

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Architecture
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en : Architecture

Option : Architecture, Formes, Ambiances et Développement durable

**Les caractéristiques morphologiques du milieu urbain
en relation avec le microclimat et le confort thermique
des usagers en espaces extérieurs
en référence au régions arides et semi arides**

Présenté par :

GRIRA Abdelhakim

Sous la direction du :

Pr. MAZOUZ Saïd

Soutenu publiquement le 19/06/2017

Devant le jury composé de :

Pr. BELAKEHAL Azzedine
Pr. MAZOUZ Saïd
Pr. MOUMMI Abdelhafid

Professeur
Professeur
Professeur

Président
Rapporteur
Examineur

Université de Biskra
Université de Oum El Bouaghi
Université de Biskra

Dédicace

J'aimerais dédier ce travail :

À mes parents à qui je dois tout.

À ma femme et mes enfants, pour le soutien et la patience sans faille.

Je leur en serais éternellement reconnaissant.

Remerciements

En premier lieu, je remercie infiniment mon directeur de recherche, le professeur Saïd MAZOUZ, pour son aide précieuse à l'élaboration de cette mémoire. Nous avons apprécié l'étendue de vos connaissances en Architecture durant tout notre cursus universitaire. Vos orientations ont toujours été riches et fructueuses et m'ont souvent permis d'arrêter les choix stratégiques. Veuillez trouver ici l'expression de notre respect et notre sincère reconnaissance.

Je tiens aussi à remercier Messieurs les membres de jury : Pr BELAKHAL Azzedine et Pr MOUMI Abdelhafid. C'est un honneur pour moi de recevoir leurs analyses et leurs critiques.

Mes profonds remerciements et tous mes respects à tous mes enseignants de ma première année du magister : Pr ZEMMOURI Noureddine, Dr MOUMI Abdelhafid, Dr BENABBAS Moussadek, Pr FARHI Abdellah, Pr KAZAR Okba, Dr BENSACI Abdelkader, Dr BELAGOUN.

Mes remerciements vont aussi à tous les amis du poste graduation avec qui j'ai partagé de nombreux bons moments au cours de l'année théorique.

Je tiens à remercier ma famille et ma belle famille pour leur soutien indéfectible. Je suis reconnaissant pour votre présence, vos encouragements, et pour n'avoir jamais cessé de croire en moi.

Je suis particulièrement reconnaissant à tous ceux qui de loin ou de près ont contribué directement ou indirectement à l'accomplissement de cette recherche.

ملخص

تتميز مدننا بمناخات محلية خاصة ناجمة عن تأثير بعض متغيرات الأماكن العمرانية (الخصائص الهيكلية والمورفولوجية) في تغيير معالم المناخ (الرياح ، درجات الحرارة والرطوبة)، مما يؤثر على الرفاهية الحرارية لمستخدمي الأماكن الخارجة. إضافة إلى ذلك، فالمعطيات المناخية تعرض بطرق مختلفة جدا في النسيج الحضري، م ذلك وفقا لاستخدام و شغل الأراضي، أو للخصائص المورفولوجية العمرانية. هذه الخصائص تتعلق بالشكل بالشكل العمراني في مجمله، كذلك الترتيبات الشكلية، إلى جانب الخصائص الحرارية للمواد المكونة لهذه الأشكال . لتحقيق الهدف الرئيسي لبحثنا، و المتمثل في تحديد تأثير الشكل العمراني على متغيرات المناخ المحلي في المناطق العمرانية ، و التي بدورها تؤثر الرفاهية الحرارية لمستخدمي الأماكن الخارجة ، عاجلنا بيانات الإشعاع الشمسي و تدفق الرياح في التحسين والتعديل المناخي للنسيج الحضري في سياق مناخ حار وجاف. في هذه الدراسة استخدمنا المحاكاة الرقمية، وذلك باستخدام برنامج SOLENE و CFD للتنبؤ بتدفق الإشعاع الشمسي و كذلك حركة الرياح على ثلاثة أنماط للمربع الحضري قيد الدراسة تقع في منطقة التوسع الشمالي من مدينة بسكرة. قمنا بربط نتائج هذه الدراسة مع دراسة المؤشرات المورفولوجية التي أجريت بالموازاة وذلك للتحقق من مدى ارتباط طريقة ترتيب المباني في المربعات الحضرية، في التغيرات التي قد تحدث فيما يتعلق بالأشعة الشمسية، وكذلك على حركة الرياح وتحسين ظروف التهوية في المناطق العمرانية. نتائج هذا البحث مكنت من اقتراح بعض التوصيات التي قد تساعد في تطوير المبادئ التوجيهية والمعايير، والمساعدة في بناء بعض مفردات التصميم المعماري و العمراني.

كلمات البحث :

المورفولوجية العمرانية ، مربع حضري ، مناخ محلي ، الرفاهية الحرارية لمستخدمي الأماكن الخارجة ، المحاكاة الرقمية.

Résumé

Nos villes sont caractérisées par des microclimats spécifiques, dû à l'influence de certains paramètres du milieu urbain (les caractéristiques structurelles et morphologiques) qui modifient les paramètres climatiques (le vent, la température ambiante et radiante ainsi que l'humidité de l'air), affectant ainsi le confort thermique de l'espace extérieur. Ainsi, les données climatiques sont présentées de manières très différentes dans le tissu urbain, selon les différentes formes d'utilisation et l'occupation des terres, ou plutôt, selon les attributs de la morphologie urbaine. Ces attributs correspondent à la fois à la forme urbaine dans son ensemble, que les arrangements morphologiques, outre les caractéristiques thermodynamiques des matériaux constitutifs de ces morphologies.

Pour répondre à l'objectif central de notre recherche qui est la quantification de l'impact de la forme urbaine sur les paramètres du microclimat urbain affectant le confort du milieu extérieur, nous avons traité l'utilisation des données de rayonnement solaire et de l'écoulement du vent dans l'amélioration et la régulation climatique du tissu urbain dans un contexte de climat chaud et sec. Dans cette recherche des simulations numériques, à l'aide du logiciel SOLENE et CFD, pour prédire le rayonnement solaire incident et l'écoulement du vent sur trois typologies représentatives de l'îlot urbain situées dans la zone d'extension nord de la ville de Biskra. Les résultats de cette étude ont été corrélés avec ceux de l'étude des indicateurs morphologiques menée en parallèle pour vérifier la dépendance ou l'indépendance du mode de l'agencement des bâtiments dans l'îlot urbain sur l'ensoleillement, ainsi que sur l'écoulement du vent et l'amélioration de la ventilation urbaine. Les conclusions de cette recherche ont abouti à l'élaboration de quelques recommandations qui devrait contribuer à concevoir des lignes directrices et des critères, et aider à établir un vocabulaire de conception architecturale et urbaine.

Mots clés :

Morphologie urbaine, îlot urbain, microclimat urbain, confort thermique extérieur, simulations numériques.

Abstract

Our cities are characterized by specific microclimates due to the influence of certain parameters of the urban environment (structural and morphological characteristics) that change climate parameters (wind, ambient and radiant and the humidity), affecting the thermal comfort of the outdoor space. Thus, climate data are presented in very different ways in the urban fabric, according to different forms of use and occupation of land, or rather, according to the attributes of the urban morphology. These attributes correspond to both the urban form as a whole, that morphological arrangements, besides the thermodynamic characteristics of the materials of these morphologies.

To meet the central objective of our research is to quantify the impact of urban form on the parameters of urban microclimate affecting the comfort of the external environment; we processed the use of solar radiation data and the wind flow in improving and climate regulation of the urban fabric in a hot, dry climate context. In this study, numerical simulations, using the SOLENE and CFD software's to predict the incident solar radiation and wind flow on three representative typologies of urban island located in the northern extension area of the city Biskra. The results of this study were correlated with those of the study of morphological indicators conducted in parallel to check the dependence or independence of the mode of arrangement of buildings in the urban island of sunshine, as well as on 'wind flow and improving urban ventilation. The findings of this research led to the development of some recommendations which should help to develop guidelines and standards, and help build an architectural and urban design vocabulary.

Keywords:

Urban morphology, urban island, urban microclimate, outdoor thermal comfort, numerical simulations.

SOMMAIRE

	DEDICACE	II
	REMERCIEMENTS	III
	RESUME	IV
	SOMMAIRE	VII
	Liste des figures	XIX
	Liste des tableaux	XIV
I.	INTRODUCTION	1
II.	LE CONTEXTE D'ETUDE	1
III.	PROBLEMATIQUE	3
IV.	OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	3
V.	QUESTIONS DE RECHERCHE	4
VI.	HYPOTHESE	5
VII.	L'ANALYSE CONCEPTUELLE	5
VIII.	METHODOLOGIE	6
IX.	LA STRUCTURE DE LA MEMOIRE	6
	CHAPITRE 1 : LE CONFORT THERMIQUE	
1.1	INTRODUCTION	9
1.2	DEFINITIONS	9
1.3	LES PARAMETRES DU CONFORT THERMIQUE	10
1.3.1	RELATIFS A L'ENVIRONNEMENT	11
1.3.1.1	Température de l'air	12
1.3.1.2	Température moyenne radiante	12
1.3.1.2.1	Détermination de TMR par des mesures avec un thermomètre à globe	13
1.3.1.2.2	Détermination de TMR par des mesures de rayonnement intégrales	14
1.3.1.3	Humidité de l'air	15
1.3.1.4	Vitesse de l'air	16
1.3.2	RELATIFS A L'INDIVIDU	17
1.3.2.1	Mécanismes de thermorégulation	17
1.3.2.1.1	Le métabolisme et les échanges thermiques	18
1.3.2.2	Les vêtements	20
1.4	EVALUATION ET ANALYSE DU CONFORT THERMIQUE	21
1.4.1	LES INDICES DU CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR	21
1.4.1.1	La température perçue PT	22
1.4.1.2	La température physiologique équivalente PET	23
1.4.1.3	Indice thermique universel du climat UTCI	24
1.4.1.4	L'indice de température standard effective en espaces extérieurs (OUT_SET*)	25
1.5	NOTION D'ADAPTATION	26
1.5.1.1	Adaptation physique	26
1.5.1.2	Adaptation physiologique	26
1.5.1.2	Adaptation psychologique	27
1.5	CONCLUSION	27
	CHAPITRE 2 : LA MORPHOLOGIE URBAINE	
2.1	INTRODUCTION	29
2.2	DEFINITIONS	29
2.3	ANALYSE DE LA MORPHOLOGIE URBAINE	30
2.3.1	STRUCTURE URBAINE	30
2.3.1.1	LES VOIES	32
2.3.1.2	LE MAILLAGE	33
2.3.1.3	TYPES ET CARACTÉRISTIQUES DES RUES	34
2.3.1.3.1	Caractéristiques des rues	34
2.3.1.3.1.1	Le profil en travers	34
2.3.1.3.1.2	La largeur	34
2.3.1.3.1.3	L'alignement	35
2.3.1.3.1.4	Le prospect	35

2.3.1.3.1.5	Le rapport chaussée – trottoir	35
2.3.1.3.1.6	Le profil en long et l'élévation	35
2.3.1.3.1.7	La végétation	36
2.3.1.3.2	Types de rues	36
2.3.1.3.2.1	Les rues principales ou artérielles	36
2.3.1.3.2.2	Les rues ordinaires ou de desserte	36
2.3.1.3.2.3	Les ruelles et les impasses ou voies de distribution	36
2.3.1.4	LES QUARTIERS	37
2.3.1.5	ILOTS ET LOTISSEMENT	37
2.3.1.5.1	Enveloppe de l'îlot	37
2.3.1.5.2	Structure de l'îlot	38
2.3.1.5.3	La géométrie	38
2.3.1.5.4	La taille et usage	39
2.3.1.5.5	Le degré d'ouverture	39
2.3.1.6	LES NOEUDS ET ESPACES LIBRES	39
2.3.1.6.1	Les places	39
2.3.1.6.3	Les cours	42
2.3.2	LES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES	42
2.3.2.1	INDICATEURS THERMO-RADIATIFS	42
2.3.2.1.1	Le facteur de vue de ciel	42
2.3.2.1.2	La durée d'ensoleillement	45
2.3.2.1.3	Le rapport H/W	45
2.3.2.1.4	La densité du bâti	48
2.3.2.1.5	L'albédo des surfaces	49
2.3.2.2	LES INDICATEURS AERAULIQUES	51
2.3.2.2.1	La densité du tissu urbain	51
2.3.2.2.2	La porosité du tissu urbain	51
2.3.2.2.3	Nature de l'agencement	52
2.4	IMPACTS DE LA MORPHOLOGIE SUR LE CONFORT	53
2.5	CONCLUSION	59
	CHAPITRE 3 : CLIMAT ET MICROCLIMAT URBAIN	
3.1	INTRODUCTION	61
3.2	DEFINITIONS	61
3.3	LES ZONES CLIMATIQUES	62
3.4	CLASSIFICATION DU CLIMAT	62
3.5	ECHELLES DU CLIMAT	63
3.5.1	Le macroclimat	63
3.5.2	Le méso climat	64
3.5.3	Le microclimat	64
3.6	FACTEURS ET ELEMENTS DU CLIMAT	64
3.6.1	LES FACTEURS CLIMATIQUE	65
3.6.1.1	Les facteurs cosmiques	65
3.6.1.2	Les facteurs géographiques	65
3.6.2	LES ELEMENTS DU CLIMAT	65
3.6.2.1	Le rayonnement solaire	66
3.6.2.2	La température de l'air	67
3.6.2.3	Le vent	67
3.6.2.4	La pression atmosphérique	67
3.6.2.5	Relation entre le rayonnement solaire et la température	68
3.7	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DES ZONE ARIDES ET SEMI ARIDES	69
3.7.1	L'ARIDITE	69
3.7.1.1	L'indice d'aridité	69
3.7.1.1.1	La formule de Koppen	70
3.7.1.1.2	La formule de De Martonne	70
3.7.1.1.3	La formule de Gaussen	70
3.8	LES MICROCLIMATS URBAINS	71
3.8.1	INTRODUCTION	71
3.8.2	LES ECHELLES DES MANIFESTATIONS MICROCLIMATIQUES	72
3.8.2.1	LES COUCHES ATMOSPHERIQUES	72

3.8.2.1.1	La couche limite urbaine	72
3.9	IMPACT DE LA MORPHOLOGIE SUR LE MICROCLIMAT	73
3.9.1	Bilan énergétique d'une surface urbaine	73
3.9.1.1	Le rayonnement net Q^*	73
3.9.1.1.1	Le flux solaire global incident K_S	74
3.9.1.1.2	L'albédo moyenne (α)	74
3.9.1.1.3	Le flux infrarouge atmosphérique L_{\downarrow}	75
3.9.1.1.4	Le flux radiatif ascendant L_{\uparrow}	75
3.9.1.2	Energie anthropique Q_E	75
3.9.1.3	Le flux de chaleur sensible Q_H	76
3.9.1.4	Le flux de chaleur latente Q_E	76
3.10	LES EFFETS DE LA VEGETATION EN MILIEU URBAIN	78
3.10.1	La végétation dans la composition urbaine	78
3.10.2	Effet microclimatique de la végétation en milieu urbain	78
3.11	LES EFFETS AERAIQUES EN MILIEU URBAIN	81
3.11.1	Les données de vent	81
3.11.2	Les échelles d'étude	82
3.11.3	Les effets du vent	83
3.11.3.1	Les effets mécaniques du vent	83
3.11.3.2	Les effets thermiques du vent	84
3.11.3.3	Les types d'écoulement du vent	85
3.11.3.4	L'écoulement autour de bâtiment	86
3.11.3.5	L'écoulement dans une rue	88
3.11.4	LA VENTILATION DES ZONES URBAINES	89
3.11.5	Méthodes d'analyse de l'écoulement du vent dans un milieu urbain.	94
3.11.4.1	Les mesures in-situ	94
3.11.4.2	Les tests en soufflerie	94
3.11.4.3	Les outils de simulation en dynamique des fluides (CFD)	94
3.12	LA POLLUTION URBAINE	95
3.12.1	DEFINITION	95
3.12.2	Principaux polluants et leurs effets	96
3.12.3	La dispersion des polluants	97
3.12.4	Indice de qualité de l'air	98
3.12.5	Impacts de la pollution	99
3.13	LE PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN	99
3.13.1	DÉFINITION	99
3.13.2	LES FACTEURS CAUSES	101
3.13.1.1	FACTEURS D'ORIGINE NATURELLE	103
3.13.1.1.1	La climatologie	103
3.13.1.1.2	La météorologie	103
3.13.1.1.3	La topographie	104
3.13.1.2	FACTEURS D'ORIGINE ANTHROPIQUE	104
3.13.1.2.1	Urbanisation	105
3.13.1.2.2	Albédo des matériaux et urbain	105
3.13.1.2.3	Chauffage et climatisation	105
3.13.3	IMPACTS DE L'ICU	106
3.13.3.1	Impact sur la consommation énergétique des bâtiments	106
3.13.4	EVALUATION DU PHENOMENE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN	107
3.13.5	LES STRATEGIES D'ADAPTATIONS	109
3.13.5.1	La forme urbaine	110
3.13.5.2	Le couvert naturel	112
3.13.5.3	L'Architecture	114
3.13.5.4	Matériaux de revêtement	114
3.13.6	CONCLUSION	115
CHAPITRE 4 : LES MODELS D'ANALYSE		
4.1	INTRODUCTION	117
4.2	Simulations aérauliques	117
4.2.1	Les codes CFD (Computational Fluid Dynamics)	117
4.3	Simulations radiatifs	118

4.4	CHOIX DES LOGICIELS DES SIMULATIONS	120
4.4.1	PRESENTATION DU LOGICIEL <i>PHOENICS</i>	120
4.4.1.1	Les principaux modules, pour l'entrée, traitement de données et la sortie	120
4.4.1.2	La structure de <i>PHOENICS</i>	121
4.4.1.3	Les fichiers inter-communication	122
4.4.1.4	Définition du problème dans <i>PHOENICS</i>	122
4.4.1.5	Comment <i>PHOENICS</i> rend les prédictions	122
4.4.1.6	Caractéristiques classiques de <i>PHOENICS</i>	123
4.4.1.6.1	Physique	123
4.4.1.6.2	Mathématiques	124
4.4.1.8	Mise en marche	125
4.4.2	MODELE THERMO-RADIATIF DE SIMULATION <i>SOLENE</i>	126
4.4.2.1	LES FONCTIONS DE <i>SOLENE</i>	126
4.4.2.1.1	Le projet	126
4.4.1.1.2	Les géométries	127
4.4.1.1.3	Les types de ciel	127
4.4.1.1.4	Les descripteurs	127
4.4.1.1.5	Les matériaux	128
4.4.2.2	LES APPLICATIONS DE <i>SOLENE</i>	128
4.4.2.2.1	LA SIMULATION SOLAIRE	129
4.4.2.2.1.1	Simulation des flux solaires direct et diffus incidents	129
4.4.2.2.1.2	Simulation des inter-réflexions solaires et du bilan radiatif	130
4.4.2.2.1.3	Calcul des facteurs de forme	131
4.4.2.2.1.4	Simulation énergétique ou thermo radiative	131
4.4.2.3	Les entrées de la simulation	131
4.5	CONCLUSION	131
	CHAPITRE 5 : PRESENTATION DU CAS D'ETUDE	
5.1	PRESENTATION DE LA VILLE DE BISKRA	134
5.1.1	SITUATION ET DONNEES CLIMATIQUES	134
5.1.1.1	Classification climatique	135
5.1.1.2	Données météorologiques	136
5.1.1.2.1	Température de l'air	136
5.1.1.2.2	Ensoleillement	137
5.1.1.2.3	Type de ciel	138
5.1.1.2.4	Humidité relative	140
5.1.1.2.5	Les vents	140
5.1.1.2.6	Pluviométrie	143
5.1.1.3	Synthèse	144
5.2	LE CADRE D'ETUDE	145
5.2.1	Présentation du pos extension nord	146
5.2.1.1	Situation	146
5.2.2	Critères de choix	147
5.2.3	Corpus d'étude	147
5.2.4	Analyse typo-morphologique	148
5.2.4.1	Le maillage	148
5.2.4.2	Classification	150
5.2.4.3	Typologie des ilots	153
5.2.4.4	Choix des typologies représentatives	154
5.2.4.5	Analyse typo-morphologique des ilots représentatifs	156
5.2.5	Corpus théorique	158
5.2.5.1	Formulation du corpus théorique	159
5.2.6	CHOIX DES INDICATEURS MORPHOLOGIQUE	163
5.2.6.1	Le facteur de vue de ciel	163
5.2.6.2	Le rapport H/W	165
5.2.6.3	La densité	165
5.2.6.4	La porosité du tissu urbain	166
5.3	CONCLUSION	168
	CHAPITRE 6 : MODELISATION NUMERIQUE	
6.1	INTRODUCTION	171

6.2	SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT DU VENT	171
6.2.1	Les conditions de la simulation	171
6.2.1.1	6.2.1.1 La période des simulations	171
6.2.1.2	Vitesse et direction du vent	171
6.2.1.3	Création du domaine	172
6.2.1.4	Le modèle de turbulences	172
6.2.1.5	Modélisation de la géométrie	173
6.2.2	Analyse des résultats de l'écoulement du vent pour les trois typologies	173
6.2.3	ANALYSE DES EFFETS	179
6.2.3.1	Effets de « Ouverture /Fermeture » de l'ilot	179
6.2.3.2	Effets du rapport d'aspect (H/W)	193
6.2.3.3	Effets de l'orientation des bâtiments	195
6.2.4	Synthèse de l'analyse de l'écoulement du vent	197
6.3	SIMULATION DE L'ENSOLEILLEMENT	198
6.3.1	Définition des paramètres d'entrée	198
6.3.1.1	Les paramètres d'environnement	198
6.3.1.2	Période des simulations	198
6.3.1.2	Le type de ciel	198
6.3.1.3	La géométrie	199
6.3.1.4	Affectation des matériaux	199
6.3.2	Calcul du facteur de ciel vu	201
6.3.3	Calcul de la durée d'ensoleillement	203
6.3.4	Calcul de l'énergie solaire globale	204
6.3.5	ANALYSE DES EFFETS	206
6.3.5.1	Effets de « Ouverture /Fermeture » de l'ilot	206
6.3.5.2	Effets du rapport d'aspect (H/W)	216
6.3.5.3	Effets de l'orientation des bâtiments	217
6.3.6	6.3.6 Synthèse de l'analyse de l'ensoleillement	218
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	219
	Bibliographie	226
	Annexes	235

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 :	Les différents paramètres déterminant le confort thermique. Source : http://www.energieplus-lesite.be	11
Figure 1.2 :	Thermomètre 38 mm plat globe gris. Thorsson et al, (2007).	14
Figure 1.3 :	Menus de la fenêtre de rayman 1.3 permettant l'importation et l'exportation de structures urbaines pour le calcul de la température moyenne de rayonnement TMR et indices thermiques. Source : Matzarakis et al., (2000).	15
Figure 1.4 :	Les composantes du bilan énergétique humain. (Houghton, 1985), adopté de, Toudert, (2005).	18

CHAPITRE 2

Figure 2.1:	Le tissu: Le Caire, centre ancien. (CEAA, Ville orientale / LADHAUS). Penarai, (2009).	31
Figure 2.2 :	Les cinq éléments de la forme urbaine perçue selon K.Lynch.	32
Figure 2.3 :	Le système du maillage. Penarai, (2009).	34
Figure 2.4 :	Caractéristiques formelles de la rue. Tiraoui, (2000).	35
Figure 2.5 :	L'exemple d'enveloppes d'îlot, Tuan Anh NGUYEN, (2007).	38
Figure 2.6 :	Quelques formes de place. Allain, (2004)	40
Figure 2.7:	L'orientation de la place. Source : http://www.espaces-publics-places.fr	41
Figure 2.8 :	Caractéristiques formelles d'un espace en forme de « U ». Source : Tiraoui, (2000).	41
Figure 2.9 :	Facteur de vue dans un canyon symétrique. Source: Parmentier, (2010); adoptée de Oke, (1981).	43
Figure 2.10:	Influence des surfaces horizontales (à gauche) et alambiquées (à droite) avec des valeurs différentes du SVF, sur les flux de rayonnement. Source, Oke, (1987)	43
Figure 2.11:	la relation entre le facteur de vue du ciel et le pourcentage de périodes de confort. Source : Tzu-Ping et al, (2010). Adopté de, Athamnia, (2012)	44
Figure 2.12:	Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon (Bougiatioti, 2006).Adopté de (ATHAMNIA 2012).	46
Figure 2.13:	Les points des mesures dans la rue et au-dessus du toit pour le canyon peu profond (A), et canyon profond (B). Johansson, (2006).	47
Figure 2.14:	3 formes bâties pour un même CES = 0,5.Musy, (2006).	49
Figure 2.15:	Divers albédos de la ville. Source : Colombert, (2008).	50
Figure 2.16:	Quelques effets aérodynamiques du vent : (a) effet venturi, (b) effet de maille, (c) effet de barre, (c) effet de passages sous les immeubles (Gandemer, 1976).Cité par Athamnia, (2012).	53

CHAPITRE 3

Figure 3.1	(a) L'importance de la courbure de la terre par rapport à la répartition de la chaleur sur le globe ; (b) zones climatiques générales.. Source: http://www.climatechallenge.be	62
Figure 3.2	Zones climatiques du monde. Source : http://fr.mapsofworld.com	63
Figure 3.3:	l'absorption, la réflexion et la diffusion de la radiation solaire par l'atmosphère terrestre. Source : Pidwirny Michael, (1999).	66
Figure 3.4 :	Variation horizontale de la pression atmosphérique. Source : http://www.meteofrance.fr	68
Figure 3.5 :	Température moyenne en fonction de l'irradiation globale. Source : http://planet-terre.ens-lyon.fr	69
Figure 3.6:	Paramètres qui font le climat urbain, Auteur: Sebastian Wypych source: http://klimat.czn.uj.edu.pl	71
Figure 3.7:	Diagramme des liens entre les caractéristiques de la surface urbaine, les processus et les caractéristiques du climat urbain.	71

	Source : Pigeon, (2007).	
Figure 3.8:	Représentation des trois échelles utilisées dans la climatologie urbaine. Source : Oke, (1997).	72
Figure 3.9:	La composition de la couche limite urbaine. Britter et Hanna, (2003).	72
Figure 3.10:	Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain Oke, (1987).	73
Figure 3.11:	Les différences de bilans radiatifs et énergétiques entre le jour et la nuit. Oke, (1987).	74
Figure 3.12:	Rôle de la géométrie de la surface dans l'échange radiatif. Source : Oke (1987).	75
Figure 3.13:	Modification de l'espace grâce à : (à gauche) l'espacement entre les arbres ; (à droite) la forme des arbres. Larue, (1996). Adopté de Vinet, (2000).	78
Figure 3.14:	Comportement spécifique de la végétation par rapport au rayonnement solaire et terrestre. Source : (CEE 1992) adopté de Reiter, (2007).	80
Figure 3.15:	Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain. Source : APUR (2012). Adopté de De Munck, (2013).	80
Figure 3.16:	Ecoulement de l'air lié à la végétation et aux mouvements du terrain (Gandemer & Guyot 1981). Adopté de Reiter, (2007).	81
Figure 3.17:	L'utilisation de la végétation comme guide aéraulique. Source : Reiter, (2007).	81
Figure 3.18:	Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces. Source : Chatelet et al., (1998), adopté de, Colombert, (2008).	82
Figure 3.19:	Profil moyen de la vitesse horizontale du vent en site homogène et en site urbain. Plate, (2001). Adopté de Bozonnet, (2008).	83
Figure 3.20:	Zones de confort pour des conditions extérieures. Source: Penwarden, (1973).	85
Figure 3.21:	Types d'écoulement du vent. Source : http://pierre.garde.free.fr	85
Figure 3.22:	Les lignes de courant et les zones d'écoulement. Source : Halistky (1963), cité par Kitous, (2012).	85
Figure 3.23:	Écoulements autour d'un bâtiment. Source : Gandemer, (1976).	85
Figure 3.24:	Les trois régimes d'écoulements dans les rues canyons pour différents prospects et pour un vent incident perpendiculaire. Source : Oke, (1988).	88
Figure 3.25:	Comparaison de l'environnement du vent (à 10 m) avant et après optimisation (à gauche: avant l'optimisation, à droite: après l'optimisation). Source : Guo, F et al, (2015).	91
Figure 3.26:	Directions du vent. Source : Chaves D, et al. (2015).	91
Figure 3.27:	Breezeway / Air path. Source : NG, E, 2007.	92
Figure 3.28:	Orientation des rues. Source : NG, E, 2007.	92
Figure 3.29:	La liaison des espaces ouverts. Source : NG, E, 2007.	93
Figure 3.30:	Sites de bord de mer. Source : NG, E, 2007.	93
Figure 3.31:	Hauteurs des constructions. Source : NG, E, 2007.	93
Figure 3.32:	Processus de simulation des facteurs physiques. Zekri, (2010)	95
Figure 3.33:	Relation émissions et immissions. Source : http://www.mtaterre.fr	96
Figure 3.34:	Emissions, transformation et dépôts de polluants. Source: http://www.sante-environnement-travail.fr	97
Figure 3.35:	Présentation schématique de la méthodologie générale utilisée pour la modélisation de la dispersion de polluants atmosphériques. Source : http://www.aria.fr	98
Figure 3.36:	L'observation de différences positives entre les températures de l'air mesurées en site urbain et celles des campagnes environnantes. Source : http://www.cnrm-game-meteo.fr	100
Figure 3.37:	Schéma de l'effet d'îlot de chaleur urbain (Source Descartes, 2009). Source: http://www.notre-planete.info	100
Figure 3.38:	Facteurs naturels et humains contribuant à la formation d'un ICU. Source : Dubois, (2014).	102

Figure 3.39:	Bilan thermique sur une surface. Source : Marjory, 2007.	102
Figure 3.40:	Exemple d'un bilan énergétique sur une journée. Source :Brutsaert, (1982), adopté de Marjory, 2007.	103
Figure 3.41:	Écoulement des vents autour d'une ville. Source : http://thebritishgeographer.weebly.com/urban-climates.html	104
Figure 3.42:	Amplification de l'îlot de chaleur. Bozonet, (2011)	106
Figure 3.43:	Ensemble des actions et techniques disponibles pour augmenter la capacité d'adaptation d'une ville aux fortes températures. Source: Shaw et al., (2007). Adopté de Honjo, (2012).	111
Figure 3.44:	L'influence des surfaces d'eau sur la température de l'air. Reiter, (2007).	113
Figure 3.45:	Contributions potentielles du couvert naturel à la mise en œuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ». Source : Dubois, (2014).	114

CHAPITRE 4

Figure 4.1:	un schéma des trois principales fonctions de PHOENICS. Source : CHAM Rapport technique: TR 001. 2005	121
Figure 4.2:	la géométrie ciel dans Solene. Source : Groleau, (2000).	127
Figure 4.3:	Bilan radiatif sur un élément de surface i. Sa radiativité est égale à l'émission directe de la surface augmentée de la partie réfléchie de l'irradiation Miguet, (2000), adopté de Bouyer, (2009).	130

CHAPITRE 5

Figure 5.1:	Carte des divisions administrative d'Algérie, source : https://www.populationdata.net	133
Figure 5.2:	La moyenne quotidienne minimale (bleu) et maximale (rouge) la température avec des bandes percentile (bande intérieure du 25 au 75eme percentile, bande extérieure du 10 au 90eme percentile). Source : https://weatherspark.com	136
Figure 5.3:	La fraction moyenne du temps passé à différentes plages de température. Source : https://weatherspark.com	137
Figure 5.4:	Heures quotidiennes de lumière du jour et Twilight. Source : https://weatherspark.com	138
Figure 5.5 :	Couverture moyenne des nuages. Source : https://weatherspark.com	139
Figure 5.6:	La fraction du temps passé dans chacune des catégories de couverture du ciel. Source : https://weatherspark.com	139
Figure 5.7:	Types de ciel dominant pour la région de Biskra, (Période entre 1996-2000). Source : http://www.satel-light.com	140
Figure 5.8:	L'humidité relative : La moyenne quotidienne maximale (bleu) et minimale (brun). Source : https://weatherspark.com	140
Figure 5.9	(a) : Roses mensuelles des vents -(b) : Rose annuelle des vents. Ville de Biskra. Source : https://windfinder.com	141
Figure 5.10	Statistiques de vent de Biskra. Source : https://windfinder.com	142
Figure 5.11:	fraction du temps passé avec le vent soufflant dans les différentes directions sur l'année. Source : https://weatherspark.com	142
Figure 5.12:	Vitesse du vent La moyenne quotidienne maximale (vert) et minimale (rose). Source : https://weatherspark.com	143
Figure 5.13	Probabilité de précipitations. Source : https://weatherspark.com	144
Figure 5.14:	Le diagramme d' Olgay. Source : Daich, (2011)	144
Figure 5.15:	Plan de situation de la zone d'extension nord de la ville de Biskra, extrait de la carte d'état majeure de la ville de Biskra N°320. Source :(DUC Biskra).	146
Figure 5.16:	Carte topographique de la partie nord de la ville de Biskra. Source : http://fr-ch.topographic-map.com	147
Figure 5.17:	Représentation schématique du réseau viaire, (POS 01 de la zone d'extension nord de la ville de Biskra). Source : l'auteur, (2016).	149
Figure 5.18:	Vue en 3D du POS 01, extension nord de la ville de Biskra. Source : l'auteur, (2016).	154
Figure 5.19:	Typologies d'îlots urbains de référence. Source : l'auteur, (2016).	155
Figure 5.20:	Résultats de la formulation du corpus théorique « type A » ; Source	160

	: l'auteur, (2016).	
Figure 5.21:	Résultats de la formulation du corpus théorique « type B » ; Source : l'auteur, (2016).	161
Figure 5.22:	Résultats de la formulation du corpus théorique « type C » ; Source : l'auteur, (2016).	161
Figure 5.23:	Représentation graphique du lien entre la durée d'ensoleillement et le facteur de ciel vue. Source : l'auteur, (2016)	164
Figure 5.24:	Représentation des facteurs de vue de ciel pour toutes les variantes du type A. Source : (Auteur, 2016).	164
Figure 5.25:	Représentation des facteurs de vue de ciel pour toutes les variantes du type B. Source : (Auteur, 2016).	164
Figure 5.26:	Représentation des facteurs de vue de ciel pour toutes les variantes du type C. Source : (Auteur, 2016).	164
Figure 5.27:	Représentation graphique du rapport d'aspect pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).	165
Figure 5.28:	Représentation graphique de la densité surfacique pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).	166
Figure 5.29:	Représentation graphique de la densité volumique pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).	166
Figure 5.30:	Représentation graphique de la porosité pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).	167
Figure 5.31:	Représentation graphique de la porosité pour les variantes du type A. Source : (Auteur, 2016).	167
Figure 5.32:	Représentation graphique de la porosité pour les variantes du type B. Source : (Auteur, 2016).	168
Figure 5.33:	Représentation graphique de la porosité pour les variantes du type C. Source : (Auteur, 2016).	168
CHAPITRE 6		
Figure 6.1 :	(a)Vitesse du vent ; (b) Rose annuelle du vent. Source : https://weatherspark.com	171
Figure 6.2:	Taille du domaine et nombre des cellules de maillage. Source : l'auteur, (2016).	172
Figure 6.3:	Importation de la géométrie (STL File). Source : l'auteur, (2016).	173
Figure 6.4:	Simulation des écoulements du vent pour les trois ilots à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	174
Figure 6.5:	Simulation des écoulements du vent pour l'îlot A, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	175
Figure 6.6 :	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot A, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	175
Figure 6.7:	Simulation des écoulements du vent pour l'îlot B, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	176
Figure 6.8:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot B, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	177
Figure 6.9:	Simulation des écoulements du vent pour l'îlot C, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	178
Figure 6.10:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot C, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	178
Figure 6.11:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les trois ilots. Source: l'auteur, (2016).	179
Figure 6.12:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type A (Classe n1), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	180
Figure 6.13:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type A (Classe n1), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	180
Figure 6.14:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les ilots. Source: l'auteur, (2016).	181
Figure 6.15:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de	182

	type A (Classe n2), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	
Figure 6.16:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type A (Classe n2), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	182
Figure 6.17:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	183
Figure 6.18:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type A (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	183
Figure 6.19:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type A (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	184
Figure 6.20:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	184
Figure 6.21:	Simulation des écoulements du vent pour variante de type A (Classe np), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	185
Figure 6.22:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type A (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	185
Figure 6.23:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	185
Figure 6.24:	Simulation des écoulements du vent pour variante de type B (Classe n2 ; n3 et n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	186
Figure 6.25:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type B (Classe n2), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	187
Figure 6.26:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type B (Classe n3), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	187
Figure 6.27:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type B (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	187
Figure 6.28:	Simulation des écoulements du vent pour variante de type B (Classe n5 ; n7 et n8), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	188
Figure 6.29:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type B (Classe n5), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	188
Figure 6.30:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type B (Classe n7), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	189
Figure 6.31:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type B (Classe n8), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	189
Figure 6.32:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	189
Figure 6.33:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type C (Classe n3 ; n4 et n6), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	190
Figure 6.34:	Simulation des écoulements du vent pour variante de type C (Classe n7), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	191
Figure 6.35:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type C (Classe n1), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	191
Figure 6.36:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type C (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s).	191

