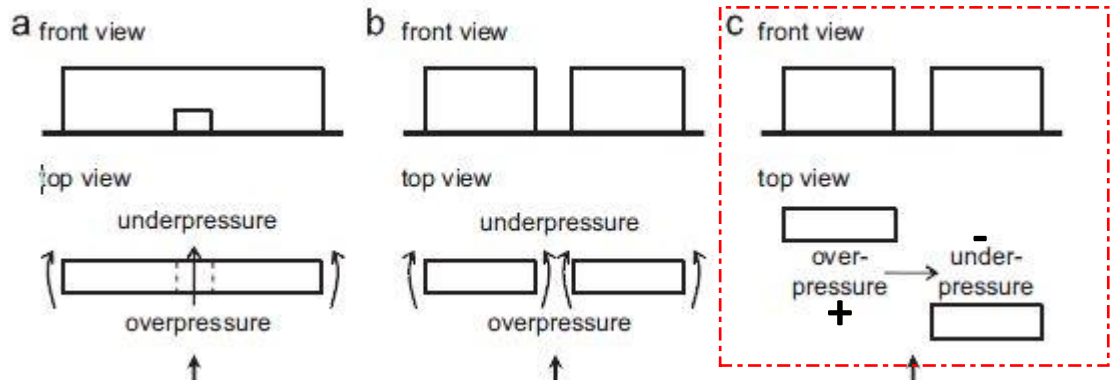


Figure IV.1 : mouvement du vent entre deux bâtiments, source (Blocken and Carmeliet, 2004 cité dans Moonen et al (2012)).

Moonen (2012) explique dans sa publication parlant de la physique urbaine que la vitesse du vent entre deux bâtiments peut augmenter d'un facteur d'amplification de l'ordre de deux ou même de 3 dans certains cas. En effet la figure IV.2 explique comment cela se produit avec le 'court-circuit' de pression qui accélère le passage du vent.

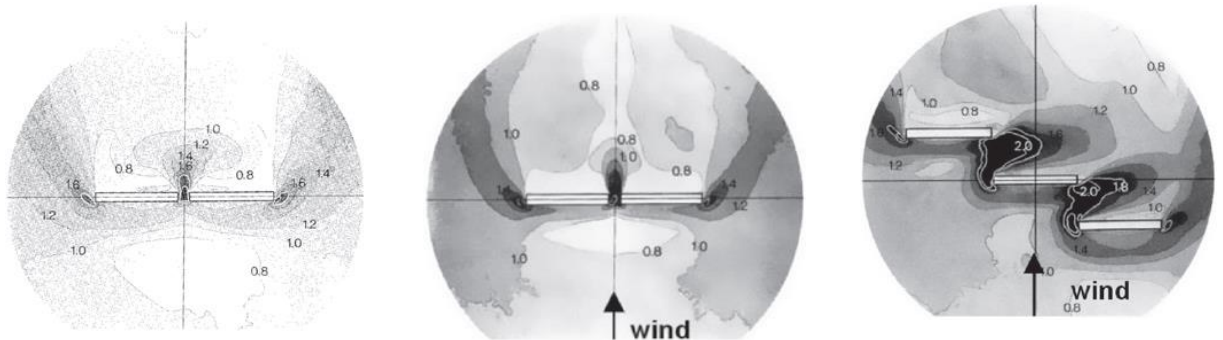


Figure IV.2: mesures du facteur d'amplification obtenue par mesures en soufflerie, source (Beranek, 1984a, 1984b)

L'observation de nos résultats sera basée sur la variation de la vitesse dans la zone centrale du cas d'étude, à une hauteur de 1.75m du sol, et pour lequel nous fixons la direction du vent à un angle bien défini  $\theta$  par rapport à l'axe de la sinusoïde. Nous comparons la vitesse incidente (inlet) et les intervalles de vitesse entre les plots.

## II.1. Analyse des cas théoriques:

Nous rappelons du dessin de la sinuosité intrinsèque qu'on étudie dans la figure IV.3, et de la sinuosité des flux venteux, sinuosité directionnelle que nous avons remarquée dans les résultats des simulations (figure IV.4). La figure IV.6 présente l'angle d'incidence du vent.

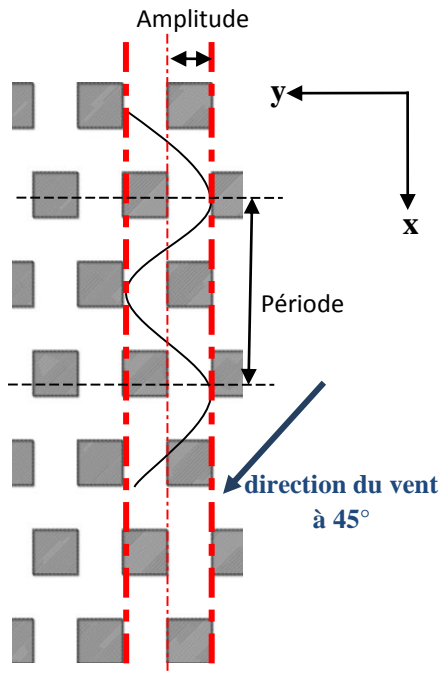


Figure IV.3: sinuosité intrinsèque

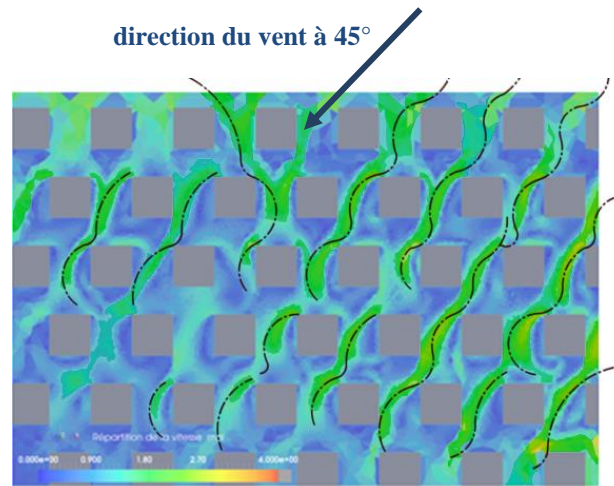


Figure IV.4 : Sinuosité directionnelle liée à l'infiltration du vent sur la diagonal NE - SW

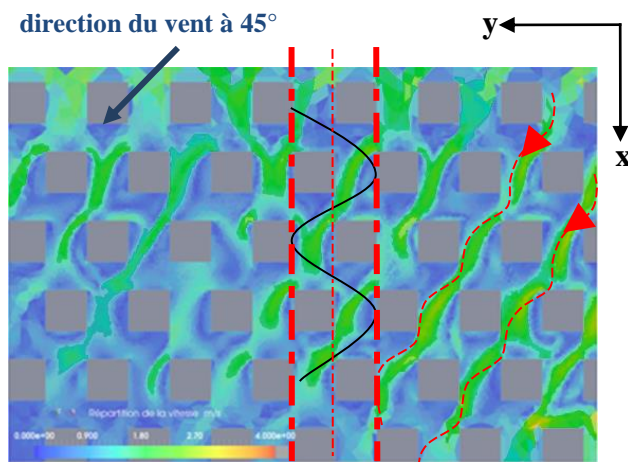


Figure IV.5 : Superposition de la sinuosité directionnelle et la sinuosité intrinsèque

- Sinuosité intrinsèque
- - - Sinuosité directionnelle

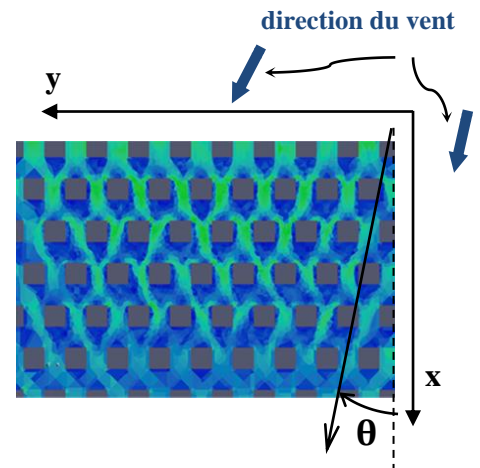
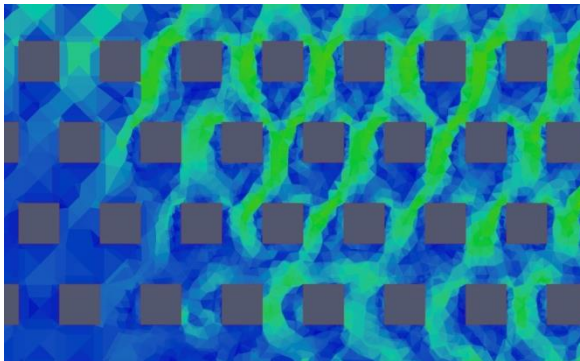


Figure IV.6 : Angle d'incidence du vent  $\theta$

L'échelle colorimétrique retenue dans les figures IV.4 et IV.5, et identifiée par les illustrations qui suivent, a été choisie pour mettre en évidence la sinuosité du vent. Les deux figures IV.4

et IV.5 montrent que les deux sinuosités n'ont pas les mêmes caractéristiques géométriques (l'amplitude, la période, la direction d'axe de la période).

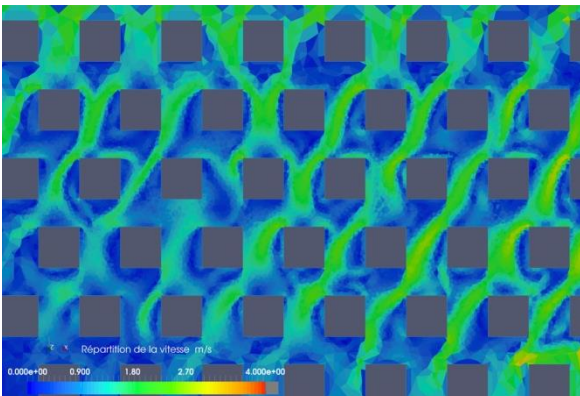
### II.1.1 Variation de la longueur d'onde $\lambda$ , à une amplitude constante, ( $\theta = 45^\circ$ ) :



#### Cas 00 : $\lambda = 48, A = 12$

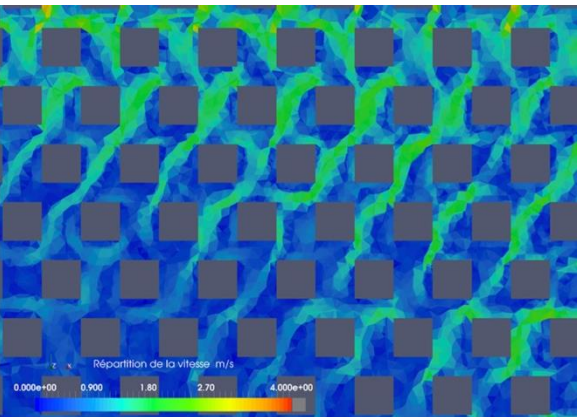
le vent s'infiltré à une vitesse moyenne entre 1.8 m/s à 2.7 m/s, c'est presque la moitié de la vitesse d'entrée. Un champ très faible de vitesse moyenne  $< 0.9$  m/s se distingue à l'arrière des obstacles.

échelle



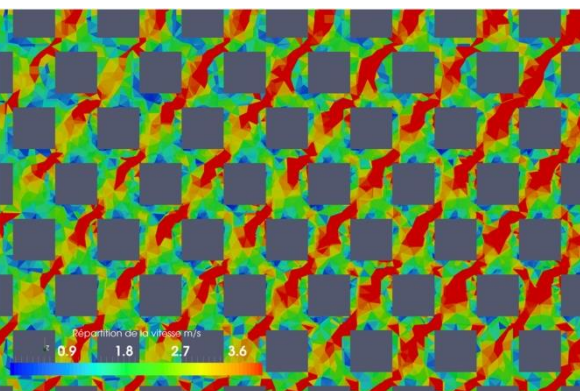
#### Cas 01 : $\lambda = 40, A = 12$

À l'entrée de la maquette, l'écoulement du vent est homogène sur toute la longueur et la largeur. Ensuite au fur et à mesure qu'on avance vers l'intérieur le vent s'affaiblit. Suivant la direction diagonale, la vitesse varie entre 1.6 m/s et 2.7 m/s, la zone de basse vitesse en aval augmente et se répartit sur les parois des obstacles. Un mouvement sinusoïdal de vent dans la direction du vent est plus perceptible (la trajectoire de la zone verte  $\approx 2$  à 2.5 m/s).



#### Cas 02 : $\lambda = 36, A = 12$

Même remarque que celle du cas précédent (homogénéité et affaiblissement de la vitesse en profondeur) mais avec une vitesse depuis l'entrée plus faible (pourtant la vitesse incidente est la même). L'hétérogénéité spatiale est moins importante, et les espaces sont plus homogènes caractérisés par une vitesse de vent  $< 1.8$  m/s.

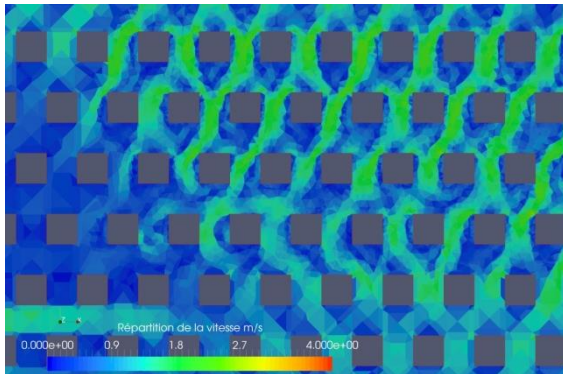


#### Cas 03 : $\lambda = 33.6, A = 12$

On remarque un changement brusque des vitesses du vent qui augmentent de nouveau. Leurs intensités est relativement supérieures à 2.7 m/s. les zones à faibles vitesses sont presque inexistantes.