	Source: l'auteur, (2016).	
Figure 6.37:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type C (Classe n6), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	192
Figure 6.38:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type C (Classe n7), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	192
Figure 6.39:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	192
Figure 6.40:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type B (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	193
Figure 6.41:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type B (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	193
Figure 6.42:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	194
Figure 6.43:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type C (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	194
Figure 6.44:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type C (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	195
Figure 6.45:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	195
Figure 6.46:	Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type C (Variation d'orientation), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).	196
Figure 6.47:	Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type c (Variation d'orientation), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).	196
Figure 6.48:	Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: l'auteur, (2016).	196
Figure 6.49:	Fenêtre de configuration des paramètres d'environnement utilisés dans Solene. Source : Solene	198
Figure 6.50:	Types de ciel dominant pour la région de Biskra, (Période entre 1996-2000). Source : http://www.satel-light.com	199
Figure 6.51:	Fenêtre de configuration de base de matériaux utilisés dans Solene. Source : Solene	200
Figure 6.52:	Triangulation de géométrie par Solène. Source: l'auteur, (2016)	201
Figure 6.53:	Représentation graphique du lien entre la durée d'ensoleillement et le facteur de ciel vue. Source : l'auteur, (2016)	204
Figure 6.54:	Représentation de l'énergie solaire globale simulée des trois îlots, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : l'auteur, (2016)	205
Figure 6.55:	Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées des trois îlots, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : l'auteur, (2016)	205
Figure 6.56:	Représentation graphique du lien entre l'énergie solaire globale et le facteur de ciel vue. Source : l'auteur, (2016)	206
Figure 6.57:	Représentation graphique des pourcentages de ciel vu calculées pour toutes les variantes de l'îlot A. Source : l'auteur, (2016)	206
Figure 6.58:	Représentation graphique des valeurs de la durée d'ensoleillement calculées pour toutes les variantes de l'îlot A, pour la journée du 21 juin. Source : l'auteur, (2016)	207
Figure 6.59:	Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées pour toutes les variantes de l'îlot A, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : l'auteur, (2016)	208
Figure 6.60:	Représentation graphique du lien entre le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source :	208

	l'auteur, (2016)	
Figure 6.61:	Représentation graphique des pourcentages de ciel vu calculées pour toutes les variantes de l'ilot B. Source: l'auteur, (2016)	210
Figure 6.62:	Représentation graphique des valeurs de la durée d'ensoleillement calculées pour toutes les variantes de l'ilot B, pour la journée du 21 juin. Source : l'auteur, (2016)	210
Figure 6.63:	Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées pour toutes les variantes de l'ilot B, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : l'auteur, (2016)	211
Figure 6.64:	Représentation graphique du lien entre le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : l'auteur, (2016)	211
Figure 6.65:	Représentation graphique des valeurs des facteurs de ciel vu calculées pour toutes les variantes de l'ilot C. Source: l'auteur, (2016)	213
Figure 6.66:	Représentation graphique des valeurs de la durée d'ensoleillement calculées pour toutes les variantes de l'ilot C, pour la journée du 21 juin. Source : l'auteur, (2016)	214
Figure 6.67:	Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées pour toutes les variantes de l'ilot C, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : l'auteur, (2016)	214
Figure 6.68:	Représentation graphique du lien entre le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : l'auteur, (2016)	215
Figure 6.69:	Représentation graphique du lien entre : H/W , le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : l'auteur, (2016)	216
Figure 6.70:	Représentation graphique du lien entre : H/W , le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : l'auteur, (2016)	217

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

Tableau 1.1:	Les différents paramètres déterminant le confort thermique, d'après Potvin, (1997), adopté de Ouameur, (2007).	10
Tableau 1.2:	Les principaux paramètres environnementaux et leurs effets sur le confort thermique. Source : Koppe et al. WHO (2004), adopté de Kitous, (2012)	12
Tableau 1.3:	Effets du vent sur la perception du confort thermique en fonction des conditions de températures d'air. Source : Kitous, (2012)	17
Tableau 1.4:	Typical metabolic heat génération for various activities (d'après O'cofaigh et al, 1999, p.27) adopté de, Ouameur, (2007).	19
Tableau 1.5:	Thermal insulation provided by various combinations of clothing (d'après O'cofaigh et al, 1999, p.27), adopté de, Ouameur, (2007).	20
Tableau 1.6:	indices de confort thermique sélectionnés pour intérieur et extérieur (Fanger 1970, Givoni 1976, and ASHRAE 2001a), Adopté de Toudert, (2005).	22
Tableau 1.7:	Température perçue et stress thermique. Staiger et al., (1997), adopté de, Musy, (2008).	23
Tableau 1.8:	Exemples de valeurs de l'indice PET (Matzarakis and Mayer, 1996), adopté de, Musy, (2008).	24
Tableau 1.9:	Echelle d'évaluation UTCI: UTCI classés en termes de stress thermique. Source : http://www.utci.org/	25

CHAPITRE 2

Tableau 2.1:	Relations entre le rapport d'aspect de la rue canyon et les conditions thermiques. Tiraoui, (2000).	46
Tableau 2.2:	Tableau synthétique des relations existantes entre proportions de la rue canyon et intensité d'ilot de chaleur. Source : Oke T.R.(1988) Adopté de Tiraoui, (2000).	46
Tableau 2.3:	Etat de l'art sur l'influence de la morphologie urbaine sur le confort extérieur, adopté de Athamnia, (2012).	58

CHAPITRE 3

Tableau 3.1:	Les types de climats (classification de Köppen). Source : https://fr.wikipedia.org	63
Tableau 3.2:	Les échelles climatiques et leur extension spatiale. Source : Markus et Morris, (1980).Adopté de Kitous, (2012)	64
Tableau 3.3:	Tableau de calculs de l'indice d'aridité selon Köppen. Source: Encyclopédie Universalis © Universalis France S. A.	70
Tableau 3.4:	Tableau de calculs de l'indice d'aridité selon De Martonne.	70
Tableau 3.5:	Paramètres a, n et b en convection naturelle. Source : Inard, (1988) adopté de, Vinet, (2000).	76
Tableau 3.6:	Classe de rugosité d'après Gandemer et al., (1981) adopté de Vinet, (2000).	81
Tableau 3.7:	Echelle de Beaufort rapportée aux effets sur le piéton. Gandemer, (1981).	83
Tableau 3.8:	Fréquence de nuisance liée à l'activité. Gandemer, (1976).	84
Tableau 3.9:	Caractéristiques du critère 5 m/s. Davenport, A.G, (1972), cité par, Kofoed .NU et al (2004).	84
Tableau 3.10:	Principaux effets des bâtiments isolés ou associés sur les écoulements d'air. Gandemer (1975), adopté de, Kitous, (2012).	88
Tableau 3.11:	Principaux polluants et leurs effets. Source : http://www.aria.fr	97
Tableau 3.12:	Echelle de l'indice ATMO. Source : http://www.aria.fr	99
Tableau 3.13:	méthodes d'observation de l'ICU d'après, Pigeon, (2007).	101
Tableau 3.14 :	Intensité de l'ilot de chaleur en fonction de la vitesse du vent.	107

CHAPITRE 5

Tableau 5.1 :	Caractéristiques morphologiques des ilots urbain appartenant à la zone d'étude. Source : l'auteur, (2016).	153
Tableau 5.2 :	Analyse morphologique de l'ilot « A ». Source: l'auteur, (2016)	156
Tableau 5.3 :	Analyse morphologique de l'ilot « B ». Source: l'auteur, (2016)	157

Tableau 5.4 :	Analyse morphologique de l'îlot « C ». Source: l'auteur, (2016)	158
Tableau 5.5 :	Résultats de formulation du corpus théorique. (Auteur, 2016).	162
CHAPITRE 6		
Tableau 6.1 :	Valeurs des paramètres physiques des matériaux utilisées pour les trois îlots représentatifs. Source : http://www-energie2.arch.ucl.ac.be . Adopté de, Mahaya, (2014)	200
Tableau 6.2 :	Facteur de ciel vu pour les trois îlots. Source : l'auteur, (2016).	202
Tableau 6.3 :	La durée d'ensoleillement des trois îlots pour la journée du 21/06. Source : l'auteur, (2016).	203
Tableau 6.4 :	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe n1 ». Source : l'auteur, (2016)	208
Tableau 6.5:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe n2 ». Source : l'auteur, (2016)	209
Tableau 6.6:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe n4 ». Source : l'auteur, (2016)	209
Tableau 6.7:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe np ». Source : l'auteur, (2016)	209
Tableau 6.8:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n2 ». Source : l'auteur, (2016)	212
Tableau 6.9:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n3 ». Source : l'auteur, (2016)	212
Tableau 6.10:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n4 ». Source : l'auteur, (2016)	212
Tableau 6.11:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n5 ». Source : l'auteur, (2016)	212
Tableau 6.12:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n7 ». Source : l'auteur, (2016)	213
Tableau 6.13:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n8 ». Source : l'auteur, (2016)	215
Tableau 6.14:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot C « classe n3 ». Source : l'auteur, (2016)	215
Tableau 6.15 :	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot C « classe n4 ». Source : l'auteur, (2016)	215
Tableau 6.16:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot C « classe n6 ». Source : l'auteur, (2016)	215
Tableau 6.17:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot C « classe n7 ». Source : l'auteur, (2016)	215
Tableau 6.18:	Valeurs de : H/W, facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B. Source : l'auteur, (2016)	216
Tableau 6.19:	Valeurs de : H/W, facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot C. Source : l'auteur, (2016)	217
Tableau 6.20:	Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour la variante C9. (Auteur,2016).	217



INTRODUCTION GENERALE

I. INTRODUCTION

Ces dernières années sont marquées par de nombreuses études et recherches scientifiques, visant essentiellement les interactions entre les phénomènes environnementaux, la morphologie urbaine et leurs impacts sur les qualités des ambiances dans les espaces extérieurs, notamment la maîtrise du confort thermique des usagers de ses espaces. (Athamenia, 2012 ; Bouyer, 2009 ; Bozonnet, 2005; Bozonnet, 2008 ; Colombert, 2008 ; De Munck, 2013 ; Ouameur, 2007 ; Walton. D et al., 2007 ; Nikolopoulou. M et al., 2003; Nikolopoulou. M, 2004 ; Gandemer, 1976 ; Matzarakis.A et al., 2010 ; Musy, 2007 ; Oke, 1982; Oke, 1987; Oke, 1988).

Les effets combinés de l'urbanisation et le réchauffement climatique mondial donnent lieu à une diminution de la qualité de l'air urbain et une augmentation des températures dans les centres urbains ; cette augmentation accentuera un problème déjà connu : l'effet d'îlot de chaleur urbain, ce phénomène caractérisé par la différence de température maximum entre la ville et la campagne environnante; les variations de cette différence au cours de la journée montrent que le rafraîchissement nocturne en milieu urbain est affaibli (Oke, 1987) ; amplifiant ainsi le risque d'exposer les citoyens à l'inconfort et au risques de santé.

Construire l'espace public ne consiste pas seulement à définir un prospect entre les bâtiments, ni à travailler en épannelage (Panerai, 2004), l'intérêt, est d'intégrer à la pratique de l'aménagement urbain et de l'architecture des éléments de la climatologie urbaine qui est aujourd'hui un domaine de recherche pluridisciplinaire; investi à la fois par les climatologues et les géographes, mais également par les architectes et les urbanistes ; pour un objectif commun de promouvoir et organiser une meilleure synergie entre les différentes actions menées en faveur de l'environnement.

II. LE CONTEXTE D'ETUDE

En Algérie, après l'indépendance, les afflux migratoires des campagnes vers les villes ; ainsi que la croissance démographique, étaient causes

d'une forte urbanisation des villes. Depuis 1974, l'Etat a pris en charge le phénomène de l'urbanisation pour répondre aux besoins en matière de logements en lançant une politique de production de masse par la création des zones d'habitation urbaine nouvelles (ZHUN), et des lotissements. (Farhi, 2001). Ces grands ensembles sont retenus comme solution d'urgence de l'insuffisance de l'offre de logements. Ensuite, la mise en œuvre de diverses formules en matière d'habitat (collectif et individuel), (LAAP¹, LSP²,....etc.), qui s'inscrivent dans le cadre de la politique d'aide de l'Etat à l'accession à la propriété. Le but était de produire le maximum de logements à moindre coût, et de répondre à la forte demande en matière d'habitat au détriment de la qualité et du bien être des citoyens. (Dahmani K et al., 2013).

La ville de Biskra à l'instar des villes du Nord, a connu au cours des dernières décennies un rythme d'urbanisation accéléré. Cette croissance urbaine a engendré des extensions urbaines, sous forme de lotissements et de grands ensembles (ZHUN). Une dynamique qui a aboutie à une urbanisation peu contrôlée, répétant les mêmes techniques et les mêmes formes urbaines et peu soucieuse de l'environnement climatique. Cette urbanisation (réglementaire) n'offre pas de réelles perspectives d'intégration des leviers d'actions qui prennent en charge les facteurs environnementaux dans l'aménagement, l'urbanisme et l'architecture (ex : modification des propriétés radiatives des surfaces, des espaces végétalisés, de la forme urbaine, etc...), pour lutter contre l'augmentation de la température en ville. (Colombert, 2008).

Dans un contexte portant sur la qualité environnementale des espaces urbains extérieurs, notre objectif sera d'étudier les caractéristiques morphologiques de ces nouvelles formes urbaines de la ville de Biskra qui appartient au milieu aride, et leurs impacts sur le microclimat et le confort thermique des usagers en espaces extérieurs, avec la prise en compte de l'effet de l'îlot de chaleur urbain.

¹ L.A.A.P : Logement en accession aidé à la propriété

² LSP : logement social participatif

III. PROBLEMATIQUE

A l'heure actuelle, nos villes exercent de nombreuses pressions sur l'environnement dû à l'urbanisation, par la forte concentration des populations et d'activités. Ces villes sont caractérisées par des microclimats spécifiques dûent à l'influence de certains paramètres du milieu urbain (les caractéristiques structurelles et morphologiques) qui modifient les paramètres climatiques (le vent, la température ambiante et radiante ainsi que l'humidité de l'air), affectant ainsi le confort de l'espace extérieur. Ainsi, les données climatiques sont présentées de manières très différentes dans le tissu urbain, selon les différentes formes d'utilisation et l'occupation des terres, ou plutôt, selon les attributs de la morphologie urbaine. Ces attributs correspondent à la fois à la forme urbaine dans son ensemble ; aux arrangements morphologiques ; ainsi que les caractéristiques thermodynamiques des matériaux constitutifs de ces morphologies. La forme, les phénomènes physiques perceptibles et l'usage, interagissent de manière complexe ce qui rend les ambiances très peu maîtrisables. Par conséquent, de nombreux concepteurs négligent les qualités intrinsèques du climat au profit des technologies plus adaptables aux changements climatiques, mais peu écologiques à cause de la complexité du comportement climatique ; en produisant des espaces inadaptés aux cycles naturels qui génèrent des problèmes pour le bien-être et la santé des utilisateurs de ces espaces.

IL est a noté aussi que dans les pays en développement caractérisés par des climats chauds et secs, les règlements d'urbanisme utilisés, sont souvent importés de climats tempérés et sont donc mal adaptés au climat local. En conséquence, les zones urbaines deviennent souvent inutilement inconfortables. (Johansson, 2005).

Dans le cadre du développement durable, il est essentiel de concevoir des lieux en concordance avec leur environnement, ce qui inscrit le microclimat parmi les dimensions fondamentales de l'architecture.

IV. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

A chaque espace urbain correspond des ambiances thermiques liées à la forme urbaine et aux activités qui s'y déroulent; les concepteurs

rencontrent des difficultés pour concevoir un environnement thermique extérieur confortable pour les usagers, par la prise en compte de la structure spatiale et de la morphologie du tissu urbain en relation avec les phénomènes environnementaux.

Face à l'enjeu d'élaborer des méthodes afin de diminuer et/ou atténuer les effets néfastes de l'urbanisation sur le microclimat local, en particulier l'utilisation de techniques alternatives ou par des stratégies d'adaptation, une mauvaise adaptation climatique des environnements urbains a souvent pour conséquence l'utilisation d'une climatisation active et ainsi une augmentation de la consommation de l'énergie.

Notre objectif central sera d'étudier les caractéristiques morphologiques du milieu urbain en relation avec le microclimat et le confort thermique des usagers en espaces extérieurs, en référence aux régions arides et semi arides, par la caractérisation des phénomènes physiques (convectif, radiatif, conductif) à une échelle microclimatique, mais aussi la quantification de l'impact de la forme urbaine sur les paramètres du microclimat urbain affectant les situations de confort ressenties par un individu.

V. QUESTIONS DE RECHERCHE

Pour atteindre nos objectifs de recherche, des questions se posent :

- Quels sont les facteurs qui agissent sur le confort thermique en espaces extérieurs ?
- Existe-il des stratégies pour le caractériser ?
- Malgré la complexité des interrelations entre les caractéristiques morphologiques du milieu urbain et le microclimat, est-il possible de modifier les conditions de confort d'un espace extérieur en modifiant le microclimat d'un lieu par l'adaptation d'un de ses paramètres physiques, à savoir le rayonnement solaire ou le vent ?
- Peut-on obtenir des améliorations réellement quantifiables des caractéristiques microclimatiques à l'échelle de l'îlot urbain, par l'adéquation de l'agencement des différents éléments bâtis et non-bâtis entre eux ?

VI. HYPOTHESE

La problématique annoncée précédemment et les questions de recherche posées, nous conduit a l'hypothèse suivante :

Etant donné que la morphologie de la ville joue un rôle important (piégeage solaire et confinement par rapport au vent) ; à l'échelle de l'ilot urbain, la variation de la configuration urbaine peut engendrer des modifications significatives sur les paramètres microclimatiques, notamment sur les températures, l'humidité relative et la vitesse du vent.

- **Hypothèse** : A l'échelle de l'ilot, un agencement adéquat des différents éléments bâtis et non-bâtis entre eux peut engendrer des améliorations réellement quantifiables des caractéristiques microclimatiques, en particulier sur l'ensoleillement et l'optimisation de la circulation de l'air.

VII. L'ANALYSE CONCEPTUELLE

L'analyse climatique des espaces urbains a pour objet principal la connaissance des caractéristiques morphologiques de l'espace urbain (principalement leurs caractéristiques de largeur, d'orientation, de gabarit moyen, du mode d'agencement,...) croisées avec ses potentialités et comportements microclimatiques face aux questions solaire, lumineuse ou aérodynamique. Ce diagnostic approfondi permet de comprendre les mécanismes de répartition de l'énergie solaire ou du vent dans les rues mais aussi en cœur d'ilot ; les résultats de cette étude préalable apportent des arguments pour fonder les règles urbaines qui seront décrites.

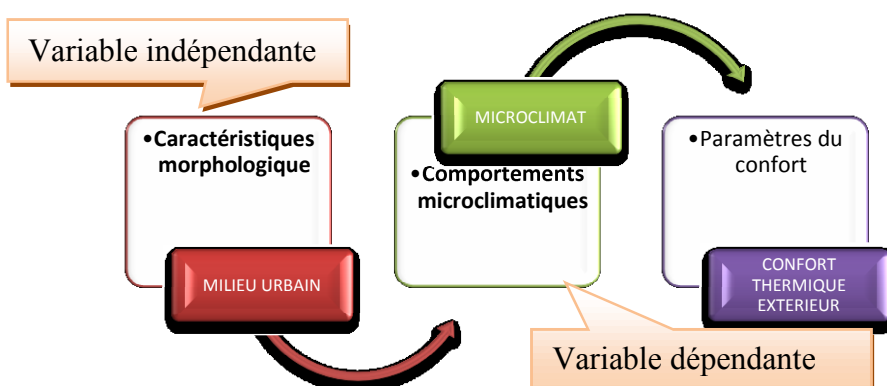


Figure 1 : Variables de la recherche

VIII. METHODOLOGIE

Notre étude s'appuie sur une approche bioclimatique basée sur la simulation informatique, à l'aide des logiciels : CFD, et SOLENE pour la détermination de l'impact de la morphologie urbaine sur les paramètres climatiques qui affectent le confort thermique en espaces extérieurs.

Dans l'étude actuelle, une approche paramétrique de calcul est présentée pour évaluer les effets des différentes morphologies urbaines sur l'environnement de la ventilation naturelle au niveau des piétons et l'ensoleillement. Cette étude, dans son premier volet découle d'une classification de vitesse du vent sur la base du confort en plein air, ainsi que l'utilisation de la fréquence relative de la vitesse du vent au niveau des piétons et les profils verticaux de la vitesse moyenne du vent pour évaluer les performances de la ventilation naturelle dans les différentes configurations urbaines. Dans le deuxième volet, nous allons observer plusieurs scénarios de l'ensoleillement au niveau de l'îlot urbain, sur la base de la durée d'ensoleillement et de la quantité d'énergie solaire globale reçue.

IX. LA STRUCTURE DU MEMOIRE

Après une introduction générale qui présentera le thème, les objectifs, la méthodologie et la stratégie de recherche, la description du présent mémoire sera constituée de deux parties structurées en six chapitres organisés comme suit:

La première partie présente un cadre théorique. Elle englobe des données se basant essentiellement sur les différentes recherches bibliographiques se rapportant au thème. Elle comprend trois chapitres.

Le premier chapitre, présente une revue de la littérature de certaines connaissances fondamentales et les recherches précédentes sur le confort thermique extérieur, soulignant la complexité de cette thématique. Ainsi que les différents paramètres (relatifs à l'environnement et à l'individu) intervenant dans l'établissement des critères de confort sont présentés. Et enfin, nous présentant les différentes approches de l'évaluation et quelques indices de confort extérieur.

Le deuxième chapitre, est consacré à la compréhension de la morphologie urbaine et ses influences sur le microclimat et le confort en espaces extérieurs, dans le but d'identifier les paramètres nécessaires qu'on doit prendre en compte dans la suite de notre recherche.

Le troisième chapitre, nous y abordons la notion du climat, ses éléments et ses différentes échelles de manifestation. Ainsi que la compréhension du processus de formation et de transformation des microclimats urbains à travers l'étude des interactions entre la forme urbaine et l'environnement climatique et les modifications engendrées sur le bilan énergétique.

La deuxième partie présente le cadre expérimentale de cette recherche. Elle comprend trois chapitres.

Le quatrième chapitre, nous présentons les outils numériques mis en œuvre dans notre recherche. Il s'agit essentiellement du modèle de CFD (computational fluid dynamics) Phoenix développé par CHAM, et le Code Solene développé par le laboratoire CERMA.

Le cinquième chapitre, nous présentons notre cas d'étude, ainsi que les indicateurs morphologiques retenus dans le cadre de notre recherche. Ensuite des simulations numériques appliquées pour différentes typologies d'ilots urbains. L'objectif est de caractériser les paramètres microclimatiques à cette échelle pour pouvoir déterminer l'impact de la morphologie.

Le sixième chapitre, est une lecture des résultats obtenus, qui seront croisés avec ceux de l'analyse des indicateurs morphologiques menée en parallèle afin de déterminer leurs dépendance ou indépendance.

CHAPITRE 1

LE CONFORT THERMIQUE

1.1 INTRODUCTION

Depuis quelques années, la problématique du confort extérieur est devenue une préoccupation majeure pour la planification ou de la restructuration urbaine. Bien que plus complexe à étudier en raison d'un nombre de paramètres plus important à prendre en considération que dans le cadre du confort intérieur.

Le confort thermique, est l'un des facteurs qui influencent les activités dans les espaces extérieurs. Nicolopoulou et al (1998,2001) à travers une étude sur les places en Angleterre, ont pu vérifier que l'utilisation de ces derniers était fonction des conditions climatiques et fonction des conditions de confort qu'elles offrent aux usagers.

Les conditions climatiques sont un facteur de stress pour les bâtiments et les infrastructures. Les changements du climat peuvent affecter le confort de vie interne et externe.

1.2 DEFINITIONS

«Le confort est un concept «pont» qui fait le lien entre des échanges thermiques, la physiologie individuelle affectée elle-même par le métabolisme et l'effort, et leur perception sous forme de réaction au stress.» André FUFTY.

La théorie classique du confort thermique qui s'appuie sur un modèle stationnaire, décrit l'état de confort comme satisfait, lorsque les flux de chaleur vers et depuis le corps humain sont en équilibre. Selon Fanger, (1972), le confort thermique se définit comme étant l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique. Le maintien de l'équilibre entre le corps humain et son environnement est l'un des éléments importants pour la santé, le bien être et le confort. (Givoni, 1976).

L'interaction de plusieurs facteurs environnementaux et personnels, a rendu la notion du confort thermique très complexe, son étude doit prendre en compte les interrelations entre les conditions thermiques de l'environnement, les réponses physiologiques, et les phénomènes psychologiques (sensation, comportement). (Nikolopoulou et al, 2001).

Il existe différentes approches au confort thermique dont on peut citer:

L'approche physique du confort thermique représente l'homme comme une machine thermique et considère les interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur.

L'approche physiologique s'intéresse aux mécanismes d'autorégulation mis en jeu dans un environnement thermique.

L'approche psychologique se penche sur les phénomènes psychologiques et peut se servir des études empiriques afin de déterminer les relations entre les grandeurs physiques et physiologiques (par exemple température d'air, température cutanée) et leurs résultats sensoriels et hédonique chez l'individu.

La réponse de l'individu dans un environnement résulte de l'interaction entre ces différents mécanismes.

1.3 LES PARAMETRES DU CONFORT THERMIQUE

La sensation de confort ou d'inconfort thermique dépend des paramètres objectifs (la température et de l'hygrométrie ambiante, des éventuels courants d'air) ainsi que du métabolisme de chacun, cette sensation reste cependant une notion personnalisée, dans la mesure où les individus sont différents. (Depecker et al. 1989), cité par (Vinet, 2000).

La perception du confort thermique varie d'une personne à l'autre selon divers paramètres personnels et environnementaux, dont le niveau d'activité, l'acclimatation physiologique et psychologique à la chaleur, le type de vêtements portés, la température de l'air et des surfaces environnantes, le *rayonnement solaire* ainsi que la vitesse et l'humidité relative de l'air (Brown et Gillespie, 1995; Fanger, 1982).cité par (Giguère, 2009).

Paramètres environnementaux	Paramètres personnels
- Température de l'air (°C);	- Taux métabolique (met);
- La température radiante moyenne (°C);	- Habillement de niveau (clo).
- Humidité (%);	
- Mouvement d'air (m/s).	

Tableau 1.1 : Les différents paramètres déterminant le confort thermique, d'après Potvin, (1997), adopté de (Ouameur, 2007).

Plusieurs études (Nikolopoulou et al, 2001; Nikolopoulou et al, 2006 ; Stathopoulos et al, 2004 et Makaremi et al, 2012) dans des contextes climatiques différents révèlent que le confort thermique est influencé conjointement par des variables climatiques, physiques et psychologiques.

1.3.1 RELATIFS A L'ENVIRONNEMENT

La prise en compte de l'environnement relatif à l'individu nécessite la connaissance précise de quatre paramètres microclimatiques :

- Température de l'air
- Température radiante moyenne
- Humidité de l'air
- Vitesse de l'air

En extérieur, en plus de tous les paramètres précédemment cités, il faut prendre en compte :

- Les apports solaires (directs, indirects et diffus)
- La température de la voûte céleste
- Les phénomènes naturels : la pluie, la grêle, la neige, etc.

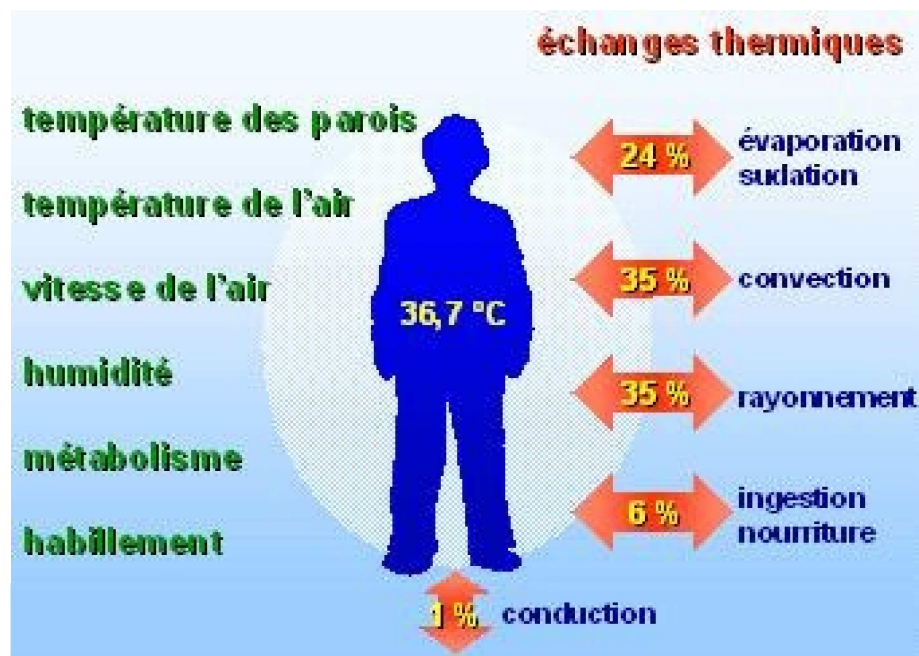


Figure 1.1 : Les différents paramètres déterminant le confort thermique.
Source : <http://www.energieplus-lesite.be>

Facteur environnemental	Effet sur le bilan thermique humain	Explications
Température de l'air	T (peau) > T(air)	Perte de chaleur convective de la peau vers l'environnement.
	T (peau) < T(air)	Perte de chaleur convective de l'environnement vers la peau.
Température radiante	Échange de chaleur rayonnante entre la peau et l'environnement.	Au soleil, la température rayonnante peut facilement excéder la température de l'air, qui résulte d'un transfert de chaleur rayonnante à partir de l'environnement à la peau.
Température de surface	Échange de chaleur conductive (rôle mineur)	
Humidité de l'air	Perte ou apport de chaleur évaporative	Le taux d'humidité (non l'humidité relative) dans l'air détermine si la sudation sous forme de vapeur s'écoule de la peau à l'environnement ou viceversa. L'évaporation de sueur est la voie la plus importante pour le corps de dissiper son surplus de chaleur.
Vitesse du vent	Convection et évaporation	Échanges thermiques augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Tableau 1.2 : Les principaux paramètres environnementaux et leurs effets sur le confort thermique. Source : Koppe et al. WHO (2004), adopté de (Kitous, 2012).

1.3.1.1 Température de l'air

La température de l'air est un facteur important qui influence le confort thermique. Elle est le résultat de l'échauffement et refroidissement de la surface de la Terre, par des processus indirects.

La température de l'air d'un environnement affecte l'échange de chaleur du corps par convection et rayonnement. Selon Givoni, (1978), cet échange dépend du mouvement de l'air et du niveau d'habillement.

La température de confort ressentie (appelée aussi "température opérative" ou "température résultante sèche") est définie par l'équation suivante :

$$T^{\circ} \text{ opérative} = (T^{\circ} \text{ air} + T^{\circ} \text{ parois}) / 2 \quad (1.1)$$

Cette relation simple s'applique pour autant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s

1.3.1.2 Température moyenne radiante

La radiation solaire est une énergie électromagnétique, d'onde courte, émis par le soleil soient partiellement absorbé par l'atmosphère terrestre. L'absorption du rayonnement solaire et l'échange du rayonnement de

grande longueur d'ondes affectent fortement l'état du confort thermique du corps humain. L'intensité de radiation solaire varie en fonction des activités solaire et de la distance de la Terre au Soleil.

La température moyenne radiante (TMR) est définie comme la température moyenne des surfaces environnantes, elle inclut l'effet du rayonnement solaire incident. (Potvin, 1997) cité par (Ouameur, 2007). Elle est l'un des paramètres météorologiques les plus importants qui régissent l'équilibre énergétique humain et affectant la sensation thermique en milieu urbain sous des conditions ensoleillées. (Thorsson, S. et al. 2007). Toutefois, le calcul de la température moyenne radiante dans les espaces urbains en plein air est particulièrement complexe.

La température moyenne radiante (TMR) peut soit être obtenue à partir des mesures distinctes de l'énergie solaire (ondes courtes) et terrestres (ondes longues) flux de rayonnement ou par des mesures intégrales, les méthodes d'estimation de flux de rayonnement sont basées sur des paramètres tels que la température de l'air, l'humidité de l'air, le degré de couverture nuageuse, la transparence de l'air et de l'heure de la journée de l'année. (Matzarakis, 2000). L'albédo des surfaces environnantes et leurs proportions d'angle solide doit également être spécifié.

1.3.1.2.1 Détermination de TMR par des mesures avec un thermomètre à globe

Si la température du globe, la température de l'air et de la vitesse de l'air sont connus, la température moyenne de rayonnement peut être calculée selon l'équation 1.2 : (Thorsson et al, 2007).

$$T_{mrt} = [(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_a)]^{0.25} - 273.15 \quad (1.2)$$

Ou

T_g = la température du globe (C°)

V_a = la vitesse de l'air (m/s)

T_a = la température de l'air (C°)

D = le diamètre du globe (mm)

ε = l'émissivité du globe

1.3.1.2.2 Détermination de TMR par des mesures de rayonnement intégrales

TMR peut être déterminée si la densité moyenne de flux de rayonnement (S_{str}) du corps humain est connue. (Equation 1.3)

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{(S_{str} / (\epsilon_p \sigma))} - 273.15 \quad (1.3)$$

σ = la constante de Stefan–Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Pour calculer S_{str} , les six mesures individuelles de la radiation du flux à ondes courtes et ondes longues doivent être multipliés par les facteurs angulaires F_i ($i = 1-6$) entre une personne et les surfaces environnantes conformément à l'équation 1.4. (THORSSON, S. et al.2007).

$$S_{str} = \alpha_k \sum_1^6 K_i F_i + \epsilon_p \sum_1^6 L_i F_i \quad (1.4)$$

Ou,

K_i = les flux de rayonnement à ondes courtes ($i = 1-6$)

L_i = les flux de rayonnement de grande longueur d'onde ($i = 1-6$)

F_i = les facteurs angulaires entre une personne et les surfaces environnantes ($i = 1-6$)

α_k = le coefficient d'absorption du rayonnement à ondes courtes (valeur standard 0.7)

ϵ_p = l'émissivité du corps humain. Selon les lois de Kirchhoff, ϵ_p est égal au coefficient d'absorption pour le rayonnement à ondes longues (valeur standard 0.97)

Thorsson, S. et al.(2007), ont comparé trois méthodes différentes de l'obtention de la TMR en milieu urbain en plein air ; la méthode A est basée sur les mesures de rayonnement et les facteurs angulaires, la méthode B basée sur des mesures avec un thermomètre 38 mm plat globe gris, (Figure 1.2) ; et la méthode C utilise le logiciel Rayman. (Figure 1.3).



Figure 1.2 : Thermomètre 38 mm plat globe gris. (Thorsson et al, 2007).

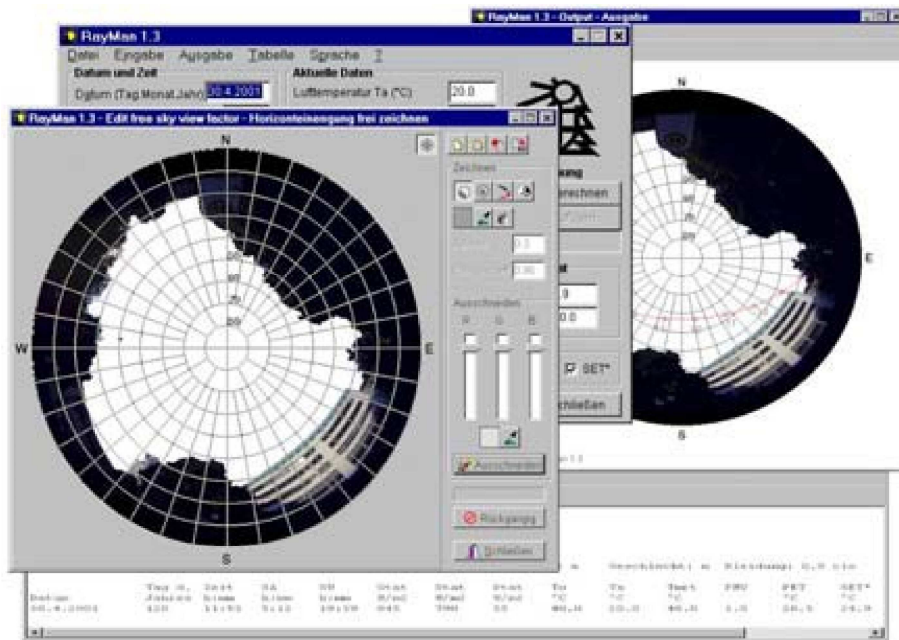


Figure 1.3 : Menus de la fenêtre de rayman 1.3 permettant l'importation et l'exportation de structures urbaines pour le calcul de la température moyenne de rayonnement TMR et indices thermiques. Source : (Matzarakis et al., 2000).

1.3.1.3 Humidité de l'air

L'humidité est l'élément atmosphérique le plus important pour déterminer le temps et le climat, ayant une grande influence sur la température de l'air, il est un facteur déterminant de la sensation de confort thermique.

Il y a plusieurs manières de mesurer la quantité d'humidité dans l'atmosphère; l'humidité relative est la plus utilisée. Il indique le degré de saturation de l'air (%) et est fortement influencé par la température de l'air. La diminution de l'humidité relative de l'air dans les villes est une caractéristique importante du climat urbain. Les grandes surfaces imperméables dans les villes provoquent un écoulement plus vite d'eaux de pluie et réduit le processus d'évapotranspiration.

L'humidité relative de l'air (HR) est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur à la température ambiante T_a et la quantité maximale (niveau de saturation) qu'il peut contenir à cette même température. Les surfaces d'eau, les fontaines et la présence d'une végétation dense contribuent à l'évaporation et donc humidifient l'air. (Reiter, 2007).

L'effet de l'humidité relative est négligeable lorsqu'elle est comprise entre (30 % et 50 %). (Szokolay, 2004), cité par (Ouameur, 2007). Plusieurs

recherches affirment que l'humidité relative influence la perception du confort thermique, et ce lorsque la température atteint des valeurs très élevées. (Ouameur, 2007). Une étude réalisée au centre ville de Montréal par Stathopoulos, (2004), affirme que l'humidité relative influence la perception du confort thermique, et ce lorsque la température atteint des valeurs très élevées. D'après l'auteur, les sujets perçoivent l'air humide à partir de 38 %. Donc les valeurs moins élevées de l'humidité relative (inférieures à 38 %) n'influencent pas la perception du confort thermique. Il est important de connaître la valeur d'humidité relative à partir de laquelle les usagers des espaces publics perçoivent l'air humide. Ces informations permettent de fixer l'étendue d'humidité relative qui doit être considéré dans l'analyse du confort thermique.

1.3.1.4 Vitesse de l'air

La ventilation (vitesse et direction du vent) est le résultat des différences pression atmosphérique influencé directement par la température de l'air. Selon Minella, (2009), le vent est influencé par deux facteurs: la rugosité (densité de la surface urbaine, orientation des rues, la relation entre la hauteur et la distance entre les bâtiments) et la porosité (perméabilité des vents dans les bâtiments et les obstacles). Le flux du vent dans la couche intra-urbaine a une influence dans la ventilation des bâtiments et le renouvellement d'air au milieu urbain, ainsi que par la dispersion de polluants et le confort thermique des piétons. Dans les centres urbains, la vitesse du vent est plus basse que dans les alentours. L'air tend à se déplacer plus lentement proche du sol et augmente sa vitesse à hauteur. La diminution de la vitesse du vent est liée à la rugosité de la surface bâtie de la ville. Cependant, en certain cas, la configuration des rues et bâtiments peut augmenter la vitesse du vent urbain, c'est l'effet de canalisation des rues. La turbulence crée par les bâtiments et le dessin des rues modifie la direction du vent. (Honjon, 2015).

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection. Dans l'habitat, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s. En effet, l'individu commence à ressentir le mouvement de l'air à cette vitesse. Le confort dynamique dans les espaces extérieurs est fonction de

la vitesse du vent. Les résultats de la recherche expérimentale menée par **Penwarden (1973)**, illustre qu'un vent de 5 m/s représente un début de l'inconfort dynamique.

	Température d'air		Rayonnement solaire		Rayonnement thermique	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Vent fort, V > 12 m/s	Fort accroissement de la sensation de froid	Accroissement de la sensation de fraîcheur jusqu'à 33°C, au-delà, effet de 'sèchecheveux'	Légère compensation de la sensation de froid	Annulation partielle de l'effet de surchauffe dû à l'absorption solaire	Effet sensible totalement annulé	Effet sensible négligeable
Vent faible à nul, Va < 6 m/s	Plein effet de la température d'air : sensation de froid possible	Plein effet de la température : sensation de chaleur possible	Forte compensation de la sensation de froid par effet direct et effet de "dièdre"	Aggravation de la sensation de chaleur par effet direct et "effet de dièdre"	Compensation de la sensation de froid par "effet de dièdre"	Aggravation de la sensation de chaleur par "effet de dièdre".

Tableau 1.3 : Effets du vent sur la perception du confort thermique en fonction des conditions de températures d'air. Source : (**Kitous, 2012**)

1.3.2 PARAMETRES RELATIFS A L'INDIVIDU

1.3.2.1 Mécanismes de thermorégulation

Dans les conditions habituelles, l'homme assure le maintien de sa température corporelle entre 36,5 °C et 37 °C. (**Gómez et al 2004**). Cette température est en permanence supérieure à la température d'ambiance, aussi un équilibre doit-il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu. Les mécanismes d'autorégulation du corps humain laissent apparaître une zone où la variation de confort thermique est faible : c'est la plage de confort thermique.

Il est possible objectivement de prédire les conditions du confort thermique en utilisant l'équation 1.4 proposée par **Gomèz et al (2004)**, mais le confort thermique ne doit pas être confondu avec l'équilibre thermique. Ainsi que la détermination des réponses subjectives des perceptions dépend de la propre évaluation de la personne soumise à un environnement donné.

$$0 = M \pm R \pm C_v \pm C_d - E \tag{1.4}$$

Où:

M : est la chaleur métabolique;

R : est l'échange de chaleur par rayonnement;
 Cv: l'échange de chaleur par convection;
 Cd : est l'échange de chaleur par conduction; et
 E : est l'échange de chaleur par évapotranspiration.

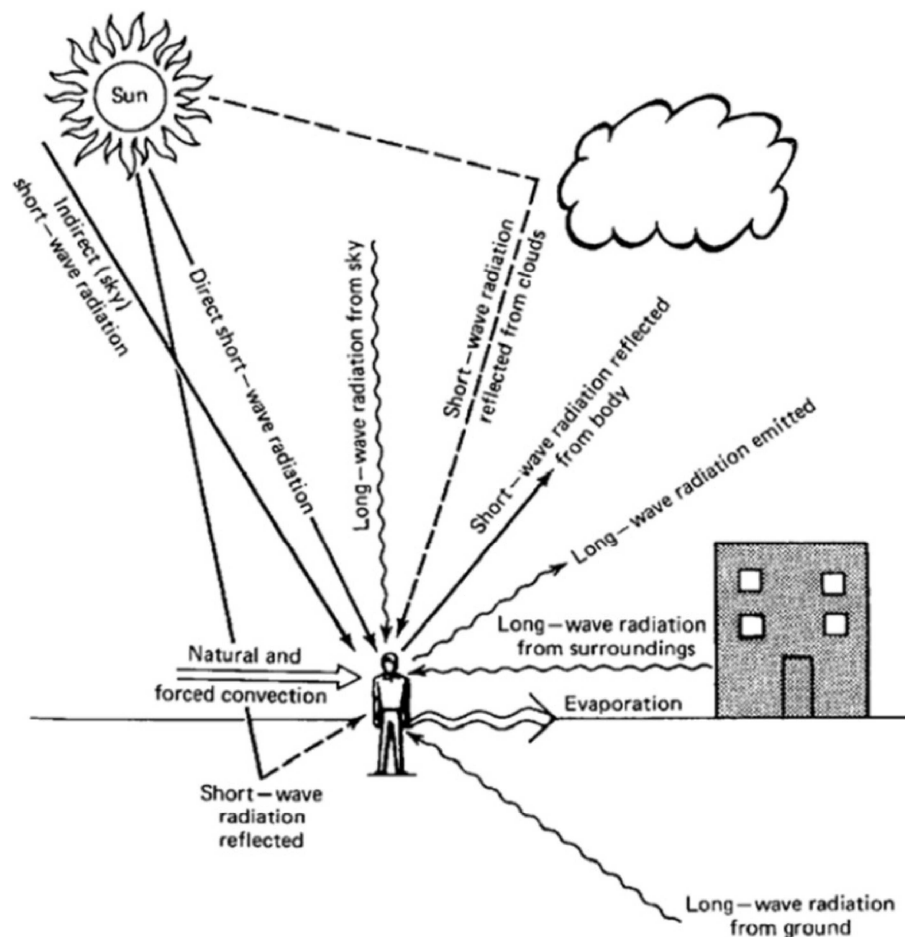


Figure 1.4 : Les composantes du bilan énergétique humain. (Houghton, 1985), adopté de, (Toudert, 2005).

Certains de ces flux de chaleur sont influencés par l'état du corps, (la température du corps et l'humidité de la peau).

Les facteurs météorologiques influent également sur un certain nombre de termes du bilan comme suit (Toudert, 2005):

$$QH = f(Ta, v); QRE = f(Ta, RH); QSW = f(RH, v; \text{ and } Q^* = f(Tmrt).$$

1.3.2.1.1 Le métabolisme et les échanges thermiques

L'état d'équilibre est atteint lorsque le corps est capable d'équilibrer la quantité de chaleur échangée entre l'intérieur et l'extérieur. Pour cela, le corps humain fabrique continuellement de l'énergie qui est essentiellement

fonction de l'âge, du sexe et de l'activité physique de l'individu .Cette énergie est appelée métabolisme humain.


Le métabolisme est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7 °C.

Le métabolisme peut se décomposer en une partie purement thermique (Mth) et une partie « mécanique » (W) :

$$M = Mth + W \tag{1.5}$$

Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos. Le rendement mécanique ($\eta_w = W/M$) n'excède pas 0.2.

Théoriquement et quantitativement, il est possible de prédire les conditions du confort thermique en fonction des paramètres environnementaux et des variables personnelles à savoir, le niveau d'habillement et le taux métabolique. Des valeurs du métabolisme sont répertoriées pour différentes activités respectivement au tableau 1.2.



ACTIVITY	W/m ²	met	ACTIVITY	W/m ²	met
Resting			Miscellaneous Occupational Activities		
Sleeping	40	0.7	Cooking	95-115	1.6-2.0
Reclining	45	0.8	House cleaning	115-200	2.0-3.4
Seated, quiet	60	1.0	Seated, limb movement	130	2.2
Standing, relaxed	70	1.2	Machine work		
Walking (on the level)			sawing (light table)	105	1.8
0.89 m/s	115	2.0	light (electrical industry)	115-140	2.0-2.4
1.34 m/s	150	2.6	heavy	235	4.0
1.79 m/s	220	3.8	Handling 50kg bags	235	4.0
Office Activities			Pick and shovel work	235-280	4.0-4.8
Reading, seated	55	1.0	Miscellaneous Leisure Activities		
Writing	60	1.0	Dancing, social	140-255	2.4-4.4
Typing	65	1.1	Calisthenics / exercise	175-235	3.0-4.0
Filing, seated	70	1.2	Tennis, singles	210-270	3.6-4.0
Filing, standing	80	1.4	Basketball	290-440	5.0-7.6
Walking about	100	1.7	Wrestling, competitive	410-505	7.0-8.7
Lifting, packing	120	2.1			
Driving / Flying					
Car	60-115	1.0-2.0			
Aircraft, routine	70	1.2			
Aircraft, instrument landing	105	1.8			
Aircraft, combat	140	2.4			
Heavy vehicle	185	3.2			

Tableau 1.4: Typical metabolic heat génération for various activities (d'après O'cofaigh et al, 1999, p.27) adopté de, (Ouameur, 2007).

1.3.2.2 Les vêtements

L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. La résistance thermique du vêtement aux transferts de chaleur (I_{cl} ou R_v) est souvent exprimée dans une unité que l'on note clo (1 clo = 0.155 m².K/W).

Un « clo » représente l'isolation apportée par une tenue d'intérieur typique d'hiver. L'isolation thermique d'un vêtement peut être soit mesurée, soit calculée en cumulant l'isolation des différentes parties du vêtement (Sprague et al. 1974), cité par (Vinet, 2010), une formule simplifiée dans la norme ASHRAE 55-81 :

$$I(\text{ens}) = 0.82 \sum I(\text{pièces}) \quad (1.6)$$

Les valeurs des isolations thermiques de la plupart des vêtements sont données, ainsi que les valeurs moyennes de l'ensemble des vêtements dans des situations courantes (Tableau 1.4).

CLOTHING	THERMAL RESISTANCE	
	m ² K/W	clo
Nude	0	0
Shorts	0.015	0.1
Typical tropical clothing ensemble: briefs, shorts, open-neck shirt with short sleeves, light socks and sandals	0.045	0.3
Light summer ensemble: briefs, long light-weight trousers, open-neck shirt with short sleeves, light socks and shoes	0.08	0.5
Light working ensemble; Light underwear, cotton work shirt with long sleeves, work trousers, woollen socks and shoes	0.11	0.7
Typical indoor winter ensemble: Underwear, shirt with long sleeves, trousers, jacket or sweater with long sleeves, heavy socks and shoes	0.16	1.0
Heavy traditional European business suit: cotton underwear with long legs and sleeves, shirt, suit including trousers, jacket and waistcoat, woollen socks and heavy shoes	0.23	1.5

Tableau 1.5 : Thermal insulation provided by various combinations of clothing d'après (O'cofaigh et al, 1999, p.27), adopté de, (Ouameur, 2007).

1.4 EVALUATION ET ANALYSE DU CONFORT THERMIQUE

La différence entre l'évaluation du confort thermique extérieur et intérieur réside dans la prise en compte de paramètres différents. Pour le confort thermique intérieur, l'indice utilisé est la température opérative T_{op} qui ne prend en compte que la température moyenne radiante des parois, ainsi que la température de l'air. Pour le confort thermique extérieur, les indices de température utilisés, tel que PT, PET ou UTCI, prennent en compte des paramètres supplémentaires à savoir:

- Le rayonnement solaire direct ou diffus pour le calcul de la température radiative moyenne des parois
- L'activité
- Les vitesses d'air
- Les variations d'humidité
- L'habillement

1.4.1 LES INDICES DU CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR

Evaluer le confort thermique dans les espaces extérieurs exige la compréhension des facteurs supplémentaires, qui ne sont pas pris en compte dans une situation intérieure typique, tels que le rayonnement solaire, le vent, les taux de transpiration considérables ou des vêtements lourds, différentes activités et les attentes humaines, apportant ainsi plus de complexité pour l'analyse thermique. Un indice thermique est basé sur la combinaison de plusieurs facteurs (par exemple, T_a , R_h , v , flux de rayonnement, etc.) en une seule variable qui résume leurs effets simultanés sur les réponses sensorielles et physiologiques du corps. (Givoni 1976, ASHRAE 2001a). cité par (Toudert, 2005).

Il existe un grand nombre d'indices thermiques, la plupart d'entre eux partagent de nombreuses caractéristiques communes et peuvent être classés en deux groupes: empirique ou rationnelle. (Tableau 1.5).

Les indices empiriques, sont généralement basés sur des mesures avec des sujets ou sur les relations simplifiées est ignorent le rôle décisif de la physiologie humaine, l'activité, l'habillement, et d'autres données personnelles (taille, poids, âge, sexe). (Toudert, 2005).

Les indices rationnels, promus par le développement des techniques de calcul, et sont basés sur l'équilibre de l'énergie humaine.

INDICES	DEFINITION
INDICES EMPIRIQUES	
ET Effective Temp.	Ensemble en monogrammes et représentent la sensation thermique instantanée estimée expérimentalement comme une combinaison de T_a , RH et v
RT Resultant Temp.	Comparable à ET mais testé pour plus de temps pour répondre à l'équilibre thermique supposée
HOP Humid Operative Temp.	La température d'un environnement uniforme à une humidité relative = humidité relative de 100% dans laquelle une personne desserre la même quantité totale de chaleur de la peau comme l'environnement réel (comparable ET * mais RH est égale à 50% pour HOP)
OP Operative Temp.	Moyenne arithmétique de T_a et T_m , qui est notamment des flux radiants solaires et infrarouges pondérés par des coefficients d'échange
INDICES RATIONNELS	
WCI Wind Chill Index	Sur la base du taux de perte de chaleur de la peau exposée causée par le vent et le froid et est fonction de T_a et v , adapté aux conditions hivernales
ITS Index of Thermal Stress	Suppose que dans la gamme de conditions dans lesquelles il est possible de maintenir l'équilibre thermique, de la sueur est sécrété à une vitesse suffisante pour parvenir à un refroidissement par évaporation.
HSI Heat Stress Index	Rapport de la perte totale de chaleur par évaporation E_{sk} nécessaire à l'équilibre thermique au maximum perte de chaleur par évaporation E_{max} possible pour l'environnement, pour l'état d'équilibre ($S_{SKIN} = S_{core} = 0$) et $T_{sk} = 35$ ° C constant
ET* new Effective Temp.	Température d'un environnement standard (HR = 50%, $T_a = TMRT$, $v < 0,15$ ms ⁻¹) dans laquelle le sujet connaîtra le même transpiration SW et T_{sk} comme dans l'environnement réel. Il est calculé pour une activité légère et des vêtements légers.
SET* Stand. Effective Temp.	Semblable à ET *, mais avec la variable de vêtements. Vêtements est normalisé pour l'activité concernée.
OUT_SET* Out. Stand. Eff. Temp.	Semblable à SET * mais adapté à l'extérieur en prenant en compte les flux de rayonnement solaire. Les référence des conditions intérieures sont: Met = Pour; HR = 50%; $v = 0,15$ ms ⁻¹ .
PMV and PT Predicted mean vote Perceived Temp.	PMV exprime la variance sur une échelle de -3 à + 3 à partir d'un budget de la chaleur humaine équilibrée et PT la température d'un environnement standardisé qui permet d'obtenir le même PMV que l'environnement réel. Vêtements et l'activité sont des variables...
PET Physiol. Equiv. Temp.	Température à laquelle dans un cadre intérieur typique: $TMRT = T_a$; VP = 12h Pa; $v = 0,1$ ms ⁻¹ , l'équilibre thermique du corps humain (activité légère, 0.9clo) est maintenu avec le noyau et la peau température égale à ceux dans des conditions réelles, l'unité ° C.

Tableau 1.6 : indices de confort thermique sélectionnés pour intérieur et extérieur (Fanger 1970, Givoni 1976, and ASHRAE 2001a), Adopté de (Toudert, 2005).

Nous présentons dans la suite un nombre non exhaustif des indices définis dans la littérature.

1.4.1.1 La température perçue PT

La température perçue PT (Perceived Température), est la température de l'air d'un environnement de référence, dans lequel la perception de chaleur ou de fraîcheur (Valeurs PMV) serait la même que dans les conditions actuelles. Ce modèle repose sur le bilan d'énergie du corps humain, basé

sur l'équation de confort de Fanger couplé avec les flux solaires. (Staiger et al., 1997). cité par (Musy, 2008).

L'environnement de référence est défini par:

- Température radiante moyenne=température de l'air
- Vitesse d'air réduite ($V=0,1\text{m.s}^{-1}$)
- Emissivité de peau ou des vêtements:0,97
- Coefficient d'absorption solaire du corps humain : 0,7
- Adoption des vêtements hiver/été:0,5 et 1, 75 clo

PT ne tient pas compte d'une exposition prolongée, et des effets du vent. En effet, le rayonnement solaire direct, peut être une source d'énergie importante. Son influence varie avec la superficie du corps exposé au soleil. (Musy, 2008).

Température perçue (°C)	Perception thermique	Stress physiologique
< -39	très froid	extrêmement froid
-39 à -26	froid	froid
-26 à -13	froid	froid modéré
-13 à 0	légèrement froid	froid faible
0 à +20	confortable	confort possible
+20 à +26	chaud	légèrement chaud
+26 à +32	chaud	chaud modéré
+32 à +38	chaud	chaud
> +38	très chaud	Extrêmement chaud

Tableau 1.7: Température perçue et stress thermique. (Staiger et al., 1997), adopté de, (Musy, 2008).

1.4.1.2 La température physiologique équivalente PET

La température physiologique équivalente PET (Physiological Equivalent Temperature), est un indice thermique qui donne une estimation de la composante thermique d'un environnement donné. Basé sur un modèle de transfert thermique du corps humain, PET donne la température de l'air d'un environnement de référence dans lequel les flux de chaleur seraient les même que dans l'environnement actuel.

L'environnement de référence est défini par:

- Température radiante moyenne=température de l'air
- Vitesse d'air faible
- Pression de vapeur d'eau=12 hPa
- Humidité relative:50%
- Température d'air:20 C°

- Travail de bureau: 1,5 met
- Habillement: 0,9 clo

Le PET est applicable pour l'étude de l'environnement intérieur et extérieur.

	T_{air} (°C)	T_{mrt} (°C)	U (m s ⁻¹)	P (hPa)	PET (°C)
Pièce typique	21	21	21	21	21
Hiver, au soleil	-5	40	0,5	2	10
Hiver, à l'ombre,	-5	-5	5,0	2	-13
Été, au soleil	30	60	1,0	21	43
Été, à l'ombre	30	30	1,0	21	29

Tableau 1.8: Exemples de valeurs de l'indice PET (Matzarakis et al, 1996).

1.4.1.3 Indice thermique universel du climat UTCI

Indice thermique universel du climat (UTCI) pour l'évaluation de l'environnement thermique extérieur. Ses principales propriétés sont:

- Peut être appliqué à n'importe quelle condition de transfert de chaleur
- Valide pour tout type de climat, saisons et échelles
- Indépendant des caractéristiques individuelles
- Prédiction des effets thermiques sur l'ensemble du corps basé sur un modèle de transfert thermique du corps humain avancé de 340 nœuds
- Paramètres d'entrée pour l'activité métabolique, température de l'air, vitesse du vent, pression de vapeur, température radiante moyenne
- Procédure de calcul simple et rapide

Cet indice est défini pour un environnement de référence dont les propriétés :

- Température radiante moyenne=température de l'air
- Vitesse d'air à 10 m de hauteur=0,5 m.s⁻¹
- Humidité relative de 50% si $T_a < 29$ °C
- Pression de vapeur d'eau : 2 Kpa si $T_a > 29$ °C
- Valeur de clo : 0,4 à 3,0

(Cet indice n'est pas encore inscrit dans les normes)

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Tableau 1.9: Echelle d'évaluation UTCI: UTCI classés en termes de stress thermique. Source : <http://www.utci.org/>

1.4.1.4 L'indice de température standard effective en espaces extérieurs (OUT_SET*)

L'indice OUT_SET* de Dear et Pickup (1999), cité par Moujalled, (2007), basé sur l'indice de température standard effective (SET*) de Gagge et al. (1971), peut donner des représentations physiologiquement valides du stress et du confort thermique en extérieur à travers des combinaisons infinies de la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité, la vitesse de l'air, l'isolation thermique de vêtements et le taux métabolique.

Le modèle OUT_MRT calcule la température de surface d'une zone hypothétique autour d'un sujet debout qui échangerait le même rayonnement infrarouge avec le sujet que le rayonnement dans toutes les longueurs d'ondes dans l'environnement solaire et infrarouge réel.

L'indice SET* définit ainsi la température d'un environnement de référence isotherme :

($T_a = T_{mrt}$, HR=50 %, $u = 0,15 \text{ m.s}^{-1}$) telle qu'une personne dans cet environnement ayant une isolation de vêtement standard (0,6 clo et 1,2 met) ait la même température moyenne de peau (T_p) et la même moiteur (ω) que dans l'environnement réel complexe.

1.5 NOTION D'ADAPTATION

Le terme adaptation est souvent défini comme une diminution graduelle de la réponse de l'organisme à une stimulation environnementale répétée. L'opportunité d'adaptation est la liberté réelle et perçue de pouvoir modifier son environnement local ou son propre ressenti.

L'adaptation thermique humaine se fait à l'aide de trois processus distincts: l'adaptation comportementale (ou physique), l'adaptation physiologique et l'adaptation psychologique. (Nikolopoulou et al.2001).

1.5.1 DIFFERENTS TYPES D'ADAPTATION

1.5.1.1 Adaptation physique

L'adaptation comportementale comprend toutes les modifications qu'une personne peut réaliser consciemment ou inconsciemment pour modifier son équilibre thermique corporel. On peut citer un ajustement personnel (habillement, activité, posture, nourriture, boisson, changement de localisation), un ajustement environnemental (modification de l'environnement lui-même comme par exemple l'ouverture d'un parasol) et l'ajustement culturel (codes vestimentaires, activités dictées par la société comme faire la sieste). L'effet des adaptations physiques peut en général être évalué quantitativement. (Nikolopoulou et al.2006).

1.5.1.2 Adaptation physiologique

L'adaptation physiologique est une réponse physiologique du corps qui tend à diminuer le stress lié à une exposition inconfortable. Dans le contexte de l'environnement thermique, il s'agit d'acclimatation physiologique. Ce genre de mécanismes est crucial dans des environnements extrêmes ou des situations d'inconfort prolongé amenant à des risques importants pour la santé. (Nikolopoulou et al.2006).

1.5.1.2 Adaptation psychologique

L'adaptation psychologique est une modification de la perception d'une information sensorielle. Ce type d'adaptation est souvent relié à la notion d' « habitude » en psychophysique qui correspond à la diminution de l'intensité de la sensation liée à l'exposition répétée au même stress environnemental. Cependant, l'adaptation psychologique couvre un domaine nettement plus large que la prise en compte de l'expérience par rapport à des expositions passées, elle dépend de tous les aspects subjectifs et contextuels de notre perception. L'adaptation psychologique est très difficile à quantifier, elle semble être un élément tout aussi essentiel (Nikolopoulou et al., 2003).

Dès lors les critères influençant l'adaptabilité psychologique des personnes doivent être intégrés dans toute méthode d'évaluation du confort thermique à l'extérieur.

1.6 CONCLUSION

Cette partie nous a permis de souligner que le confort thermique des usagers en espaces extérieurs est aussi influencé par des éléments objectifs que subjectifs. Elle a aussi permis de dresser un panel de certains indices de confort thermique qui fixent des limites quantitatives du confort thermique à l'extérieur, mais aucun système n'existe actuellement pour préciser ces valeurs de manière exacte. Cela est dû à la complexité du problème à cause des interactions de plusieurs paramètres et aussi de l'importance des processus d'adaptation psychologique qui modifient largement la sensation de confort perçue.

La conception d'un projet urbain de qualité du point de vue des ambiances urbaines, notamment le confort thermique, consiste à réunir les approches physiologiques et psychologiques, quantitatives et qualitatives, pour une utilisation optimale des éléments climatiques. Ainsi, rappelons que l'objectif de cette recherche est d'étudier l'impact de la morphologie urbaine sur les paramètres microclimatiques affectant le confort thermique, nous abordant dans les sections suivantes le rôle important que joue la morphologie urbaine sur la formation et la transformation des microclimats urbains et les éléments du confort extérieur.

CHAPITRE 2

LA MORPHOLOGIE URBAINE

"L'enceinte des murs étant faite il faut tracer les places des maisons et prendre les alignements des grandes rues et des ruelles selon l'aspect du ciel le plus avantageux. La meilleur disposition sera si les vents n'enfilent point les rues, parce qu'ils sont toujours nuisibles, ou par leur froid qui blesse, ou par leur chaleur et leur humidité qui corrompt..."
Vitruve, Livre I, Ch. VI

«toute personne s'intéressant aux événements urbains ou étant concernée par les problèmes d'aménagement d'une ville ou d'une de ses parties doit fortement passer par une analyse préliminaire de la situation urbaine afin de disposer des connaissances de base indispensables tantôt pour bien orienter la réflexion ou l'action constructive tantôt pour mieux situer l'objet d'étude et de recherche poursuivi.» (Zucchelli , 1984).

2.1 INTRODUCTION

La qualité et la diversité des tissus urbains découlent directement des modes spécifiques de combinaison des espaces et des formes construites. L'étude de ces formes et des relations entre les différentes entités du milieu urbain, s'inscrit dans le domaine de la morphologie urbaine qui traduit l'image de chaque ville. Le terme morphologie urbaine, nous renvoie directement à l'imaginaire la forme tridimensionnelle d'une agglomération ou d'un groupe de bâtiments ainsi que les espaces qu'ils créent. Le domaine de la morphologie urbaine comprend une première dimension, liée à l'organisation spatiale de l'agglomération dans son ensemble ; mais s'intéresse également à l'aspect interne de la ville, à l'agencement des différents éléments bâtis et non-bâtis entre eux, au paysage urbain, à l'harmonie visuelle.

«La réflexion sur la ville passe à travers une utilisation diversifiée de l'analyse selon qu'elle est assumée en tant que: outil de "vérification" d'hypothèses formulées pour comprendre et décrire la formation et la transformation de l'espace socio-physique urbain; outil de "perception et d'explication" de l'espace construit, de sa genèse; de sa composition et de sa signification.» (Zucchelli , 1984).

2.2 DEFINITIONS

La morphologie urbaine est l'étude des caractéristiques de la forme de la ville (la voirie, le parcellaire, le découpage du sol, les densités, les usages), de sa constitution progressive, de son tissu urbain, et des rapports réciproques des éléments de ce tissu. Elle constitue un élément important dans la réflexion actuelle sur l'urbain. Selon Levy, l'objet de la morphologie urbaine est la forme urbaine, forme posant, d'entrée de jeu, la question de sa définition. Une réflexion sur son anatomie, s'impose

pour une meilleure connaissance de sa structure, qui devrait pouvoir aider l'action urbaine et l'urbanisme. (Levy, 2005).

2.3 ANALYSE DE LA MORPHOLOGIE URBAINE

La formulation des méthodes d'analyse morphologique du tissu urbain, permet d'acquérir des connaissances plus approfondies des formes des villes. L'étude de la morphologie urbaine est fondée ainsi sur une analyse de l'évolution du tissu urbain et du rôle de chacun de ses caractéristiques dans l'espace urbain (site, réseau viaire, trame parcellaire, espace libre ou espace bâti.).

Plusieurs niveaux peuvent être distingués dans le cadre de l'analyse morphologique:

- **Les types architecturaux:** les modèles de références dont s'inspire directement l'ensemble des bâtiments.
- **Le tissu urbain:** l'ensemble des relations entre tous les composants urbains qui en un caractère constant ou répétitif (type architecturaux, rue, parcelles,...etc)
- **La forme urbaine:** rapport entre le tissu urbain et la structure urbaine, laquelle est constituée par l'ensemble des éléments singuliers caractérisant la ville (grands axes structurant; grands équipements et monuments; configuration des bâtiments;.....)
- **Le site urbanisé:** rapport entre la forme urbaine et morphologie du site naturel. (BORIE et al., 1984).

2.3.1 STRUCTURE URBAINE

La structure urbaine se distingue par des caractéristiques propres qui découlent de l'analyse des différents éléments distinctifs du bâti et du non bâti. Les éléments constitutifs de la structure urbaine sont les entités physiques de base d'une ville. Le tissu urbain est constitué de la superposition ou de l'imbrication de trois ensembles, à savoir : le réseau des vois; les découpages fonciers; et les constructions.



Figure 2.1: Le tissu: Le Caire, centre ancien. (CEAA, Ville orientale / LADHAUS). (Penarai, 2009).

L'analyse du tissu urbain procède par l'identification de chacun de ces ensembles, l'étude de leurs logiques et celle de leurs relations. (Penarai, 2009).

Selon Kevin Lynch, la morphologie, la forme physique de la ville joue un rôle fondamental dans la production de l'image perçue à travers cinq types d'éléments constitutifs du paysage urbain : les voies, les limites, les nœuds, les points de repère et les quartiers. Ces éléments permettent d'étudier la structure urbaine.

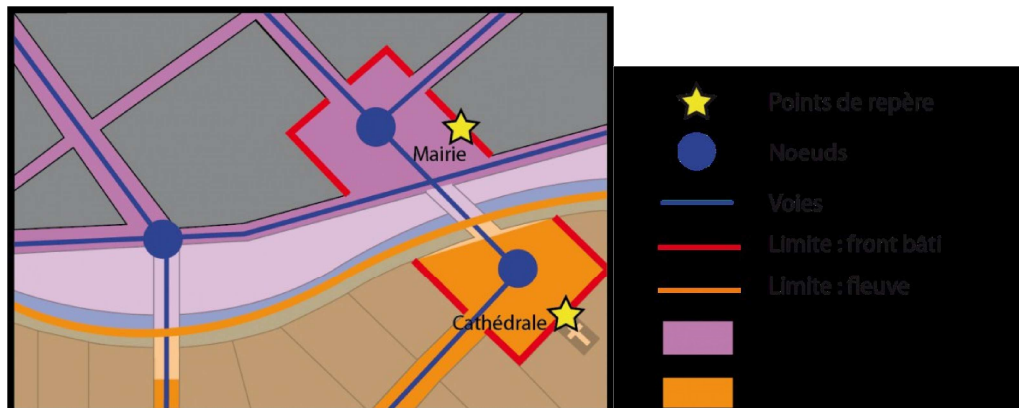


Figure 2.2 : Les cinq éléments de la forme urbaine perçue selon Lynch K.

Source : www.unt.unice.fr

2.3.1.1 LES VOIES

« Le point de départ comme le point d'arrivée de toutes les voies est toujours l'habitation ou la demeure de l'Homme. La communication entre ces deux points extrêmes n'est généralement pas directe et elle doit s'effectuer par des voies intermédiaires. Un système de voies ressemble à un bassin fluvial. Les sources forment des ruisseaux qui affluent vers des torrents. Ceux-ci débouchent dans les rivières qui, à leur tour, se jettent dans le fleuve qui mènera toutes ces eaux à la mer. De même, l'Homme sort de sa maison en empruntant un sentier qui le conduit à un chemin qui débouche sur un chemin vicinal. Celui-ci mène à une route départementale, puis nationale, et ainsi de suite, jusqu'au rivage de la mer où les différentes voies se disperseront sur cet élément navigable en toutes directions pour desservir les divers points du globe. »
I. Cerda

En milieu urbain, les voies (paths) sont des éléments linéaires du paysage urbain permettant l'organisation du mouvement ; on distingue quatre types de voie: de transit, artérielle, de desserte et de distribution. Elles se structurent en réseaux et couvrent l'ensemble de l'espace urbain. Le rôle de chaque voie dans la structuration du paysage urbain est également une fonction de sa fréquentation (même si les recherches plus récentes de l'école de la syntaxe spatiale montrent que ces fréquentations sont souvent déjà une conséquence de la configuration du réseau viaire).

(Lynch, 1959), www.unt.unice.fr

Les différentes voies d'une ville peuvent être hiérarchisées ; les caractéristiques des types hiérarchiques varient à la fois selon la taille des villes et la culture locale. (NGUYEN, Tuan Anh, 2007). En milieu urbain, on définit quatre types de voie: de transit, artérielle, de desserte et de distribution.

2.3.1.2 LE MAILLAGE

Le maillage est le support structurel du tissu urbain, constitué par les réseaux de voies. Les ruelles et les rues ordinaires forment l'essentiel du maillage. Les rues étroites, parfois en impasses, assurent la desserte locale. Les rues larges et les rues principales mettent en communication et structurent les quartiers. Les boulevards et avenues assurent les liaisons à plus longue distance et construisent le maillage général. (NGUYEN, Tuan Anh, 2007). Le maillage permet d'évaluer la densité de la ville, le rapport des pleins et des vides, de l'espace bâti et des espaces publics, leurs positions relatives, les aires et les secteurs ainsi que la situation des monuments principaux. Le classement du maillage a une signification importante dans la division des fonctions de l'espace urbain. En classant ainsi la voirie, nous obtenons trois grilles superposées (GAUTHIEZ. B, 2003), cité par (NGUYEN, Tuan Anh, 2007) :

- **La maille primaire** (voies principales entre agglomérations ou entre les quartiers : cours, avenues, boulevard,...)
- **la maille secondaire** (rues à l'intérieur d'un quartier)
- **la maille tertiaire** (voies de desserte des bâtiments ou de groupes de bâtiments : rues, ruelles, impasses).

La dimension du maillage influence la connectivité qui est une composante essentielle de l'urbanité. Le maillage peut donc contribuer à l'identité des quartiers et à leur urbanité. (BAR. P et al., 1981), cité par (NGUYEN, Tuan Anh, 2007).

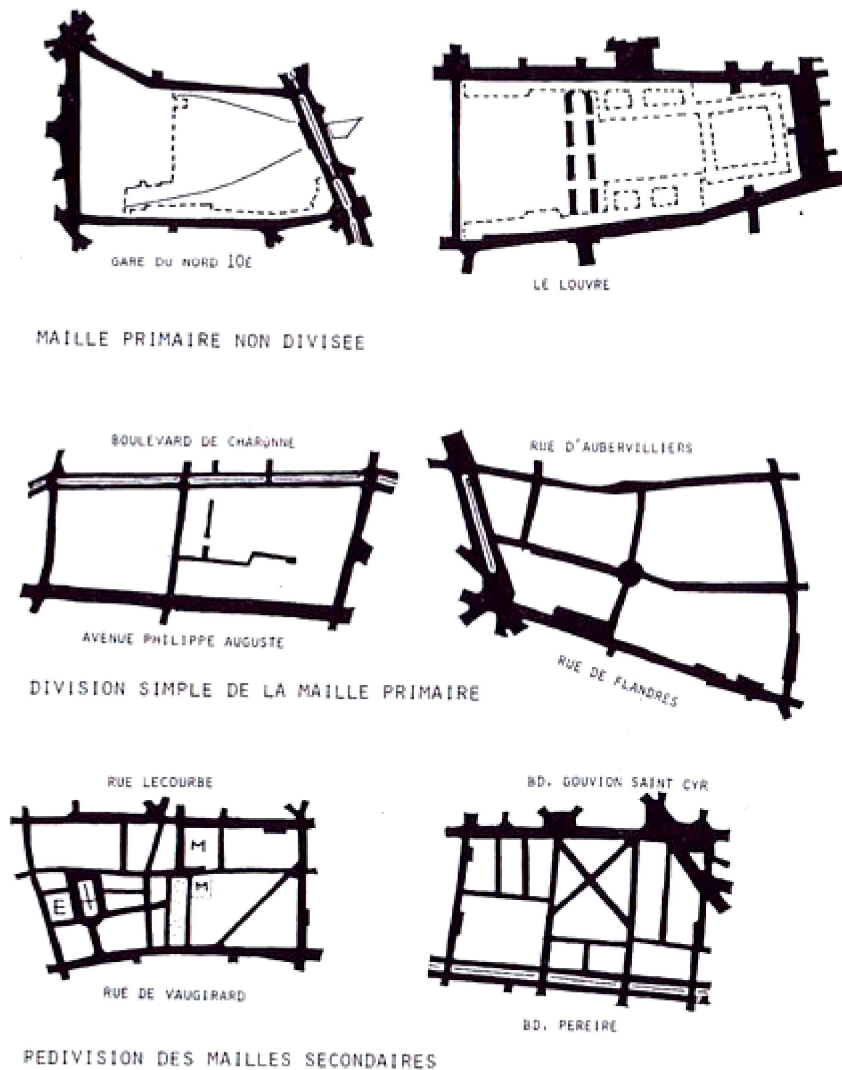


Figure 2.3 : Le système du maillage. (Panerai, 2009).

2.3.1.3 TYPES ET CARACTÉRISTIQUES DES RUES

2.3.1.3.1 Caractéristiques des rues

Nous présentons quelques caractéristiques essentielles de la rue, qui sont en relation avec sa morphologie. (Allain, R, 2004).

2.3.1.3.1.1 Le profil en travers

Il dépend de sa largeur et de son rapport avec la hauteur du bâti encadrant. Le gabarit de la rue est aussi déterminé par l'alignement, le prospect et les règles architecturales.

2.3.1.3.1.2 La largeur

Elle peut être créée par l'usage. La croissance de la circulation sur certains chemins les a hissés au rang de rues principales, entraînant des

élargissements successifs aux dépens des parcelles en limite. Mais les formes de largeurs fixées réglementairement sont déterminantes.

2.3.1.3.1.3 L’alignement

C’est la limite séparative entre la voie publique et les parcelles riveraines. Cette contrainte réglementaire s’explique par les nécessités de circulation, d’hygiène et d’esthétique. Elle peut être modifiée en vue d’élargir, de régulariser la rue et de permettre un bâti plus élevé.

2.3.1.3.1.4 Le prospect

C’est le rapport entre la hauteur des façades et la largeur de rue. C’est un des facteurs de la cohérence de la rue. Quand la hauteur des façades est très supérieure à la largeur de la rue, l’ensoleillement et l’éclairage sont affaiblis (ruelles, rues canyons). A l’inverse des hauteurs trop faibles par rapport à la largeur engendrant une impression de vide.

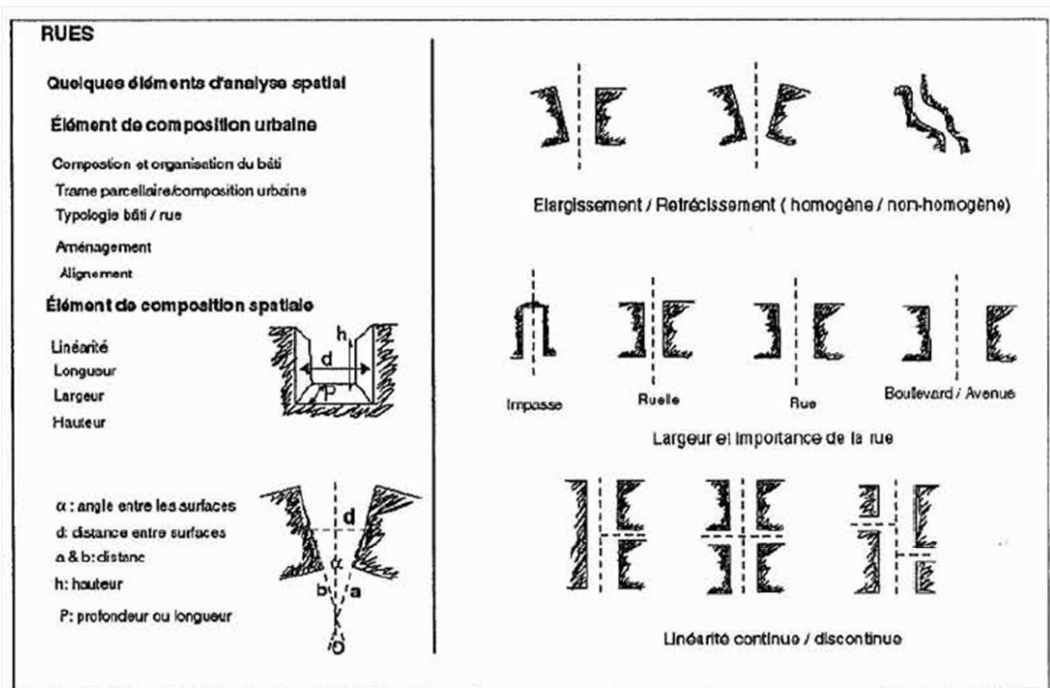


Figure 2.4 : Caractéristiques formelles de la rue. (Tiraoui, 2000).