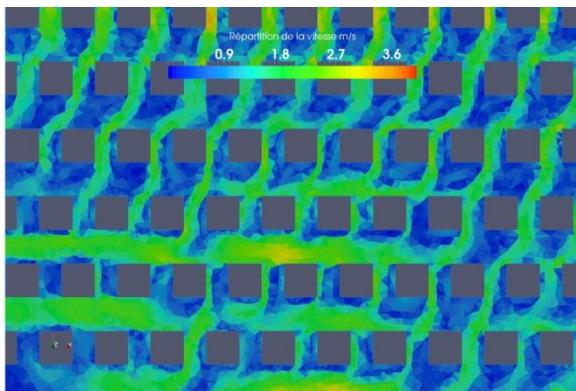
La variation de la fréquence de la sinuosité intrinsèque construit, pour un indice de forme  $\frac{A}{2} = 0.33$ , un refuge contre la vitesse du vent. Nous attendons à ce que cet effet persiste en augmentant plus la fréquence, mais il se passe le contraire. Les bâtiments sont plus proches, les contournements du vent autour des obstacles deviennent plus importants et l'effet s'inverse. L'interaction de ces anomalies sera plus expliquée dans la partie II.4.

### II.1.2 Variation de l'amplitude, pour une période $\lambda$ constante ( $\theta = 45^\circ$ ):



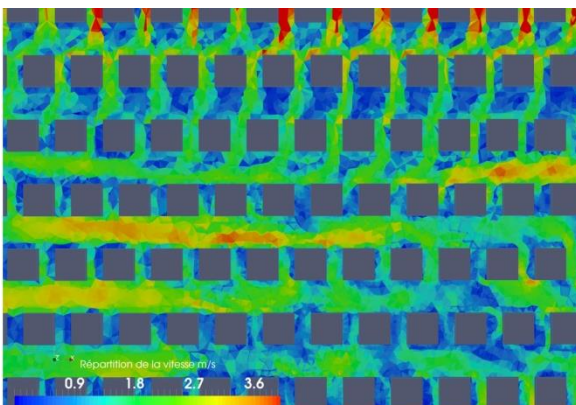
#### Cas 00 :

C'est le cas initial interprété précédemment.



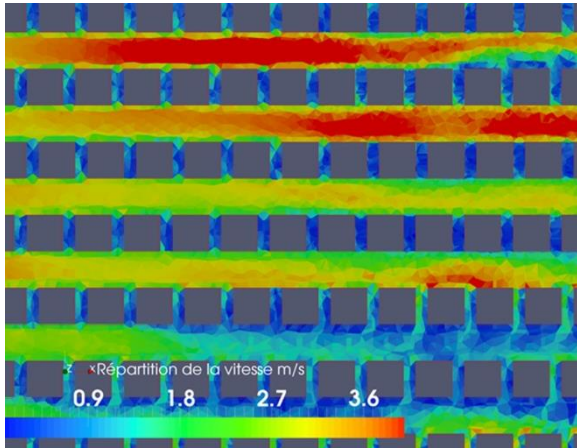
#### Cas 04 : $A = 8$ , $\lambda = 48$

vitesse relativement faible, homogène au début puis s'amplifie vers l'intérieur et surtout entre les rangées Nord-Sud des bâtiments où l'on distingue des zones de vitesses de vent importantes.



#### Cas 05: $A = 6$ , $\lambda = 48$

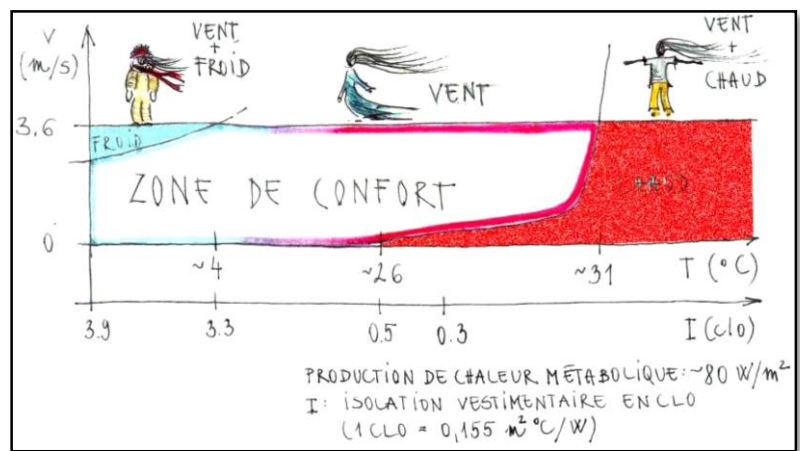
vitesse du vent est plus intense, elle supérieure ou égale à 3.6 m/s. Les allures sinueuses du vent disparaissent et un effet de canalisation émerge dans les couloirs du modèle. Les zones de faible vitesse sont moins visibles.



**Cas 06 :  $A = 4.8$ ,  $\lambda = 48$**

Un mouvement purement rectiligne de l'air, une vitesse forte avoisinant 3,6 m/s. Plus l'espace devient profond selon x plus la vitesse ralentit suivant un effet de canalisation bien visible sur tout l'échantillon, on retrouve l'effet d'une rue canyon pour une direction du vent non parallèle à celle de la rue.

Après la description des cas, nous allons décrire l'environnement aérodynamique du point de vue confort piéton. Les critères que nous adoptons sont d'une part en liaison avec la température ambiante qu'on a choisi ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (figure IV.7), et d'autre part selon l'effet mécanique (Tableau I.2, paragraphe II.1.2, chapitre I)



**Figure IV.7 : Critère du confort aérodynamique lié à la température de l'air, source (cours vent et ventilation Mastère 2 STEU, Olivier Flamand)**

Les constatations à propos de la vitesse du vent ont montré que la géométrie sinusoïdale du vide qu'on a tracé a un double effet sur la vitesse de l'air. Une disposition qui affaiblit la vitesse de l'air (cas 00, cas 01, cas 02, cas 04) et une autre qui l'augmente (cas 03, 05, 06).

**Effet de la modification de la périodicité de la sinuosité intrinsèque :**

Les réductions de la période, dans le cas 02 a diminué l'intervalle de la vitesse du vent de 5 m/s à un intervalle de valeurs entre 0 et 2.7 m/s. Selon la figure IV.7, qui décrit les zones de confort en fonction de vitesses du vent et de la température de l'air, ces intervalles de vitesse répondent aux conditions du confort du piéton.

De même pour l'effet mécanique du vent, la diminution de la période à 36 m n'évoque pas de désagrément chez les piétons. Ces conditions présentent une zone de vent peu agitée avec une légère sensation des flux d'air.

### **Effet de la modification de l'amplitude de la sinuosité intrinsèque :**

Les transformations de l'amplitude sont plus critiques. La diminution de la valeur de l'amplitude (cas 05 et 06) amène à une augmentation de la vitesse du vent de 2.7 m/s à 3.6 m/s, ce qui nous met dans une zone d'inconfort selon la figure IV.7.

Par contre la valeur seuil de 4.5 m/s (valeur à partir de laquelle une gêne mécanique est ressentie (tableau I.2)) n'est franchie que dans le cas où l'amplitude  $A \leq 4.8$  m/s (cas 06), ceci signifie l'existence des rafales. Ces derniers provoquent un état de désagrément et de perturbation (le soulèvement de la poussière).

Nous nous sommes concentrés aussi sur la forme de la trajectoire du vent. Nous avons remarqué que le vent prend une forme sinusoïdale ou rectiligne perceptible dans certains cas (02, 01, 04, 05). En effet, en réduisant le champ de vitesse dans la légende des couleurs, nous notons l'apparition d'une bande (verte pour une vitesse  $\geq 2.7$  m/s) qui contourne les obstacles dans un mouvement continu (cas 02) ou discontinu (cas 04). Nous pouvons appeler cette ondulation du vent sinuosité directionnelle, au sens où elle dépend de la direction du vent.

A partir de cela, nous cherchons à voir la corrélation de cette sinuosité avec la direction du vent. Dans ce qui suit, nous allons présenter des simulations aérauliques pour des angles de vent incident  $\theta$  variables allant de  $1^\circ$  jusqu'à  $89^\circ$  par pas de  $5^\circ$  (figure IV.8 et IV.9) pour une même géométrie (cas 00).

### **II.3. Evolution de la sinuosité directionnelle**

Nous constatons que pour  $\theta < 20^\circ$ , l'intensité du champ de vitesse est homogène au début suivant l'axe des y et puis s'affaiblit en profondeur. Quand  $25 \leq \theta \leq 40$  ou  $\theta = 50^\circ$  le champ de vitesse atteint des valeurs très faibles ( $V \leq 1$  m/s). Ensuite, de plus en plus que la direction du vent s'approche de l'angle droit, nous observons de nouveau l'augmentation de la vitesse du vent par effet de canalisation entre les rangées des bâtiments suivant l'axe des y. Ce que nous retenons à priori est que la variation de vitesse pour  $\theta = 50^\circ$  paraît la plus appropriée en matière de confort aéraulique à la hauteur de l'homme.

Quant à la sinuosité directionnelle, elle apparaît dans les exemples de simulations avec une direction de vent de  $1^\circ$  jusqu'à  $50^\circ$ . Elle est clairement confondue à la sinuosité intrinsèque pour un vent incident de  $10^\circ$ . Elle commence à changer de direction pour un angle  $\theta = 30^\circ$ , jusqu'à elle suit une direction diagonale pour  $\theta = 45^\circ$ .

Le reste des cas (de  $55^\circ$  à  $89^\circ$ ) la sinuosité directionnelle est quasiment absente. Le vent prend des trajets rectilignes non influencés par la sinuosité intrinsèque.



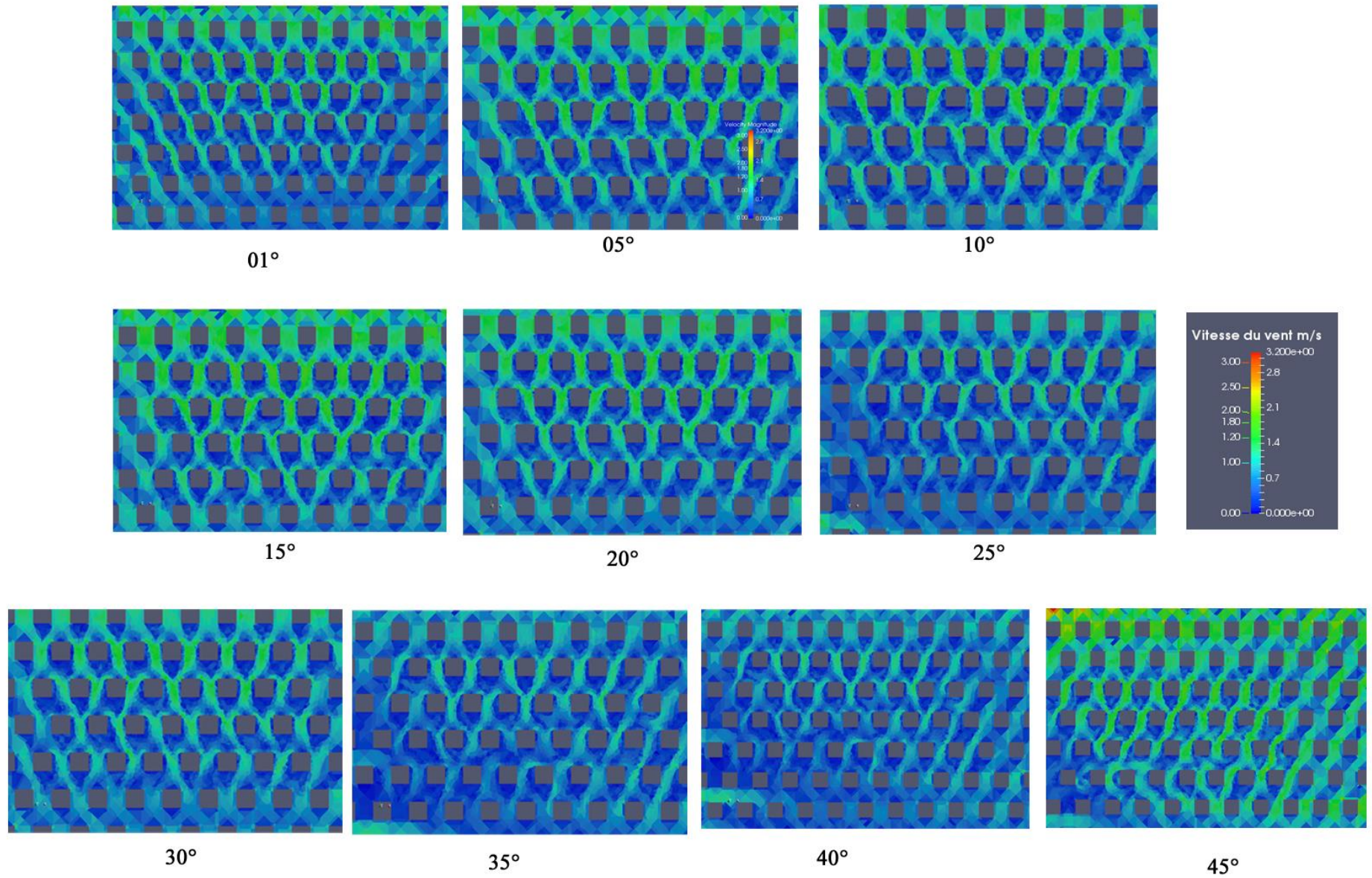
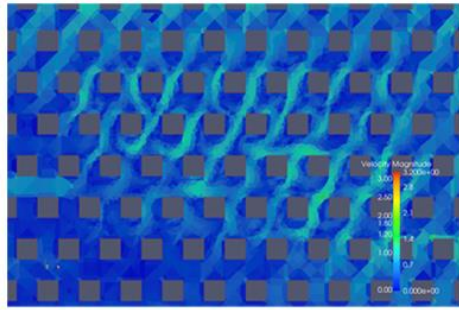
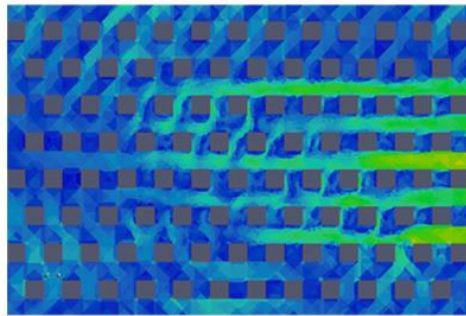