2.3.1.3.1.5 Le rapport chaussée – trottoir

Le rapport chaussée-trottoir d’abord est favorable aux piétons. La réduction des trottoirs s’accroît avec l’arrivée de l’automobile. La chaussée se définit aussi par son revêtement.

2.3.1.3.1.6 Le profil en long et l’élévation

Le profil en long d’une rue qui est représenté par son élévation en fonction de la longueur, de l’alignement, de la ligne de faite, de l’alternance des

limites d'immeubles. Le rythme des façades est conditionné par le découpage parcellaire. Les façades étroites favorisent la diversité architecturale et l'animation de la façade urbaine.

2.3.1.3.1.7 La végétation

Elle participe aussi au profil et à la forme de la rue : des alignements d'arbres peuvent redonner de l'homogénéité à des façades urbaines anarchiques. La végétation sert de guide visuel et induit des phénomènes de masquage, de filtrage, de perspective, de perception modifiée. (De Sablet, 1988, Stefulesco, 1993). Cité par (Vinet, 2000).

2.3.1.3.2 Types de rues

Les rues se distinguent pourtant selon longueur, leur taille, leur animation. Les caractéristiques de la rue varient en fonction de sa position hiérarchique, selon la taille des villes et la culture locale, ainsi que les contextes urbains. (NGUYEN, Tuan Anh, 2007).

2.3.1.3.2.1 Les rues principales ou artérielles

Elles ont en général une largeur de 12 à 25 mètres permettant un stationnement de chaque côté. Elles peuvent être d'anciennes grandes rues, des pénétrantes depuis les faubourgs, des rues de liaisons inter-quartiers, des rues structurantes, des rues de composition,...

2.3.1.3.2.2 Les rues ordinaires ou de desserte

Elles constituent l'essentiel du maillage de la ville. Les rues ordinaires (une largeur de 6 à 8 mètres) sont parfois étroites, mais deux voitures peuvent s'y croiser ; elles contribuent à la desserte locale. De 9 à 12 mètres, elles peuvent être considérées comme large bien que la perception de cette largeur soit très relative. Les ruelles, venelles ou passages ouverts sont les héritages de la « ville pédestre ».

2.3.1.3.2.3 Les ruelles et les impasses ou voies de distribution

L'impasse est une forme particulière de la rue. Dans la structure urbaine actuelle, l'impasse a le sens de "corridor" (couloir) et de "passage" (galerie). L'impasse fait partie de la voirie urbaine, mais elle ne livre pas de passage à la circulation d'une rue à l'autre. Elle est avant tout un lieu d'habitation situé en retrait de la voie publique, avec laquelle elle communique par un goulot étroit, rarement accessible aux véhicules.

Dans les villes compactes, elles forment un maillage assez dense et serré dans les vieux centres, mais aussi dans beaucoup de quartiers sous-intégrés. D'une largeur très variable, de 1 à 6 mètres. Elles subsistent au cœur des vieilles villes.

2.3.1.4 LES QUARTIERS

Les quartiers sont les parties de la ville d'une taille assez grande, ils sont composés par de nombreuses voies, des îlots, des parcelles. Chaque quartier présente des caractéristiques qui lui sont propres dans la ville.

2.3.1.5 Les îlots

Le mot îlot désigne une portion du territoire urbain, un groupe de maisons, d'immeubles, délimité par des rues dans une ville. L'îlot est l'expression du dehors et du dedans. Il est aussi l'expression de ses habitations, de son époque, de son évolution, de son contexte. Selon (Penarai, 2009), l'îlot n'est pas une forme architecturale mais un ensemble de parcelles rendues solidaires et qui prend son sens que dans une relation dialectique avec le maillage des voies, il apparaît comme le complément de la trame viaire, son négatif : la superposition des deux remplit tout l'espace.

2.3.1.5.1 Enveloppe de l'îlot

L'enveloppe d'îlot est constituée des bâtiments qui entourent une grande cour intérieure dans l'îlot, elle joue le rôle de digue par rapport à cette cour. La cour intérieure peut être isolée ou reliée à la rue extérieure par des porches. Quelquefois, une voie peut traverser à cette cour.

Sous l'angle d'usage, l'enveloppe d'îlot est une structure idéale pour les grands îlots. Elle crée les conditions les plus confortables vis-à-vis des ambiances urbaines.

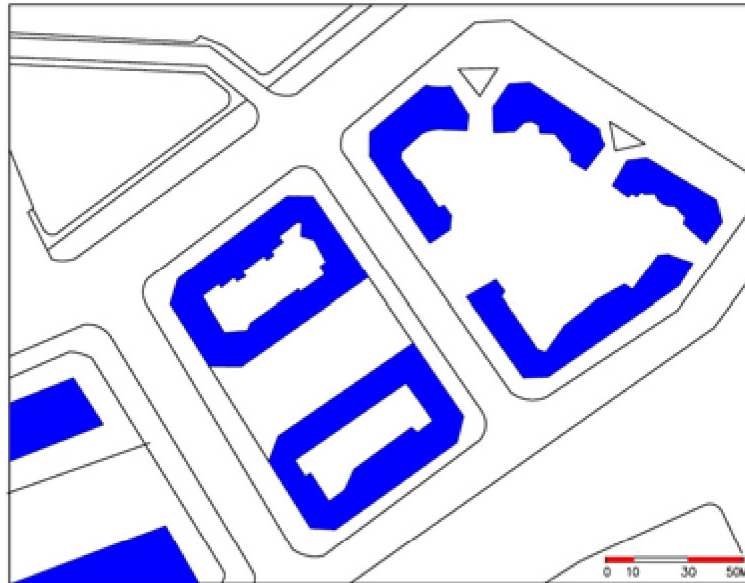


Figure 2.5 : L'exemple d'enveloppes d'îlot, (NGUYEN, Tuan Anh, 2007).

2.3.1.5.2 Structure de l'îlot

Du point de vue de la morphologie urbaine, l'îlot peut distinguer par les caractères physiques, ci-dessous. (Allain, 2004):

2.3.1.5.3 La géométrie

- **L'îlot carré** caractéristique du système hippodamien recouvre des réalités diverses. Son principal inconvénient est le caractère difficilement accessible et utilisable du cœur d'îlot quand les carrés sont grands. Ceci implique alors des systèmes de « passage » traversant ou impasses.
- **L'îlot rectangulaire** a comme principal avantage l'économie de voirie (rangées allongées, parcelles étroites et peu profondes, bien adaptées aux maisons urbaines mitoyennes). Mais ce n'est plus le cas lorsqu'il n'est constitué que d'une seule rangée de bâtiments. Son principal inconvénient apparaît lorsque les rectangles sont trop longs ; ils nuisent alors à l'irrigation optimale des quartiers centraux.
- **L'îlot triangulaire**, résulte fréquemment de la superposition d'une nouvelle trame de rue en oblique par rapport à une trame quadrangulaire et rectangulaire. Son principal inconvénient est l'inégalité du découpage et l'utilisation plus difficile des parcelles d'angles.
- **L'îlot barre**, avec une seule épaisseur de bâti entre les deux rues

parallèles est fréquent dans les villes anciennes aux tissus très denses. Il peut aussi être généré par une percée parallèle à des rues anciennes.

- **L'îlot irrégulier**, existe dans les vieilles villes, dans les secteurs dont la trame de rue est libre.

2.3.1.5.4 La taille et usage

Les îlots sont de tailles diverses : de quelques dizaines de m² dans certaines petites villes à plusieurs hectares parfois.

L'usage et l'organisation interne de l'îlot varient. Ils sont parfois complètement bâtis, mais le plus souvent ils comportent un espace central non bâti appelé, le cœur d'îlot, autour de cet espace, les bâtiments peuvent s'appeler l'enveloppe d'îlot.

2.3.1.5.5 Le degré d'ouverture

L'îlot se définit aussi par sa plus ou moins grande ouverture. On distingue :

- **Les îlots fermés** autour d'un cœur constitué d'espaces privatifs (cours ou jardins, ou plus ou moins densément bâtis ou remplis de bâtiments annexes (hangars, ateliers, cabanes...)).
- **Les îlots ouverts**, visuellement, quand les limites laissent voir l'intérieur des cours et jardins, privés ou publics ou partiellement, par un porche, une ruelle ou plus radicalement sur un côté ou par un espace traversant. Certains îlots de grands ensembles entrent dans cette catégorie quand les immeubles à l'alignement ferment un espace semi - fermé transformé en square.
- **Les îlots hyperdenses**, peuvent être complètement bâtis.

2.3.1.6 Les nœuds et espaces libres

Le nœud est un point de convergence de cheminement ou un grand espace vide dans la ville.

2.3.1.6.1 Les places

Les places sont des espaces publics ouverts plus ou moins minéraux, connectés au reste de la ville par des accès de rues qui y débouchent et pourtant visuellement fermées par une certaine disposition du bâti autour de celles-ci. Plusieurs critères sont à examiner en ce qui concerne la

morphologie de la place, On peut étudier les différences des places par certaines caractéristiques :

- **La forme** : L'analyse morphologique de la place consiste en premier lieu à dégager la configuration géométrique de son contour. La forme peut être simple et régulière : carrée, rectangulaire, circulaire, ... et peut également prendre des formes irrégulières.

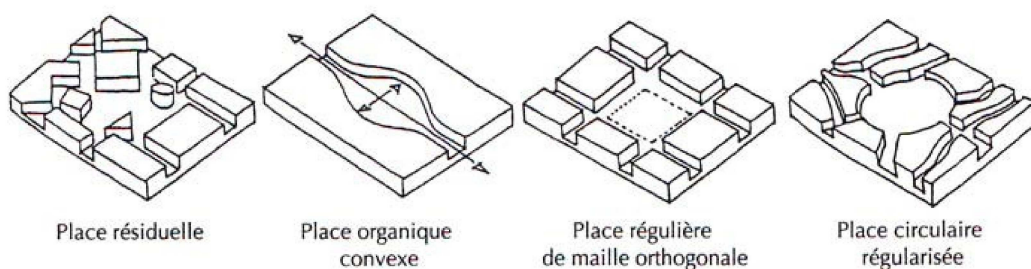


Figure 2.6 : Quelques formes de place. (Allain, 2004)

- **Les dimensions** : Les places ont des dimensions différentes qui dépendent du contexte urbain. La forme de la place doit être appréciée par rapport à la dimension verticale (une petite place entourée par des bâtiments de six ou sept étages prendra la forme d'un canyon), tandis que dans l'énorme place Bel cour de Lyon, la même hauteur de bâtiments parvient à peine à affirmer une dimension verticale autour de l'espace public.
- **L'ouverture et la fermeture** : Etant donné que la place soit connecté au reste de la ville par l'arrivée de rues qui percent le front bâti, sa fermeture ne peut jamais être totale ; le rapport entre les pleins (le bâti) et les vides (les ouvertures) le long du périmètre de la place, peut être directement calculé, pour donner une idée de la porosité de ce périmètre.
- **L'orientation de la place** : Une même place rectangulaire pourra être une place en profondeur ou en largeur, selon que son bâtiment principal occupe le côté court ou le côté long du rectangle (**Figure 2.7**).

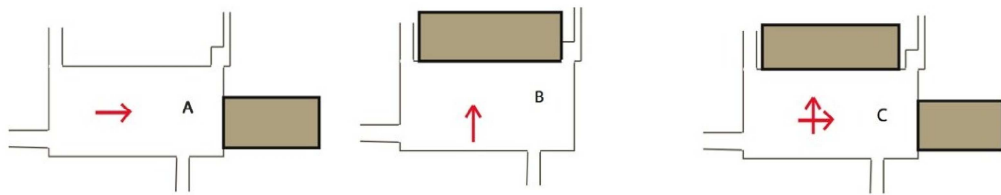


Figure 2.7: L'orientation de la place, (A) Place en largeur : l'édifice principal de la place occupe le côté le plus long, de ce fait, il donne une orientation en largeur de la place. (B) Place en longueur : l'édifice emblématique de la place occupe le côté le plus court. (C) Place à la fois en longueur et en largeur : deux édifices importants orientent chacun la place selon leur disposition. Source : <http://www.espaces-publics-places.fr>

- **L'enveloppe :** Au lieu d'être développée sur deux rives comme dans la rue, la façade urbaine de la place est fermée autour d'un vide qui devient un volume. Le rapport de proportion entre le gabarit des immeubles et les dimensions de la place est déterminant, de même que les caractères des façades urbaines (matériaux, style, modénature, habillage publicitaire). Comme pour la rue, le rythme de ces façades est cause ou conséquence du découpage parcellaire.
- **Le centre :** Il peut être vide ou occupé par un signe (statue, fontaine, bassin, colonne) qui peut focaliser la place et corriger les multiples sollicitations visuelles d'une enveloppe irrégulière ou trop ouverte.

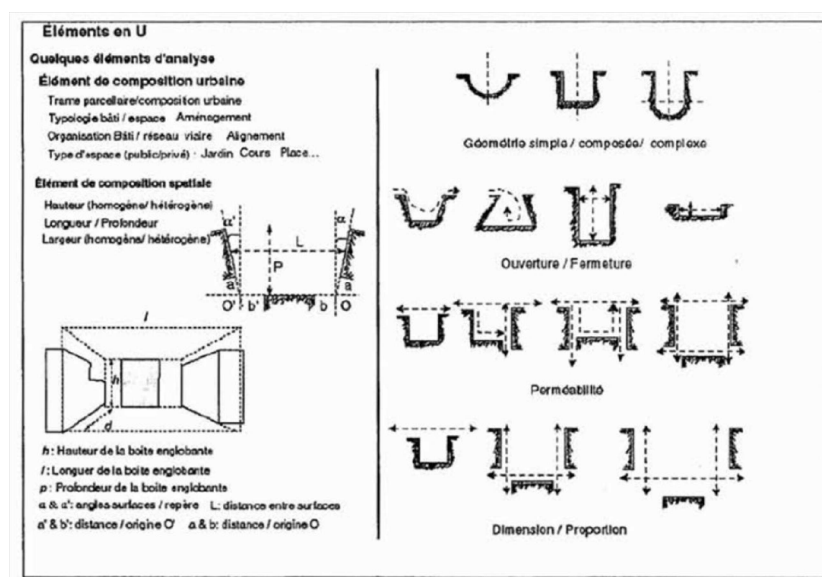


Figure 2.8 : Caractéristiques formelles d'un espace en forme de « U ». Source : (Tiraoui, 2000).

- **Les types de places** : Le classement des places peut être hiérarchique (de la placette à l'esplanade) ou générique (places « créées » et places « spontanées », formées progressivement sans plan préétabli). Fonction, signification et donc forme sont aussi très influencées par la position dans le tissu urbain et par le processus de formation de la place. (NGUYEN, Tuan Anh, 2007).

2.3.1.6.3 Les cours

La cour, du latin *cahors*, *cahortis*, « coin de ferme ». « Espace découvert, entouré de murs ou de bâtiments, faisant partie d'une habitation, d'un édifice administratif, scolaire, etc. qui souvent s'ordonne autour d'elle » (Dictionnaire Grand Larousse universel, 1997).

Les cours sont des espaces libres communautaires qui assurent des liaisons avec les espaces publics (rue, boulevard, etc.) et contribuent à la transition entre l'espace public et l'espace privé, se sont des véritables lieux d'échanges et de rencontres. Ces espaces représentent une solution optimale pour améliorer la densité de construction, et favorisent le confort urbain ; et créent également des espaces esthétiques dans la structure urbaine locale. Les cours peuvent être ouvertes ou fermées ou même traversante, traitée comme un élément charnière entre deux rues ou une rue et l'intérieur de l'îlot, et constituer des espaces publics ou privés.

2.3.2 LES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES

2.3.2.1 Indicateurs thermo-radiatifs

2.3.2.1.1 Le facteur de vue de ciel

Le Facteur de Vue du Ciel (FVC) est une mesure de l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un point de l'espace urbain. (Sarradin, 2004) cité par (Athamnia, 2012). C'est un paramètre sans dimension compris entre 0 et 1. (Oke, 1988). Il détermine les échanges de chaleur par rayonnement entre le lieu considéré et le ciel.

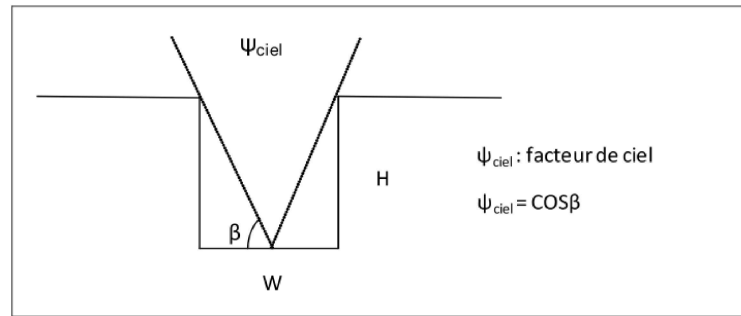


Figure 2.9 : Facteur de vue dans un canyon symétrique, largeur de rue W , hauteur des bâtiments H . Source: (Parmentier, 2010); adoptée de (Oke, 1981).

Le facteur de vue du ciel permet de caractériser la géométrie urbaine et les conséquences radiatives et thermiques qui en découlent (Robinson, 2006; Yamashina et al., 1986; Giridharan et al., 2007; Sacre, 1983). cité par (Athamnia, 2012). Il affecte le confort dans les espaces extérieurs.

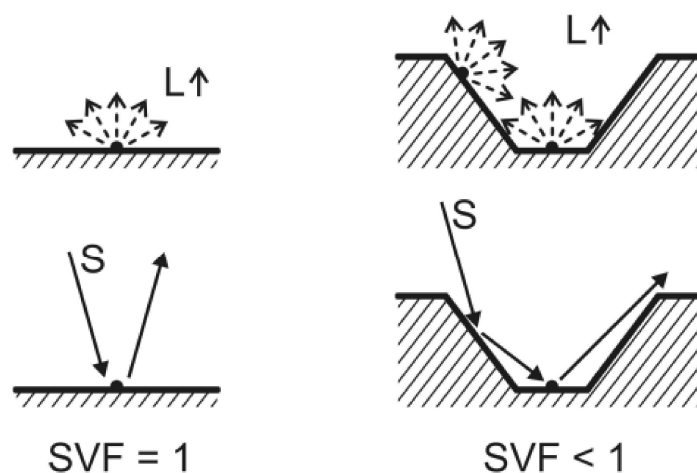


Figure 2.10: Influence des surfaces horizontales (à gauche) et alambiquées (à droite) avec des valeurs différentes du SVF, sur les flux de rayonnement. L = rayonnement de grande longueur d'onde, S = rayonnement d'ondes courtes. Source : (Oke, 1987).

Le facteur de vue du ciel est un indicateur qui affecte la température de l'air ainsi que la quantité d'énergie solaire incidente (Athamnia, 2012).

Tzu-Ping et al., (2010), cité par (Athamnia, 2012), ont effectué une étude sur le confort thermique estival dans les espaces extérieurs d'un campus universitaire à Taiwan. Les résultats ont indiqué que les espaces avec un facteur de vue de ciel (SVF) de 0,13, présente le plus grand pourcentage de périodes confortables (plus de 53 %), qui diminue avec l'augmentation du FVC des surfaces jusqu'à atteindre 0 % dont le FVC vaut 0,81.

Inversement, lorsque les valeurs de FVC sont inférieures à 0,13, le pourcentage diminue et atteint 25 % pour un FVC de 0,04. Ainsi, les espaces présentant des surfaces avec un grand FVC risquent de provoquer des situations d'inconfort en été.

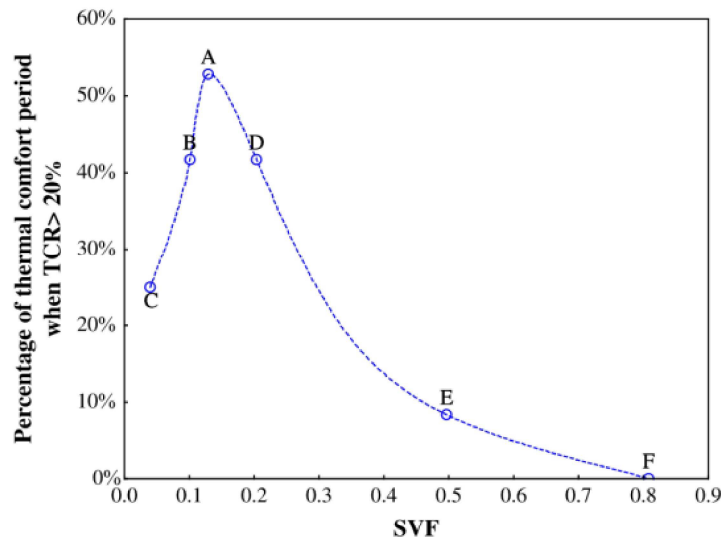


Figure 2.11 : la relation entre le facteur de vue du ciel et le pourcentage de périodes de confort. Source : (Tzu-Ping *et al*, 2010). Adopté de, (Athamnia, 2012)

Santos *et al*, (2003), ont étudié l'influence de la géométrie urbaine et le stockage thermique dans les bâtiments de la ville, dans un quartier de la ville de Belo Horizonte, au Brésil. Ils ont mis l'accent sur le facteur de vue du ciel (FVC) et densité des bâtiments, comme paramètres qui ont été corrélées avec les données climatologiques recueillies par le biais d'une station mobile. Les résultats ont confirmé des températures plus élevées et refroidissement plus lent dans les sites les plus obstrués et dans les zones les plus denses.

Oke, (1981), a étudié les caractéristiques de l'évolution temporelle des îlots de chaleur urbains et de l'échange radiatif dans les canyons urbains, il a utilisé un modèle simple pour simuler les vitesses de refroidissement nocturne pour les environnements ruraux et urbains dans des conditions calmes et sans nuages. Ce modèle a été utilisé pour étudier essentiellement le rôle joué par les différences rurales / urbaines dans la géométrie et l'admission thermique. Les résultats des expériences ont montré que le facteur de vue du ciel mesuré pour la géométrie de canyon dans la partie centrale de la ville est une variable pertinente dans

la caractérisation des îlots de chaleur urbains nocturnes en raison de sa dépendance dans la régulation du rayonnement de grande longueur d'onde de la perte de chaleur par rayonnement. Il est également démontré que cette mesure est au cœur de la relation entre la taille de la ville et de l'intensité de l'îlot de chaleur.

Souza, (2007), a effectué une étude dans la ville de Bauru au Brésil, grâce à un programme informatique, elle a déterminé le le facteur de vue du ciel (FVC) pour 40 points de mesure. Les données de température air ont été prélevées et ensuite corrélées les informations obtenues avec les valeurs de FVC. L'analyse a montré qu'il n'y avait pas une tendance claire entre FVC et la température moyenne de l'air. Selon l'auteur, les valeurs maximales de la température, à la fois en été et en hiver, ont été trouvés dans les zones avec des valeurs du FVC inférieures, ces zones ont les températures les plus inconfortables. Aussi en matière de confort thermique, les résultats ont indiqué que le FVC a une plus grande influence au cours de l'été que l'hiver.

2.3.2.1.2 La durée d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement représente pour une date donnée la durée pendant laquelle un élément de surface du sol reçoit directement de rayonnement solaire direct. On peut également calculer, sur le site étudié, la durée moyenne d'ensoleillement. Sa valeur sera égale à la valeur moyenne des durées d'ensoleillement pondérées par les surfaces élémentaires. Le calcul de cet indicateur nous permettra de localiser les points du projet qui sont largement exposés au soleil et par conséquent ils sont inconfortables pour l'implantation de certains équipements. (**Musy, 2006**).

2.3.2.1.3 Le rapport H/W

Les rues en milieu urbain peuvent être caractérisées de manière quantitative par le rapport d'aspect (rapport entre la hauteur des bâtiments H et la largeur des rues W) qui est inversement proportionnel au facteur de vue du ciel des éléments de la rue. Par ailleurs, à une échelle plus grande, le calcul du rapport d'aspect peut être exprimé par l'équation (2.1). (**Masson, 2000**) :

$$AR = \frac{S_{vertical}}{S_a - S_{bati}} \tag{2.1}$$

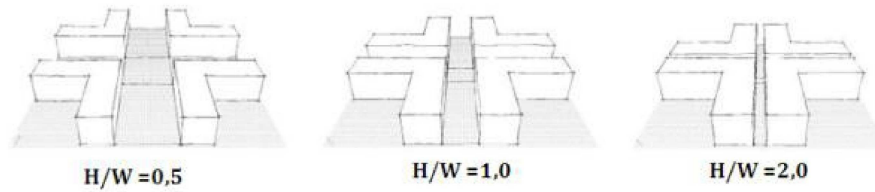


Figure 2.12: Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon (Bougiatioti, 2006).Adopté de (ATHAMNIA, 2012).

Une synthèse sur l'impact des différences de rapport H/W par rapport aux conditions thermiques effectuée par Tiraoui, (2000), est présentée dans le **tableau 2.1**. Ces conclusions sont spécifiques à une rue canyon localisée à la latitude de 45° Nord et orientée Nord-Sud.

	H/W	Avantages
L'accessibilité solaire	0,5 à 2	l'absorption solaire est comprise entre 13 % (H/W = 0,5) et 27 % (H/W = 2) lorsque l'albédo de surface est égal à 0,4.
	0,58	Le rapport H/W est représentatif des villes de latitude 45°N.
Gain de chaleur	0,4	le gain de chaleur est de 30 % par rapport à une situation de surface dégagée (H/W =0).
	0,7	Le gain de chaleur est de 50 % par rapport au cas H/W=0.
	1,0	Le gain de chaleur est de 70 % par rapport au cas H/W=0.

Tableau 2.1 : Relations entre le rapport d'aspect de la rue canyon et les conditions thermiques. (Tiraoui, 2000).

Oke T.R. (1988) cité par (Tiraoui, 2000), (**tableau 2.2**), met en relation les variations proportionnelles de la rue canyon avec celle des conditions thermo-aérauliques et de la dispersion des polluants. Il compare trois facteurs: l'écoulement, la dispersion des polluants et l'accessibilité des rayonnements solaires avec l'intensité d'ilot de chaleur.

La protection des vents	H/W=0.65 H/W=0,4	Apporte une bonne protection du vent Induit une faible interférence d'écoulement
Dispersion des polluants	H/W=0.65,D=0.25 Induit	une dispersion convenable des polluants
L'accessibilité solaire	H/W=0.5-2.0 H/W=0.58	L'absorption solaire est de 1327%, quand l'albédo de surface est de 0.4 Est approprié pour la latitude 45°
Gain de chaleur	H/W=0.4 H/W=0.7 H/W=1.0	Gain de chaleur est de 1/3 (par rapport à une situation de surface dégagée) Gain de chaleur est de 1/2 Gain de chaleur est de 2/3

Tableau 2.2 : Tableau synthétique des relations existantes entre proportions de la rue canyon et intensité d'ilot de chaleur. La rue canyon étudiée est semi-infinie, se trouvant à la latitude 45° Nord, orientée nord sud, les vents sont orientés à 30° par rapport à l'axe de la rue. (H : hauteur de rue, W : largeur de rue), Source : (Oke T.R.1988) Adopté de (Tiraoui, 2000).

Johansson, (2006), a examiné l'influence de la géométrie urbaine sur le confort thermique extérieure en comparant deux canyons urbains situés à Fès, au Maroc ,avec deux rapports d'aspects différent, Le premier est dans la vieille ville et, avec un rapport H / W de 9,7, est désormais appelé le «canyon» «profond» (Figure 2.11), le second est dans le nouveau quartier et, avec un rapport H / W de 0,6, est appelé le Canyon «peu profond».L'évaluation du confort thermique par l'indice PET suggère qu'en été, le canyon profond été plus confortable que le canyon peu profond. Cependant, pendant l'hiver, le canyon profond est le plus confortable en raison de possibilité de l'accès solaire. Les résultats montrent que, dans les climats chauds et secs une forme urbaine compacte est préférable. Cependant, si il ya une saison froide, la conception urbaine devrait inclure quelques rues plus larges ou des espaces ouverts ou les deux pour fournir un accès solaire. Le rapport entre la hauteur des bâtiments (H) et la distance entre elles (L) influe sur la quantité de rayonnement à la fois entrant et sortant et affecte également la vitesse du vent.

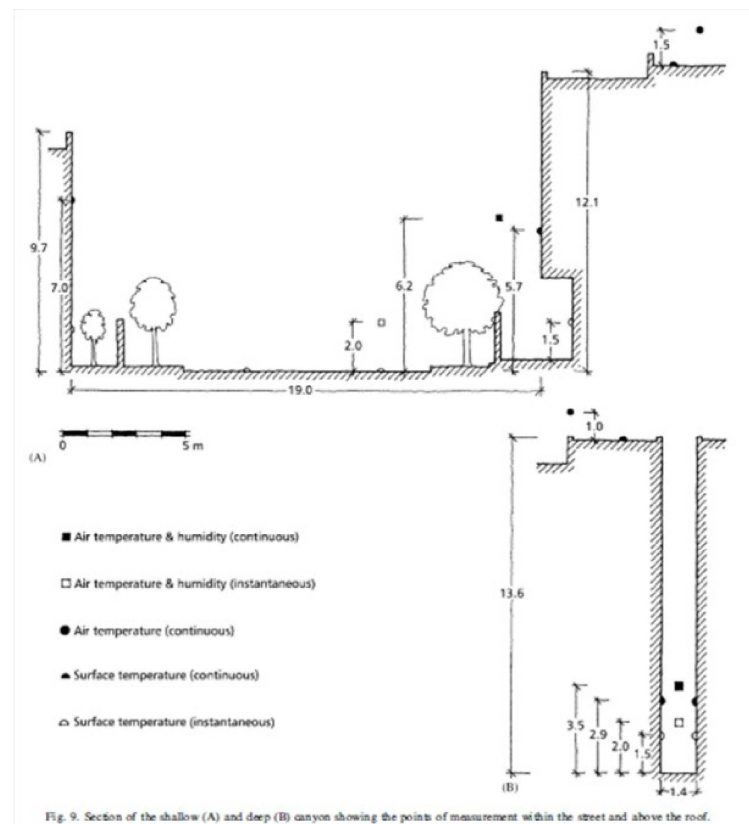


Figure 2.13 : Les points des mesures dans la rue et au-dessus du toit pour le canyon peu profond (A), et canyon profond (B). Johansson, (2006).

Les travaux de Oke pour la caractérisation de l'ICU, il a distingué pour les villes européennes et américaines une corrélation entre ΔT_{urMAX} et le rapport d'aspect H / W des rues, de type canyon, des centres urbains :

$$\Delta T_{urMAX} = 7,54 + 3,97 \ln\left(\frac{H}{W}\right) \quad (2.2)$$

2.3.2.1.4 La densité du bâti

La densité surfacique urbaine rend compte de l'occupation des structures bâties dans le milieu urbain. Elle correspond au rapport entre la surface construite et la surface totale urbaine, et varie selon le mode d'occupation de l'espace. D'un point de vue climatique, la densité surfacique urbaine interfère avec certaines préoccupations climatiques urbaines comme l'îlot de chaleur urbain. La densité d'occupation du bâti peut être obtenue avec l'équation suivante, (Tsoka, 2011):

$$D_S = \frac{1}{A_S} \sum_i^N A_{p,i} \quad (2.3)$$

avec :

- A_p : la surface de plancher du bâtiment i
- A_S : la surface totale du quartier étudié
- N : le nombre des bâtiments au sol

La densité volumique représente la relation entre la volumétrie construite et la surface du territoire qui correspond au projet de l'urbanisation. (Musy, 2006). Elle s'écrit avec la formule suivante :

$$D_V = \frac{V_b}{A_S} \quad (2.4)$$

Avec :

- V_b : le volume cumulé des bâtiments (m3)
- A_S : la surface totale du quartier étudié (m2)

Ces deux indicateurs de densité rendent compte de l'occupation de constructions ainsi que de la volumétrie construite. Leur calcul permet d'évaluer la consommation d'espace quant au projet urbain.

Autres définitions de densité, tel que le **COS** (coefficient d'occupation des sols) ; définie par le rapport entre la surface de plancher hors d'œuvre nette de cette construction et la surface de terrain sur laquelle elle est ou

doit être implantée ; le **CES** (coefficient d'emprise au sol), qui représente le rapport entre la surface au sol d'une construction et la surface de la parcelle sur laquelle elle se trouve.

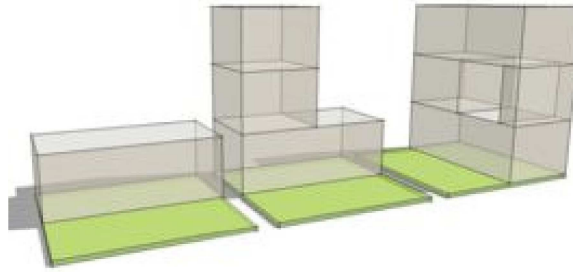


Figure 2.14: 3 formes bâties pour un même CES = 0,5. (Musy, 2006).

L'intérêt de ces indicateurs est de lier les formes urbaines aux questions environnementales et climatiques. (Musy, 2006).

Boukhezer (2002), cité par (Athamnia, 2012), a montré que la densité surfacique des bâtis agit sur la quantité d'énergie journalière absorbée par les bâtiments, par une étude sur trois tissus urbains présentant des densités d'occupation de sol différentes dans la ville d'Oran en Algérie; Le centre historique de la ville caractérisé par son tissu organique, sa forte minéralisation et sa densité surfacique élevée, présente de plus grandes quantités d'énergie solaire absorbée par rapport aux tissus urbains en damier et dispersés.

2.3.2.1.5 L'albédo des surfaces

L'albédo est le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident sur une surface donnée, ainsi quand le rayonnement solaire arrive sur une surface opaque, une partie de l'énergie est réfléchi et le reste est absorbé, constituant une propriété importante car elle détermine la vitesse relative de la chaleur sur la surface lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil. Il désigne l'indice de réfléchissement d'une surface en fonction de sa couleur mais aussi de sa texture et porosité. C'est une grandeur sans dimension. Sa valeur s'exprime soit par un pourcentage entre 0% et 100%, qui est donc le pourcentage de lumière réfléchi par rapport à la quantité reçue, soit par un chiffre entre 0 et 1, qui est la fraction de la lumière réfléchi.

Les surfaces avec un faible albédo deviennent alors plus chaudes que celles avec un fort albédo. Cette définition s'applique aussi bien à des surfaces uniformes qu'à des milieux plus hétérogènes et complexes comme les zones urbaines. (Colombert, 2008).

Les températures les plus élevées se produisent dans les zones urbaines où il ya une incidence plus élevée de béton, le ciment et l'asphaltage, qui coïncide avec les zones les plus densément construites.

Asaeda et al., (1993), ont observés le flux de chaleur près de la surface du sol pour différents types de chaussées (asphalte, béton et sol nu). Les résultats ont montré que le stockage de la chaleur de surface en dessous au cours de la journée été plus important pour les sols revêtus d'asphalte, et moins pour la surface de sol nu. En conséquence, la température de la surface en asphalte est passé à plus de 60 C° au maximum, à midi et était d'environ 5 C° supérieure à la température atmosphérique même en début de la matinée. Par conséquent, le revêtement d'asphalte a enregistré 150 W / m² supplémentaire dans le rayonnement infrarouge et 200 W / m² à la chaleur sensible dans l'atmosphère par rapport à la surface de sol nu. La plupart du rayonnement infrarouge du sol a été absorbée à moins de 200 m de la basse atmosphère, affectant la température de l'air près du sol.

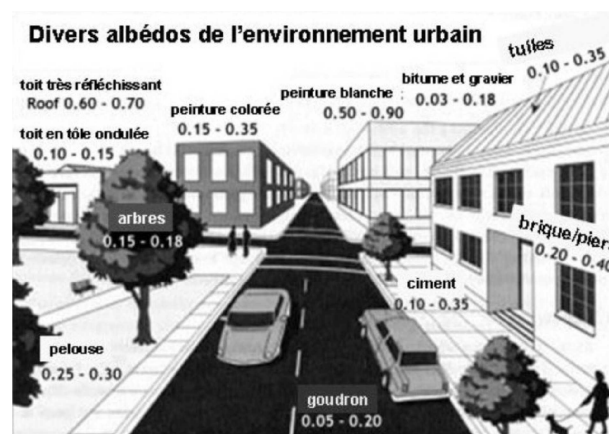


Figure 2.15 : Divers albédos de la ville. Compris entre 0 et 1 l'albédo caractérise le pouvoir réfléchissant d'un support. A 1 l'énergie lumineuse est entièrement renvoyée. Source : (Colombert, 2008).

2.3.2.2 LES INDICATEURS AERAULIQUES

2.3.2.2.1 La densité du tissu urbain

La densité est un concept qui exprime un rapport entre un nombre d'éléments et une surface, un volume ou bien une longueur. Ce rapport équivaut à l'appréciation de la charge supportée par unité de référence»

La densité bâtie se définit par le rapport entre l'emprise au sol multiplié par la hauteur moyenne et la surface d'occupation du sol.

$$\text{Densité bâtie} = \frac{\text{Emprise au sol} \times \text{hauteur moyenne}}{\text{Surface d'occupation du sol}} \quad (2.5)$$

(Boukezer), cité par (Athamnia, 2008), a montré que la densité surfacique des bâtis affecte considérablement la quantité d'énergie absorbée par les bâtiments, dans une étude comparative menée sur trois modèles de quartier de la ville d'Oran. Un modèle organique, un modèle en damier et un modèle aléatoire.

2.3.2.2.2 La porosité du tissu urbain

La porosité d'un quartier urbain est traduite par le rapport des volumes utiles ouverts à l'ensemble des volumes du tissu urbain considéré. Son ordre de grandeur est entre 5% et 50% avec 35% comme valeur moyenne. (Tsoka, 2011).

La porosité est calculée avec l'équation suivante:

$$P = \frac{\sum_i \pi r_{h,i}^2 L_i}{\sum_i V_i + \sum_j V_j} \quad (2.6)$$

avec :

{ L_i : la longueur de l'espace ouvert i

{ $r_{h,i}$: le rayon hydraulique de l'espace ouvert i

{ V_j : le volume moyen de l'espace bâti j

{ V_i : le volume moyen d'un espace ouvert i

Le $r_{h,i}$ est calculée en utilisant l'équation:

$$r_{h,i} = \frac{hl}{h+l} \quad (2.7)$$

La valeur h est la hauteur de la canopée dans la rue considérée (hauteur moyenne des bâtiments qui la bordent) et l est la largeur moyenne de la rue.

Ait amour, (2004), cité par (Athamnia, 2012), définit la porosité d'un quartier urbain comme le rapport entre la surface totale de ces percements et la surface totale de sa façade urbaine. Sa valeur dépend de la configuration spatiale de chaque tissu et de son orientation par rapport aux vents dominants. Elle est donnée par la relation:

$$Porosité_{quartier} = \frac{Surface\ totale\ des\ percements}{surface\ total\ de\ la\ façade\ urbaine} \times \cos\varnothing \quad (2.8)$$

Où \varnothing représente l'angle que fait chaque quartier avec la direction du vent dominant.

La porosité d'un tissu urbain peut considérablement affecter la vitesse du vent au sein d'un quartier ainsi que la température de l'air. Lorsque la densité du bâti est importante, elle protège les zones intérieures des fortes rafales. En revanche, ces zones sont souvent défavorisées du point de vue de renouvellement d'air, particulièrement dans les espaces confinés. Au contraire, lorsque la densité du bâti est moins importante, la ventilation est favorisée et la turbulence et la convection forcée peuvent se développer plus facilement. (Athamnia, 2012).

2.3.2.2.3 NATURE DE L'AGENCEMENT

L'organisation urbaine est définie par l'agencement spatial des bâtiments et de l'espace public les uns par rapports aux autres et leur importance en termes de surface au sein d'une ville. (Colombert, 2008).

Dans un milieu urbain, la nature de l'agencement se traduit par la façon dont les bâtiments sont associés (forme, dimension, orientation, juxtaposition, ...etc), et cela conditionnent la distribution de la vitesse du vent et l'intensité turbulente autour des obstacles. Par conséquent, des effets de gêne liés à l'écoulement du vent peuvent être engendrés. Plusieurs effets aérodynamiques sont documentés dans la littérature, (Gandemer, 1976), tels que : l'effet venturi, l'effet de maille, l'effet des barres, l'effet de passages sous les immeubles

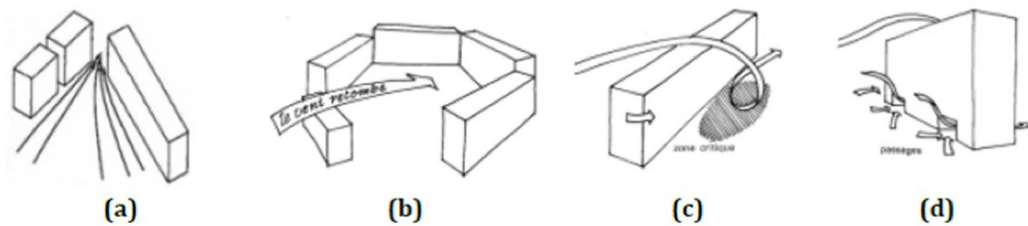


Figure 2.16 : Quelques effets aérodynamiques du vent : **(a)** effet venturi, **(b)** effet de maille, **(c)** effet de barre, **(c)** effet de passages sous les immeubles (Gandemer, 1976).

2.4 IMPACTS DE LA MORPHOLOGIE SUR LE CONFORT EXTERIEUR

Les éléments composant les formes des tissus urbains et des tracés agissent comme des facteurs de variations du microclimat urbain et induisent une distribution des paramètres de confort (température de l'air, vitesse du vent, rayonnement incident...). (Athamnia, 2012).

A l'échelle urbaine, les modifications des paramètres de confort causées par de nombreux paramètres morphologiques, sont synthétisées dans le tableau ci-dessous. (Tableau 2.3).

L'influence de la morphologie urbaine sur le confort extérieur		
Facteurs morphologiques influant sur le rayonnement solaire et sur la température de surface		
INDICATEUR	AUTEUR	ETUDE
SVF	Tzu-Ping <i>et al.</i> , (2010)	ont étudié expérimentalement le confort thermique estival dans les espaces extérieurs d'un campus universitaire à Taiwan en utilisant l'indice de confort PET (Température Physiologique Equivalente). Ils ont croisé les résultats de l'indicateur FVC et le pourcentage des périodes thermiquement confortables pour divers endroits sur le campus. Les résultats ont montré que la place, dont FVC est de 0,13, présente le plus grand pourcentage de périodes confortables avec plus de 53 %. Ce pourcentage diminue avec l'augmentation du FVC des surfaces jusqu'à atteindre 0 % pour la place dont le FVC vaut 0,81. Inversement, lorsque les valeurs de FVC sont inférieures à 0,13, le pourcentage diminue et atteint 25 % pour un FVC de 0,04. Ainsi, les espaces présentant des surfaces avec un grand FVC risquent de provoquer des situations d'inconfort en été.
	Ratti <i>et al.</i> , (2003)	ont montré l'existence d'un lien étroit entre le FVC et les températures des surfaces urbaines, en étudiant numériquement trois configurations différentes dans les régions chaudes et arides. La première présente des formes géométriquement fermées avec des cours intérieures. Dans la seconde configuration, les cours intérieures ont été supprimées, présentant ainsi des formes compactes. Notons que, ces deux configurations présentent un tissu dense avec une densité surfacique bâtie élevée et des rues étroites. En revanche, la troisième configuration présente un tissu ouvert avec des formes aérées représentatives des formes pavillonnaires. Les résultats obtenus pour ces configurations montrent que les formes fermées avec des cours intérieures présentent les valeurs les plus faibles du FVC de l'ordre de 0,13, alors qu'il est de 0,23 pour les formes compactes et de 0,48 pour les formes pavillonnaires. Les températures de surfaces les plus élevées sont obtenues pour les formes pavillonnaires avec des valeurs de l'ordre de 40,5°C. Cette valeur maximale est supérieure de 5,3°C par rapport aux formes compactes et de 8,6°C par rapport aux formes fermées avec des cours intérieures. Ratti <i>et al.</i> , (2003) suggèrent alors d'ouvrir les tissus

		urbains afin de favoriser la dissipation de la chaleur et d'éviter ainsi les risques d'inconfort thermique dans ces espaces.
	Ratti et al. , (2003)	ont montré le rôle prépondérant de l'agencement des tissus sur leur pourcentage de FVC.
	Athamena et al. , (2009)	ont montré numériquement que l'organisation serrée et fractionnée des bâtiments du projet Lyon Confluence réduit le FVC des façades et du sol par rapport à une organisation ouverte et aérée. Ils ont montré aussi que les géométries présentant un fort pourcentage de surfaces horizontales, notamment les toitures et les terrasses, sont caractérisées par des valeurs élevées de FVC.
rapport H/W	Aida (1982) et Aida et Gotoh , (1982)	études expérimentales sur des rues canyon présentant différents rapports d'aspect H/W ont montré une réduction d'absorption de l'énergie solaire incidente de 27% à 13 % lorsque le rapport H/W passe de 0,5 à 2.
	Bourbia et Awbi , (2004).	Ils ont observé qu'une rue avec un rapport H/W égal à 0,5 reçoit un pourcentage élevé d'énergie solaire direct notamment les surfaces verticales des bâtiments atteignant un pic de température de surface de 53°C. Ce captage thermique diminue lorsque le rapport H/W est égal à 2 où les pics de température ne dépassent pas 46°C.
	(Sakakibara , 1996).	L'étude de l'effet du rapport d'aspect d'une rue sur son environnement thermique intérieur montre que plus le rapport H/W est grand, plus le phénomène de stockage de chaleur est marqué. La différence de quantité de chaleur restituée entre un canyon présentant un rapport H/W de 2 et un canyon avec un rapport de H/W égal à 0,7 serait de 50 W/m ² .
la densité surfacique urbaine	Boukhezer (2002)	une étude menée sur trois tissus urbains présentant des densités d'occupation de sol différentes dans la ville d'Oran en Algérie a montré que la densité surfacique des bâtis agit sur la quantité d'énergie journalière absorbée par les bâtiments. Le centre historique de la ville caractérisé par son tissu organique, sa forte minéralisation et sa densité surfacique élevée, présente de plus grandes quantités d'énergie solaire absorbée par rapport aux tissus urbains en damier et dispersés.
	Aida et Gotoh (1982)	ont abordé la densité surfacique urbaine de manière plus simplifiée à travers le rapport W1/W2 (où W1 est la largeur des toitures W2 est la largeur des rues). Cet indicateur a été étudié par la suite sur une configuration de rue canyon en faisant varier les paramètres W1 et W2. L'objectif était de quantifier sa variation sur la quantité d'énergie solaire réfléchie par les surfaces. Les résultats montrent que les valeurs d'albédo équivalent diminuent progressivement avec l'augmentation du rapport W1/W2. Autrement dit, l'albédo des surfaces augmente avec la densité des surfaces bâties. En effet, cette densité engendre moins d'échange d'énergie entre les surfaces que dans le cas d'une géométrie fractionnée.
Variation de la façade des rues canyons	Ali-Toudert et Mayer (2007)	ont étudié numériquement l'impact de l'irrégularité des façades sur le confort thermique au sein d'une rue canyon. Le confort thermique a été évalué par le biais de la température physiologique équivalente (PET). Le panel d'étude comprend trois rues canyons présentant toutes des galeries piétonnes. La première rue comporte des façades homogènes et symétriques avec un rapport H/W égal à 2 (cas I), la seconde est asymétrique avec une façade en gradins (cas II) et la dernière configuration est composée de deux façades différentes avec des dispositifs de surplomb (balcons ou terrasses par exemple) (cas III). Pour la rue symétrique (cas I), durant la journée, le pourcentage des zones confortables d'été dans les surfaces couvertes de galerie est supérieur à celui obtenu au milieu de la rue en raison de sa durée d'ensoleillement élevée. Ce pourcentage est étroitement lié au rapport H/W de la rue et aux dimensions des galeries (hauteur et largeur). Toutefois, durant la nuit, le pourcentage des zones confortables enregistrées dans les galeries reste inférieur à celui des surfaces de la rue. Les chercheurs ont attribué cette différence à la faible ventilation des galeries par rapport à la rue et à leur capacité de piégeage de la chaleur émise par le sol revêtu d'asphalte. Par ailleurs, des sensations de chaleur ont été identifiées dans la rue asymétrique présentant une façade en gradins (cas II) en raison de sa grande ouverture vers le ciel. En effet, cette ouverture entraîne un captage de l'énergie solaire plus important que dans la configuration symétrique (cas I). En revanche, lorsque les rayons solaires sont obstrués par les façades, la rue asymétrique présente un meilleur confort thermique que le cas I. Enfin, les résultats optimaux de sensation de confort ont été obtenus pour la rue présentant des dispositifs de façades surplombant la rue. Ceci est dû à la morphologie de la rue qui présente un faible facteur de vue du ciel générant davantage de surfaces ombragées au niveau de la rue et des galeries.

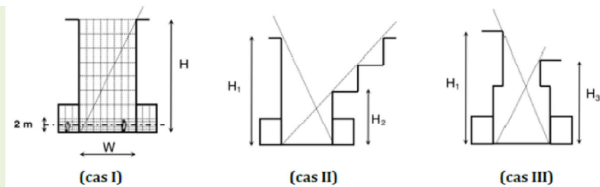


Figure : Schématisation des configurations étudiées par Ali-Toudert et al., (2007).

<p>Variation de la forme et de la hauteur des espaces publics extérieurs</p>	<p>Masmoudi et Mazouz (2004)</p>	<p>une étude numérique thermo-radiative dans les climats chaud et aride, pour trois places de forme rectangulaire, carrée et circulaire. Dans un premiers temps, la hauteur des bâtiments encadrant les places est considérée constante et égale à 16,6 m. La forme circulaire présente les résultats optimaux de flux solaire absorbée. En effet, la quantité d'énergie solaire absorbée par la place circulaire à 13h00 est la plus faible avec seulement 81 Wh/m², en comparaison avec les valeurs de l'ordre de 114 Wh/m² obtenues pour les places en forme de rectangle et de carré. Des conclusions analogues sont tirées pour les températures radiantes moyennes, égales respectivement à 36°C, 38°C et 39°C, pour la place circulaire, rectangulaire et carrée. Dans un second temps, trois hauteurs d'immeubles ont été considérées : 16,6 m, 25 m et 50 m. Cette modification géométrique a très peu d'effet sur l'absorption des façades des places. Cependant, au niveau du sol, la quantité d'énergie solaire absorbée est alors réduite de façon quasi-homogène pour toutes les places.</p>
<p>Hétérogénéité de la hauteur des structures bâties</p>	<p>Kondo et al., (2001)</p>	<p>L'effet de la hauteur des bâtiments sur la quantité d'énergie solaire absorbée a été étudié pour trois configurations. La première configuration présente des bâtiments de formes carrées, présentant une hauteur homogène de 25 m. La seconde et la troisième, présentent des hauteurs de bâtiments variées, mais avec des pourcentages de bâtis homogène. Cette étude numérique a montré que, la quantité d'énergie solaire absorbée est plus grande pour les configurations présentant des hauteurs hétérogènes. Cela provient du fait qu'une fraction des flux réfléchis par les toitures est interceptée par les parois verticales adjacentes plus hautes, augmentant ainsi les inter-réflexions et par conséquent la quantité d'énergie solaire absorbée.</p>
<p>L'orientation des façades urbaines</p>	<p>Chimklai et al., (2004) Aida et Gotoh, (1982) Kondo et al., (2001)</p>	<p>ont montré que la variation de la hauteur des formes urbaines joue un rôle très prépondérant sur la quantité d'énergie solaire réfléchi. la hauteur solaire affecte la quantité du flux solaire réfléchi. ont constaté que lorsque la hauteur solaire est importante, la valeur de l'énergie solaire réfléchi d'un tissu urbain augmente, indépendamment de la valeur des coefficients de réflexion des surfaces. En revanche, lorsque la hauteur solaire est faible, la quantité d'énergie solaire réfléchi diminue dans le cas où les surfaces des bâtiments ont des coefficients de réflexion modérés.</p>
<p>L'ombre des surfaces</p>	<p>Ali-Toudert et Mayer, (2006)</p>	<p>ont minimisé le rôle de l'orientation solaire d'une rue canyon sur son comportement thermique. En effet, selon eux, lorsque le rapport d'aspect de la rue est de H/W=0.5, le confort thermique urbain est presque indépendant de l'orientation. En revanche, lorsque le rapport H/W est égal à 4, le confort est optimal de façon identique pour les deux orientations Est-Ouest et Nord-Sud, fournissant ainsi un bien meilleur environnement thermique.</p>
<p>L'albédo des surfaces</p>	<p>Ait-Ameur (2002) Vinet (2000) et Robitu (2005)</p>	<p>l'espace ombragé n'est pas favorable à l'accumulation thermique (inertie ou stockage) et limite les hausses de températures de l'air générées par l'action du rayonnement solaire direct. ont mentionné que, dans les espaces urbains extérieurs, les surfaces ombragées enregistrent les indices de confort les plus favorables.</p>
<p>Impact de la couleur des surfaces sur l'albédo</p>	<p>Akbari et al., (2003), Synnefa et al., (2007) Akbari et al., (2003) (Taha, 1997) Synnefa et al., (2007) Simpson et McPherson, (1997)</p>	<p>ont montré que l'augmentation de la réflexion des matériaux des surfaces urbaines est liée à leur couleur, à leurs états d'utilisation et à la nature des surfaces urbaines. ont étudié l'impact de la couleur des façades sur la température des surfaces. Pendant les heures de plein soleil, les façades peintes en noir peuvent atteindre des températures supérieures de 7°C par rapport à celles peintes en blanc. Les matériaux de couleurs claires ont un albédo supérieur à celui des matériaux sombres. C'est pourquoi les villes du Sud ont en général un albédo plus fort (0,30 à 0,45) que celles du Nord (0,10 à 0,20). ont mesuré l'albédo de toitures de différentes couleurs. Ainsi, les toitures peintes avec des revêtements blancs ont une forte réflectivité, pouvant atteindre 72 %, contre 26 % pour des toitures noires. ont étudié l'impact de la couleur des toitures dans le désert d'Arizona aux Etats Unis. Dans ce cas, les toitures blanches avec un albédo de 0,75 étaient jusqu'à 20°C plus froides que les toits gris (albédo de l'ordre de</p>

		0,30) et jusqu'à 30°C plus froides que celles des toits sombres (albédo de 0,10).
L'impact de l'optimisation et de la détérioration des surfaces sur l'albédo	(Synnefa <i>et al.</i> , 2007) ; (Azari et Bierman, 2005 ; Watts <i>et al.</i> , 2006).	L'albédo des matériaux sombres ou colorés peut être optimisé, notamment par l'ajout de pigments réfléchissants dans les peintures de revêtement, ou par l'utilisation de revêtements thermo-chromiques. Ces derniers changent leurs couleurs en fonction de leur environnement thermique, en passant de couleurs sombres à des couleurs plus claires lorsque la température de surface augmente au-delà d'un seuil de transition.
	(Karlessi <i>et al.</i> , 2009).	Une étude expérimentale du potentiel des matériaux thermo-chromiques sur la quantité d'énergie absorbée a montré que la quantité d'énergie absorbée augmente lorsque la température de surface est inférieure à la température de transition de 30°C et qu'elle diminue lorsque la température dépasse le seuil de transition.
	(Berdahl <i>et al.</i> , 2005)	Les surfaces peuvent perdre de leur pouvoir de réflexion initial. Cette détérioration est due à plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques locales et l'encrassement des moisissures réduisant l'efficacité des matériaux. Par exemple, l'albédo varie en fonction de la quantité d'eau contenue dans le matériau. Celle-ci accroît l'absorption du flux solaire incident et diminue le pouvoir de réflexion du matériau. Un sable sec a une valeur d'albédo de 35 %, alors que lorsqu'il est humide, la valeur diminue jusqu'à 25 %.
L'impact de la nature des surfaces sur l'albédo	Akbari <i>et al.</i> , (2008) Berdahl et Bretz, (1997).	ont montré que les toitures avec des tuiles plates reflètent plus d'énergie solaire que les toitures à tuiles concaves ou convexes. ont constaté que la rugosité diminue fortement la réflexion solaire. Il est avéré que la réflexion d'un matériau à surface lisse de l'ordre de 79 % chute à 51% lorsque sa surface est rugueuse. En effet, si la surface est rugueuse, les rayons solaires effectuent plusieurs réflexions, appelées réflexions diffuses avant de s'échapper. Ceci diminuerait la quantité d'énergie solaire réfléchi. Une surface lisse engendre des réflexions spéculaires qui s'échappent sans inter-réflexions.
L'inertie des enveloppes urbaines	(Ait_Ameur, 2002)	Les parois urbaines présentent une forte inertie thermique induisant une forte capacité de stockage de la chaleur et un amortissement des ambiances thermiques dans l'espace urbain. Cet amortissement se traduit par des montées et des descentes très lentes des températures. De plus, l'inertie thermique engendre un déphasage des températures entre l'environnement thermique intérieur et extérieur des bâtiments et entre la nuit et le jour. Ce déphasage thermique maintient une partie de la matinée des températures fraîches produites par le refroidissement nocturne et une partie de la nuit des températures plus chaudes produites par l'accumulation thermique en journée. Ce phénomène d'inertie thermique est davantage présent dans les espaces étroits présentant une faible ouverture au ciel tels que les rues ou les cours intérieures.
Facteurs morphologiques influant sur la température de l'air		
Impact de la densité urbaine	(Oke, 1987 ; Akbari <i>et al.</i> , 1997 ; Santamouris et Doulos, 2001)	Le champ de température de l'air en milieu urbain est la résultante de l'ensemble des échanges thermiques produits entre les surfaces urbaines et l'atmosphère. Ceux-ci sont largement dominés par les flux solaires incidents. Les écarts recensés entre les centres-villes et la périphérie sont souvent importants notamment au niveau des stations météorologiques aéroportuaires, de l'ordre de 5 à 10°C. Ces différences illustrent l'effet énergétique de l'urbanisation sur la température de l'air, connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain.
	Akbari <i>et al.</i> , (1992)	ont constaté que les températures dans les zones urbaines sont généralement plus élevées que celles des zones rurales proches, de l'ordre de 1 à 4°C. Ce phénomène constitue un avantage en hiver car il permet de diminuer la consommation d'énergie liée au chauffage. Parallèlement, il augmente la production de brouillard. Cependant, dans les climats chauds, une augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande énergétique de conditionnement d'air.
	Oke (1988)	Dans une étude menée sur 30 villes américaines et européennes de moyennes latitudes a montré que l'ouverture ou la fermeture d'un tissu urbain affecte l'îlot de chaleur urbain. Oke (1988) propose une corrélation empirique permettant de caractériser en termes d'îlot de chaleur un tissu urbain de type rue canyon en fonction de leur rapport d'aspect H/W
Impact des surfaces urbaines chaudes	Synnefa <i>et al.</i> , (2007)	ont montré expérimentalement sur des bâtiments revêtus de béton que l'augmentation de l'albédo de 0,30 à 0,65 permet de diminuer la température de l'air de 2,2°C. Par ailleurs
	Niachou <i>et al.</i> , (2008)	ont étudié expérimentalement les caractéristiques thermiques d'une rue canyon orientée dans la direction Nord-Est et Sud-Ouest. Ils montrent que la température de l'air mesurée près des façades varie suivant l'orientation et la réflexion des matériaux de parois. La température de l'air à proximité de la façade Sud-Ouest est plus élevée que celle de la façade Nord-Est, la différence moyenne des températures instantanées

		entre les deux façades au cours de la journée est proche de 3°C, alors que la différence maximale absolue de la température de l'air est de 5,4°C au cours de la journée.
	Oke et Nakamura, (1988)	pour une rue canyon orientée Est-Ouest. La température de l'air près de la paroi Nord face au soleil est supérieure à la température de l'air ambiant, en raison des transferts convectifs et radiatifs.
Facteurs morphologiques influant sur la vitesse du vent		
	(Penwarden et Wise, 1975) (Bejerregard et al., 1981)	Les effets du vent sur un individu peuvent être divisés en deux catégories : les effets dynamiques et les effets thermiques. Les effets dynamiques induits par le vent modifient le comportement de l'individu et ses mouvements. Ces gênes peuvent être ressenties avec des vitesses du vent supérieures à 5 m/s. Au-dessus de 10 m/s, la marche devient difficile et au-dessus de 15 m/s, il existe un risque d'accident.
L'influence la rugosité urbaine	Grimmond et Oke, (1999)	ont montré que la hauteur de déplacement et la longueur de rugosité peuvent être estimées à partir de valeurs caractéristiques pour différents types de zones urbaines répertoriées dans la littérature. Ils présentent une zone urbaine comme un assemblage de plusieurs zones bâties où les seuls paramètres qui les différencient sont la hauteur des immeubles et la densité bâtie.
L'influence de la volumétrie des bâtiments	(Gandemer, 1981)	Les écoulements autour d'un bâtiment résultent des interactions entre le vent et la structure bâtie. Par sa forme et sa disposition, un bâtiment modifie la distribution des différentes zones de pression comme illustré sur la Figure ci-dessous. Ainsi, sur la face au vent d'un bâtiment, apparaît une zone de surpression caractérisée par un contournement de l'écoulement vers le haut et sur les côtés du bâtiment et l'apparition d'un rouleau tourbillonnaire résultant de l'interaction avec le sol. Au niveau des arêtes des bâtiments, des zones de décollement apparaissent, caractérisées par leurs dépressions relativement constantes avec la hauteur du bâtiment. Cependant, sous la face du bâtiment, le vent forme des mouvements tourbillonnaires à l'origine du sillage. Ces tourbillons s'atténuent en aval du bâtiment où l'écoulement retrouve ses caractéristiques en amont.
		
		Figure :Schématisation du contournement d'une structure bâtie par le vent (Gandemer, 1981).
L'influence de l'agencement urbain	Gandemer, 1976	Les dimensions, les formes et les juxtapositions des ensembles bâtis conditionnent la distribution de la vitesse du vent et l'intensité turbulente autour des obstacles. Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB Nantes) a effectué plusieurs essais en soufflerie sur plusieurs juxtapositions de bâtiments afin d'étudier leur impact sur l'écoulement d'air. Cette étude a permis d'observer plusieurs effets aérodynamiques tels que : l'effet venturi, l'effet de maille, l'effet des barres, l'effet de passages sous les immeubles.
L'influence de l'orientation des tissus urbains par rapport aux vents incidents	(Oke et Nakamura, 1988 ; Santamouris et al., 2001)	L'orientation des structures bâties permet de déterminer le régime de vent et contrôler sa vitesse. En effet, si l'orientation est parallèle, la vitesse augmente d'avantage que si les structures sont perpendiculaires au vent.
	Gandemer (1976)	L'exemple de la rue canyon a fait l'objet de plusieurs études afin de déterminer la nature du régime du vent en fonction de l'orientation de la rue. Il a été constaté que, lorsque l'écoulement est parallèle à la direction de la rue, un effet de canalisation est observé. Pour que l'effet de canalisation soit observé, le couloir canalisant doit être étanche et composé de parois peu poreuses, doté d'une largeur inférieure ou égale à l'épaisseur des bâtiments et enfin, la hauteur des bâtiments doit être supérieure ou égale à 6 m. Il précise que, la canalisation ne constitue pas une gêne en soi. Elle devient problématique lorsqu'elle est associée à une anomalie aérodynamique, lors d'une association canalisation-Venturi par exemple.
		
		Présentation d'une anomalie aérodynamique "canalisation-Venturi"

	<p>(Gandemer, 1976). Lorsque l'écoulement est perpendiculaire à la direction de la rue, l'écoulement d'air forme un ou plusieurs vortex qui se caractérisent par un mouvement en spirale. Ce mouvement peut être accéléré par l'augmentation de la vitesse de vent et aussi par les effets thermiques liés aux parois chauffées par le soleil. En effet, l'air chaud remonté est remplacé par l'air plus frais qui circule au-dessus des toits permettant éventuellement d'évacuer la chaleur de la rue.</p>  <p>Schéma de la circulation du vent lorsque le vent est perpendiculaire à une rue canyon (www.iau-idf.fr).</p>
	<p>Oke et Nakamura, (1988) Ils ont distingué trois types d'écoulements suivant le rapport d'aspect H/W d'une rue a : un écoulement de rugosité isolé lorsque ce rapport est inférieur à 1,54 (a), un écoulement à interface de sillage lorsque le rapport est compris entre 1,54 et 2,5 (b) et enfin un écoulement rasant lorsque le rapport est supérieur à 2,5 (c).</p>  <p>Profil de la circulation de l'air dans une rue canyon en fonction du rapport d'aspect H/W de la hauteur et de sa largeur</p>
<p>L'influence de la densité ou porosité d'un tissu urbain</p>	<p>(Gandemer, 1976) La mesure de la densité d'un tissu urbain permet d'évaluer sa porosité par rapport au vent. Dans les tissus compacts et resserrés, seuls les toits et les terrasses constituent des probables zones d'inconfort. Un groupement de construction à décrochement organisé de manière verticale peut engendrer un effet de pyramide défini par Gandemer (1976) (Figure à droite). Cette forme semble judicieuse car elle ne produit pas d'inconfort, elle dissipe le maximum d'énergie du vent dans tous les azimuts et diminue les survitesses dans les niveaux inférieurs des immeubles et aux niveaux des terrasses. Cependant, les tissus poreux ou ouverts engendrent des perturbations aérodynamiques qui s'étendent sur de longues distances. En effet, la porosité horizontale ou verticale des tissus urbains (cours, espaces résidentiels par exemple) ainsi que la porosité des immeubles (pilotis, trous par exemple) modifient l'écoulement de l'air et créent des zones à risques liées à de forts courants d'air. Afin de limiter ces risques, il faut que l'ouverture d'un tissu urbain soit inférieure à 0,25 fois son périmètre et qu'il soit constitué de bâtiments de hauteurs voisines.</p>  <p>Un tissu poreux présentant des bâtiments de hauteurs homogènes. A droite : Un effet de pyramide sur un groupement de construction à caractère pyramidal.</p>
<p>Le flux solaire global incident K_s</p>	<p>Delaunay (1995) A l'échelle urbaine, le flux solaire incident mesuré est atténué de 2 à 20 % par rapport à un site rural, ce constat est dû aux particules polluantes émises par les bâtiments et les véhicules. La pollution se manifeste par une augmentation des aérosols et des noyaux de condensation. Ces derniers favorisent la création de nuages ou de brouillards réduisant la quantité d'énergie solaire incidente et augmentant ainsi l'énergie solaire diffuse.</p>

Tableau 2.3: Etat de l'art sur l'influence de la morphologie urbaine sur le confort extérieur, adopté de (Athamnia, 2012).

2.5 CONCLUSION

Cette lecture bibliographique a permis la compréhension des relations entre la morphologie urbaine, et les paramètres physiques de confort. On a pu distinguer deux grandes familles d'indicateurs, ceux, en relation avec le rayonnement solaire et la température des surfaces, dites **thermo-radiatifs** (le facteur de vue du ciel, le rapport H/W, la densité surfacique et l'albédo des surfaces) ; et d'autres en relation avec la vitesse du vent, dites **aérauliques** (la densité ou la porosité d'un tissu urbain et la nature de l'agencement des tissus urbains). Dans le cadre de cette recherche, ces indicateurs morphologiques seront mis en correspondance à des descripteurs physiques, qui caractérisent les différentes manifestations microclimatiques en milieu urbain. Cela nécessite une bonne connaissance du processus de formation et de transformation du microclimat urbain, ce thème sera abordé en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

CLIMAT ET MICROCLIMAT URBAIN

«Dans la ville même, les sillons creusés dans la masse des constructions, rues et places, introduisent des facteurs nouveaux. Ils canalisent les courants et les dévient. Les façades rayonnent des calories et réfléchissent les radiations venues d'en-haut. A leur surface se produisent des phénomènes de convection : ils sont matérialisés par la marche des flocons dans une rue étroite, par un jour de neige. Tous les vides urbains se comportent comme des espaces incomplètement clos, dont l'atmosphère a des propriétés différentes de celle des climats locaux des campagnes environnantes. Chacun a son climat, et il affecte l'organisme des citadins.»

Sorre Max

3.1 INTRODUCTION

L'intérêt pour les phénomènes de l'atmosphère est ancien ; pour l'homme préhistorique, le climat était une «force incontrôlable», l'un de ses soucis majeurs est de se protéger des conditions climatiques quelques fois dures. Ce chapitre aura comme objectif d'approfondir nos connaissances en matière de climatologie urbaine ; notamment, la microclimatologie urbaine qui est au centre de notre réflexion en raison de dépendance de plusieurs facteurs et paramètres distinctifs aux milieux urbains. Sa compréhension est primordiale pour le déroulement de notre recherche. Nous commençant par les différentes définitions du climat, ses échelles et différents facteurs qui l'influencent ; et par la suite nous abordant le processus de formation et de transformation du climat urbain, qui est aujourd'hui un domaine de recherche investi à la fois par les climatologues et les géographes, mais également par les architectes et les urbanistes.

3.2 DEFINITIONS

Le terme « climat » est d'origine grecque (Klima) qui désigne l'inclinaison de la Terre par rapport au Soleil, passé en latin sous la forme "climatis" à partir duquel son nom a été forgé (climatologie : science du climat).
Source : (www.larousse.fr).

La définition la plus ancienne revient à Hann (1882). Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un point quelconque de la terre. C'est l'ensemble de types de temps qui se succèdent habituellement en un lieu au cours d'une longue période. Le "temps qu'il fait" est l'état de l'atmosphère à un moment donné. Il est la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques

des variables de l'état de l'atmosphère, les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations,...).

La climatologie est devenue une discipline scientifique qui se concentre sur l'étude du climat. Les climatologues utilisent des observations et des relevés qui ont été réalisés dans une région donnée durant au minimum 30 ans, soit le temps utile pour définir un climat.

3.3 LES ZONES CLIMATIQUES

Les endroits les plus chauds sur Terre se situent autour de l'équateur, tandis que les plus froids sont situés aux pôles (Arctique ou **pôle Nord** et Antarctique ou **pôle Sud**). Ceci est dû au fait que les rayons du soleil atteignent verticalement la Terre au niveau de l'équateur.

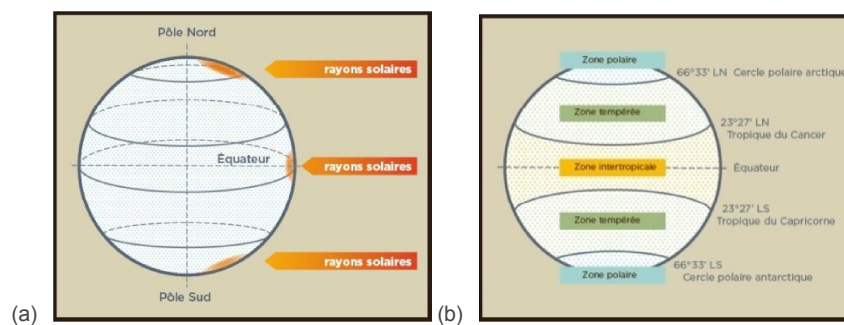


Figure 3.1 : (a) L'importance de la courbure de la terre par rapport à la répartition de la chaleur sur le globe ; (b) zones climatiques générales.. Source: <http://www.climatechallenge.be>

Une proportion de rayonnement solaire nécessaire à réchauffer 1 m² à l'équateur réchauffera 3 m² aux pôles. **Figure 3.1 (a)**. Par conséquent, la lumière du soleil est moins concentrée, de sorte qu'il fait plus froid. Ce phénomène est dû à la forme sphérique de la Terre.

On peut distinguer trois zones climatiques générales **Figure 3.1 (b)**:

- deux zones polaires au climat froid
- une zone tempérée au climat ni trop chaud ni trop froid
- deux zones intertropicales au climat chaud.

3.4 CLASSIFICATION DU CLIMAT

Il existe plusieurs systèmes de classification des climats du monde, le plus ancienne, et le plus largement utilisé est celui de **Köppen**¹.

¹ **Wladimir Peter Köppen**, climatologue et météorologue allemand d'origine russe, qui est le premier à avoir dressé une cartographie complète des régions climatiques du globe. Le but initial

Le système Köppen reconnaît cinq grands types climatiques; chaque type est désigné par une lettre majuscule, chacun étant lui-même subdivisé en sous-classes. La délimitation de chaque groupe est basée sur les moyennes annuelles et mensuelles de la température et les précipitations.

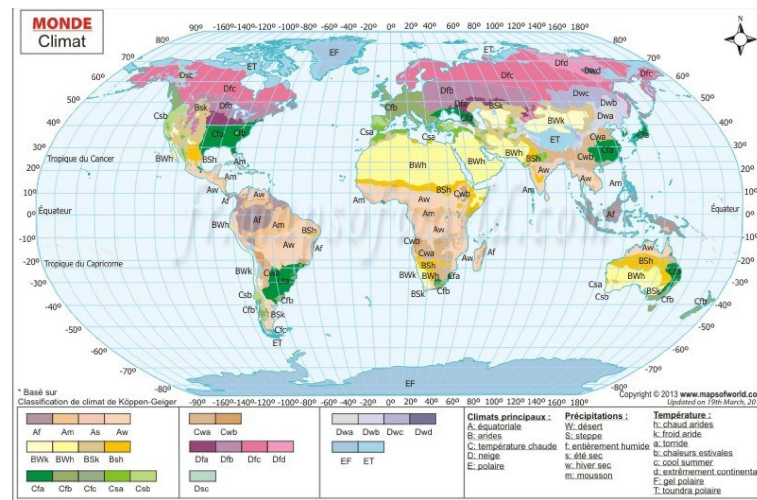


Figure 3.2: Zones climatiques du monde. Source : <http://fr.mapsofworld.com>

Pour faciliter les choses à l'échelle internationale, chaque climat s'est vu attribuer une lettre de A à E. 1^{ère} lettre : type de climat, 2^{ème} lettre : régime pluviométrique, 3^{ème} lettre : variations de température. Les différents types de climats sont résumés dans le tableau 3.1. Chaque type sera défini en détail dans l'annexe.

Les types de climats (classification de Köppen)	
Classe A	Tropical : Équatorial (<i>Af</i>) • Mousson (<i>Am</i>) • Savane (<i>Aw</i> , <i>As</i>)
Classe B	Sec : Désertique/Aride (<i>BWh</i> , <i>BWk</i>) • Steppique/Semi-aride (<i>BSh</i> , <i>BSk</i>)
Classe C	Tempéré : Subtropical humide (<i>Cfa</i> , <i>Cwa</i>) • Océanique (<i>Cfb</i> , <i>Cwb</i> , <i>Cfc</i>) • Méditerranéen (<i>Csa</i> , <i>Csb</i>)
Classe D	Continental : Continental humide (<i>Dfa</i> , <i>Dwa</i> , <i>Dfb</i> , <i>Dwb</i>) • Subarctique (<i>Dfc</i> , <i>Dwc</i> , <i>Dfd</i> , <i>Dwd</i>) • Étés secs (<i>Dsa</i> , <i>Dsb</i> , <i>Dsc</i> , <i>Dsd</i>)
Classe E	Polaire : Toundra (<i>ET</i>) • Inlandsis (<i>EF</i>)

Tableau 3.1 : Les types de climats (classification de Köppen). Source : <https://fr.wikipedia.org>

3.5 LES ECHELLES DU CLIMAT

Le climat d'un lieu peut être défini à trois échelles : le macroclimat, le méso climat et le microclimat.

3.5.1 Le macroclimat

Le macroclimat est représenté par les caractéristiques climatiques

de la classification de Köppen était de rendre compte des principaux groupes de végétation naturelle.

principales d'un pays ou d'une surface de grande ampleur. La ville influence le temps et le climat à l'échelle de tout son territoire. À l'échelle temporelle, cette influence s'étale sur une période de un à six mois.

3.5.2 Le méso climat

L'échelle des climats régionaux ou méso climats, qui s'applique à des régions de plusieurs milliers de kilomètres carrés, soumises à certains phénomènes météorologiques bien particuliers (Sirocco, vent venu du désert) du fait de l'interaction entre la circulation générale et le relief. Le méso climat inclut les effets des caractéristiques du paysage, tel que la topographie, la présence de masses importantes d'eau (mer, lac de grande taille,...), de végétation (forêts,...) ou de bâtiments (zones urbaines,...). Son évolution temporelle est de l'ordre d'une journée (24 heures). (Oke, 1987).