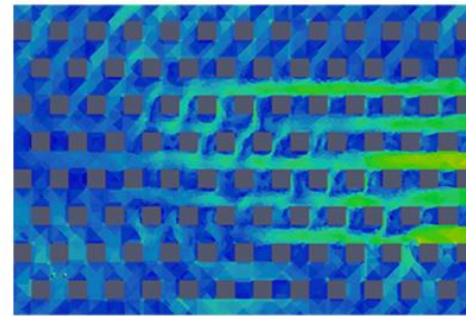
Figure IV.8 : Variation de la direction du vent de 1° à 45°



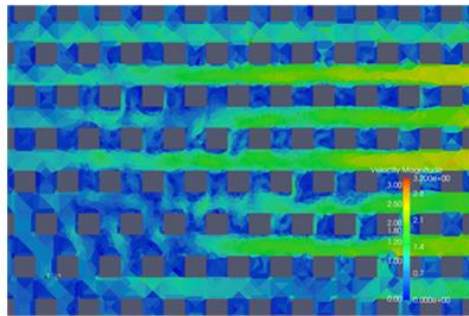
50°



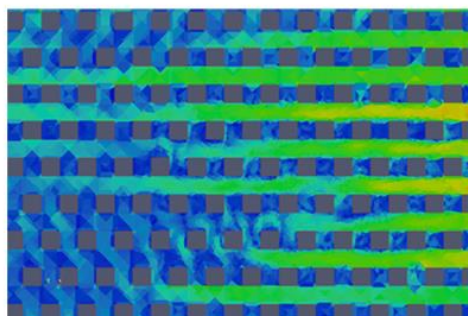
55°



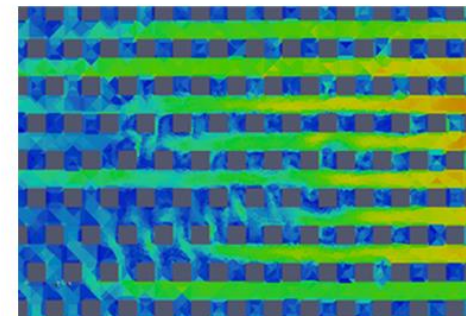
60°



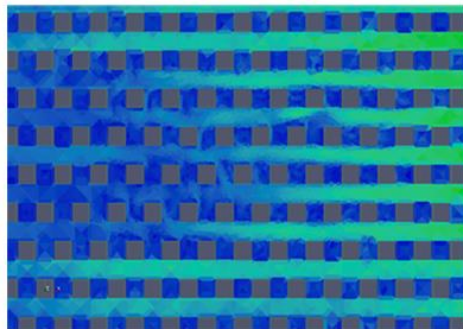
65°



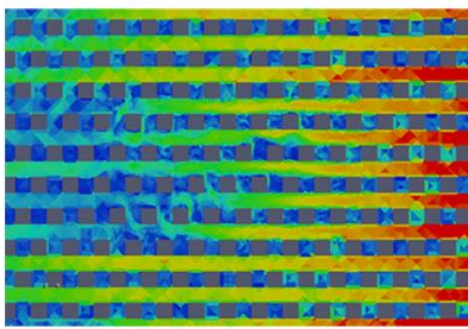
70°



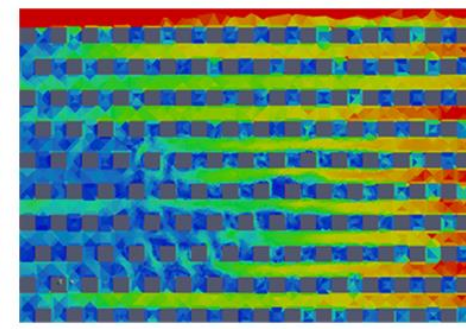
75°



80°



85°



89°

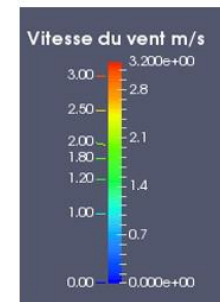
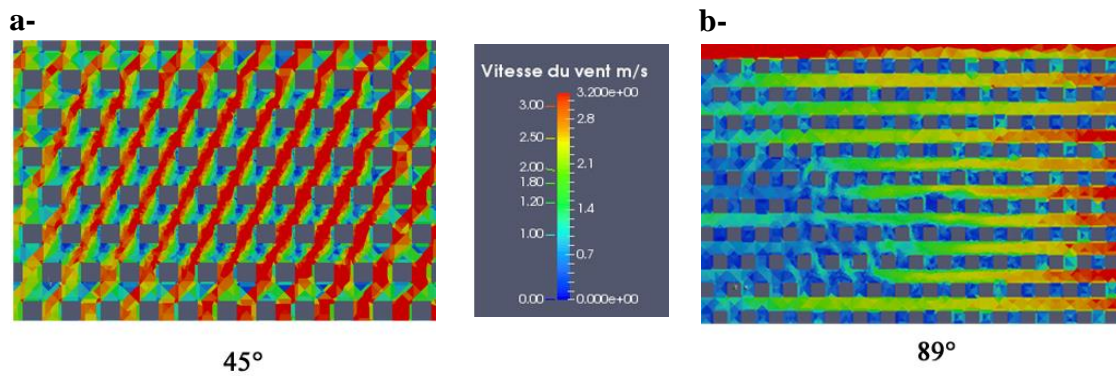


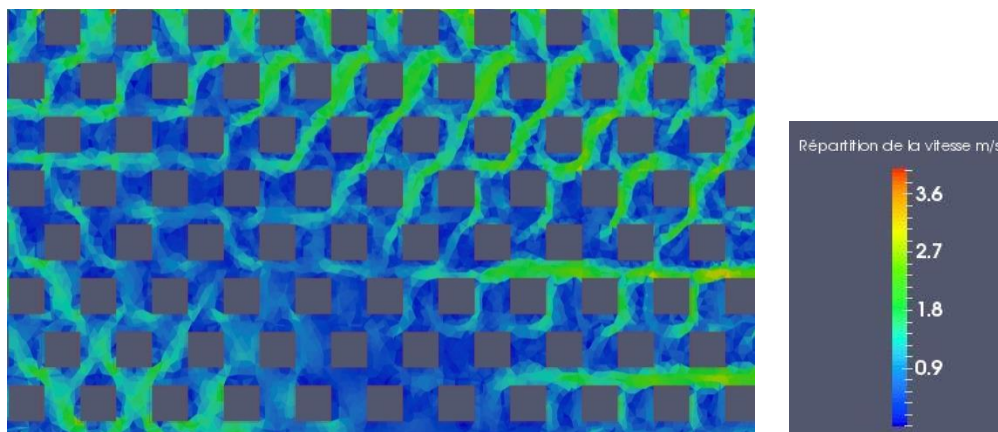
Figure IV.9 : Variation de la direction du vent de 50° à 89°

Par ailleurs, les cas directionnels de 45° et 89°, indiqués sur la figure IV.10 et relative à la situation d'inconfort (pour deux vitesses de vent différentes), montrent une similitude au niveau de la continuité du champ de vitesse par effet de canalisation. En plus, le cas 45° paraît plus renforcé en intensité et pourvu de perturbations dues à l'effet de coin.



**Figure IV.10 : Comparaison de situations d'inconfort**  
**a- cas directionnels de 45° pour une vitesse de vent = 2.5 m/s**  
**b- cas directionnels de 89° pour une vitesse de vent = 5 m/s**

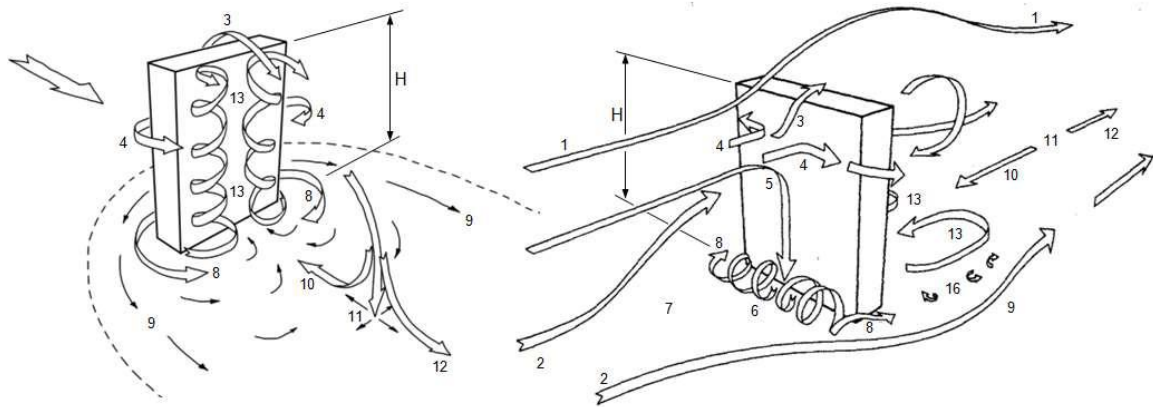
Afin de vérifier la validité de l'optimum de l'évolution de la sinuosité directionnelle (50°), nous avons appliqué cette condition au cas 02 ( $\frac{A}{\lambda} = 0.33$ , vitesse de vent = 5 m/s) de géométrie différente, et nous constatons comme le montre la figure IV.11 que la situation ne s'est pas améliorée. Ce contre exemple montre que l'optimum de la sinuosité directionnelle est tributaire de la géométrie urbaine.



**Figure IV.11 : Application de la sinuosité directionnelle optimale au cas 02**

#### II.4 Phénomène aéraulique et forme du trajet vent:

La trajectoire des flux peut s'expliquer par les phénomènes aérauliques qui s'établissent autour de chaque obstacle, la figure IV.12.

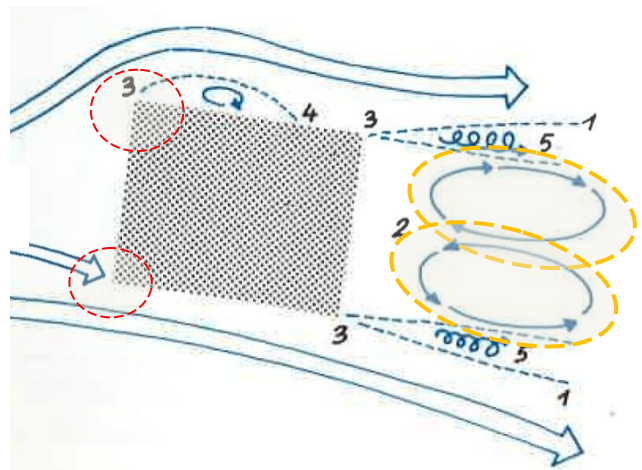


**Figure IV.12: Contournement du vent autour d'un bâtiment, Beranek; 1984a, source (cours vent et ventilation Master STEU, Olivier Flamand)**

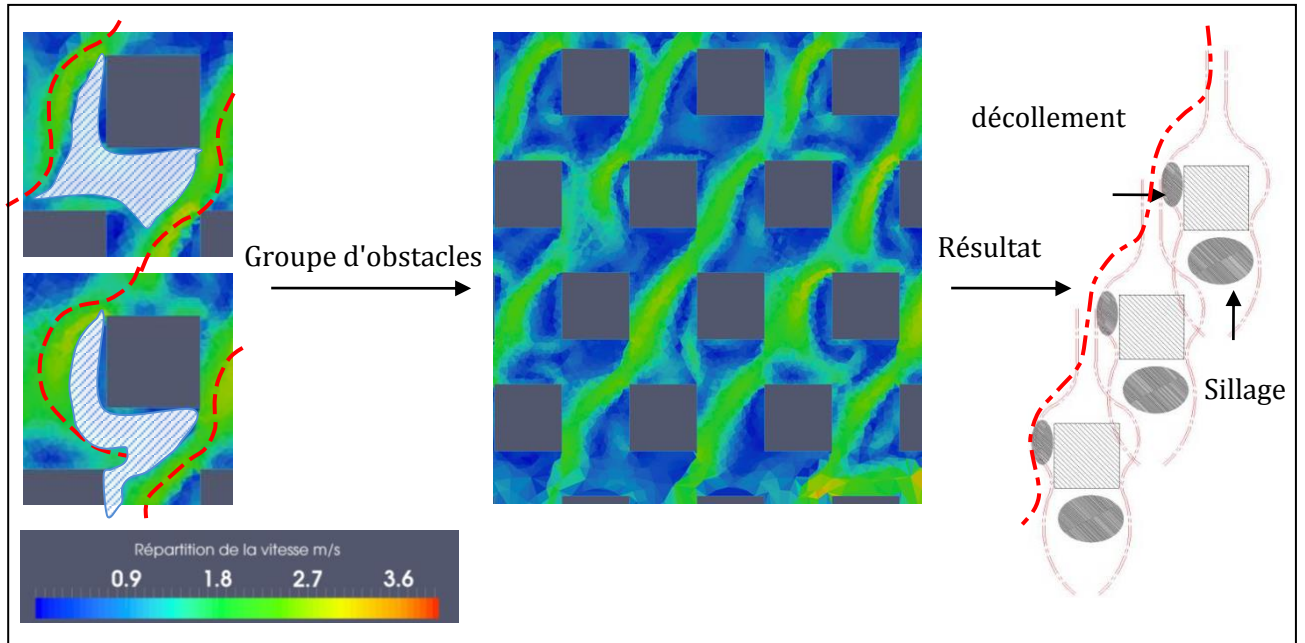
En effet, une configuration plus simple nous aide à comprendre l'écoulement du vent de nos résultats :

- Lors du détournement du vent autour par un obstacle, on remarque un décollement au niveau des deux coins en amont de l'obstacle, c'est ce qui est indiqué par la zone rouge. Des zones de dépression se créent un mouvement tourbillonnaire.
- Une circulation fluide tourbillonnaire se produit en aval de l'obstacle (les ellipses jaunes, figure IV13).

**Figure IV.13 : le vent autour d'un seul obstacle parallélépipédique**



Application du schéma précédent sur nos résultats:



- Trajet sinusoïdal vitesse du vent entre 1.8 m/s et 2.7 m/s
- ▨ vitesse du vent entre 0 m/s et 1.8 m/s

Figure IV.14 : Sinuosité directionnelle

Cette sinuosité directionnelle peut être superposée à la sinuosité intrinsèque (figure IV.8, cas de l'angle  $\theta$ :  $5^\circ$  ou  $10^\circ$ ) ou prend une autre direction (figure IV.14). Nous avons expliqué dans le chapitre II paragraphe IV, que nous comparons aussi la sinuosité intrinsèque aux résultats de la méthode de squelettisation, la figure IV.15 nous montre les deux cas de figures :

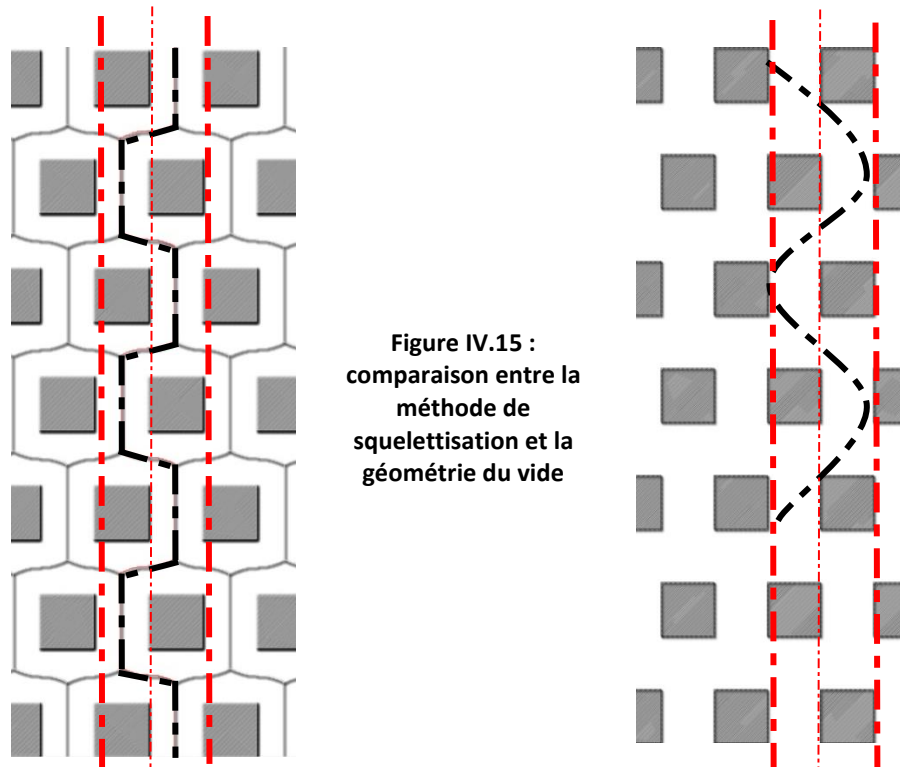
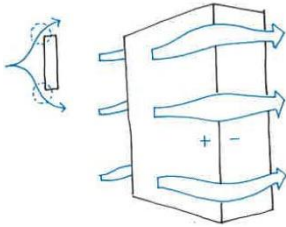


Figure IV.15 :  
comparaison entre la  
méthode de  
squelettisation et la  
géométrie du vide

## Anomalie et survitesse:

La figure IV.16 nous montre les déformations apportées aux lignes de courant d'air par la déflexion causée par un bâtiment. Cette déformation peut aboutir à des anomalies dans certaines conditions de vitesse importante. Nous parlons du phénomène du coin:



*'C'est un phénomène d'écoulement aux angles des constructions qui mettent en relation la zone de surpression amont à la zone de pression latérale du bâtiment.'* (Gandemer et al, 1976).

Figure IV.16 : effet de coin  
(Gandemer et al 1976)

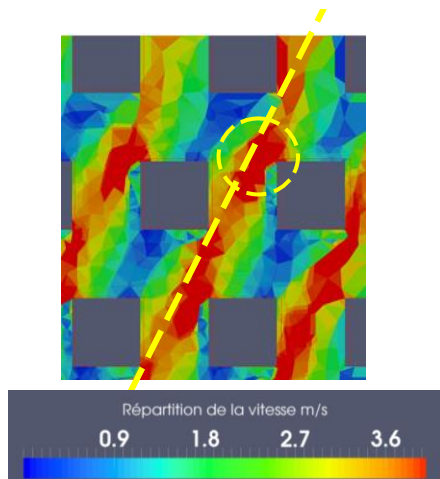


Figure IV.17 : effet de canalisation et effet de coin.

La vitesse du vent dans la figure IV.17 prend des valeurs importantes ( $> 3.2$  m/s) par effet de canalisation. L'effet de coin renforce aussi l'accélération de l'air et le maintien aussi sur une étendue considérable. Cela vient en opposition à ce qui est généralement proposé pour éviter l'effet de canalisation : orienter à un angle de  $45^\circ$ . Finalement la disposition des bâtiments peut aggraver la situation plus que l'orientation de la rue.

### III. Liaison entre la répartition spatiale du vent et la géométrie sinueuse :

#### Corrélation et analyse du confort

Il ressort de cette étude que le cas 02 est le plus performant comparé aux autres cas. Il est bien ventilé et confortable. Son organisation spatiale est la forme la plus adéquate face au régime des vents du tissu urbain. Elle favorise une répartition spatiale du vent assez homogène avec une intensité faible.

Nous avons essayé de voir la relation entre la variation du coefficient de sinuosité et la vitesse du vent (tableau IV.1). Les valeurs du tableau IV.1 ont été obtenues par une approche empirique en superposant aux champs de vitesse de vent simulés des sinusoides tracées arbitrairement.

Longueur d'onde $\lambda$ (m)		48	40	36	33.6	
Amplitude A (m)		12	12	12	12	
Coefficient de sinuosité Si		1.52	1.713	2	2.57	
Vitesse moyenne approximative du vent (m/s)	P (x,y) (m,m)	$P_1 (0, -\frac{A}{2})$	2.25	1.9	1.89	4.005
		$P_2 (\frac{\lambda}{4}, -\frac{A}{2})$	1.44	0.36	0.99	0.495
		$P_3 (\frac{\lambda}{2}, \frac{A}{2})$	2.25	1.98	0.45	4.005
		$P_4 (\frac{3\lambda}{4}, -\frac{A}{2})$	1.125	0.54	0.18	1.8
		$P_5 (\lambda, -\frac{A}{2})$	2.25	1.26	0.18	4.005

Tableau IV.1 : variation de la longueur d'onde de la sinusoïde et son impact sur la vitesse du vent

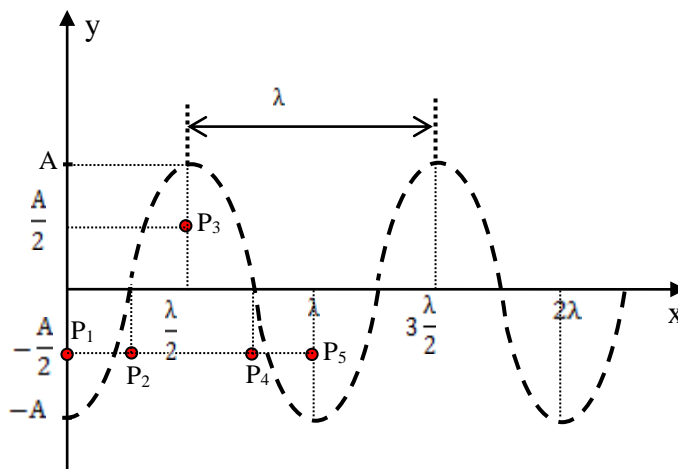


Figure IV.18 : Disposition des points de mesure de la vitesse moyenne simulée

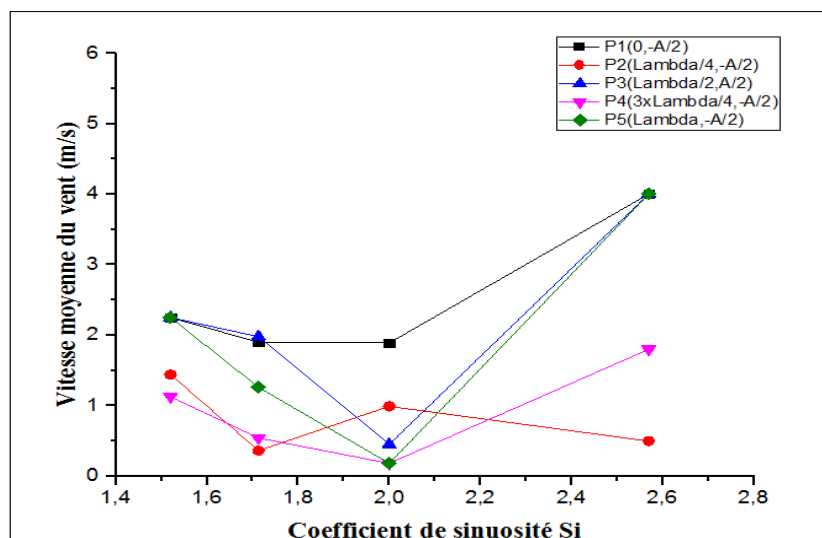


Figure IV.19 : Variation de la vitesse moyenne du vent en fonction du coefficient de sinuosité

Ces résultats montrent que la réduction de la longueur d'onde  $\lambda$  n'a pas un effet constant (une atténuation ou une augmentation continue). En augmentant la fréquence d'une sinusoïde urbaine on agit de deux manières différentes sur le vent : soit on protège plus contre le vent, soit on accélère son passage. Il existe un intervalle de valeurs de coefficient de sinuosité (1.8 ; 2) où on marque le changement de l'impact et la diminution importante de la vitesse de l'air.

Ces résultats sont en accord avec des études antérieures telles que celle de Zhang et al (2005), et Bouketta et al (2012) qui ont montré par simulation que le champ de vent est étroitement lié à la disposition des bâtiments.

## V. Conclusion

Le calcul de simulation de la répartition de la vitesse du vent à travers un tissu urbain caractérisé par des rues sinueuses nous a permis de constater l'effet très appréciable de la sinuosité sur la ventilation extérieure. Les résultats obtenus relatifs à une direction du vent de  $45^\circ$  par rapport à l'axe de la sinusoïde montrent qu'il est possible de contrôler la vitesse du vent en jouant sur le facteur de forme de sinuosité  $\frac{A}{\lambda}$ . En effet nous trouvons que, pour une valeur fixe de la période A de 12 m, une réduction de la période de la rue  $\lambda$  de 25 % (valeur initiale 48m - valeur intermédiaire 36 m) améliore considérablement l'homogénéité du champ de vitesse. Mais une réduction de 30 % augmente la vitesse du vent jusqu'à 4 m/s.

Par ailleurs, afin de tester davantage l'effet de l'orientation du vent nous avons effectué une étude systématique de la sinuosité directionnelle dans un intervalle de  $90^\circ$  et nous avons constaté une situation de confort caractérisée par des valeurs douces de la vitesse moyenne (2,7 m) pour un angle de  $50^\circ$ , l'étude a montré également que cette situation optimale est étroitement liée à la géométrie urbaine.



## Conclusion générale

Ce mémoire présente un travail exploratoire dans le domaine de l'interaction entre la morphologie de la ville et le vent urbain. Il traite la problématique de la configuration spatiale et ces conséquences en ce qui concerne l'écoulement du vent autour des constructions. Cela a été effectué à travers des simulations numériques sur des cas d'étude théoriques.

Dans une première phase, nous avons analysé des travaux antérieurs portant sur la même thématique. Nous avons comparé les paramètres qu'ils ont utilisés pour quantifier cette relation et nous avons dégagé un manque de prise en compte de l'influence des différents types de tracés urbains sur le changement des mouvements venteux. Les tracés courbés sinueux n'ont pas été particulièrement évoqués. Ainsi, nous avons focalisé notre travail de master sur l'étude de ce type de trame urbaine en matière d'impact sur le mouvement du vent et sa vitesse moyenne.

En deuxième partie nous avons défini ce type de grille urbaine. Nous avons montré sa singularité en tant que trajet parcouru et son apport en termes d'ambiances visuelles aux piétons et ce dans le but de définir l'image de la sinuosité urbaine. De même, nous l'avons simulé à un paramètre mathématique que nous avons appelé coefficient de sinuosité. Ce coefficient a servi d'outil de paramétrage de la corrélation entre la forme courbe et la répartition de vitesse du vent dans les trajets courbes.

Une troisième partie a été consacrée pour l'élaboration des cas d'étude théoriques et le principe d'enchaînement. La procédure du travail a consisté à faire varier  $\lambda$  pour une amplitude de  $A$  fixe, et vice versa. Les simulations numériques ont été exécutées avec le Code Saturne.