3.5.3 Le microclimat

Le microclimat définit les conditions climatiques locales d'un site particulier. Il se réfère à des espaces de petites dimensions tels qu'un terrain, une rue ou une place. Il est influencé par le volume des constructions voisines mais aussi par la nature, l'orientation et l'inclinaison des surfaces, la présence d'arbres, etc. Chaque surface possède son propre microclimat. Ils s'étendant de moins de un à plusieurs centaines de mètres. La variabilité du microclimat peut s'effectuer dans une période de temps très courte.

Echelles	Caractères dimensionnels		
	Horizontal (m) (Oke)	Vertical (km)	Temporel
Meso	10^4 à 2×10^5	1 à 10	1 à 6 mois
Local	10^2 à 5×10^4	0.01 à 0.1	1 à 24 h
microclimat	10^{-2} à 10^3	0.01	1 s à 24 h

Tableau 3.2: Les échelles climatiques et leur extension spatiale. Source : (Markus et Morris, 1980). Adopté de (Kitous, 2012).

3.6 FACTEURS ET ELEMENTS DU CLIMAT

Le climat d'une région est influencé par deux types de facteurs (cosmiques et géographiques). Il se définit à partir de l'analyse de certains éléments météorologiques: la température, la pression et les précipitations.

3.6.1 LES FACTEURS CLIMATIQUE

3.6.1.1 Les facteurs cosmiques

Ils agissent sur toute l'étendue de la planète terre. Il s'agit de:

- **L'atmosphère:** est le siège de tous les phénomènes qui créent le temps et les climats.
- **Les mouvements de la terre :** (rotation, révolution). Ils entraînent la succession des jours et des nuits, la succession des saisons et provoquent des différences thermiques sur les façades des continents.
- **La latitude:** La quantité de chaleur que reçoit la terre dépend de la hauteur du soleil à l'horizon. Pour le même nombre de rayons (même quantité d'énergie solaire), la surface réchauffée sera plus petite à l'équateur, car les rayons arrivent perpendiculairement à la surface. De plus, les rayons ont traversé un minimum d'épaisseur atmosphérique à l'équateur. La quantité d'énergie que le sol reçoit par unité de surface est donc très grande à l'équateur.

Figure 3.1(a).

3.6.1.2 Les facteurs géographiques :

Ils agissent sur une région bien précise de la planète :

- **Le relief:** il intervient par l'altitude (la température diminue au fur et à mesure que l'on s'élève en altitude) et par l'exposition (adret: versant au vent; Ubac: versant sous le vent)
- **La végétation:** apporte l'humidité, baisse la température et protège le sol.
- **Les courants marins :** sont parcourus par le courants chauds (Gulf stream; Oya shivo) et par des courant froids (Labrador; Kouro shivo) qui modifient le climat des côtes qu'ils baignent

3.6.2 LES ELEMENTS DU CLIMAT

Les principaux éléments climatiques à prendre en considération par les concepteurs, sont : La température de l'air, L'humidité, Les vents, Les

pluies et le rayonnement solaire. On va essayer dans cette partie de les définir et d'indiquer de façon générale leurs caractéristiques.

3.6.2.1 Le rayonnement solaire

Le soleil émet en permanence une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique libérée par les fusions thermonucléaires qui se produisent dans la masse du soleil, ce rayonnement émis constitue un spectre sous différentes longueurs d'ondes, entre 0,25 à 4 μm , allant des ultraviolets à l'infrarouge (8 % ultraviolet, 41 % visible, et 51 % infrarouge). A la limite supérieure de l'atmosphère, l'énergie solaire reçue par la Terre, est estimée à 1380 W/m². (De Brichambaut et al., 1974), cité par (Tiraoui, 2010). Cette valeur appelée constante solaire. L'intensité de cette énergie diminue et sa distribution spectrale se modifie par **l'absorption, la réflexion et la diffusion** lors de son passage par l'atmosphère terrestre. Au moins **25%** de la radiation solaire atteignant les couches de l'atmosphère est diffusée ou absorbée par les molécules d'air, les particules de poussière et la couche d'ozone. Tandis que les rayonnements solaires qui atteignent la terre proviennent de toutes les directions de la voûte céleste.

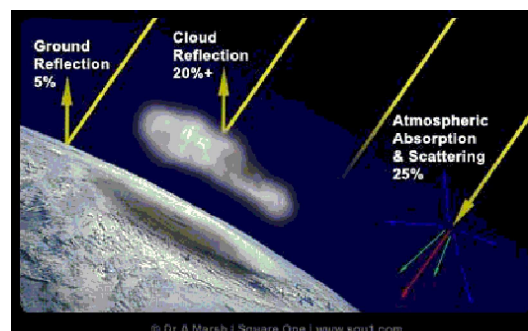


Figure 3.3: l'absorption, la réflexion et la diffusion de la radiation solaire par l'atmosphère terrestre. **Source :** (Pidwirny Michael, 1999).

En effet **25%** de la radiation solaire totale est réfléchi vers la voûte céleste, dont **20%** est due à la poussière, aux nuages, à la vapeur d'eau et autre. Le reste est réfléchi par les surfaces de la terre vers le ciel. La capacité de réflexion des surfaces de la terre dépend du facteur de réflexion des sols (l'albédo). (**Figure 3.3**).

En général l'atmosphère diminue la radiation solaire à **50%** de la radiation totale arrivant en dehors de l'atmosphère. Le reste du rayonnement

solaire qui traverse l'atmosphère en atteignant la terre est le rayonnement solaire direct.

L'ensoleillement fait intervenir deux modalités sensorielles :

- le sens visuel qui peut être évoqué comme un paramètre climatique spécifique (intensité de la lumière émise, du niveau de l'éclairement ou de la lumière réfléchie, du niveau de la luminance).
- la sensibilité thermique, traduite par la température « opérative » et l'effet de rayonnement perçu indépendamment de la température de l'air. (Boussoualim, 2001), cité par (Zekri, 2010).

3.6.2.2 La température de l'air

La température est une grandeur physique dont les variations suscitent les sensations de chaud et froid. (cf. § 1.3.1.1). Elle dépend de plusieurs paramètres, tel que le rayonnement solaire qui réchauffe la terre pendant la journée et du rayonnement nocturne qui la refroidit, elle dépend également du déplacement des masses d'air, des plans d'eau....etc.

3.6.2.3 Le vent

Le vent est de l'air qui se déplace des anticyclones (hautes pressions) vers les dépressions (basses pressions). Il est un phénomène météorologique très variable en direction et en vitesse, il est déterminé par plusieurs facteurs globaux et locaux tels que : La pression de l'air, la rotation de la terre, les variations journalières des températures, la topographie. L'effet thermique du vent se fait par l'échange de température entre le corps humain et l'environnement extérieur. (cf. § 1.3.1.4).

3.6.2.4 La pression atmosphérique

En un point quelconque de l'atmosphère, la pression résulte du poids de la colonne d'air qui surmonte l'unité de surface, elle s'exprime en pascal (Pa), unité équivalente au newton par mètre carré (N/m²), en météorologie l'unité de pression utilisée est l'hectopascal (hPa). Autrefois, on employait le millibar (mb) ou encore le millimètre de mercure (mmHg).

La pression décroît avec l'altitude, plus on s'élève, moins il y a d'air au-dessus de nos têtes et donc plus la pression baisse. En moyenne, la pression atmosphérique diminue de 1 hPa tous les 8 mètres. **Figure 3.4.**

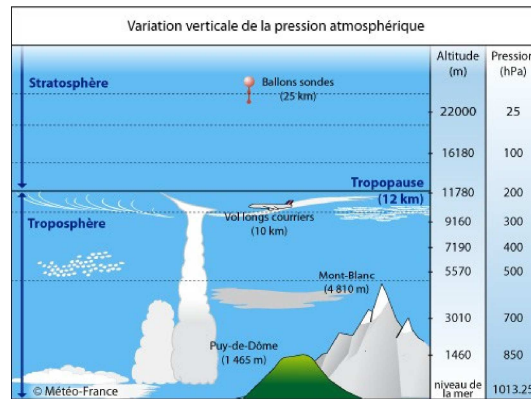


Figure 3.4 : Variation horizontale de la pression atmosphérique, Au niveau de la mer, la pression moyenne est de 1 013,25 hPa. 1 013,25 hPa = 1013,25 mb = 760 mmHg. Source : <http://www.meteofrance.fr>

Par ailleurs plus l'air est froid, donc dense, plus la décroissance de la pression est rapide. En météorologie, on appelle dépression un centre de basse pression et anticyclone un centre de haute pression. Les fluctuations de la pression à un niveau donné intègrent toutes les modifications de la nature de l'air dans l'épaisseur de l'atmosphère située au dessus.

3.6.2.5 Relation entre le rayonnement solaire et la température

Le réchauffement de la couche d'air au-dessus du sol provient de l'absorption par cette couche d'énergie rayonnante et du transfert par convection de l'énergie calorifique du sol ; à l'origine de ces énergies se trouve l'énergie solaire. Il existe donc une relation étroite entre le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale et la température au-dessus du sol. (Riou CH, 1976).

Selon (Pierre Thomas, 2000), La température varie dans le même sens que l'irradiation, plus l'irradiation est forte, plus il fait chaud. (Figure : 3.5). Mais il n'y a pas de proportionnalité entre l'irradiation globale et la température (car à l'équilibre l'énergie incidente E est proportionnelle à la température à la puissance 4 (loi de Stefan²), ce qui revient à dire que la température est proportionnelle à la racine 4e de l'énergie).

² La formule de Stefan est d'une importance capitale et rappelle que les flux incidents et partants ne sont fonction que de la température. On note la forte dépendance en T puisqu'il s'agit d'une puissance quatrième. Alors que la Température du Soleil n'est que 20 fois plus élevée que celle de la Terre, son flux partant est 160.000 fois plus élevé.

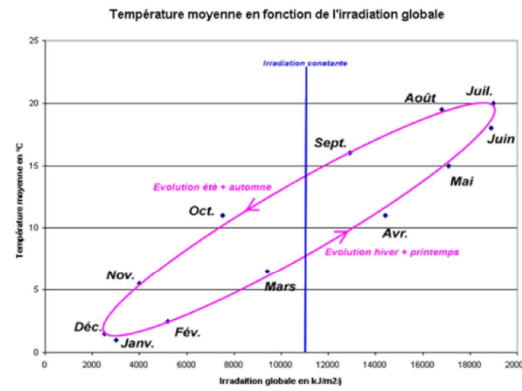


Figure 3.5 : Température moyenne en fonction de l'irradiation globale. Source : <http://planet-terre.ens-lyon.fr>

3.7 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DES ZONES ARIDES ET SEMI ARIDES

Les régions chaudes et arides sont situées généralement entre les latitudes 20°-25° au Nord et au Sud de l'équateur et largement entre 15°-30° Nord et Sud. Ces régions sont rencontrées au Sud de l'Afrique, en Asie partiellement, en Amérique du Nord (le Mexique et la Californie) et du Sud (Pérou, Brésil) comme en Australie.

3.7.1 L'aridité

Aride: emprunté au latin *aridus*, de *arere*, être desséché.

Aridité : emprunté au latin *Ariditas*. Aridité : climat caractérisé par la faiblesse des précipitations moyennes annuelles et par le fort déficit de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle, opposé à un climat humide. Concept climatique à référence spatiale (zone aride), l'aridité ne doit pas être confondue avec la SECHERESSE, concept météorologique à référence temporelle - phénomène conjoncturel (période, année sèche).

L'aridité a de fortes implications hydrologiques et édaphiques dont elle est indissociable. Source : <http://webworld.unesco.org>

3.7.1.1 L'indice d'aridité

Les géographes et les climatologues ont essayé d'exprimer la notion d'aridité qui est générée par une complexité de phénomènes atmosphériques et géographiques, en termes numériques. Il existe une multitude d'indices et de formules, certaines basées sur des critères climatologiques, d'autres biogéographiques ; représentés sous forme d'indice d'aridité.

3.7.1.1.1 La formule de Köppen

Köppen définit l'indice d'aridité comme le rapport entre la température en C° et la pluviométrie en Cm/ans ou mois pour définir les types de climat selon le tableau suivant :

	non aride	semi-aride	aride
pluies en toutes saisons	$P > 2(T + 7)$	$P < 2(T + 7)$ $P > (T + 7)$	$P < (T + 7)$
pluies d'été	$P > 2(T + 14)$	$P < 2(T + 14)$ $P > (T + 14)$	$P < (T + 14)$
pluies d'hiver	$P > 2 T$	$P < 2 T$ $P > T$	$P < T$

Tableau 3.3: Tableau de calculs de l'indice d'aridité selon Köppen. Source: Encyclopédie Universalis © Universalis France S. A.

3.7.1.1.2 La formule de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne permet de déterminer le degré d'aridité d'une région. Il est défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles

Pour le calculer, on utilise la formule (3.1):

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (3.1)$$

I : Indice d'aridité

P : Pluviométrie annuelle ou mensuelle.

T : Température moyenne annuelle ou mensuelle.

Exemple:

Indice d'aridité (I)	Degré d'aridité
I entre 0 et 5	Régions hyperarides <i>Déserts absolus</i>
I entre 5 et 10	Régions arides <i>désertiques</i> <i>Régions</i>
I entre 10 et 20	Régions semi-arides
I entre 20 et 30	Régions semi-humides
I entre 30 et 55	Régions humides

Tableau 3.4: Tableau de calculs de l'indice d'aridité selon De Martonne.

3.7.1.1.3 La formule de Gaussen

Selon Gaussen, un mois est dit aride, quand : $P < 2 \times T$

P : précipitations totales en millimètres sur 1 mois,

T : température moyenne en °C sur le même mois

Cet indice est très utile quant à l'utilisation d'un diagramme ombrothermique, ce dernier est toujours construit sur le modèle d'échelle : 1 °C = 2mm.

3.8 LES MICROCLIMATS URBAINS

3.8.1 INTRODUCTION

Le climat urbain est le résultat des interactions entre des facteurs naturels et anthropiques (causés par les humains). La pollution de l'air, les matériaux de surface de la ville, l'émission de chaleur ajoutés à des causes naturelles créent des différences climatiques entre les villes et les zones rurales. (Figures : 3.6-3.7).

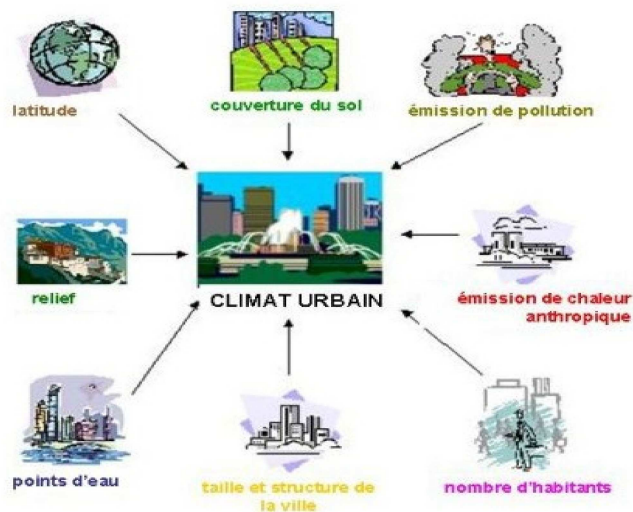


Figure 3.6: Paramètres qui font le climat urbain, Auteur: Sebastian Wypych source:<http://klimat.czn.uj.edu.pl>

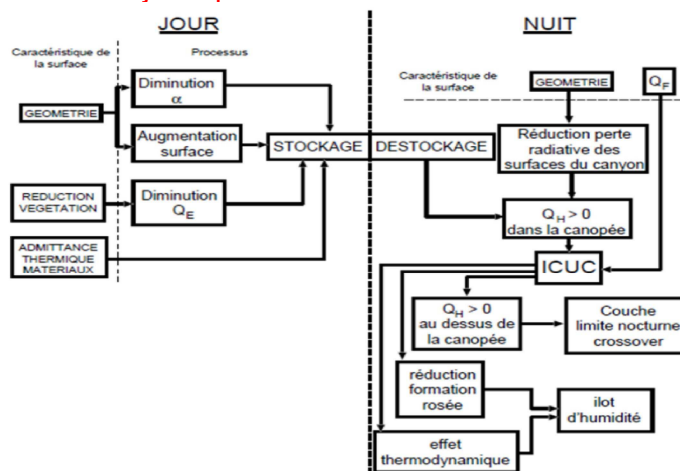


Figure 3.7: Diagramme des liens entre les caractéristiques de la surface urbaine, les processus et les caractéristiques du climat urbain. (Pigeon, 2007).

3.8.2 LES ECHELLES DES MANIFESTATIONS MICROCLIMATIQUES

3.8.2.1 Les couches atmosphériques

Nous avons présenté dans la section précédente, les différentes échelles pour lesquels le climat d'un lieu peut être défini, à savoir : le macroclimat, le méso climat et le microclimat. Ces trois échelles utilisées dans la climatologie urbaine, permettent de distinguer les processus atmosphériques dans l'aire urbaine et les couches atmosphériques qui sont appropriées à chaque échelle. La stabilité de ces couches dépend de la stratification thermique. **(Figure 3.8).**

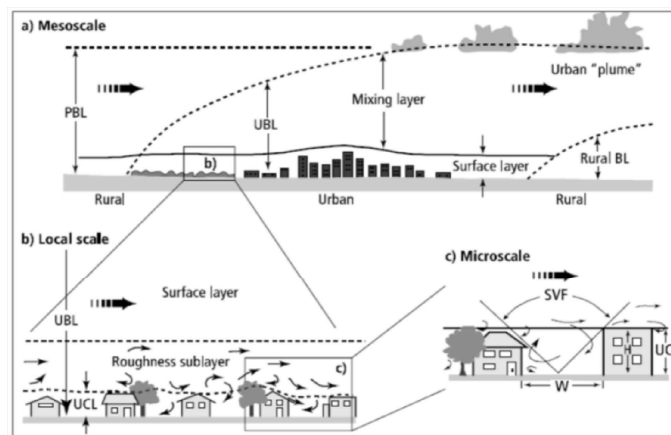


Figure 3.8 : Représentation des trois échelles utilisées dans la climatologie urbaine : (a) la couche limite atmosphérique (CLA), (b) la couche limite urbaine (CLU), (c) la couche de la canopée urbaine (CCU). Les flèches horizontales en gras indiquent la direction du vent. Les petites flèches dans (b) et (c) indiquent la nature de l'écoulement moyen et turbulent. **Source :** (Oke, 1997).

3.8.2.1.1 La couche limite urbaine

La couche limite urbaine est la portion de la couche limite atmosphérique, s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus d'une surface urbaine et se décompose en deux sous-couches d'écoulement: la sous-couche inertielle et la sous-couche de rugosité. **(Figure 3.9).**

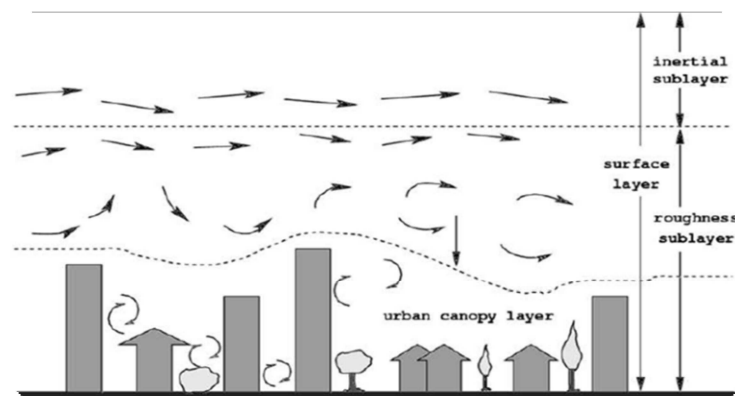


Figure 3.9: La composition de la couche limite urbaine. **(Britter et Hanna, 2003).**

3.9 IMPACT DE LA MORPHOLOGIE SUR LE MICROCLIMAT

Il semble que l'existence d'un climat urbain découle de la façon dont l'environnement urbain répartit l'énergie disponible. Le bilan d'énergie, est l'approche conceptuelle communément utilisée afin d'étudier cette répartition.

3.9.1 Bilan énergétique d'une surface urbaine

Une approche conceptuelle d'équilibre énergétique, se base sur le principe de la thermodynamique, du fait que les pertes et les gains d'un système s'équilibrent. En conséquence, l'énergie reçue par l'élément urbain est égale à la somme de l'énergie réémise par cet élément d'une part, et de l'énergie stockée à l'intérieur de cet élément d'autre part.

(Figure 3.10).

L'équation du bilan énergétique de surface peut être écrite. (Oke, 1987):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_s + \Delta Q_A. \quad (3.2)$$

Chaque terme est une densité de flux (unités de $W m^{-2}$):

Q^* est le rayonnement tout-onde nette ;

Q_F la chaleur anthropique ;

Q_H la chaleur sensible ;

Q_E la chaleur latente ;

ΔQ_s la variation nette raisonnable de stockage de chaleur ; et ΔQ_A l'advection thermique net.

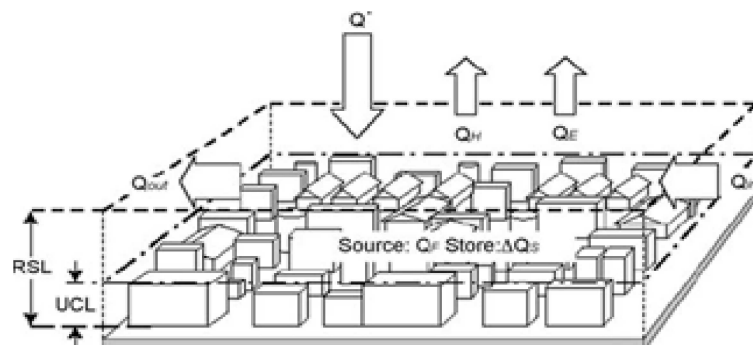


Figure 3.10: Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain (Oke, 1987).

3.9.1.1 Le rayonnement net Q^* :

Le rayonnement net (Flux radiatif) d'une surface urbaine, est la quantité d'énergie radiative disponible à la surface terrestre, il représente la somme des flux solaires (direct, diffus et réfléchi) et infrarouge en provenance du ciel absorbés par la surface, à laquelle est soustraite son

émission en flux de grandes longueurs d'onde. Il est obtenu par l'équation 3.3 du bilan radiatif :

$$Q^* = K_S(1-\alpha) + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (3.3)$$

où K_S est le flux solaire global incident (W/m^2), α est l'albédo moyen de la surface urbaine (-), L_{\downarrow} représente le flux infrarouge atmosphérique (W/m^2) et L_{\uparrow} représente le flux infrarouge émis par la surface (W/m^2).

Les termes du bilan radiatif (Q^*) sont changeants selon les conditions de jour ou de nuit. Le bilan radiatif de nuit n'inclura que les émissions de grande longueur d'onde (L_{\downarrow} , L_{\uparrow}). **(Figure 3.11).**

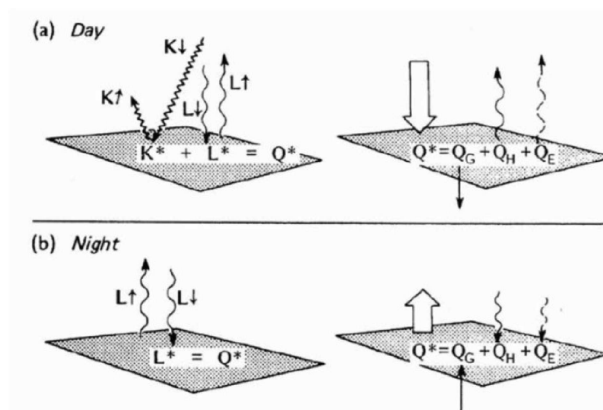


Figure 3.11: Les différences de bilans radiatifs et énergétiques entre le jour et la nuit. (Oke, 1987).

Le bilan radiatif de grande longueur d'onde (L^*) est généralement négatif dans les conditions nocturnes (les pertes sont plus importantes que les apports), même en conditions de ciel nuageuses. Il participe de ce fait au refroidissement de surface. Les bilans radiatif (Q^*) et énergétique (Q) en absence de rayonnements solaires (la nuit) sont de ce fait négatifs. (Tiraoui, 2010).

3.9.1.1.1 Le flux solaire global incident K_S , s'écrit comme suit :

$$K_S = K_{\text{Solaire_direct}} + K_{\text{Solaire_diffus}} + K_{\text{Solaire_reflechi}} \quad (3.4)$$

Où $K_{\text{Solaire_direct}}$ est le flux solaire direct (W/m^2),

$K_{\text{Solaire_diffus}}$ est le flux solaire diffusé par les particules atmosphériques (W/m^2) et

$K_{\text{Solaire_reflechi}}$ est le flux solaire réfléchi provenant des autres surfaces urbaines (W/m^2).

3.9.1.1.2 L'albédo moyen (α) d'une surface urbaine, est le ratio entre le flux court longueurs d'onde globale réfléchi et le flux incident

correspondant. Il prend en compte les composantes directes et diffuses de ces flux. Selon Miguet, (1996), cité par (Athamnia, 2012), l'albédo équivalent d'une surface urbaine peut être calculé par l'équation 3.5:

$$\alpha = 1 - \frac{\varnothing_{absorbé}}{\varnothing_{globale_incident}} \quad (3.5)$$

ou $\varnothing_{absorbé}$ est le flux solaire absorbé après multi-réflexion (W/m^2), et $\varnothing_{globale_incident}$ représente le flux global incident (W/m^2).

Par ailleurs, le rayonnement solaire réfléchi dépend des propriétés réfléchives des matériaux de surface (albédo), mais aussi de la forme du tissu urbain. L'effet de la géométrie urbaine consiste à réduire la valeur de l'albédo (augmentation de l'absorption) en comparaison avec celle d'une surface horizontale. La réduction est due au piégeage du rayonnement dans les canyons. (Figure 3.12).

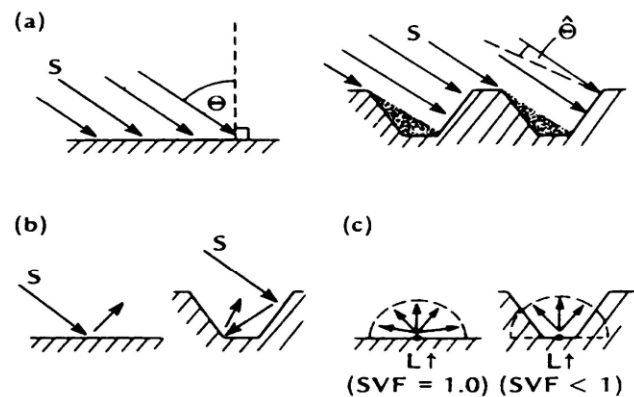


Figure 3.12: Rôle de la géométrie de la surface dans l'échange radiatif.

La comparaison de surfaces horizontale et complexe en termes de (a) : rayonnement incident de courte longueur d'onde (S); (b) : réflexion de S; (C) : émission de grande longueur d'onde (L). Source: (Oke, 1987).

3.9.1.1.3 Le flux infrarouge atmosphérique L_{\downarrow} (W/m^2), ou flux radiatif descendant L_{\downarrow} , correspond au rayonnement émis par les particules en suspension dans l'atmosphère (ex : des gouttelettes d'eau, poussières).

3.9.1.1.4 Le flux radiatif ascendant L_{\uparrow} , correspond principalement au rayonnement émis par la surface terrestre en direction de l'atmosphère.

3.9.1.2 Energie anthropique Q_E

Sa formation résulte de l'action humaine (transport, industrie, etc.). La quantité de chaleur de source anthropique est dans certains cas non négligeable. Cette source inclut le chauffage, les industries et le transport.

3.9.1.3 Le flux de chaleur sensible Q_H

Un phénomène de convection naturelle apparaît lorsque sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à une différence de température, un courant d'air se met en place. Lorsque l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe, on emploie le terme de convection forcée. En milieu urbain, en raison de la différence entre la température de surface (T_S) et la température de l'air (T_{air}), une partie de l'énergie thermique est transportée par convection turbulente dans l'atmosphère sous forme de chaleur sensible. Cette dernière s'exprime par :

$$Q_H = h_c(T_S - T_{air}) \quad (3.6)$$

où h_c représente un coefficient d'échange convectif ($W m^{-2} K^{-1}$). Celui-ci dépend du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), du type de convection (naturelle, forcée ou mixte) et de la disposition spatiale et géométrique des surfaces (horizontales, verticales ou inclinées). (Athamnia, 2012).

Il est possible d'exprimer ce coefficient à partir d'un écart de température entre la surface et l'air et de paramètres que l'on note : a, n et b, les valeurs de ces paramètres sont définies dans le tableau ci-dessous (Tableau 3.6), par différents auteurs. (Inard, 1988) cité par (Vinet, 2000).

$$h_c = a (T_S - T_{air})^n + b \quad (3.7)$$

Auteurs	Surfaces verticales			Surfaces horizontales					
				Flux ascendant			Flux descendant		
	a	n	b	a	n	b	a	n	b
Briss	1.88	0.32	0	2.42	0.31	0	0	0	0.6
Byvok	0	0	4	0	0	5	0	0	0.5
Heat	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7
Gaignou	1.85	0.25	0	-	-	-	-	-	-
Mitalas	1.02	0.33	0	-	-	-	-	-	-
Ferries	1.6	0.33	0	2.1	0.33	0	1	0.33	0
ASHRAE	1.24	0.33	0	1.31	0.33	0	1.52	0.33	0

Tableau 3.5: Paramètres a, n et b en convection naturelle. Source : (Inard, 1988) adopté de, (Vinet, 2000).

3.9.1.4 Le flux de chaleur latente Q_E

La chaleur latente, à savoir l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau, est liée essentiellement à la présence de végétation, d'eau et d'humidité. A cause de leur rareté, ces derniers n'arrivent pas à jouer un rôle satisfaisant en termes de refroidissement de la ville. Alors, les principales raisons induisant la réduction de la chaleur latente en ville sont :

- L'augmentation de l'imperméabilité des surfaces et cela par le captage et la canalisation des eaux pluviales.
- La substitution de surfaces végétales par d'autres minérales, qui augmente l'inertie thermique et par delà les émissions de chaleur. La chaleur latente est d'autant plus faible que la surface imperméabilisée est importante.

Pour caractériser l'état de l'humidité d'un site urbain, un nombre adimensionnel appelé le « **nombre de Bowen** » est utilisé, correspondant au rapport entre le flux de chaleur sensible et celui de chaleur latente dans la direction verticale. (Athamnia, 2012).

$$\beta = \frac{Q_h}{Q_E} \quad (3.8)$$

Le résultat de ce rapport nous permet de distinguer deux situations:

- Lorsque $\beta > 1$, la disponibilité en eau est limitée. La chaleur est donc transportée dans l'air par convection sous forme de chaleur sensible. Cette situation caractérise principalement un climat chaud.
- Lorsque $\beta < 1$, la disponibilité de l'eau est abondante. Dans ce cas, la chaleur transportée vers l'air est majoritairement sous forme latente. Ce transfert de chaleur ne contribue pas forcément au réchauffement de l'air, mais il augmente le niveau d'humidité. (Robitu, 2005). Cité par (Athamnia, 2012).

Il est à noter qu'en milieu urbain, toute perturbation du bilan énergétique (Q) est due généralement à l'augmentation de la chaleur produite et à l'atténuation des pertes thermiques. (Tiraoui, 2010). Il traduit une perte thermique quand ce dernier est négatif, et il exprime un gain quand il est positif. La nature du bilan (positif ou négatif) dépendra principalement des conditions de surface. Les pertes thermiques sont liées à la chaleur latente (Q_E) et aux pertes par convection (Q_H). Ainsi que les gains de chaleur sont liés aux caractéristiques d'émission et d'inertie des surfaces (Q_G). L'équilibre est réalisé quand les pertes compensent les gains.

Cependant, en milieu urbain cet équilibre est rompu et se traduit souvent par un bilan positif.

3.10 LES EFFET DE LA VEGETATION EN MILIEU URBAIN

3.10.1 La végétation dans la composition urbaine

À l'échelle urbaine, il existe un lien entre le végétal et le bâti dans la composition d'ensemble. Ils sont susceptibles d'entraîner la création d'espaces, la réduction d'échelle entre espaces plats et volumes imposants, une division de l'espace en sous-espaces, des séparations et des repérages. (**Figure 3.13**). La végétation sert de guide visuel et induit des phénomènes de masquage, de filtrage, de perspective, de perception modifiée. (De Sablet, 1988 ; Stefulesco, 1993). Cité par (Vinet, 2000).

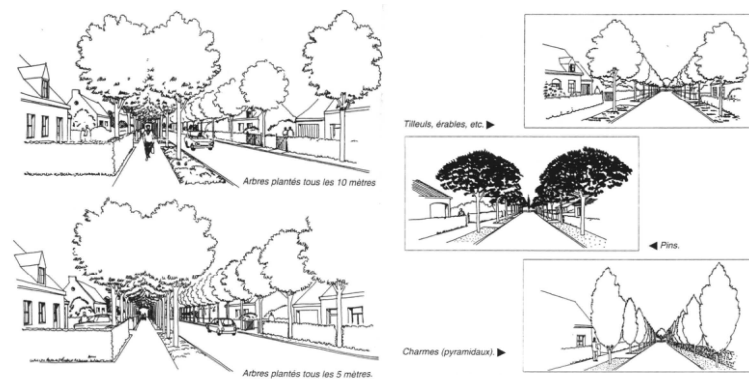


Figure 3.13: Modification de l'espace grâce à : (à gauche) l'espacement entre les arbres ; (à droite) la forme des arbres. Larue, (1996). Adopté de (Vinet, 2000).

3.10.2 Effet microclimatique de la végétation en milieu urbain

Plusieurs études démontrent que la végétation a un effet significatif sur le microclimat urbain, (refroidissement par évapotranspiration, protection contre les rayonnements solaires d'été et contre les vents agressifs d'hiver), de plus elle réagit comme un filtre contre la pollution de l'air et représente une apparence esthétique...etc. (Santamouris, 2001) cité par (Ouameur, 2007). La température en un lieu est dépendante de la nature des surfaces environnantes et est influencée par l'occupation du site et par son relief. La végétation affecte l'albédo et la quantité du rayonnement solaire émise sur un espace urbain, favorise l'évapotranspiration d'eau et ainsi la réduction de l'échauffement de l'air.

Selon Sailor, (1998), cité par (Vinet, 2000), l'effet direct dû à l'ombre des arbres se traduit par une diminution de la température des surfaces, un effet indirect de refroidissement régional peut alors apparaître en augmentant la couverture végétale.

Les arbres peuvent être très efficaces pour réduire la consommation d'énergie à l'intérieur des bâtiments de trois manières (Vinet, 2000):

- Les arbres, en créant une ombre sur une fenêtre, limitent les apports solaires.
- Les murs, les fenêtres et les toits à l'ombre s'échauffent moins et donc réduisent la quantité de chaleur atteignant l'intérieur.
- Le sol à l'ombre est plus frais et représente donc un « puits de chaleur » pour la maison.

Dimoudi et Nikolopoulou, (2003) dans une étude paramétrique au centre ville d'Athènes (Grèce), démontrent que plus la surface de l'aménagement vert augmente plus le différentiel de température de l'air diminue, et plus le rapport surface totale de l'espace vert / surface totale de la proportion urbaine augmente plus le différentiel de température diminue. Les auteurs ajoutent qu'une rangée d'arbres diminue la température de l'air environnant de 1 °C, tandis la création d'un parc au centre-ville en remplacement de bâtiments générerait une baisse de température de l'air environnant de 2 °C à plus de 6 °C.

Gómez *et al* (2001, 2004), cité par (Ouameur, 2007) affirment que la végétation joue un rôle crucial dans le contrôle de l'énergie en ville par ses effets bioclimatiques qui affectent l'albédo et la quantité du rayonnement solaire émise sur un espace urbain. Ils montrent aussi que les conditions du confort thermique des individus peuvent être améliorées par l'effet bioclimatique de la végétation.

Lachance *et al.*, (2006), cité par, (Giguère, 2009), ont observés dans l'arrondissement de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve à Montréal, l'été, un secteur situé en bordure d'une zone végétalisée présentait une température de surface plus fraîche de 6 °C, comparativement à un secteur situé en bordure de zone industrielle sans végétation (respectivement 29 °C et 35 °C).

Johnston et Newton (2004), cité par (Parmentier A, 2010), montrent l'effet bénéfique de la végétation sur la température. Ils rapportent qu'un arbre mature qui transpire 450 litres d'eau a un effet refroidissant équivalent à celui de cinq climatiseurs qui fonctionneraient 20 heures par jour.

Reiter, (2007), a constatée que les écarts de température sont moins importants dans les régions boisées que dans les zones dégagées, du fait que dans les régions fortement boisées, le feuillage des arbres intercepte de 60 à 90% de la radiation solaire, empêchant ainsi l'augmentation de température du sol en journée. Ainsi, l'air s'échauffe dans une moindre mesure qu'ailleurs. Par ailleurs, les arbres empêchent l'émission du rayonnement terrestre vers la voûte céleste pendant la nuit, limitant ainsi la chute de température nocturne. (Figure 3.14).



Figure 3.14: Comportement spécifique de la végétation par rapport au rayonnement solaire et terrestre. Source : (CEE 1992) adopté de (Reiter, 2007).

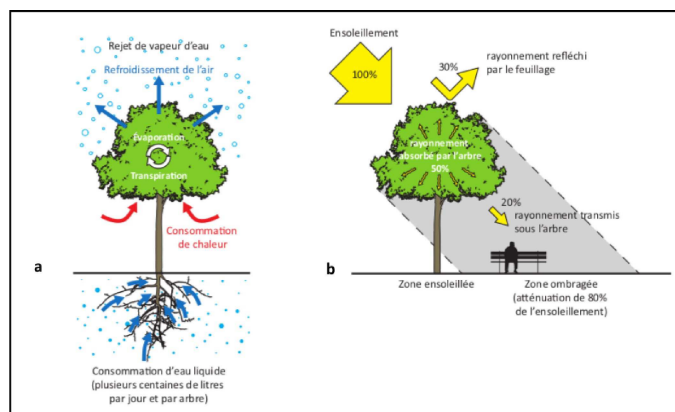


Figure 3.15: Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain. Source : (De Munck, 2013).