Dans la dernière partie, nous avons montré clairement une corrélation entre les variations de la vitesse du vent et l'indice de forme de la sinuosité géométrique. La sinuosité a montré un effet de protection pour une marge de valeurs de  $\frac{A}{\lambda}$ , et a engendré une augmentation de vitesse pour d'autres valeurs.

Nos résultats intéressants ont ouvert la porte à de nouvelles réflexions qui peuvent être développées en continuité à ce travail. En effet, comme perspectives de notre projet de master on pourra étudier; la relation entre l'impact de la forme sinusoïdale (courbe), en termes d'augmentation ou atténuation de vitesse du vent, sur la conception des espaces extérieurs, et l'influence du mouvement du vent de trajet sur la consommation énergétique des bâtiments.

## Annexes (01)

### Représentation cartésienne

$L_i$  peut s'exprimer en fonction de l'abscisse curviligne  $s$  de la courbe ( $\mathcal{C}_i$ ), figure II-4. La position d'un point quelconque  $P$  de la courbe s'écrit en coordonnées cartésiennes de base  $(\vec{u}_x, \vec{u}_y)$  :

$$\vec{OP} = x \vec{u}_x + y \vec{u}_y \quad (7)$$

L'élément vectoriel d'abscisse curviligne  $d\vec{s}$  de point moyen  $P$  s'écrit alors :

$$d\vec{s} = \vec{P_1P_2} = d\vec{OP} = dx \vec{u}_x + dy \vec{u}_y$$

D'où la valeur de cet élément :

$$ds = \|d\vec{s}\| = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (8)$$

Et par intégration, on obtient la longueur  $L_i$  du tronçon de courbe ( $\mathcal{C}_i$ ) :

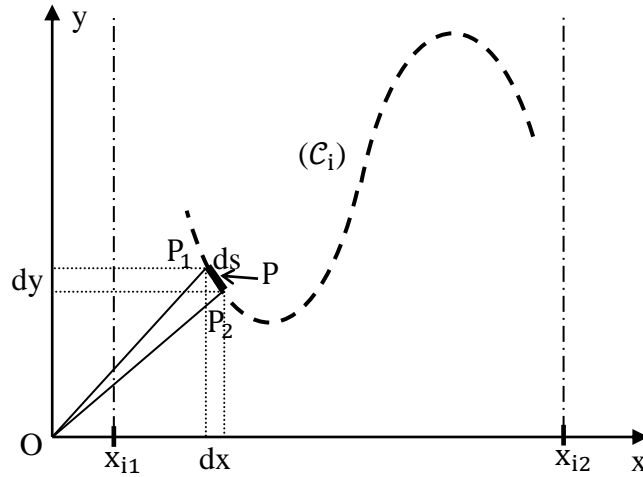
$$L_i = \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} ds = \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} \sqrt{dx^2 + dy^2} = \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (9)$$

où  $x_{i1}$  et  $x_{i2}$  sont les limites inférieure et supérieure de l'intervalle où s'étend la courbe ( $\mathcal{C}_i$ ).

Le coefficient de sinuosité sera donné ainsi par la relation :

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}{\sum_{i=1}^n m_i \lambda_i} \quad (10)$$

La connaissance de la forme de courbe des différents tronçons ( $\mathcal{C}_i$ ) et donc la dépendance de  $y=f(x)$  (paramétrage de courbe) permet d'évaluer la longueur effective  $L$  et par là le coefficient de sinuosité  $S_i$ .



**Figure II-4.** Graphe d'un élément curviligne considéré sur l'axe du tronçon de courbe  $(C_i)$  en représentation cartésienne.

### Représentation polaire

Dans certains cas de forme curviligne particulière, par exemple circulaire, elliptique, sinusoïdale ou spirale, il est plus commode d'utiliser la représentation polaire  $(\rho, \theta)$  de base  $(\vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta)$ , figure II-5.

Dans ce cas, la position du point P de la courbe prend en coordonnées polaire la forme suivante :

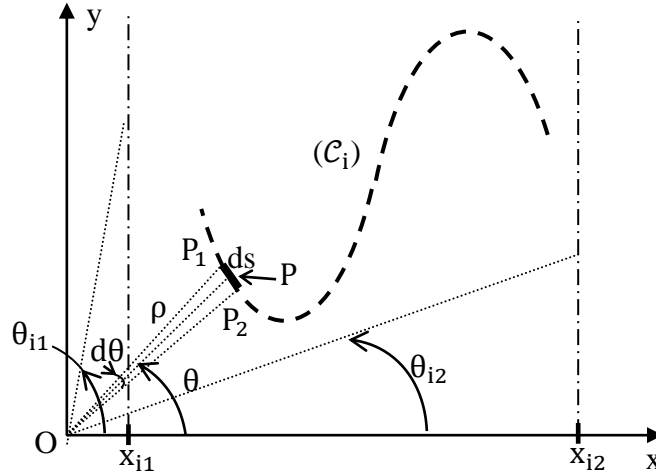
$$\vec{OP} = \rho \vec{u}_\rho \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad d\vec{s} &= \vec{P_1P_2} = d\vec{OP} = d\rho \vec{u}_\rho + \rho d\vec{u}_\rho = d\rho \vec{u}_\rho + \rho d\theta \frac{d\vec{u}_\rho}{d\theta} = d\rho \vec{u}_\rho + \rho d\theta \vec{u}_\theta \\ &(\vec{u}_\rho = \cos\theta \vec{u}_x + \sin\theta \vec{u}_y ; \quad \vec{u}_\theta = \frac{d\vec{u}_\rho}{d\theta} = -\sin\theta \vec{u}_x + \cos\theta \vec{u}_y) \\ ds &= \|d\vec{s}\| = \sqrt{d\rho^2 + (\rho d\theta)^2} = d\theta \sqrt{\left(\frac{d\rho}{d\theta}\right)^2 + \rho^2} \end{aligned} \quad (12)$$

De même par intégration de cet élément entre les limites inférieure  $\theta_{i1}$  et supérieure  $\theta_{i2}$  de l'intervalle de courbe  $(C_i)$ , on obtient :

$$L_i = \int_{\theta_{i1}}^{\theta_{i2}} ds = \int_{\theta_{i1}}^{\theta_{i2}} \sqrt{\left(\frac{d\rho}{d\theta}\right)^2 + \rho^2} d\theta \quad (13)$$

$$\Rightarrow \quad S_i = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{\theta_{i1}}^{\theta_{i2}} \sqrt{\left(\frac{d\rho}{d\theta}\right)^2 + \rho^2} d\theta}{\sum_{i=1}^n m_i \lambda_i} \quad (14)$$



**Figure II-5.** Graphe d'un élément curviligne considéré sur l'axe du tronçon de courbe  $(C_i)$  en représentation polaire.

### Exemple de calcul

#### a- Trajet demi-circulaire

Trajet constitué par  $2m$  demi-cercles de rayon  $R$  alternés comme indiqué sur la figure II-6. Dans ce cas, la période est  $\lambda = 4R$  et l'amplitude  $A = R$ .

L'équation d'un cercle de rayon  $R$  est en coordonnées cartésiennes de la forme :

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (15)$$

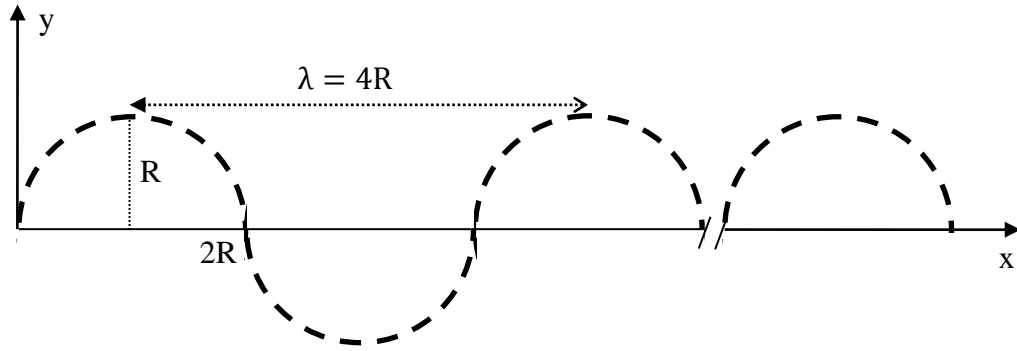
En considérant un cercle centré à l'origine  $O$ , la forme paramétrique de cette équation sera donnée par :

$$x = R \cos\theta \quad \text{et} \quad y = R \sin\theta$$

où  $\theta = (\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{OP})$  est l'angle polaire,  $(0 < \theta < 2\pi)$ .

Le rayon vecteur position s'écrit  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2} = R = \text{constante}$ . La longueur du cercle conformément à la relation (9) est ainsi égale à  $(\frac{d\rho}{d\theta} = 0)$  :

$$L = \int_{\text{cercle}} ds = \int_0^{2\pi} \rho d\theta = \int_0^{2\pi} R d\theta = 2\pi R \quad (16)$$



**Figure II-6.** Graphe d'un trajet plan demi-circulaire.

Etant donné que la période du trajet est constituée par 2 demi-cercles, sa longueur est celle d'un cercle  $2\pi R$  et la longueur effective du trajet complet est  $2\pi m R$ . D'autre part, la longueur directe raccourcie du trajet est  $\ell = m \lambda = 4mR$ , ce qui permet ainsi de calculer le coefficient de sinuosité :

$$Si = \frac{L}{\ell} = \frac{2\pi m R}{4mR} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (17)$$

Nous remarquons dans ce cas de trajet mono demi-circulaire que le coefficient de sinuosité est une constante qui ne dépend pas du rayon  $R$ .

### **b- Trajet elliptique**

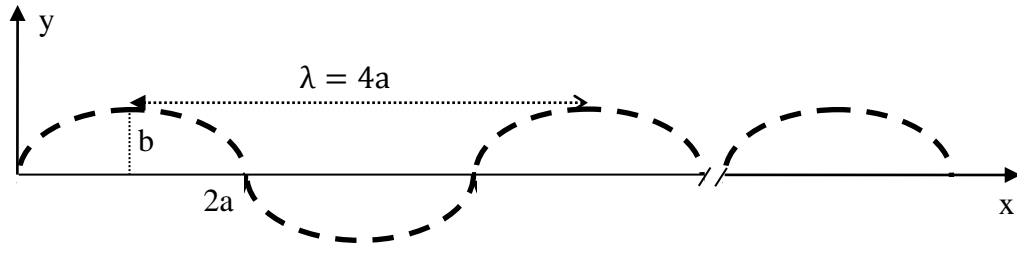
Trajet similaire au précédent formé par  $2m$  demi-ellipses alternées le long de l'axe  $\overrightarrow{Ox}$  et ayant  $a$  comme la demi-mesure de l'axe horizontal et  $b$  la demi-mesure de l'axe vertical ( $a > b$ ), figure II-7. La période du trajet est  $\lambda = 4a$  et l'amplitude  $A = b$ .

L'équation de l'ellipse en coordonnées cartésiennes s'écrit :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (18)$$

et celle paramétrique est donnée par :  $x = a \cos(t)$  et  $y = b \sin(t)$

où  $t$  est un paramètre variant de  $0$  à  $2\pi$  (différent de l'angle polaire  $\theta$  défini précédemment).



**Figure 7.** Graphe d'un trajet plan demi-elliptique.

Appliquons de la relation (5) pour le calcul de la longueur L du trajet effectif :

$$\begin{aligned}
 L &= 2m \int_{\text{demi-ellipse}} ds = 2m \int_0^\pi \sqrt{dx^2 + dy^2} = 2m \int_0^\pi \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt \\
 &= 2m \int_0^\pi \sqrt{a^2 \sin^2(t) + b^2 \cos^2(t)} dt \\
 &= 2m \int_0^\pi \sqrt{a^2 (1 - \cos^2(t)) + b^2 \cos^2(t)} dt \\
 &= 2m \int_0^\pi \sqrt{a^2 + (b^2 - a^2) \cos^2(t)} dt \\
 &= 2ma \int_0^\pi \sqrt{1 - e^2 \cos^2(t)} dt
 \end{aligned}$$

où  $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$  est l'excentricité de l'ellipse ( $1 < e < 1$ )

Etant donné que le terme  $e^2 \cos^2(t)$  est petit devant l'unité, on remplace l'intégrande  $\sqrt{1 - e^2 \cos^2(t)}$  par son développement limité <sup>(1)</sup> :

$$\sqrt{1 - e^2 \cos^2(t)} = 1 - \frac{e^2 \cos^2(t)}{2} - \frac{e^4 \cos^4(t)}{8} - \frac{e^6 \cos^6(t)}{16} - \dots$$

On intègre ensuite terme à terme en linéarisant au préalable les puissances de cosinus. Au fait, nous nous contentons du développement à l'ordre 1, puisque le reste est négligeable dans la limite de nos applications :

$$\begin{aligned}
 L &= 2ma \int_0^\pi \left(1 - \frac{e^2 \cos^2(t)}{2}\right) dt = 2ma \left(\pi - \frac{e^2}{2} \int_0^\pi \left(\frac{1 + \cos(2t)}{2}\right) dt\right) \\
 L &= 2ma\pi \left(1 - \frac{e^2}{4}\right) \tag{19}
 \end{aligned}$$

Dans ces conditions, le coefficient de sinuosité vaut :

$$\text{Si} = \frac{L}{l} = \frac{2ma\pi \left(1 - \frac{e^2}{4}\right)}{4ma} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{e^2}{4}\right) \tag{20}$$

Nous remarquons que Si dépend de l'excentricité e de l'ellipse et qu'on retrouve celui du trajet circulaire lorsque  $e = 0$ .

(<sup>1</sup>) Utilisation du développement limité de la forme usuelle  $(1 + u)^\alpha$  :

$$(1 + u)^\alpha = 1 + \alpha u + \frac{\alpha(\alpha-1)u^2}{2!} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} u^3 + \dots = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-(n-1))}{n!} u^n$$

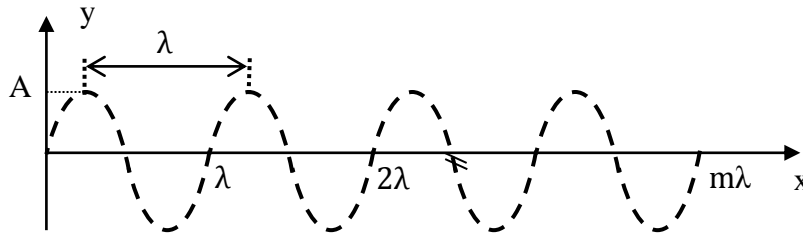
### c- Trajet sinusoïdal

Considérons maintenant un trajet sinusoïdal constitué par  $m$  périodes de période  $\lambda$  et d'amplitude  $A$  et qui est décrit par l'équation cartésienne, figure II-8 :

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad (21)$$

L'application de la relation (9) fournit longueur  $L$  du trajet effectif :

$$L = m \int_{\text{une période}} ds = m \int_0^\lambda dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$



**Figure II-8.** Graphe d'un trajet plan sinusoïdal.

Faisons le changement de variable suivant :  $t = \frac{2\pi x}{\lambda}$  ;  $dt = \frac{2\pi}{\lambda} dx$

$$\begin{aligned} L &= m \int_0^{2\pi} \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{1 + \left(A \frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cos^2(t)} dt = m \int_0^{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2 \cos^2(t)} dt \\ &= m \int_0^{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2 (1 - \sin^2(t))} dt \\ &= 4m \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2} \sqrt{1 - \frac{A^2}{\left(\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2\right)} \sin^2(t)} dt \end{aligned}$$

Le développement limité de l'intégrande  $\sqrt{1 - \left(\frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2}\right) \sin^2(t)}$  et le suivi du même procédé que précédemment conduit au résultat suivant :

$$\begin{aligned}
\sqrt{1 - \frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2} \sin^2(t)} &= 1 - \frac{\left(\frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2}\right) \sin^2(t)}{2} - \frac{\left(\frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2}\right)^2 \sin^4(t)}{8} - \frac{\left(\frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2}\right)^3 \sin^6(t)}{16} - \dots \\
L &= 4m \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 - \frac{\left(\frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2}\right) \sin^2(t)}{2}\right) dt \\
&= 4m \frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2} \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{A^2}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 + A^2}\right)\right) \\
&= 4m \frac{\pi}{2} \lambda \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2} \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\left(\frac{A}{\lambda}\right)^2}{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2}\right)\right) \quad (22)
\end{aligned}$$

D'où l'on déduit le coefficient de sinuosité du trajet sinusoïdal en fonction du rapport amplitude de la sinusoïde sur sa longueur d'onde  $\left(\frac{A}{\lambda}\right)$  :

$$Si = \frac{L}{\ell} = 2\pi \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2} \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\left(\frac{A}{\lambda}\right)^2}{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2}\right)\right) \quad (23)$$

Le rapport  $\frac{A}{\lambda}$  décrit l'ampleur de la sinusoïde en crête-crête qu'on définit ainsi comme étant le degré de sinuosité. D'ailleurs, nous remarquons bien que le facteur de sinuosité varie dans le même sens que le degré de sinuosité dans la mesure où si le degré de sinuosité diminue, la sinuosité diminue et vice versa. A titre d'exemple, si l'on prend  $\frac{A}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} (\cong \frac{1}{6})$ , on trouve :  $Si = 1,23$ .

#### d- Trajet spiral

Soit une demi-droite (OD) dans le plan xOy qui tourne de manière uniforme autour de l'axe  $\vec{Oz}$ . Comme l'indique la figure II-9, un point P mobile qui se déplace uniformément sur cette droite depuis l'origine O décrit dans ce plan un trajet spiral d'équation polaire dont le module du rayon vecteur position  $\|\vec{OP}\| = \rho$  est proportionnel à l'angle polaire  $\theta$  :

$$\rho = a \theta \quad (24)$$

Le coefficient de proportionnalité a est appelé coefficient de la spirale. Après chaque tour  $\theta = 2\pi$ , le point P avance de la distance  $2\pi a$  qui représente le pas de la spirale noté  $e = 2\pi a$ .



La longueur de la spirale depuis l'origine jusqu'au point d'ouverture  $\theta_0$  est donnée d'après la relation (9) par :

$$L = \int_{\text{spirale}} ds = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\left(\frac{d\rho}{d\theta}\right)^2 + \rho^2} d\theta = \int_0^{\theta_0} \sqrt{a^2 + a^2\theta^2} d\theta = \int_0^{\theta_0} a\sqrt{1 + \theta^2} d\theta$$

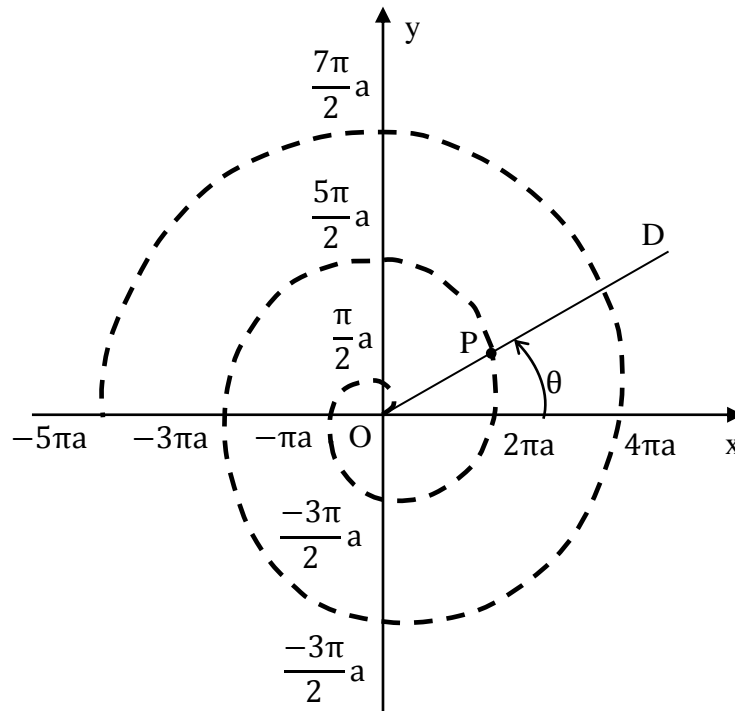
Faisons le changement de variable  $\theta = \sinh(t)$  <sup>(2)</sup> :

$$L = \int_0^{\theta_0} a\sqrt{1 + \theta^2} d\theta = \int_0^{\text{argsinh}(\theta_0)} a\sqrt{1 + \sinh^2(t)} \cosh(t) dt$$

---

Le sinus hyperbolique et le cosinus hyperbolique sont définis respectivement par les relations suivantes :

$$\sinh(t) = \frac{e^t - e^{-t}}{2} \quad \text{et} \quad \cosh(t) = \frac{e^t + e^{-t}}{2}$$



**Figure II-9.** Graphe d'un trajet spiral.

L'utilisation de la relation fondamentale :  $\cosh^2(t) - \sinh^2(t) = 1$  donne encore :

$$L = a \int_0^{\text{argsinh}(\theta_0)} \cosh^2(t) dt = a \int_0^{\text{argsinh}(\theta_0)} \frac{(e^t + e^{-t})^2}{4} dt$$

$$\begin{aligned}
&= a \int_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)} \frac{e^{2t} + 2 + e^{-2t}}{4} dt = a \left[ \frac{e^{2t} - e^{-2t}}{8} + \frac{t}{2} \right]_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)} \\
&= a \left[ \frac{\sinh(2t)}{4} + \frac{t}{2} \right]_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)} = a \left[ \frac{\sinh(t) \cosh(t)}{2} + \frac{t}{2} \right]_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)}
\end{aligned}$$

Enfin, reprenons la variable polaire  $\theta$  :

$$\theta = \sinh(t) \quad \text{et} \quad t = \operatorname{argsinh}(\theta) = \operatorname{Ln}(\theta + \sqrt{\theta^2 + 1})$$

d'où l'on déduit :

$$L = \frac{a}{2} \left[ \theta \sqrt{1 + \theta^2} + \operatorname{Ln}(\theta + \sqrt{\theta^2 + 1}) \right]_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)} \quad (25)$$

et si l'on suppose une longueur directe de  $m$  demi-pas ( $\ell = m\pi a$ ), le coefficient de sinuosité vaut :

$$\begin{aligned}
\operatorname{Si} &= \frac{L}{\ell} = \frac{\frac{a}{2} \left[ \theta \sqrt{1 + \theta^2} + \operatorname{Ln}(\theta + \sqrt{\theta^2 + 1}) \right]_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)}}{m\pi a} \\
&= \frac{\frac{1}{2} \left[ \theta \sqrt{1 + \theta^2} + \operatorname{Ln}(\theta + \sqrt{\theta^2 + 1}) \right]_0^{\operatorname{argsinh}(\theta_o)}}{m\pi} \quad (26)
\end{aligned}$$

Les différents trajets ont été donnés à titre d'exemple pour l'illustration du calcul du coefficient de sinuosité, mais dans la suite de ce mémoire, nous allons considérer uniquement le trajet à caractère sinusoïdal qui représente conformément à la décomposition en séries de Fourier l'harmonique de base de toute fonction périodique. Autrement dit, une sinuosité non sinusoïdale peut être traitée comme une variation périodique qui sera alors décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales.

## Annexes (02) : fichier script

```
import salome
salome.salome_init()
import GEOM
import math
from salome.geom import geomBuilder
geompy = geomBuilder.New(salome.myStudy)
gg = salome.ImportComponentGUI("GEOM")

#####
## INFOS MODIFIABLES ##
#####
Lx=12.                # largeur du batiment
Ly=12.                # longueur du batiment
Rx=Lx                 # largeur de la rue verticale
Ry=Ly                 # largeur de la rue horizontale

Marge=100             # distance a droite, gauche, en haut et bas au dela des
batiments
nb_colone=22          # nombre de batiment dans l'horizontale
nb_ligne=12           # nombre de batiment dans la verticale
#####
## Points de Construction ##
#####
p0 = geompy.MakeVertex( 0., 0., 0.)
px = geompy.MakeVertex(1., 0., 0.)
py = geompy.MakeVertex( 0., 1., 0.)
pz = geompy.MakeVertex( 0., 0., 1.)
vector_x=geompy.MakeVector(p0, px)
vector_y=geompy.MakeVector(p0, py)
vector_z=geompy.MakeVector(p0, pz)

xmax=nb_colone*(Lx+Rx)
ymax=nb_ligne*(Ly+Ry)-Ry
xmoy1=nb_colone*(Lx+Rx)*1./3.
ymoy1=nb_ligne*(Ly+Ry)*1./3.-Ry/2.
xmoy2=nb_colone*(Lx+Rx)*2./3.
ymoy2=nb_ligne*(Ly+Ry)*2./3.-Ry/2.

#####
## Creation Batiment de Base ##
```

```

#####
pt1 = geompy.MakeVertex(0.0, 0.0, 0.0)
pt2 = geompy.MakeVertex(Lx, Ly, 2*min(Lx,Ly))
BoxDeBase = geompy.MakeBoxTwoPnt(pt1, pt2)
geompy.addToStudy(BoxDeBase, "BoxDeBase")
LigneBox=geompy.MakeMultiTranslation1D(BoxDeBase, vector_x, Lx+Rx, nb_colone)
geompy.addToStudy(LigneBox, "LigneBox")

LigneBox2 = geompy.MakeTranslation(LigneBox, Rx, Ly+Ry, 0)
geompy.addToStudy(LigneBox2, "LigneBox2")

ToutesBox=geompy.MakeMultiTranslation1D(LigneBox, vector_y, 2*Ly+2*Ry, nb_ligne/2)
#ToutesBox=geompy.MakeRotation(ToutesBox, vector_z, 45*math.pi/180)
geompy.addToStudy(ToutesBox, "ToutesBox")

ToutesBox2=geompy.MakeMultiTranslation1D(LigneBox2, vector_y, 2*Ly+2*Ry,
nb_ligne/2)
#ToutesBox2=geompy.MakeRotation(ToutesBox2, vector_z, 45*math.pi/180)
geompy.addToStudy(ToutesBox2, "ToutesBox2")

#####
### Surface de Sol ###
#####
p1=geompy.MakeVertex(-Marge, -Marge, 0.)
p2=geompy.MakeVertex(-Marge, ymax+Marge, 0.)
p3=geompy.MakeVertex(xmax+Marge, ymax+Marge, 0.)
p4=geompy.MakeVertex(xmax+Marge, -Marge, 0.)
Rect=geompy.MakePolyline([p4, p1, p2, p3, p4])
Rect=geompy.MakeFaceWires([Rect],0)
#Rect=geompy.MakeRotation(Rect, vector_z, 45*math.pi/180)
geompy.addToStudy(Rect, "Rect")

p5=geompy.MakeVertex(xmoy1, ymoy1, 0.)
p6=geompy.MakeVertex(xmoy1, ymoy2, 0.)
p7=geompy.MakeVertex(xmoy2, ymoy2, 0.)
p8=geompy.MakeVertex(xmoy2, ymoy1, 0.)
Rect2=geompy.MakePolyline([p5, p6, p7, p8, p5])
Rect2=geompy.MakeFaceWires([Rect2],0)
#Rect2=geompy.MakeRotation(Rect2, vector_z, 45*math.pi/180)
geompy.addToStudy(Rect2, "Rect2")

#####
## Veine Numerique ##