Plus les dimensions esthétiques et les qualités thermiques de la végétation s'ajoute l'impact **acoustique** qui est parfois mentionné à travers une atténuation de certaines fréquences du spectre sonore. (Robinette, 1972), cité par (Vinet, 2000). En terme de protection face à des nuisances, s'ajoute l'effet de la réduction de la **pollution atmosphérique** et l'amélioration de la qualité de l'air par fixation de certaines poussières, diminution de l'effet de ruissellement par interception des pluies, protection contre l'érosion due aux vents et à l'eau, affaiblissement de la présence de rosée et de gelée, suppression des éblouissements par effet de filtre ou d'écran, etc. (Vinet, 2000). La

végétation associée à d'autres interventions aérodynamiques telles que des mouvements de terre, des rocailles, des écrans artificiels (mobilier urbain, sculptures, écrans acoustiques,...) peut être également utilisée comme une protection contre les vents. (Figure 3.16). De plus elle peut aussi servir à guider le vent dans la direction souhaitée. (Figure 3.17).

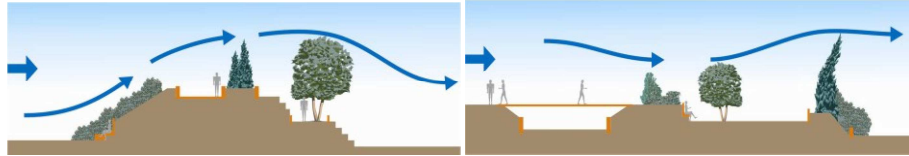


Figure 3.16 : Ecoulement de l'air lié à la végétation et aux mouvements du terrain (Gandemer & Guyot 1981). Adopté de Reiter, (2007).

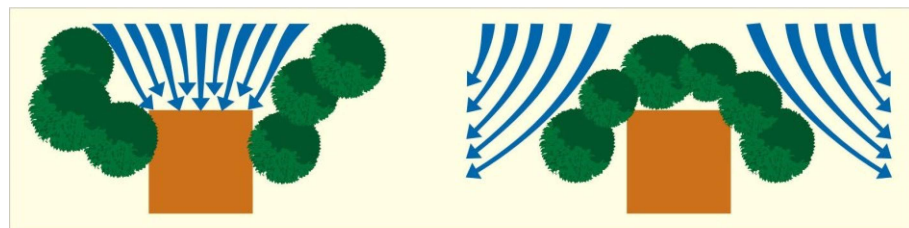


Figure 3.17 : L'utilisation de la végétation comme guide aéraulique. Source : (Reiter, 2007).

3.11 LES EFFETS AERAULIQUES EN MILIEU URBAIN

En milieu urbain, les interactions entre les volumes bâties induisent des phénomènes aérodynamiques locaux qui peuvent être notables et qu'il convient de traiter. En d'autres cas climatiques, au contraire, il peut être bénéfique d'assurer une irrigation minimale propice au confort.

3.11.1 les données de vent

Les données locales du vent sont essentielles pour l'évaluation de l'environnement aéraulique dans les espaces urbains. La donnée la plus importante est la vitesse moyenne du vent et sa direction pendant la période ou l'espace est occupé. La vitesse et la direction du vent sont habituellement mesurées à 10 m au-dessus du sol dans des stations météorologiques situées à l'extérieur des villes. La variation de la vitesse moyenne avec la hauteur et la rugosité peut être décrite par un modèle logarithmique. (Gandemer et al., 1981) :

$$\bar{U}_z = k \bar{U}_{ref} \ln \frac{z}{z_0} = C_z \bar{U}_{ref} \quad (3.9)$$

La correspondance entre σ et la vitesse moyenne de référence s'exprime par :

$$\sigma = K \bar{U}_{ref} \quad (3.10)$$

Des classes de rugosité sont définies pour certains types de sites.

(Tableau 3.7).

Classe de rugosité	I : Océan – grand lac	II : Rase campagne	III : Bocage, banlieue	IV : Zone urbaine	V : Centre des grandes villes
Z0	0.005	0.07	0.03	1	2.5
k	0.166	0.202	0.234	0.266	0.292
K	0.17	0.20	0.21	0.23	0.23

Tableau 3.6: Classe de rugosité d'après Gandemer et al., (1981).

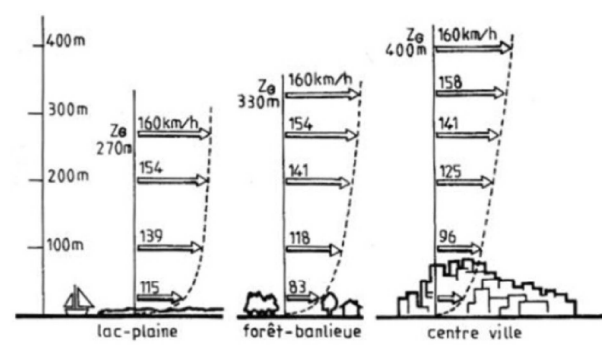


Figure 3.18: Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces. Source : (Chatelet et al., 1998), adopté de, (Colombert, 2008).

Généralement les données sur le vent peuvent être procurées par les centres météorologiques nationaux. La rose des vents est une représentation graphique simple illustrant les vitesses et directions des vents locaux pour une région particulière basée sur des mesures effectuées sur une longue période de temps.

3.11.2 Les échelles d'étude

Pour l'étude des mouvements d'air, trois échelles peuvent être définies :

- l'échelle régionale (de l'ordre de la centaine de km),
- l'échelle méso (la dizaine de km), et
- l'échelle microclimatique (quelques centaines de m).

Pour l'échelle microclimatique, l'écoulement d'air peut être modifié non seulement par la présence de petits obstacles, mais aussi par des phénomènes thermiques liés notamment à l'ensoleillement. La couche limite atmosphérique se modifie aux abords des constructions, où se forme une nouvelle couche atmosphérique appelée couche limite urbaine.

(Bozonnet, 2008).

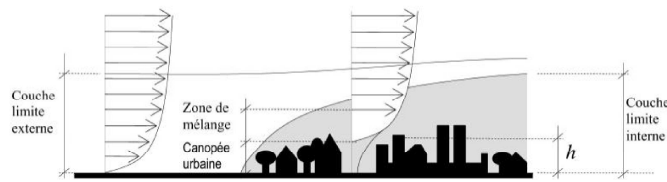


Figure 3.19: Profil moyen de la vitesse horizontale du vent en site homogène et en site urbain. (Plate, 2001). Adopté de (Bozonnet, 2008).

3.11.2 LES EFFETS DU VENT

Le vent, est l'un des facteurs ayant plus d'influence sur les conditions de confort des usagers des espaces extérieurs. Outre que la qualité des ambiances en relation avec les mouvements d'air peut être examinée selon deux angles : le confort dynamique (interaction avec les mouvements, la stabilité des usagers) et le confort thermique (contribution des échanges convectifs au bilan thermique du corps). (Musy, 2008).

Généralement ces deux aspects sont traités séparément, d'un côté la gêne dynamique, et d'un autre la notion de confort thermique.

3.11.2.1 Les effets mécaniques du vent

Le vent exerce une force proportionnelle au carré de sa vitesse sur le piéton qui doit la compenser dans son déplacement. Les effets mécaniques peuvent être ressentis avec des vitesses du vent supérieures à $4\text{-}5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. L'échelle de Beaufort donne quelques manifestations du vent en fonction de sa vitesse et des sensations ressenties. (Tableau 3.7).

Force	Vitesse du vent (m/s) à H=2m	Caractéristiques du vent
2	1,5 à 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	3 à 4,5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux.
4	4,5 à 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7 à 9	Les arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9 à 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11 à 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14 à 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pédestre très difficile et dangereuse.
9	17 à 20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Tableau 3.7: Echelle de Beaufort rapportée aux effets sur le piéton. (Gandemer, 1981).

Selon Gandemer, (1976), les conditions de confort peuvent être représentées par seuil de gêne auquel on associe une fréquence d'inconfort, c'est-à-dire le pourcentage du temps pendant lequel le seuil est atteint et dépassé. Suivant les types d'activités, l'acceptabilité pour une fréquence donnée diffère. Il propose des limites de fréquences au delà desquelles, selon l'activité, les conditions de vent deviennent inconfortables. (Tableau 3.8).

Activités	Limite supérieure de la gêne pour un confort convenable (en pourcentage du temps annuel)
Station immobile prolongée (terrasse de café, théâtre en plein air, piscine, etc.)	5 %
Station immobile de courte durée (jardin public, aire de jeux, rue commerçante, galerie, etc.)	10 %
Marche normale (promenade pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble, etc.)	15 %
Marche rapide (parc auto, trottoir des avenues, belvédère, etc.)	25 %

Tableau 3.8: Fréquence de nuisance liée à l'activité. (Gandemer, 1976).

3.11.2.2 Les effets thermiques du vent

L'intensité du vent perturbe les échanges thermiques entre le corps humain et le milieu extérieur. Le critère de confort de 5 m.s^{-1} du Tableau 3.9 peut être utilisé, si nous présumons que les gens adaptent leur comportement et leurs vêtements selon la saison. Le tableau 3.9 peut être utilisé pour une température de l'air supérieure à 10°C . (Kofoed .NU et al., 2004). Il est à relever que, selon le climat, un vent d'une certaine intensité pourrait être perçu comme peu souhaitable ou même souhaitable. Dans des climats froids, le vent diminuera presque toujours les conditions de confort à l'extérieur, tandis que l'inverse est vrai dans des climats chauds. (Athamnia, 2012).

Activité	Emplacement	Caractéristiques		
		A	I	TI
Marche rapide	Chaussée, chemins	43%	50%	53%
Déambuler marchandes	Parcs, rues	23%	34%	53%
Debout / assis pour une courte période	Parcs, espaces urbains	6%	15%	53%
Debout /assis pour une longue période	Restaurants extérieurs	0.1%	3%	53%

Tableau 3.9: Caractéristiques du critère 5 m/s. (A= Acceptable, I=Inconfortable, TI= Très inconfortable / Dangereux). (Kofoed .NU et al., 2004).

Penwarden (1973), résume les zones de confort pour des conditions

extérieures, à l'ombre et au soleil, par deux schémas, les zones de couleur gris à deux chiffres représentent les zones de vent de confort par rapport aux différentes valeurs de vêtements (clo). Au-dessous de chaque zone grise selon la température transpiration variable et grelottant commence comme une réponse biologique à des conditions inconfortables (**figures 3.20**).

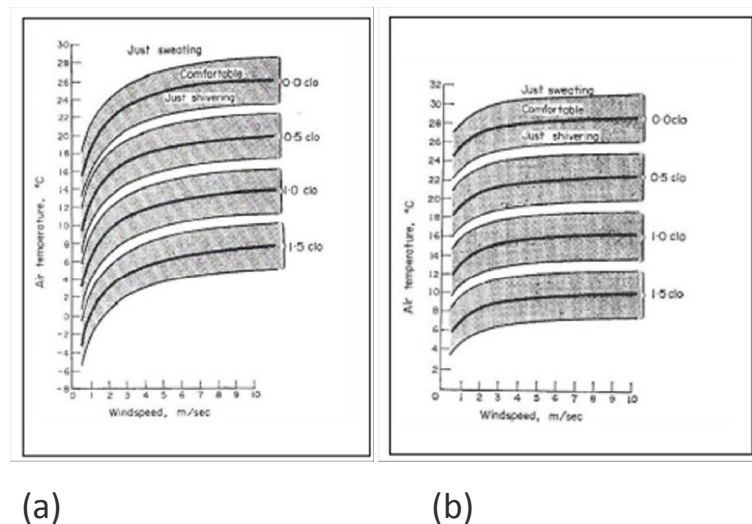


Figure 3.20: Zones de confort pour des conditions extérieures, (a) : au soleil ,(b) : à l'ombre. L'unité "clo" représentent l'isolation thermique des différents types de vêtements, où 0.0clo et 0.5clo sont des tissus d'été légers, 1.0 est pour le costume d'affaires et 1.5 est pour les vêtements d'hiver avec surcouche. Source: (Penwarden, 1973).

3.11.2.3 Les types d'écoulement du vent

On peut distinguer plusieurs types d'écoulement (**Figure 3.21**). La principale différence entre ces deux types d'écoulement se situe au niveau du comportement des particules dans l'écoulement du fluide.

- **Écoulement laminaire** lorsque les particules d'air suivent des trajectoires rectilignes et parallèles. À l'échelle moléculaire, la viscosité de l'écoulement laminaire est assez élevée pour réduire au minimum les échanges de matière entre deux couches (transfert thermique et échange de fluide entre les couches). (Dubois, 1997).
- **Écoulement turbulent**, la direction et la vitesse varient continuellement en traduisant une agitation plus ou moins désordonnée avec des rafales, il s'agit alors d'un vent turbulent, dans lequel les échanges thermiques y sont plus nombreux. Ce type d'écoulement est le plus commun dans la nature et il se

retrouve dans les premiers 500 mètres au-dessus du sol. (Gandemer, 1976).

- **Ecoulement tourbillonnaire**, L'agitation désordonnée, caractéristique de l'écoulement turbulent, s'organise dans ce cas sous forme de tourbillons, les trajectoires ne sont ni rectilignes, ni parallèles entre elles, mais totalement désordonnées.

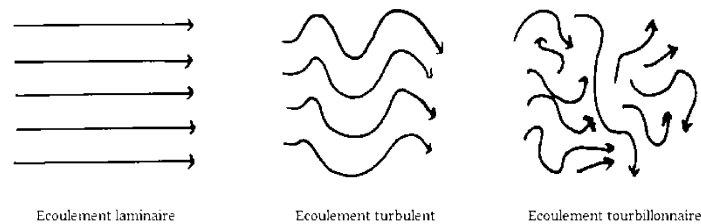


Figure 3.21: Types d'écoulement du vent. Source : <http://pierre.garde.free.fr>

3.11.2.4 L'écoulement autour de bâtiment

Les caractéristiques d'écoulement de base dépendent de la forme de l'obstacle, de son orientation et des caractéristiques de l'écoulement incident. Les figures 3.22 et 3.23 illustrent les champs d'écoulements types autour d'un obstacle de forme cubique.



Figure 3.22: Les lignes de courant et les zones d'écoulement. A: vent non perturbé, B: la zone de déplacement, C: la zone de cavité ou zone de recirculation du vent, D: la zone de sillages d'après (Haistry 1963), adopté de (Kitous, 2012).

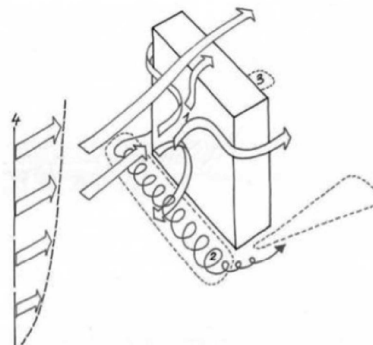
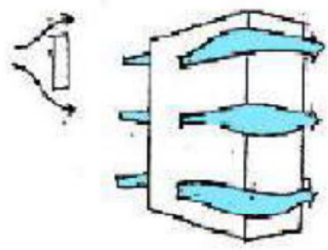
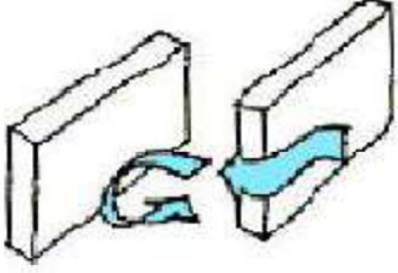
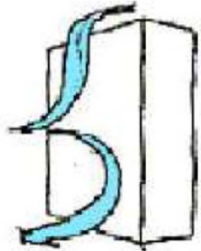
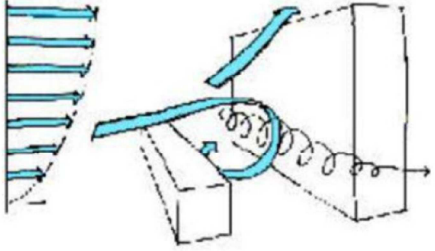
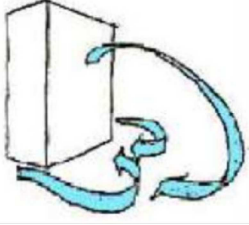
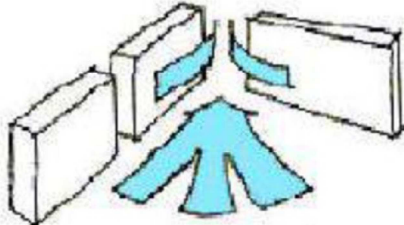


Figure 3.23: Ecoulements autour d'un bâtiment, 1. point de séparation, 2. rouleau tourbillonnaire, 3. zone tourbillonnaire latérale, 4. gradient vertical de vitesse. Gandemer, (1976).

Lorsque le vent est perpendiculaire à l'une des façades du bâtiment, on distingue trois zones de perturbation: sur la façade au vent, on observe une zone de suppression et un vortex turbulent du à l'écoulement qui descend sur la face. Sur la façade sous le vent, on observe une zone de dépression turbulente qui s'étire dans la cavité de basse pression. Sur les cotés et la partie supérieure, on observe un décollement et une zone turbulente. (Bozonnet, 2005).

Gandemer, (1975) cité par (Kitous, 2012), identifie les principes d'écoulement d'air autour de nombreuses configurations de bâtiments comprenant des formes isolées et des formes associées. Selon l'hauteur, l'interaction entre les bâtiments et le vent génère des distributions du vent très variées au niveau du sol. **Le tableau 3.10**, illustre quelques exemples de comportement du vent autour des bâtiments.

Formes isolées	Formes associées
	
Effet de coin	Effet de liaison des zones de pression différente entre immeubles
	
Effet de tourbillon amont	Effet Wise
	
Effet de sillage et de rouleau aval	Effet venturi

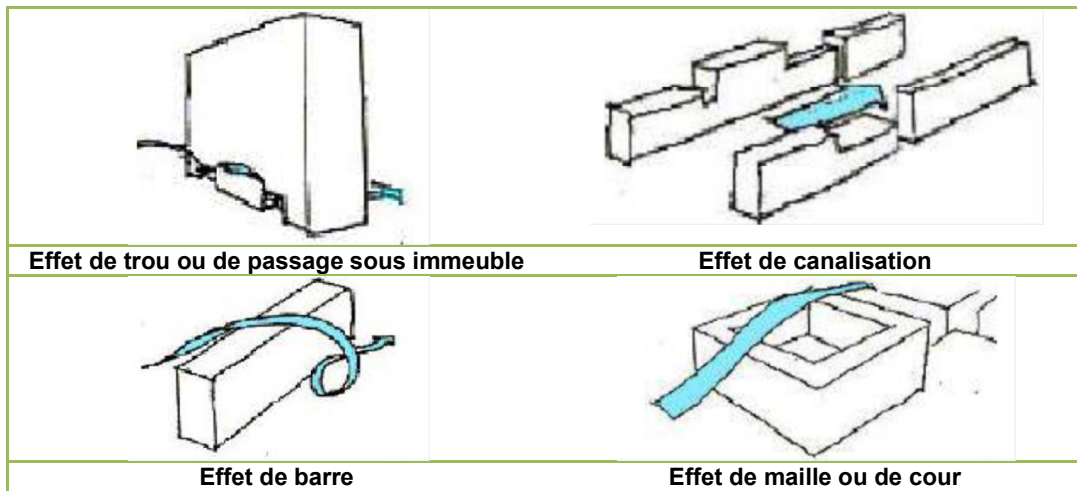


Tableau 3.10: Principaux effets des bâtiments isolés ou associés sur les écoulements d'air. Gandemer (1975), adopté de, Kitous, (2012).

3.11.2.5 L'écoulement dans une rue

Les différents régimes d'écoulement dans une rue peuvent être caractérisés en fonction du prospect H/W . Ces régimes d'écoulement sont déterminés par le degré d'interaction entre les écoulements générés en aval du bâtiment face au vent et en amont du bâtiment sous le vent, (figure 3.24), ils sont classés comme suit :

- Le régime de rugosité isolée, correspond au cas où les écoulements n'interagissent pas, lorsque la rue est plus large, caractérisée par un prospect $H/W < 0.33$.
- Un régime de sillage interférent pour un prospect moyen compris entre 0.33 et 0.65 ($0.33 < H/W < 0.65$).
- un écoulement rasant pour un prospect de la rue $H/W = 0.65$.

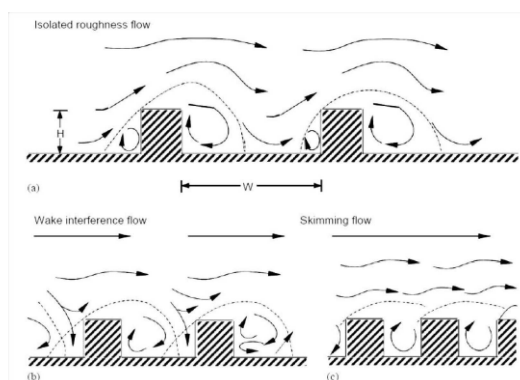


Figure 3.24: Les trois régimes d'écoulements dans les rues canyons pour différents prospects et pour un vent incident perpendiculaire : a) écoulement de rugosité isolée, b) écoulement de sillage interférent, c) écoulement rasant. Source : Oke, (1988).

3.11.3 La ventilation des zones urbaines

La ventilation naturelle des zones urbaines peut être compromise en milieu urbain par le confinement dû principalement à la densité des constructions et à la faible porosité. L'étude du système passif doit prendre en compte les comportements dynamiques du bâti en interaction avec son environnement, notamment dans les scénarii les plus défavorables en période estivale. Une bonne ventilation de la rue et/ou du bâtiment permet d'éliminer la chaleur accumulée, par les parois principalement, et d'amener de la fraîcheur en ville. La vitesse du vent est un facteur important de maîtrise du phénomène d'ICU, le phénomène diminue avec l'augmentation de cette dernière. En outre, l'ICU disparaît pour des vents d'une vitesse supérieure à 11 m/s. L'augmentation de la vitesse d'air génère, de plus, une augmentation des transferts thermiques par convection. Selon [Chao Yuan, et al. \(2012\)](#), l'optimisation de la perméabilité urbaine pour assurer une bonne ventilation naturelle dans les zones urbaines est un problème de conception majeur rencontré par les urbanistes et les architectes. L'air stagnant dans les espaces urbains extérieurs aggrave le confort thermique urbain extérieur et la dispersion de la pollution de l'air urbain. En été, une diminution de la vitesse du vent de 1,0 m / s à 0,3 m / s est l'équivalent de 1,9 ° C d'augmentation de la température.

Le vent peut être combiné à l'eau dans un effet « brumisateur » : il transporte les gouttelettes d'eau d'une fontaine par exemple, rafraîchissant ainsi l'atmosphère et les personnes qui les reçoivent directement, grâce à l'action du vent sur la peau mais aussi avec l'évaporation des gouttelettes qui consomme de l'énergie. ([Colombert, 2008](#)).

[Chao Yuan, et al. \(2012\)](#), dans une analyse numérique comparent les effets de différentes modifications de la morphologie bâtiment sur les performances de ventilation naturelle à l'échelle du piéton. Ils proposent un certain nombre de recommandations qui sont importants pour la planification urbaine et la conception, comme suit:

- L'orientation de la grille des rues dans la planification de réseau est un paramètre important dans les performances de ventilation

naturelle urbain. Les rues principales doivent être disposées le long de la direction des vents dominants.

- Pour les piétons, les performances de ventilation urbaine dépend surtout de la porosité du bâtiment au niveau du piéton.
- la diminution du ratio de couverture du site permet d'augmenter la performance de la ventilation naturelle au niveau des piétons.
- Perméabilité du vent dans la couche de podium est très utile dans les principaux flux d'air vers les canyons urbains profonds.
- Des passages d'air doivent être disposés aussi près que possible du niveau du sol.
- Revers de construction, de séparation, et le renforcement de perméabilité sont utiles dans l'amélioration de l'environnement du vent au niveau des piétons. Cependant, les niveaux d'efficacité de ces stratégies diffèrent.
- Les chemins de l'air dans les zones urbaines peuvent être efficacement mis en place et organisées par l'application de différentes stratégies pour améliorer le renforcement porosité.
- Alignement des rues correctement et en laissant des espaces libres suffisants qui peuvent être liés entre eux sont tout aussi importants

Une étude menée par [Guo, F et al, \(2015\)](#), pour évaluer les performances de ventilation naturelle dans la zone à haute densité du centre-ville de Dalian, une analyse du potentiel éolien in situ a été effectuée, et les résultats ont été utilisés comme référence pour configurer les conditions aux limites de la simulation numérique CFD. Ils ont proposé de construire un chemin de ventilation de la ville, qui est un espace de faible rugosité. Ils ont conçu un espace ouvert le long de la ville menant direction du vent comme le chemin de ventilation pour diriger la brise terre-mer et montagne-vallée pour la zone centrale de la ville. Afin d'évaluer l'effet des stratégies d'optimisation, une simulation a été réalisée sur l'environnement du vent avant et après optimisation à l'aide du logiciel PHOENICS. Les résultats montrent que, dans la zone B, la vitesse du vent a augmenté en moyenne à 0,95 m/s, 2,4 fois celle avant

l'amélioration. La ventilation dans les zones A, B, est significativement améliorée. (Figure 3.25).

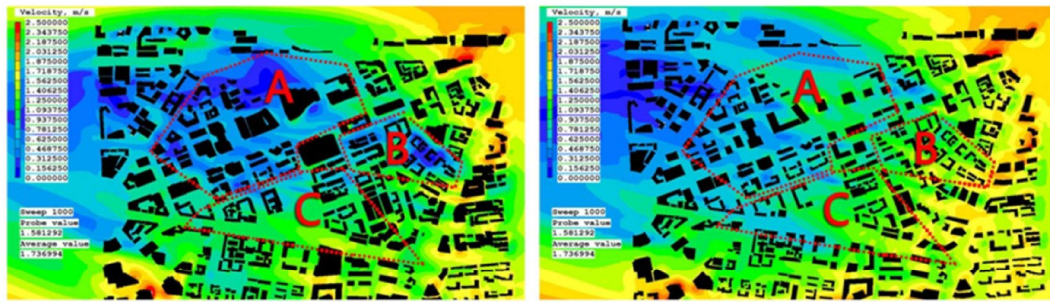


Figure 3.25: Comparaison de l'environnement du vent (à 10 m) avant et après optimisation (à gauche: avant l'optimisation, à droite: après l'optimisation). Guo, F et al, (2015).

Chaves D, et al. (2015), ont analysé les effets de la morphologie urbaine sur la dynamique de ventilation à travers une étude comparative entre deux quartiers : Copacabana et d'Ipanema, situé à Rio de Janeiro, Brésil. L'étude a été développée à l'aide de simulations expérimentales dans un tunnel de vent, en tenant compte de la morphologie urbaine et ses relations les espaces ouverts. Un diagnostic a été réalisé grâce à l'examen des effets du vent par rapport au volume des espaces construits et non construits. Dans un premier temps, les deux quartiers étudiés, ont été sélectionnés en fonction de caractéristiques communes, qui établissent une relation entre les deux régions, telles que la distance de la plage et la présence d'une place publique. Les résultats indiquent qu'il est que la morphologie urbaine est en mesure de représenter une forte influence sur la direction et la force des vents. La perméabilité du vent à travers le maillage urbain est essentielle pour améliorer la ventilation sur les zones internes du quartier. (Figure : 3.26).



Figure 3.26: directions du vent comparatives: (a) Copacabana; (B) Ipanema. (Chaves D, et al. 2015).

NG. E, (2007), propose des lignes directrices de conception urbaine qui fournissent référence de conception utile pour une meilleure ventilation de l'air :

- **Chemin de l'air « Breezeways » :** Il est important pour une meilleure ventilation de l'air urbain dans une ville chaud dense humide de laisser plus de vent pénétrer à travers le district urbain. « Breezeways » peuvent être sous des formes de routes, d'espaces ouverts et couloirs de construction de faible hauteur, à travers laquelle l'air atteint les parties intérieures de zones urbanisées largement occupées par des immeubles de grande hauteur. (Figure 3.27).

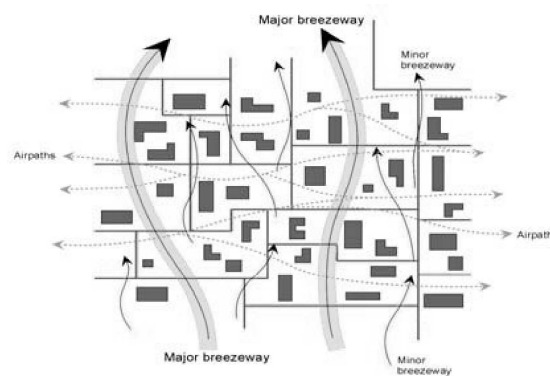


Figure 3.27: Breezeway / Air path. (NG. E, 2007).

- **Orientation de la grille des rues :** Rues principales, larges avenues et / ou « breezeways » principaux devrait être aligné en parallèle, ou jusqu'à 30 degrés à la direction des vents dominants, afin de maximiser la pénétration des vents dominants dans le quartier. (Figure 3.28).

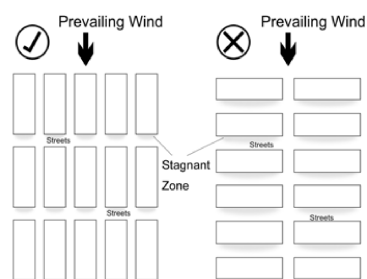


Figure 3.28: Orientation des rues. (NG. E, 2007).

- **La liaison des espaces ouverts** : les espaces ouverts peuvent être liés et alignés de manière à former des « breezeways » ou des couloirs de ventilation. (Figure 3.29).

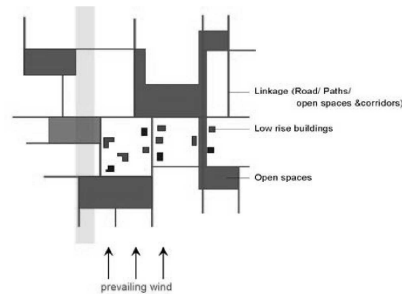


Figure 3.29: La liaison des espaces ouverts. (NG. E, 2007).

- **Sites de bord de mer** : sont les passerelles des brises de mer et de terre en raison des effets de refroidissement et de réchauffement de la mer de soleil. Les bâtiments le long du front de mer devraient éviter le blocage des brises mer / terre et les vents dominants. (Figure 3.30).

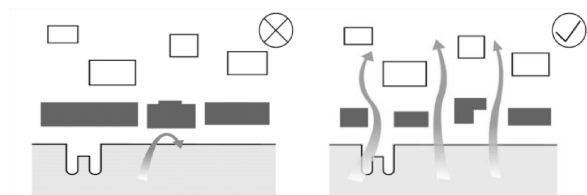


Figure 3.30: Sites de bord de mer. (NG. E, 2007).

- **Hauteurs des constructions** : la variation de la hauteur doit être considérée comme autant que possible avec le principe que la hauteur diminue vers la direction où le vent dominant vient. (Figure 3.31).

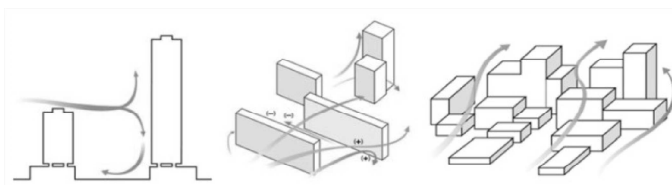


Figure 3.31: Hauteurs des constructions. (NG. E, 2007).

- **Disposition des bâtiments** : des écarts importants devraient être prévus entre les blocs pour maximiser la perméabilité à. Ces écarts devraient être de préférence à une face perpendiculaire au vent dominant

3.11.4 Méthodes d'analyse de l'écoulement du vent en milieu urbain.

3.11.4.1 Les mesures in-situ

Les mesures sur le site ont l'avantage que les résultats obtenus sont ceux d'une situation réelle, où l'influence de tous les immeubles et des obstacles sont inclus. L'inconvénient d'une telle démarche est que celle-ci peut devenir coûteuse puisque, idéalement, la période de mesures devrait être assez étendue pour couvrir les combinaisons de vitesses et de directions de vent les plus fréquentes, ce qui nécessite un grand nombre de points de mesure. Il est difficile, aussi, d'évaluer de nouvelles configurations d'aménagement.

3.11.4.2 Les tests en soufflerie

Les tests en soufflerie ont l'avantage que des résultats fiables pour un grand nombre de combinaisons de vitesses et de directions du vent peuvent être obtenus rapidement. Il est également possible de tester l'environnement éolien pour de nouvelles surfaces lorsque ces dernières sont encore en stade de planification, et de tester de nouveaux aménagements. Cependant, il est essentiel de faire appel à un laboratoire expérimenté et de développer un modèle précis de la surface concernée ainsi que de ses environs. Ainsi, des essais en soufflerie peuvent être coûteux en temps et en argent.

3.11.4.3 Les outils de simulation en dynamique des fluides (CFD)

Les programmes pour ce type de simulations sont appelés «logiciels de simulation en dynamique des fluides» (CFD) et comportent l'avantage que n'importe laquelle des combinaisons de vitesses et de directions du vent et de configuration de l'espace et des environs peuvent être évaluées. Cependant, les calculs impliquent des ressources informatiques considérables et il est nécessaire que l'utilisateur de ces logiciels soit expérimenté et qu'il comprenne bien cette problématique complexe de circulation d'air.

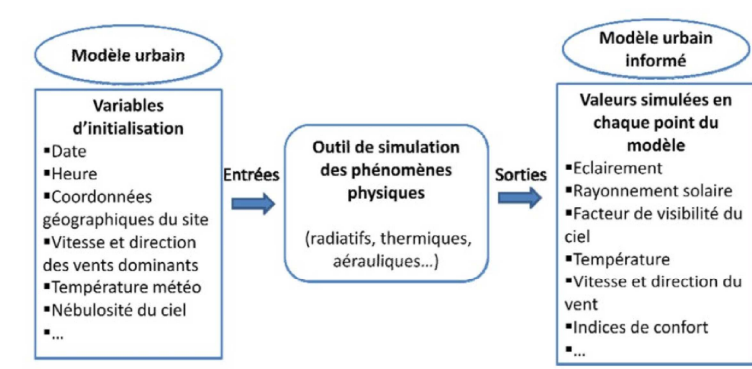


Figure 3.32: Processus de simulation des facteurs physiques. (Zekri, 2010)

À l'échelle urbaine, les études aérauliques servent à vérifier les incidences des vents les plus forts sur les espaces libres et à identifier les formes bâties génératrices de phénomènes d'accélération qui affectent le confort des piétons. Elles permettent aussi de générer des microclimats voulus dans certains quartiers en jouant sur le pouvoir naturel de rafraîchissement des vents. Elles permettent ainsi de croiser programmation urbaine et ambiances sensibles.

3.12 LA POLLUTION URBAINE

Les données scientifiques actuelles, indique que la pollution urbaine, qui est causé par les activités humaines (en particulier les industries et les transports), provoque un spectre d'effets néfaste pour l'environnement, l'économie et la santé humaine, dont le smog et les pluies acides sont des bons exemples.

3.12.1 DEFINITION

Selon la loi française sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE)³ de 1996, la **pollution atmosphérique** se définit comme étant **"l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives"**.

³ (LAURE) : Loi n°96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie.

L'existence d'un polluant dans l'atmosphère est rythmée par cinq étapes (Figure 3.33) :

- son émission dans l'atmosphère;
- sa dispersion et son transport par le vent;
- ses interactions avec d'autres substances ou radiations et éventuelles transformations, avec production d'une pollution secondaire;
- son interaction avec d'autres milieux, par dépôt ou immission;
- ses effets sur les milieux récepteurs.

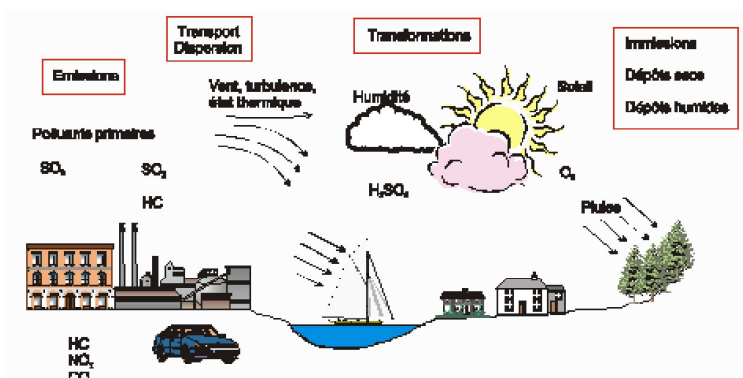


Figure 3.33: Relation émissions et immissions. Source : <http://www.mtaterre.fr>

3.12.2 Principaux polluants et leurs effets

Les sources émettrices de polluants dans l'atmosphère peuvent être d'origine anthropique (domestique, industrie, agriculture, transports, etc.) ou naturelle (volcans, etc.). Les polluants les plus connus sont présentés ci-dessous ainsi que leurs effets sur la santé et l'environnement.