```

```

#####
R=math.pow(xmoy1**2+ymoy2**2,0.5)
Theta=math.atan(ymoy2/xmoy1)
#Xmin=R*math.cos(Theta+45./180*math.pi)
Xmin=xmoy1

R=math.pow(xmoy1**2+ymoy1**2,0.5)
Theta=math.atan(ymoy1/xmoy1)
#Ymin=R*math.sin(Theta+45./180*math.pi)
Ymin=ymoy1

R=math.pow(xmoy2**2+ymoy1**2,0.5)
Theta=math.atan(ymoy1/xmoy2)
#Xmax=R*math.cos(Theta+45./180*math.pi)
Xmax=xmoy2

R=math.pow(xmoy2**2+ymoy2**2,0.5)
Theta=math.atan(ymoy2/xmoy2)
#Ymax=R*math.sin(Theta+45./180*math.pi)
Ymax=ymoy2
XminVeine=Xmin-2*(Xmax-Xmin)
XmaxVeine=Xmax+2*(Xmax-Xmin)
YminVeine=Ymin-2*(Ymax-Ymin)
YmaxVeine=Ymax+5*(Ymax-Ymin)

ZmaxVeine=5*2*min(Lx,Ly)
box2 = geompy.MakeBox(XminVeine,YminVeine,0, XmaxVeine,YmaxVeine,ZmaxVeine)

#####
## Reconstruction Veine ##
#####
Shell=geompy.SubShapeAll(box2, geompy.ShapeType['SHELL'])
cut1=geompy.MakeCut(Shell[0], Rect)
cut2=geompy.MakeCut(Rect, Rect2)
geompy.addToStudy(cut1, "cut1")
geompy.addToStudy(cut2, "cut2")
Veine= geompy.MakeShell([cut1,cut2,Rect2])
Veine= geompy.MakeSolid([Veine])
geompy.addToStudy(Veine, "Veine")

#####
### Geometrie Finale ###
#####

```

```
Cut1=geompy.MakeCut(Veine, ToutesBox)
Cut2=geompy.MakeCut(Cut1, ToutesBox2)
geompy.addToStudy(Cut2, "GeoFinale")
```

## Annexe (03)

### L'équation de la conservation de la masse (équation de continuité)

La variation temporelle de la masse  $m$  du fluide par unité de volume ( $\rho = \frac{m}{V}$ ) est donnée par l'équation de conservation suivante :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0$$

$\downarrow$   
**la variation temporelle  
de la masse volumique**

$\downarrow$   
**variation spatiale du vecteur  
densité du courant de fluide**

En régime permanent  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  et pour un fluide incompressible ( $\frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0$ ), cette équation se réduit à :

$$\sum_{i=1}^3 \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

C'est à dire  $\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0$ , ou encore  $\frac{\partial \bar{U}_z}{\partial z} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$   
(variation de vitesse avec uniquement l'altitude  $z$ )

### L'équation de la conservation de la quantité de mouvement

C'est l'équation de mouvement du fluide (application de la deuxième loi de Newton). Elle définit l'équation de Navier-Stokes en coordonnées cartésiennes pour un fluide incompressible :

$$\rho \frac{dU_i}{dt} = -2\varepsilon_{ijk} \rho \omega_j U_k - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{i3}$$

$\downarrow$   
**Force d'inertie du  
mouvement par unité  
de volume**

$\downarrow$   
**Force de  
Coriolis  
par unité de  
volume**

$\downarrow$   
**Force de  
pression  
par unité  
de volume**

$\downarrow$   
**Force de  
contraintes  
visqueuses  
par unité  
de volume**

$\downarrow$   
**Force de  
gravité par  
unité de volume**

### Profil de la vitesse du vent

L'intégration de cette équation entre la hauteur de rugosité  $z_0$  où la vitesse moyenne vaut zéro et la côte  $z$ , fournit la vitesse moyenne  $\bar{u}(z)$  selon une variation logarithmique de l'altitude  $z$  :

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

$u^*$  et  $z_0$  peuvent être obtenus expérimentalement. En coordonnées semi-logarithmique, le profil de vitesse  $\ln(z) = f(\bar{u}(z))$  est donc une droite dont la pente est  $\frac{k}{u^*}$  et l'ordonnée à l'origine  $\ln(z_0)$ .

La variation logarithmique de la vitesse du vent avec la hauteur au dessus du sol n'est applicable qu'à partir d'une certaine hauteur  $z^*$  où l'écoulement peut voir les irrégularités du sol.  $z^*$  correspond à l'épaisseur effective de la sous couche turbulente qui est généralement prise égale à 1,5 fois la hauteur moyenne des obstacles  $H$ .

Par ailleurs comme on l'avait remarqué au § II, l'expression du profil de vitesse doit être rectifiée en tenant compte de la hauteur de déplacement  $d$  par un changement d'altitude  $z$  en  $z - d$  tel que pour  $z = z_0 + d$  la vitesse moyenne est nulle  $\bar{u}(z_0 + d) = 0$  :

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$$

Cette approche implique qu'à une côte  $z$ , la vitesse décroît quand la rugosité  $z_0$  augmente. Le profil de vitesse est ainsi fonction de la nature du sol et de la géométrie des obstacles existant. Comme le montre le tableau II-1, soulignons enfin que la valeur de la hauteur de rugosité  $z_0$  varie de quelques millimètres sur une surface marine à quelques mètres sur une zone urbaine .

Type de surface (sites homogènes de grande extension horizontale)	Hauteur de rugosité (m)	Classe de rugosité
Mer, neige, sable	0.0005	I
Mer par grand vent	0.005	II
Herbe courte	0.01	III
Champs cultivés ouverts	0.05	IV
Plantations hautes, campagne ouverte	0.10	V
Campagne et habitat dispersé	0.25	VI
Zone urbaine périphérique	0.50	VII
Centre ville, forêt	1.00	VIII
Centre de métropoles, forêt tropicale	4.00	IX

**Tableau II-1** : Classes et hauteur de rugosité



## Annexes (04) : fichier « famille »

```
<?xml version="1.0"?>
<familles>
  <famille>
    <name>GD4</name>
    <classe>batiments</classe>
    <albedo>0.25</albedo>
    <transmittance>0</transmittance>
    <emissivite>0.9</emissivite>
    <layers>
      <layer>
        <position>1</position>
        <matériau>beton</matériau>
        <épaisseur>0.15</épaisseur>
      </layer>
    </layers>
    <soleneID>0</soleneID>
    <saturneID>0</saturneID>
  </famille>

  <famille>
    <name>GD3</name>
    <classe>batiments</classe>
    <albedo>0.25</albedo>
    <transmittance>0</transmittance>
    <emissivite>0.9</emissivite>
    <layers>
      <layer>
        <position>1</position>
        <matériau>beton</matériau>
        <épaisseur>0.15</épaisseur>
      </layer>
    </layers>
    <soleneID>0</soleneID>
    <saturneID>0</saturneID>
  </famille>

  <famille>
    <name>GD2</name>
    <classe>batiments</classe>
    <albedo>0.25</albedo>
    <transmittance>0</transmittance>
    <emissivite>0.9</emissivite>
    <layers>
      <layer>
```

```
<position>1</position>
<materiau>beton</materiau>
<epaisseur>0.15</epaisseur>
</layer>
</layers>
<LAI>2</LAI>
<epaisseur_feuillage>0.2</epaisseur_feuillage>
<coeff_extinction>0.9</coeff_extinction>
<evaporation>1</evaporation>
<soleneID>0</soleneID>
<saturneID>0</saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
<name>GD1</name>
<classe>batiments</classe>
<albedo>0.25</albedo>
<transmittance>0</transmittance>
<emissivite>0.9</emissivite>
<layers>
<layer>
<position>1</position>
<materiau>beton</materiau>
<epaisseur>0.15</epaisseur>
</layer>
</layers>
<LAI>2</LAI>
<epaisseur_feuillage>0.2</epaisseur_feuillage>
<coeff_extinction>0.9</coeff_extinction>
<evaporation>1</evaporation>
<soleneID>0</soleneID>
<saturneID>0</saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
<name>ZoneUrb</name>
<classe>sol</classe>
<albedo>0.1</albedo>
<transmittance>0</transmittance>
<emissivite>0.9</emissivite>
<layers>
<layer>
<position>1</position>
<materiau>asphalte</materiau>
<epaisseur>0.1</epaisseur>
</layer>
<layer>
```

```
<position>2</position>
<materiau>beton</materiau>
<epaisseur>1.0</epaisseur>
</layer>
</layers>
<LAI>2</LAI>
<epaisseur_feuillage>0.2</epaisseur_feuillage>
<coeff_extinction>0.9</coeff_extinction>
<evaporation>1</evaporation>
<soleneID>8</soleneID>
<saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
<name>ZoneEtude</name>
<classe>sol</classe>
<albedo>0.1</albedo>
<transmittance>0</transmittance>
<emissivite>0.9</emissivite>
<layers>
<layer>
<position>1</position>
<materiau>asphalte</materiau>
<epaisseur>0.1</epaisseur>
</layer>
<layer>
<position>2</position>
<materiau>beton</materiau>
<epaisseur>1.0</epaisseur>
</layer>
</layers>
<LAI>2</LAI>
<epaisseur_feuillage>0.2</epaisseur_feuillage>
<coeff_extinction>0.9</coeff_extinction>
<evaporation>1</evaporation>
<soleneID>8</soleneID>
<saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
<name>veineinf</name>
<classe>sol</classe>
<albedo>0.1</albedo>
<transmittance>0</transmittance>
<emissivite>0.9</emissivite>
<layers>
<layer>
<position>1</position>
```

```
    <matériau>asphalte</matériau>
    <épaisseur>0.1</épaisseur>
  </layer>
  <layer>
    <position>2</position>
    <matériau>beton</matériau>
    <épaisseur>1.0</épaisseur>
  </layer>
</layers>
<LAI>2</LAI>
<épaisseur_feuillage>0.2</épaisseur_feuillage>
<coeff_extinction>0.9</coeff_extinction>
<evaporation>1</evaporation>
<soleneID>8</soleneID>
<saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
  <name>surfarbre</name>
  <classe>surface_arbre</classe>
  <albedo>0.1</albedo>
  <transmittance>0</transmittance>
  <emissivite>0.9</emissivite>
  <soleneID>8</soleneID>
  <saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
  <name>air</name>
  <classe>volume_air</classe>
  <soleneID></soleneID>
  <saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
  <name>arbre</name>
  <LAD>1</LAD>
  <classe>volume_arbre</classe>
  <soleneID></soleneID>
  <saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>
  <name>veinelat</name>
  <classe>sat_inlet</classe>
  <soleneID></soleneID>
  <saturneID></saturneID>
</famille>
```

```
<famille>  
  <name>ciel</name>  
  <classe>sat_sym</classe>  
  <soleneID></soleneID>  
  <saturneID></saturneID>  
</famille>
```

```
<famille>  
  <name>terre1</name>  
  <classe>sat_wall</classe>  
  <soleneID></soleneID>  
  <saturneID></saturneID>  
</famille>
```

```
</familles>
```

## Table des figures

Figure I.1 : Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain. source (Rotach <i>et al</i> , 2000).....	18
Figure I.2 : Plan masse des deux ensembles d'habitation. source (Bouketta <i>et al</i> , 2012, P. 644).....	20
Figure I.3: modélisation et simulation du cas 01, source (Bouketta <i>et al</i> , 2012).....	20
Figure I.4 : Profil des tissus urbains étudiés, Québec - Canada (Ouameur, 2007).....	20
Figure I.5 : Les deux cas d'étude, tissu médiéval (à gauche), tissu "moderne" (à droite) Fez – Maroc. source (E. Johansson, 2006, P.1328, P. 1329).....	21
Figure I.6 : Le passage d'un régime à un autre se réalise est en fonction une combinaison des valeurs de H/W et L/W, source (Oke, 1988).....	22
Figure I.7: profil de la rue et régime du vent: formation des vortex. source (H.Wu, Montreal 1994; Kautheim <i>et al</i> , 2014).....	23
Figure I.8 : Cas d'étude,source AbuSufian Kushol et al (2013).....	24
Figure I.9 : Transformations numérique de l'agencement des bâtiments.....	24
Figure I.10 : source (Ameur, 2002).....	27
Figure I.11 : source (Ameur, 2002).....	27
Figure I.12 : source (oke, 1987).....	27
Figure I.13 : source (Krautheim et al, 2014).....	28
Figure I.14 : schéma explicatif de la différence entre la rugosité absolue et la rugosité relative du tissu urbain.....	28
Figure I.15 : source (Ameur, 2002).....	28
Figure I.16 : source (auteur).....	28
Figure I.17 : source (Johansson, 2012).....	28
Figure I.18 : source (Johansson, 2012).....	28
Figure I.19 : source (Benzerzour, 2004).....	29
Figure I.20 : Disposition orthogonale des obstacles, source (Shishegar, 2013).....	30
Figure I.21 : Disposition alternée des obstacles, source (Shishegar, 2013).....	30
Figure I.22 : Légende des paramètres géométriques, source (Grimmond <i>et al</i> , 1999).....	32
Figure I.23 : Maquette du cas d'études en expérimentation pour dégager des relations théoriques simples et basiques, source (Kim <i>et al</i> , 2011).....	33
Figure I.24 : Maquette d'une zone urbaine pour la vérification des théories dégagées (F16), source (Kim <i>et al</i> , 2011).....	33
Figure I.25 : Ormen Långe par Ralph Erskine, source (Kautheim <i>et al</i> , 2014).....	33
Figure I.26 : Configuration de la trame alternée, source (Zhang <i>et al</i> , 2005, P. 893); .....	34
Figure II.1: source Stephen Marshall, Streets and Patterns, cité dans Salat <i>et al</i> , 2011, P.254.).....	38
Figure II.2: Evolution du plan rectiligne d'une ville à un plan organique, source (Salat <i>et al</i> , 2011, P.110).....	40
Figure II.3 : Parcours dans des ruelles tortueuses et leurs effets, source (Pierre Pinon <i>et al</i> , D'après De Wolfe, cité dans Salat <i>et al</i> 2011, P.386-376).....	40
Figure II.4 : Niveaux d'abstraction géométrique, source Stephen Marshall, cité dans (Salat et al, 2011, P.232).41	41
Figure II.5 : Classification des tissus selon les trois méthodes d'analyse, source (Raimbault, 1998).....	42
Figure II.6 : Ville française dans la région du Var, source (Bill Hillier, 1984 cité dans Daas, 2013).....	43
Figure II.7.a : carte axiale d'une ville française dans la région du Var, source (ibid).....	43
Figure II.7.b : carte convexe d'une ville française dans la région du Var, source (ibid).....	43
Figure II.8 : Connectivité par analyse d'axialité source (Daas Nawel, 2013, P107).....	44
Figure II.9 : Illustration du calcul du coefficient de sinuosité d'un trajet sinueux, source (auteur).....	45
Figure II.10 : Graphe d'un élément curviligne considéré sur l'axe du tronçon de courbe ( $C_1$ ) en représentation cartésienne, source (auteur).....	46
Figure II.11 : Graphe d'un trajet plan sinusoïdal, source (auteur).....	47
Figure II.12 : squelettisation des formes, source (Sarradin, 2005).....	48
Figure II.13: Explication du concept de squelettisation par Blum, source (Sarradin, 2005).....	48
Figure III.1 : rue canyon courbe,.....	51
FigureIII.2:Bologneltalie,source, <a href="https://urbabillard.wordpress.com/">https://urbabillard.wordpress.com/</a> .....	51

Figure III.3 : alternance des bâtiments.....	51
Figure III.4 : disposition en damier, .....	51
Figure III.5.a:plan Barcelona - Espagne, source, <a href="https://urbabillard.wordpress.com/">https://urbabillard.wordpress.com/</a> .....	51
Figure III.5.b : essai de variation de l'amplitude et la période,.....	52
Figure III.6: rue canyon sinueuse de $A/\lambda = 0.12$ , source (auteur).....	52
Figure III.7: disposition éloignée des obstacles.....	54
Figure III.8.a: disposition rapprochée des obstacles.....	54
Figure III.8.b : altération et chevauchement.....	54
Figure III.9 : Etat initial.....	55
Figure III.10: réduction de A.....	55
Figure III.11 : Etat initial.....	55
Figure III.12: réduction de la période.....	55
Figure III.13 : géométrie d'étude sur Salomé.....	57
Figure III.14 : coupe transversale A - A.....	57
Figure III.15: modélisation volumétrique.....	57
Figure III.16: trame duvide.....	57
Figure III.17: Maillage.....	57
Figure III.18 : source (wikipédia).....	57
Figure III.19: maillage différent pour chaque groupe de surface. Un degré de raffinement plus important dans la zone d'étude.....	58
Figure III.20: modèle 3D et maillage accordé à chaque groupe de surfaces.....	58
Figure III.21 : cas 01.....	61
Figure III.22 : cas 03.....	61
Figure III.23 : cas 04.....	61
Figure III.24: Simulation pour une direction de $0^\circ$ .....	62
Figure III.25 : Simulation pour une direction de $90^\circ$ .....	63
Figure III.26 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	65
Figure III.27 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	65
Figure III.28 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	66
Figure III.29 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	66
Figure III.30 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	67
Figure III.31 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	67
Figure III.32 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	68
Figure III.33 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	68
Figure III.32 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	69
Figure III.33 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	69
Figure III.34 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	70
Figure III.35 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	70
Figure III.36 : écoulement du vent dans la veine numérique.....	71
Figure III.37 : écoulement du vent dans la zone centrale.....	71
Figure IV.1 : mouvement du vent entre deux bâtiments, source (Blocken and Carmeliet, 2004 cité dans Moonen et al (2012)).....	74
Figure IV.2: mesures du facteur d'amplification obtenue par mesures en soufflerie, source (Bernabek et al 1979).....	74
Figure IV.3: sinuosité intrinsèque.....	75
Figure IV.4 : Sinuosité directionnelle liée à l'infiltration du vent sur la diagonal NE – SW.....	75
Figure IV.5 : Superposition de la sinuosité directionnelle et la sinuosité intrinsèque.....	75
Figure IV.6 : Angle d'incidence du vent $\theta$ .....	75
Figure IV.7 : Critère du confort aéraulique lié à la température de l'air, source (cours vent et ventilation Mastère 2 STEU, Olivier Flamand).....	78
Figure IV.8 : Variation de la direction du vent de $1^\circ$ à $45^\circ$ .....	80
Figure IV.9 : Variation de la direction du vent de $50^\circ$ à $89^\circ$ .....	81
Figure IV.10 : Comparaison de situations d'inconfort.....	82
a- cas directionnels de $45^\circ$ pour une vitesse de vent = 2.5 m/s	
b- cas directionnels de $89^\circ$ pour une vitesse de vent = 5 m/s	
Figure IV.11 : Application de la sinuosité directionnelle optimale au cas 02.....	82

Figure IV.12: Contournement du vent autour d'un bâtiment, Beranek; 1984, source (cours vent et ventilation Master STEU, Olivier Flamand).....	83
Figure IV.13 : le vent autour d'un seul obstacle parallélépipédique.....	83
Figure IV.14 : Sinuosité directionnelle.....	84
Figure IV.15 : comparaison entre la méthode de squelettisation et la géométrie du vide.....	84
Figure IV.16 : effet de coin (Gandemer et al 1976).....	85
Figure IV.17 : effet de canalisation et effet de coin.....	85
Figure IV.18 : Disposition des points de mesure de la vitesse moyenne simulée.....	86
Figure IV.19 : Variation de la vitesse moyenne du vent en fonction du coefficient de sinuosité.....	86



## Bibliographie

**Acte de colloque, XVIII colloque international de climatologie, Climat Ubrain et Ville et Architecture** (11 Septembre 2005).

**Abdeljaoued, M.** " Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques Cas d'étude : ville d'Annaba", Magistère, Architecture, forme, ambiances, et développement durable, Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider – Biskra, (2014), Algérie.

**Adolphe, L.** Modelling the link between built environment and urban climate : Towards simplified indicators of the city environment., The 7th IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brasil, August 13 - 15, (2001).

**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, 28 (2001) 183 - 200.

**Ameur, K. A.** Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans l'espaces publics urbains : Validation d'un système d'indicateurs « morphologiques » et d'indicateur de confort , Thèse de Doctorat, Discipline : Mécanique, Thermique et Génie Civil Spécialité : Science pour l'ingénieur option Architecture.

**Asimakopoulos, D. N., Asimakopoulos, V.D., Chrisomallidou, N., Klitsikas, N., Mangold, D., Michel, P., Santamouris, M. et Tsangrassoulis, A.** Energy and climate in the urban built environment. Ed.Santamouris, (2001).

**Banzo, M.** L'espace ouvert pour une nouvelle urbanité, Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Volume 3, Pessac, (2009).

**Benzerzour, M.** Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique", Thèse de Doctorat (2004), Discipline : Mécanique, Thermique et Génie Civil Spécialité : Science pour l'ingénieur option Architecture.

**Beranek, W. J.** Wind environment around single buildings of rectangular shape. Heron 29 (1984a), 4-31.

**Beranek, W. J.** Wind environment around buildings configurations. Heron 29 (1984b), 33-70.

**Bouketta S. et Bouchahm, Y.** L'effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et la ventilation naturelle extérieure, Energies Renouvelables 15N°4 (2012) 639-659.

**Boussoualim, A.** Incidence des caractéristiques microclimatiques sur l'usage et les activités en espace public extérieur : étude de cas à Blagnac, Thèse de doctorat (2002), Toulouse, France.

**Bouyer, J.** Modélisation et simulation des microclimats urbains - Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, Université de Nantes (2009).

**Brown R.D. et Gillespie, Terry J.** Microclimatic Landscape Design creating thermal comfort and Energy Efficiency. Ed. John Wiley & Sons, 1995.

**Brophy, V., O'Dowd, C., Bannon, R., Goulding, J. et Lewis, J.** Sustainable urban design. Energy Research Group, with the support of the European Commission, Directorate-General Energy and Transport (2000).

**Daas, N.** Etude morphologique des agglomérations vernaculaires aurassiennes, Mastère de recherche, Département d'Architecture, Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture, Université Hadj Lakhdar De Batna, Alger, 2013.

**Gandemer, J. et Guyot, A.** Intégration du phénomène du vent dans la conception du milieu bâti, Guide méthodologique et conseils pratiques. Paris : Ministère de l'équipement (1976).

**Grimmond, C. S. B., et Oke, T. R.** Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *Journal of applied meteorology*, 38 (1999) 1262-1292.

**Grundström, K., Johansson, E., Mraissi, M., Ouahrani, D.** Climat and urbanisme, la relation entre le confort thermique et la forme du cadre, Report 8, Projet de coopération Université de Lund, Suède - LPEE, Maroc, (2003).

**Hallez, S., Thiessen, L., Derouane, A. et Verduyn, G.** L'influence du vent et de la température sur les concentrations en Pb dans l'air urbain. I. Cas d'un site situé sous l'influence directe du trafic intense. *The Science of the Total Environment*, 86 (1989) 265-271.

**Holland, D., Berglund, J., Spruce, J. et Mckellip, R. D.** Derivation of Effective Aerodynamic Surface Roughness in Urban Areas from Airborne Lidar Terrain Data *Journal of applied meteorology and climatology* 47(2008).

**Johansson, E.** Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco, *Building and Environment* 41 (2006) 1326 - 1338.

**Johansson, L.** Modeling near ground wind speed in urban environments using high-resolution digital surface models and statistical methods, Master thesis, Department of Physical geography and Ecosystems science, Lund University (2012).

**Johansson, E.** Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates - studies in Fez and Colombo. PhD Thesis, Housing Development & Management, Lund University, Lund, Sweden, (2006).

**Kim, B-G., Changhoon, L., Seokjun, J., Ki-Cheol, R., Kim, S., Donghyun You et Shim, W-S.** Estimation of Roughness Parameters Within Sparse Urban-Like Obstacle Arrays, Springer Science+Business Media B.V. (2011)

**Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. et Schultz-Granberg, J.** City and wind Climate as an Architectural Instrument. Ed. DOM publishers, (2014).

**Kushol, S. A. S., Ahmed, K. S., Hossain, M.Z. et Rahman, I.** Effect of Street Morphology on Microclimate in Residential , Areas Following FAR Rule in Dhaka City. **PLEA 2013 - 29th Conference**, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany 10-12 September (2013).

**Macdonald, R. W., Griffiths R. F. et Hall, D. J.** An improved method For the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmospheric Environment* 32 (1998) 1857-1864.

**Marshall, S.** Streets and Patterns. Ed. Routledge,(2004).

- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B. et Carmeliet, J.** Urban physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand, *Frontiers of Architectural Research* 1 (2012), 197-228.
- Nakamura, Y. et Oke, T.** "Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon," *Atmospheric Environment* vol. 22, pp. 2691-2700, 1988.
- Oke, T. R.** *Boundary layer climates*, 2<sup>d</sup> ed., University press, Cambridge (1987).
- Oke, T.R.** Street design and Urban Canopy layer climate, *Energy and Buildings* 11 (1988) 103-113.
- Ouameur, F.** Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics, Etude comparative en trois tissus urbains de la ville de Québec. Mémoire - Maître ès Sciences, Ecole d'Architecture : Faculté d'Aménagement, d'architecture et des Arts Visuels, Université Laval Québec, (2007).
- Raimbault, M.** Caractérisation de tissus urbains par trois méthodes géométriques, DEA (1998).
- Reiter, S.** Assessing wind comfort in urban planning, *Environment and Planning B: Planning and Design* 37 (2010) 857-873.
- Rotach, M. W.** On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion, *Atmospheric Environment*, 33 (1999) 4001- 4008.
- Salat, S., Labbé, F. et Nowacki, C.** Les villes et les Formes sur l'urbanisme durable, CSTB, Laboratoire des Morphologies Urbaines, Hermann, Editeurs des sciences et des Arts (2011).
- Shishegar, N.** Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons, *Journal of Clean Energy Technologies* V 1 (2013)
- Strawbridge, K.B. et Snyder, B.J.** Planetary boundary layer height determination during pacific 2001 using the advantage of scanning lidar instrument, *Atmospheric Environment*, 38 (2004) 5861- 5871
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I. et Asimakopoulos, D.** "Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions," *Atmospheric Environment*, vol. 33, (1999), pp.4503-4521.
- Sarradin, F.** Analyse morphologique des espaces ouverts urbains le long de mesure des variations des formes de ciel par la squelettisation. **Université de Nantes, 2004.**
- SzÚcsn, A.** Wind comfort in a public urban space: Case study within Dublin Docklands, *Frontiers of Architectural Research* 2 (2013), 50-66.
- Todhunter, P. E.** "Microclimatic Variations Attributable to Urban Canyon Asymmetry and Orientation," *Physics and Geography*, vol. 11, pp.131-141, (1990).
- Wang, B.** Les Impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent : Performance énergétique éolienne à l'échelle du quartier, Thèse de doctorat (2015).
- Wisse, J. A., Verkaik, J.W. et Willemsen, E.** Climatology aspects of a wind comfort cod. In 12th International conference. *Wind.Eng* (121 CWE). Cairns, Australia, (2007).

**Zhang, A., Cuilan, G. et Zhan, L.** Numerical simulation of the wind field around different building arrangements, *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics* 93 (2005) 891-904.

**Zekri, E.** Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain, Thèse de doctorat (2010).