Polluants	Définitions	Effets
Les oxydes d'azote : NOx	Ce terme regroupe le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO ₂). Le NO, principalement émis par la circulation automobile, provient des réactions de combustion. Il est ensuite oxydé en NO ₂ dans l'atmosphère.	Ils sont des irritants respiratoires qui peuvent entraîner une altération de la fonction respiratoire. Ils sont à l'origine des pluies acides et de la formation de l'ozone.
Le dioxyde de soufre: SO₂	Ce polluant, d'origine principalement industrielle, provient des installations de combustion (fioul lourd, charbon, gasoil...).	Il est très irritant pour les muqueuses et les voies respiratoires. Il peut provoquer des œdèmes du poumon et des bronchites. Il est en partie responsable des pluies acides.
Les particules : PM	Constituées de poussières polluantes de composition diverse et de tailles comprises entre 0,001 µm et 50 µm. Elles résultent le plus souvent de la réunion dans l'atmosphère de plusieurs sources de pollution. Elles contiennent des substances toxiques comme les métaux lourds ou les hydrocarbures. Seules les particules de taille inférieure à 10 µm (PM10) restent en suspension dans l'air. Ces particules fines (PM10) sont principalement émises par les véhicules diesel.	Les particules fines peuvent pénétrer profondément dans les alvéoles pulmonaires et provoquer entre autres des troubles respiratoires, et pourraient entraîner des cancers. Leurs dépôts dégradent les bâtiments, et bloquent la respiration des plantes.
L'ozone : O₃	Dans la stratosphère, il permet de filtrer les radiations ultraviolettes. Dans la troposphère, ce polluant secondaire est formé suite à de nombreuses réactions chimiques et photochimiques avec le NO ₂ et les hydrocarbures. C'est le polluant qui dépasse le plus souvent les normes notamment l'été par fort ensoleillement. L'ozone réagissant avec le NO pour former le NO ₂ , c'est un polluant observé plutôt en zone interurbaine.	Il provoque des irritations des voies respiratoires et de la muqueuse oculaire. Il est responsable du smog dans les villes, et participe activement à l'effet de serre.
Le monoxyde de carbone : CO	Il provient de la combustion incomplète des combustibles utilisés par les véhicules. On trouve des concentrations fortes en CO sous les espaces couverts (tunnels, parking...) où les	A fortes doses, il peut entraîner le coma puis la mort. Tout comme les oxydes d'azote et les hydrocarbures, il intervient

	véhicules circulent en nombre important. Il se transforme en CO ₂ dès que l'on s'éloigne de la source.	dans la formation de l'ozone troposphérique.
Le dioxyde de carbone : CO₂	Il est le produit final de toute réaction de combustion de produits carbonés.	Il n'est pas nocif pour l'homme mais il contribue à l'augmentation de l'effet de serre.
Les composés organiques volatils : COV	Ce terme comprend les hydrocarbures (HC), les solvants et certains composés organiques. Ces polluants sont très diversifiés. Certains des hydrocarbures, les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) tels que le benzène, sont cancérigènes. Les hydrocarbures proviennent des solvants, des peintures mais aussi des automobiles.	Les HC participent à l'effet de serre par formation de CH ₄ . De plus, ils favorisent la formation de l'ozone troposphérique.
Le plomb : Pb	En milieu urbain, la pollution par le plomb était principalement due aux véhicules fonctionnant au carburant plombé, avant l'arrivée des carburants sans plomb qui ont permis une baisse importante des teneurs en plomb dans l'atmosphère.	Il entraîne des modifications de la composition du sang en gênant la fabrication de l'hémoglobine. A forte dose, il gêne le fonctionnement du système nerveux central.
L'acide chlorhydrique : HCl	L'acide chlorhydrique provient principalement de l'incinération des ordures ménagères et en particulier du plastique comme le PVC.	Il participe à la formation des pluies acides.
Les dioxines et furanes : PCDD/PCDF (polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes)	sont des produits secondaires de réactions chimiques avec des composés à base de polychlorophénols (herbicides...). Les sources principales sont multiples : combustion (incinération des déchets, du bois, transports routiers...), industrie du papier... Les dioxines et furanes s'accumulent le long des chaînes alimentaires (poisson, viande, lait...). La contamination humaine par ingestion représente plus de 90% de l'exposition aux dioxines.	Les PCDD/PCDF peuvent entraîner la chloracné modéré ou sévère chez l'homme et engendrent un effet cancérigène certain chez les animaux.

Tableau 3.11: Principaux polluants et leurs effets. Source : <http://www.aria.fr>

3.12.3 La dispersion des polluants

Le déplacement des polluants depuis leur source, c'est-à-dire leur dispersion, est un facteur déterminant de leur accumulation ou leur dilution dans l'atmosphère. Les concentrations en polluant dans l'atmosphère peuvent fluctuer dans le temps et dans l'espace selon les paramètres suivants :

- variation dans le temps de l'intensité des émissions des différentes activités.
- la topographie locale peut favoriser ou non le déplacement des masses d'air.
- les conditions météorologiques : une atmosphère stable limite la dispersion des polluants et favorise les pics de pollution
- la structure thermique de l'atmosphère : une inversion thermique de température limite la dispersion des polluants.

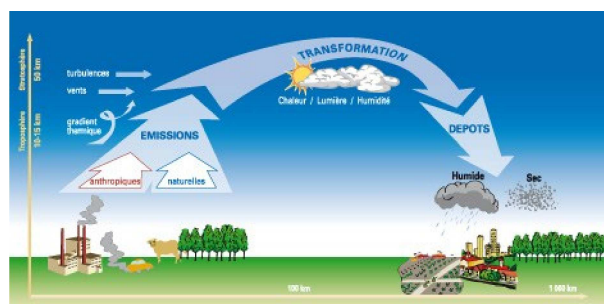


Figure 3.34: Emissions, transformation et dépôts de polluants. Source: <http://www.sante-environnement-travail.fr>

Le schéma suivant (**Figure 3.35**), présente la méthodologie générale utilisée pour la modélisation de la dispersion de polluants atmosphériques.

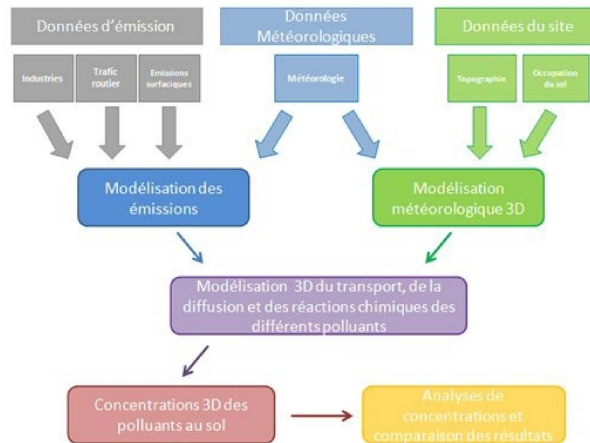


Figure 3.35: Présentation schématique de la méthodologie générale utilisée pour la modélisation de la dispersion de polluants atmosphériques. Source : <http://www.aria.fr>

3.12.4 Indice de qualité de l'air

C'est un indicateur de qualité de l'air permettant de synthétiser différentes données en une seule valeur simple. L'indice **ATMO**, conçu à l'initiative du **Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, en France**, il existe depuis 1995. Il constitue un indicateur journalier de la qualité de l'air obligatoire pour les agglomérations supérieures à 100 000 habitants. Dans certaines agglomérations moins peuplées, un **IQA** (Indice de Qualité de l'Air) peut être calculé. Pour chaque polluant (SO_2 , NO_2 , O_3 , PM_{10}) un sous-indice est calculé à partir d'une moyenne des niveaux du polluant considéré. C'est le sous-indice maximal qui est choisi comme indice ATMO final caractérisant la qualité de l'air globale de la journée considérée. C'est un chiffre allant de 1 à 10, associé à un qualificatif (de très bon à très mauvais).

Indice ATMO	Ozone	Dioxyde de soufre	Dioxyde d'azote	Particules PM10
1	0 à 29	0 à 39	0 à 29	0 à 6
2	30 à 54	40 à 79	30 à 54	10 à 19
3	55 à 79	80 à 119	55 à 84	14 à 20
4	80 à 104	120 à 159	85 à 109	30 à 39
5	105 à 129	160 à 199	110 à 134	28 à 34
6	130 à 149	200 à 249	135 à 164	50 à 64
7	150 à 179	250 à 299	165 à 199	42 à 49
8	180 à 209	300 à 399	200 à 274	80 à 99
9	210 à 239	400 à 499	275 à 399	65 à 79
10	>= 240	>= 500	>= 400	>= 125

Indices ATMO	Qualificatif
10	Très mauvais
9	Mauvais
8	Mauvais
7	Médiocre
6	Médiocre
5	Moyen
4	Bon
3	Bon
2	Très bon
1	Très bon

Tableau 3.12: Echelle de l'indice ATMO. Source : <http://www.aria.fr>

3.12.5 Impacts de la pollution

A l'échelle urbaine, les particules polluantes émises par les bâtiments et les véhicules se manifestent par une augmentation des aérosols et des noyaux de condensation, favorisant ainsi la création de nuages ou de brouillards réduisant la quantité d'énergie solaire incidente et augmentant ainsi l'énergie solaire diffuse. (Athamnia, 2012).

Il est à noter aussi que, la température des surfaces est généralement plus élevée en ville qu'à la campagne, induisant ainsi un flux infrarouge émis plus important en zone urbaine et en milieu de journée. Par ailleurs, comme le flux infrarouge émis par les surfaces urbaines L_{\uparrow} est en partie absorbé par les polluants contenus dans l'atmosphère urbaine, il y a une élévation de la température de l'air et donc une augmentation du flux infrarouge atmosphérique L_{\downarrow} .

3.13 LE PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

Dans cette section, en va définir en quoi consiste un îlot de chaleur, quels sont les causes de sa formation et ses impacts sur l'environnement et la santé et quel sont les mesures à prendre pour l'atténuer.

3.13.1 DÉFINITION

Le phénomène dit « d'îlot de chaleur urbain, ICU » correspond à l'observation de différences sensiblement positives entre les températures de l'air mesurées en site urbain et celles des campagnes environnantes, (figure 3.36). Des études américaines par Akbari et al., (1992) cité par (Vinet, 2000), ont montré que les températures estivales, dans les zones urbaines, sont généralement plus élevées de 1 à 4 °C que celles des zones rurales environnantes. L'évolution spatiale de la température se traduit par un pic semblable à un « îlot ».

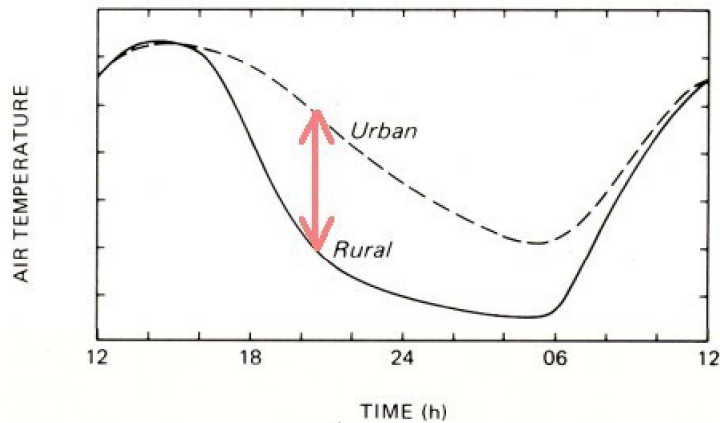


Figure 3.36: L'observation de différences positives entre les températures de l'air mesurées en site urbain et celles des campagnes environnantes. Source : <http://www.cnrm-game-meteo.fr>

Le phénomène se caractérise par :

- un rafraîchissement nocturne en milieu urbain fortement atténué, ainsi l'heure du maximum d'ICU est généralement située quelques heures après le coucher du soleil ;
- l'augmentation de température en début de journée est plus rapide en milieu rural jusqu'à observer temporairement une température plus faible en ville ;
- une inertie du milieu urbain, notamment due aux matériaux et revêtements des surfaces urbaines.

L'îlot de chaleur urbain est un effet de dôme thermique, créant une sorte de microclimat urbain où les températures sont significativement plus élevées : plus on s'approche du centre de la ville, plus il est dense et haut, et plus le thermomètre grimpe. (**Figure 3.37**).

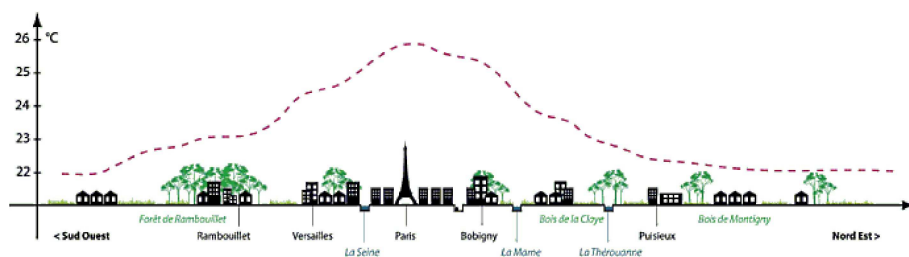


Figure 3.37: Schéma de l'effet d'îlot de chaleur urbain (Source Descartes, 2009). Source: <http://www.notre-planete.info>

Trois types d'îlots de chaleur urbains sont distingués dans la littérature, soit :

- les îlots de chaleur à la surface du sol : grâce à des lectures de rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces, il est possible de déceler les endroits d'une ville où les surfaces sont les plus chaudes ;
- les îlots de chaleur de la canopée urbaine, qui est la couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments, où l'essentiel de l'activité humaine se déroule ;
- les îlots de chaleur de la couche limite urbaine, située au-dessus de la couche de la canopée. Les îlots de chaleur de la canopée urbaine et de la couche limite urbaine font référence à la température de l'air (Oke, 1982; Voogt, 2002). Cité par (Giguère, 2009).

Selon Pigeon, (2007), l'excès de la température de l'air qui caractérise le phénomène d'îlot de chaleur de la canopée urbaine peut être observé selon cinq méthodes distinctes de la littérature (**tableau 3.13**).

Méthode d'observation	Auteur
L'étude de la tendance de température pour une station dont l'environnement s'urbanise	(Tarleton et Katz, 1995, Montávez et al., 2000, Tereshchenko et Filonov, 2001)
La comparaison de la tendance de température observée pour plusieurs stations dont l'environnement évolue différemment	(Magee et al., 1999, Philandras et al., 1999)
Construction de statistiques sur la différence de température entre des paires ou des groupes de stations urbaines et rurales	(Ackerman, 1985, Nasrallah et al., 1990, Moreno-Garcia, 1994)
Observation à l'aide d'un réseau de stations fixes	(Kuttler et al., 1996, Morris et al., 2001)
Les observations le long d'un trajet à l'aide de véhicules	(Yamashita et al., 1986, Goh et Chang, 1999, Unger et al., 2001).

Tableau 3.13: méthodes d'observation de l'ICU d'après, Pigeon, (2007).

3.13.2 LES FACTEURS CAUSES

Les différentes études sur les îlots de chaleur urbains ont montré ce phénomène est très variable, sa forme et son intensité dépendent de la combinaison d'une série de facteurs naturels et humains. (**Figure 3.38**).

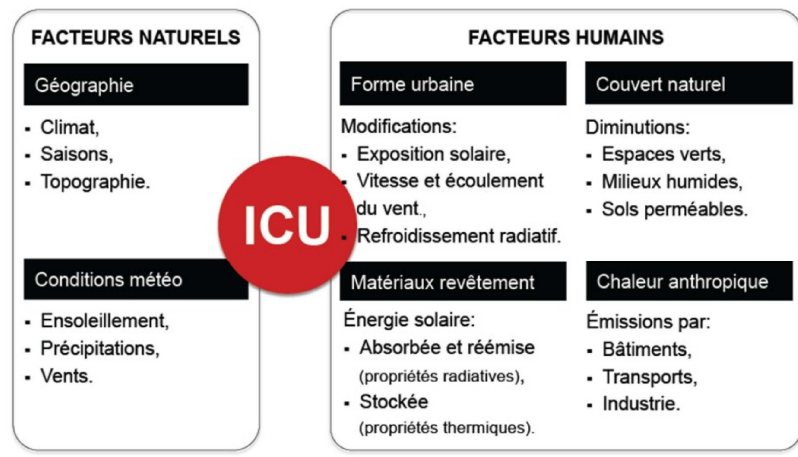


Figure 3.38: Facteurs naturels et humains contribuant à la formation d'un ICU. Source : [Dubois, \(2014\)](#).

Pour définir les facteurs favorisant la création d'un ICU, il est important d'étudier le bilan thermique d'une surface de sol. En effet, connaître les phénomènes physiques en jeu permet :

- d'étudier l'influence de la forme urbaine et de dispositifs particuliers tels que les toitures réfléchives, les arbres, les bassins d'eau, les fontaines, les brumisateurs...
- de déterminer les paramètres influents pour mieux concevoir.

$$QS = RN + QC + QE \tag{3.9}$$

avec

QS = transfert de chaleur dans le sol : conduction

RN = flux radiatif net : rayonnement

QC = flux de chaleur sensible : convection

QE = flux de chaleur latente : évaporation ou condensation

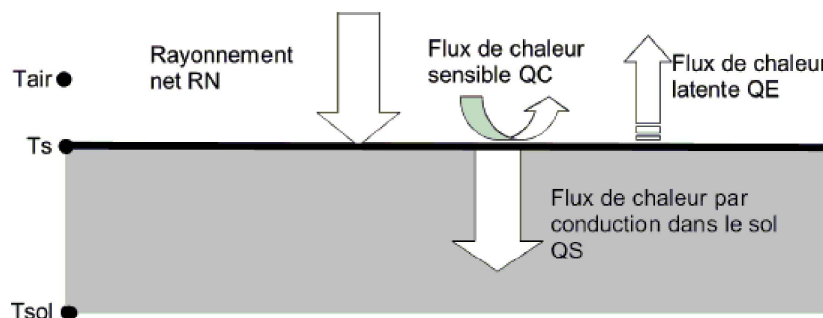


Figure 3.39: Bilan thermique sur une surface. Source : [Marjory, \(2007\)](#).

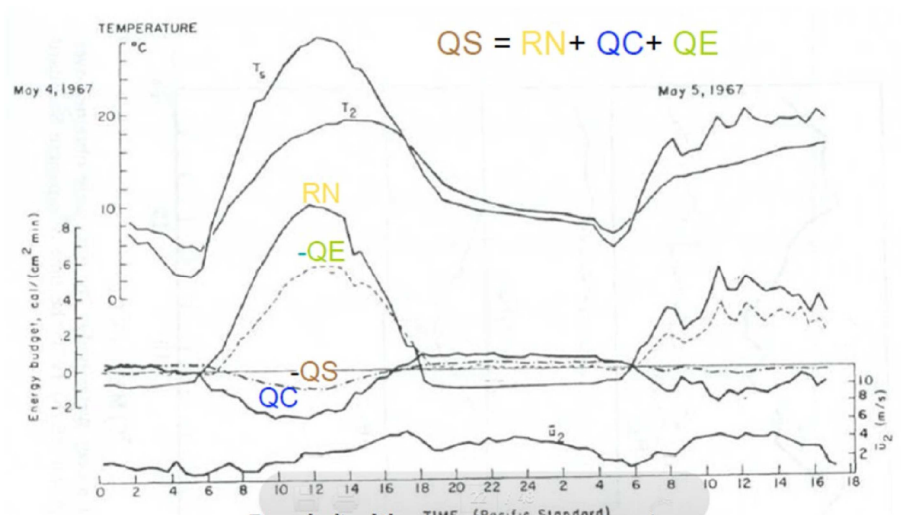


Figure 3.40 : Exemple d'un bilan énergétique sur une journée : T_s : température de surface, T_2 : température, U_2 : vitesse moyenne du vent à 2m pour une surface plantée (en Californie). (Brutsaert, 1982), adopté de (Marjory, 2007).

3.13.2.1 FACTEURS D'ORIGINE NATURELLE

Les facteurs d'origine naturelle concourant à la formation des ICU ressortent de trois catégories distinctes : climatologie, météorologie et topographie.

3.13.2.1.1 La climatologie

L'énergie apportée par le soleil sous forme de chaleur est d'autant plus importante que celui-ci est haut. Il devrait donc faire plus chaud lors du solstice d'été. Cependant, ce raisonnement est inexact si on omet de prendre en considération l'inertie de la Terre. Au printemps et en été, celle-ci accumule de la chaleur avec pour conséquence un ralentissement de l'élévation de la température. On observe le phénomène inverse en automne et en hiver : la Terre restitue la chaleur accumulée au printemps et en été.

3.13.2.1.2 La météorologie

Le climat des zones non bâties diffère de celui des villes. Conformément à la mécanique des fluides, l'écoulement du vent en rase campagne est laminaire (la mesure de sa vitesse permet de visualiser un comportement stable). Au-dessus des villes s'observe des couches d'air chaud, de telle façon qu'elles sont couvertes d'une cloche invisible (urban boundary layer ou UBL). Cette cloche est d'une altitude très supérieure aux faîtes des constructions, y compris des immeubles de grande hauteur (IGH).

Au-dessus de la canopée urbaine (urban canopy layer ou UCL), c'est-à-dire des toitures, une seconde cloche épouse littéralement la forme du bâti. Quand le vent s'approche de la ville, il se réchauffe et sa viscosité diminue. Il cesse d'être laminaire pour devenir turbulent, comportement erratique renforcé par les obstacles tels que les bâtiments.

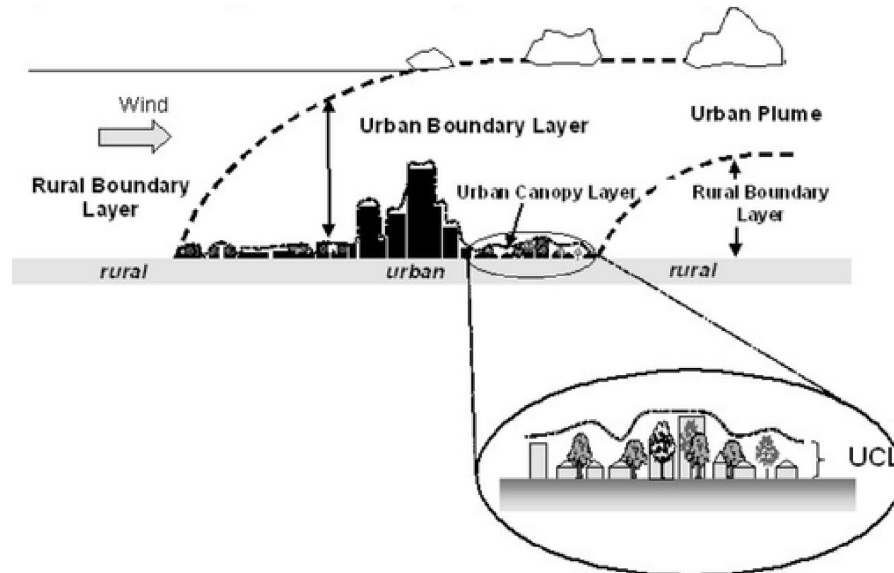


Figure 3.41: Ecoulement des vents autour d'une ville.

Source : <http://thebritishgeographer.weebly.com/urban-climates.html>

La ventilation naturelle permet d'amener de la fraîcheur en ville. La vitesse du vent est un facteur important de maîtrise du phénomène d'ICU, le phénomène diminuant avec l'augmentation de cette dernière. En outre, l'ICU disparaît pour des vents d'une vitesse supérieure à 11 m/s. L'augmentation de la vitesse d'air génère, de plus, une augmentation des transferts thermiques par convection.

3.13.2.1.3 La topographie

La topographie joue un rôle dans la hausse très localisée des températures. Lorsque les vents sont faibles, le poids de l'influence du relief local est fort

3.13.2.2 FACTEURS D'ORIGINE ANTHROPIQUE

En plus des facteurs d'origine naturelle, plusieurs causes de source anthropique favorisent l'émergence et l'intensification des îlots de chaleur urbains. Ces causes sont l'effet de l'urbanisation, les bas *albédos* des matériaux, les sources de chaleur anthropique.

3.13.2.2.1 Urbanisation

Etant donné que l'urbanisation est la substitution du couvert végétal par des surfaces minérales (bitume, pierre, etc.), elle diminue la capacité d'évapotranspiration, contribuant à assécher l'air ambiant. De plus, le comportement des matériaux urbains fait qu'ils emmagasinent de la chaleur qu'ils restituent plus tard, une fois que la température de l'air est redescendue. Ainsi que la morphologie urbaine, qui se rapporte aux formes tridimensionnelles, à l'orientation et à l'espacement des bâtiments dans une ville, joue également un rôle dans la formation des îlots de chaleur urbains. Les bâtiments déploient des surfaces de réflexion des rayonnements infrarouge. De plus, ils font obstacle aux écoulements d'air qui dissipent la chaleur. Aussi, la morphologie urbaine peut également influencer la circulation automobile et encourager ainsi les apports de chaleur et de pollution de l'air de ce mode de transport que représente le véhicule automobile (Oke, 1988). Cité par, (Giguère, 2009).

3.13.2.2.2 Albédo des matériaux et urbain

Les caractéristiques de réflexion des surfaces et notamment celles des toits ont le plus d'influence sur l'albédo équivalent de la surface urbaine dans les villes constituées principalement d'immeuble de hauteur importante. Mais quand la hauteur des bâtiments diminue, les caractéristiques de réflexion du sol et des murs reprennent de l'influence relative. Les surfaces rugueuses et sombres absorbent plus de rayonnement que les surfaces lisses, planes et claires et atteignent une température plus élevée, restituant alors cette chaleur à l'air ambiant. Les surfaces lisses et planes sont moins chaudes que celles qui sont rugueuses et courbées. La taille de la surface, l'épaisseur n'induisent pas de différences significatives pendant la journée. En règle générale, plus les réflectivités et émissivités sont grandes, plus la température de surface reste faible. Des données radiatives de plusieurs matériaux sont présentées dans l'annexe.

3.13.2.2.3 Chauffage et climatisation

La production de chaleur anthropique telle que la chaleur émise par les véhicules, les climatiseurs et l'activité industrielle est un autre facteur

contribuant au développement d'îlots de chaleur, notamment dans les milieux urbains denses où les activités se concentrent. Les dissipations thermiques des bâtiments participent de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain. La densification des villes et l'augmentation générale des consommations énergétiques font augmenter l'énergie dissipée. Les systèmes de climatisation sur air représentent une part significative des charges thermiques venant s'ajouter à l'ambiance extérieure. Le phénomène s'inscrit donc dans une sorte de cercle vicieux d'auto amplification : plus il fait chaud, plus l'intérieur des bâtiments est rafraîchi, ce qui génère encore plus de charges thermiques à l'extérieur. **Bozonet, (2011).**

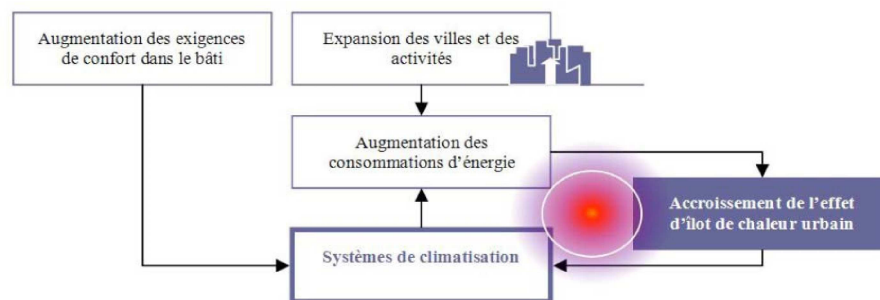


Figure 3.42 : Amplification de l'îlot de chaleur. **(Bozonet, 2011)**

3.13.3 LES IMPACTS DE L'ICU

3.13.3.1 Impact sur la consommation énergétique des bâtiments

En été, l'augmentation de température due au phénomène d'ICU se traduit directement par une consommation d'énergie accrue pour climatiser les bâtiments. Pour chaque augmentation de la température estivale de 0.5 °C, le pic des charges de conditionnement d'air s'élève de 1.5 à 2 %. **(Vinet, 2000).** Par contre en hiver, ce phénomène peut être un avantage en hiver car il permet de diminuer les factures de chauffage.

L'évolution des exigences de confort d'été dans les bâtiments et le développement de la climatisation tendent alors à accélérer ces surconsommations.

Par contre en hiver le phénomène a un effet positif, en réduisant localement les besoins de chauffage des bâtiments.

3.13.4 EVALUATION DU PHENOMENE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

L'ICU peut être évalué de façon dynamique grâce à des modèles numériques, mais aussi estimé par une méthode statique. (Oke 1982), propose une expression de T_{URMAX} en fonction de la population et de la vitesse de vent de référence. L'effet d'îlot de chaleur urbain peut alors être défini par l'écart de température maximum entre la ville et la campagne environnante (T_{URMAX}).

$$\Delta T_{URMAX} = \frac{P^{0.25}}{(4U)^{0.5}} \quad (3.9)$$

Avec,

P : Nombre d'habitants

U : vitesse du vent s de référence en m/s

Vitesse du vent de référence (m/s)	Intensité de l'îlot de chaleur (K)
1	4.5
2	3.4
3	3.4
4	2.6
5	2.2

Tableau 3.14 : Intensité de l'îlot de chaleur en fonction de la vitesse du vent.

Oke T.R. propose également une formule permettant de distinguer les villes européennes et américaines. Corrélation entre T_{URMAX} et le rapport d'aspect H (hauteur) / W (largeur) des rues, de type canyon, des centres urbains :

$$\Delta T_{URMAX} = 7.45 + 3.97 \text{LN}\left(\frac{H}{W}\right) \quad (3.9)$$

D'autre part, Reiter, (2007), a proposé un algorithme pour évaluer de manière très simplifiée quelques températures types pour l'air en milieu urbain, à partir de la température de l'air à la station météorologique pour des urbanisations européennes (ou de morphologie semblable) situées dans un climat tempéré froid.

Soit T_m , la température de l'air à la station météorologique le jour et l'heure considéré, avec ou sans soleil

T_a la température ambiante sur le site au moment considéré,

T_c , l'influence d'une couverture de l'espace public (pergola,...)

T_u , l'influence de l'urbanisation

T_q , l'influence du quartier

T_v , l'influence de la végétation

T_e l'influence de l'eau

F_v est l'influence de la vitesse du vent

$$T_a = T_m + T_c + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v \quad (3.10)$$

1/ T_c

Si l'espace présente une couverture en dur (pierre,...), une pergola ou une couverture végétale quasiment continue (arbres denses,...), $T_c = T_{mc} - T_m$. On obtient alors, $T_a = T_{mc} + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$, où T_{mc} est la température de l'air à la station météorologique par ciel couvert le même jour et à la même heure.

Si l'espace est ouvert sur le ciel, $T_c = 0$. On obtient alors : $T_a = T_m + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$.

2/ T_u

La valeur de T_u peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction de la taille de la ville (supérieure ou inférieure à 1 million d'habitants), de la saison et de la période de la journée.

Valeur de T_u en °C						
Heure	Grande ville ($\geq 1\ 000\ 000$ habitants)			Petite ville ($< 1\ 000\ 000$ habitants)		
	Ete	Printemps/ automne	Hiver	Ete	Printemps/ automne	Hiver
6 à 12h	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.4
12 à 16h	0	0	0	0	0	0
16 à 22h	2	1.75	1.5	1.5	1.35	1.2
22 à 6h	3	2.6	2.2	2	1.75	1.5

3/ T_q

La valeur de T_q peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction du quartier dans lequel est situé l'espace public considéré. T_u est le facteur d'influence dû à l'urbanisation, la saison et le moment de la journée calculé au point ci-dessus.

Valeur de T_q en °C	
Quartier d'un centre-ville très dense (H/W @ 2)	0.25 T_u
Quartier urbain dense (H/W @ 1)	0
Quartier urbain périphérique et aéré (H/W @ 0.5)	- 0.5 T_u
Quartier suburbain : les maisons ne sont pas mitoyennes	- (2 T_u) / 3

4/ T_v

Si le site est situé à une distance inférieure ou égale à 500m par rapport à un espace présentant une végétation dense (d'une longueur supérieure à 50m), $T_v = - 1.5^{\circ}\text{C}$; autrement, $T_v=0$.

5/ T_e

La valeur de T_e peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction du type de surface d'eau présente dans l'espace public ou sur un de ses bords et de l'aspect ouvert ou confiné de l'espace public. Un espace est confiné quand il est de petite dimension et qu'il est fermé par des constructions sur tous ses côtés ; citons par exemple une cour, une place étroite,...

Valeur de T_e en $^{\circ}\text{C}$		
Espace public ouvert ou de grande taille	Surface d'eau \geq 100m de large	- 1
	Surface d'eau @ 50 m de large	-0.5
	Surface d'eau @ 10m de large	-0.1
Espace public confiné	Bassin d'eau	-0.5
	Fontaine ou bassin avec jets d'eau	-1

6/ F_v

La valeur de F_v dépend de V , la vitesse du vent à la station météorologique (à 10m de haut) ainsi que du type de quartier.

Valeur de F_v		
Quartier urbain dense (H/W @ 1) à très dense (H/W @ 2)		1
Quartier urbain périphérique et aéré (H/W @ 0.5) ou quartier suburbain	$V \leq 2\text{m/s}$	1
	$2 < V \leq 5\text{m/s}$	0.5
	$V > 5\text{m/s}$	0

7/ T_a

T_a peut alors être calculé à partir de la formule :

$$T_a = T_m + T_c + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$$

3.13.5 LES STRATEGIES D'ADAPTATIONS

Le développement durable commence à être intégré dans les politiques de planification, de transport urbain et dans les projets d'urbanisme. Sur le terrain, les initiatives de développement durable souffrent souvent encore d'un manque de soutien, d'outils ou de leviers efficaces. Par ailleurs, relever le défi climatique impose de prendre des mesures d'adaptation afin d'atténuer les effets néfastes du réchauffement sur la population, l'économie et l'environnement. La question se pose particulièrement à l'échelle de la ville, système complexe, à très fort enjeu, en évolution

constante, et soumis à un microclimat spécifique : l'îlot de chaleur urbain. Selon Tiraoui, (2012), certains travaux entrepris sur les relations entre le bâti et les conditions thermiques urbaines ont tenté de donner des prescriptions d'ordre général nécessaires à l'amélioration des conditions climatiques extérieures, comme suit :

Pour les conditions chaudes, il s'agit de:

- diminuer les apports radiatifs (solaires et thermiques), soit par les obstructions ou en diminuant les températures de surface (matériaux, obstructions de surface par des végétaux ou des écoulements d'eau, etc.), diminuer la température de l'air, par l'augmentation de l'évapotranspiration (végétation, fontaine, etc.),
- augmenter les échanges convectifs, favoriser les mouvements d'air par la création de zones de dépression.

Pour les conditions froides, il s'agit de:

- augmenter les apports radiatifs (solaires et thermiques),
- briser les vents, diminution des mouvements d'air.

D'autre part, selon Dubois, (2014), de nombreux leviers d'action sont envisageables pour l'amélioration des conditions climatiques en milieu urbain, et qui ont une incidence positive tant sur le climat local que sur le climat global. Ces leviers, peuvent être regroupés en quatre catégories: la forme urbaine, le couvert naturel, l'architecture et les matériaux de revêtement.

3.13.5.1 La forme urbaine

Pour les mesures liées aux infrastructures urbaines, trois domaines d'action peuvent être proposés:

- Les densités, qui donnent un aperçu synthétique de l'espace urbain. Ces densités comprennent ainsi la densité construite, la densité de population, la densité résidentielle, la densité d'espaces verts, la densité d'arbres d'alignement, la densité de voirie, etc.
- L'agencement des espaces publics au sein de la ville, que l'étude du rapport entre les pleins et les vides peut éclairer ainsi que la position des espaces verts dans la ville.

- La forme et le profil de l'espace urbain, qui comprennent les rapports entre largeur de rue et hauteur d'immeuble, l'alignement des bâtiments sur la rue, la silhouette des villes, etc.

Différentes stratégies proposées par [Shaw et al., \(2007\)](#), cité de ([Honjo, 2012](#)), illustrées dans la **figure 3.42**, qui sont liées aux domaines d'action déjà identifié. L'objectif principal est de réduire les rejets directs de chaleur sensible, réduire les stocks de chaleur, apporter des sources de fraîcheur et améliorer la ventilation du milieu urbain par les mesures suivantes: contrôle des apports solaires des bâtiments (et donc maîtrise des consommations énergétiques), augmentation du rafraîchissement par le biais de l'évaporation au sein des zones naturelles, matériaux réfléchissants pour les façades et les toits des bâtiments, matériaux de voirie rafraîchissant, utilisation du pouvoir rafraîchissant de l'eau, infrastructure verte, masse thermique du cadre bâti, isolation des bâtiments et refroidissement mécanique, amélioration de la ventilation par le biais de l'orientation des bâtiments et de la morphologie urbaine.

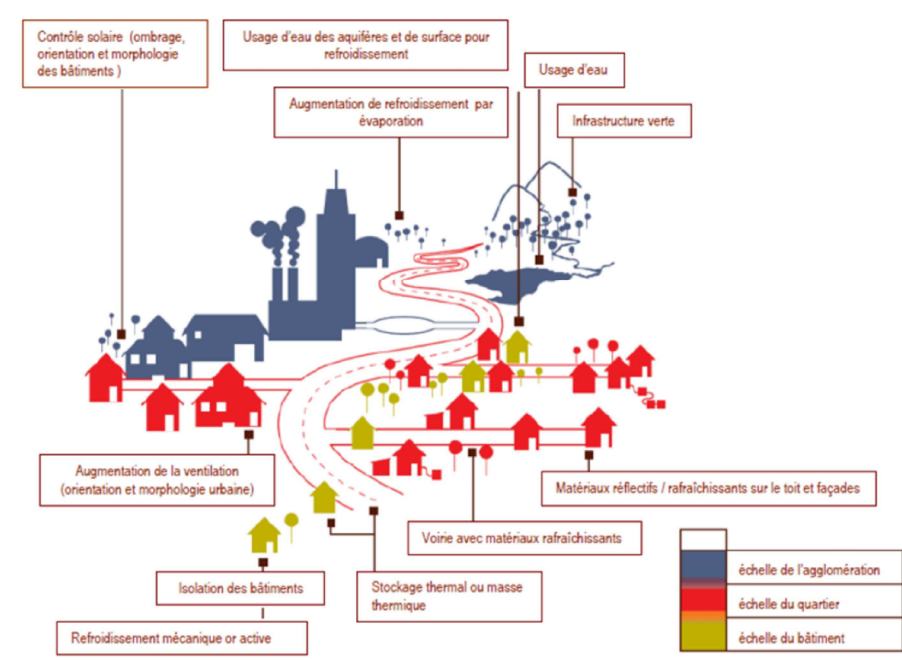


Figure 3.43: Ensemble des actions et techniques disponibles pour augmenter la capacité d'adaptation d'une ville aux fortes températures. *Source:* ([2Shaw et al., 007](#)). *Adopté de* ([Honjo, 2012](#)).

3.13.5.2 Le couvert naturel

L'eau et les végétaux sont en mesure de créer de la fraîcheur et d'abaisser naturellement la température de l'air ambiant dans les milieux urbanisés, par les phénomènes concomitants d'évaporation et d'évapotranspiration. Izard et al, (1979), cité par (Vinet, 2000), soulignent une similitude entre la fonction végétale et la fonction plan d'eau. Selon eux, la place plantée avec sa fontaine correspond à un modèle d'espace extérieur urbain présentant des aptitudes microclimatiques favorables au confort dans les régions méditerranéennes : l'ambiance climatique répond aux exigences saisonnières de l'espace extérieur, qui est ensoleillé l'hiver et à l'ombre l'été. Selon Dimoudi et Nikolopoulou, (2003), une rangée d'arbres diminue la température de l'air environnant de 1 °C, tandis la création d'un parc au centre-ville en remplacement de bâtiments générerait une baisse de température de l'air environnant de 2 °C à plus de 6 °C. (Lachance et al., 2006), cité par, (Giguère, 2009), ont observés dans l'arrondissement de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve à Montréal, l'été, un secteur situé en bordure d'une zone végétalisée présentait une température de surface plus fraîche de 6 °C, comparativement à un secteur situé en bordure de zone industrielle sans végétation (respectivement 29 °C et 35 °C). Johnston et al., (2004), montrent l'effet bénéfique de la végétation sur la température. Ils rapportent qu'un arbre mature qui transpire 450 litres d'eau a un effet refroidissant équivalent à celui de cinq climatiseurs qui fonctionneraient 20 heures par jour.

D'autre part, grâce au processus d'évaporation, les sols humides ont des capacités de rafraîchissement semblables à celles de la végétation, et leurs températures de surface sont plus fraîches que celles des sols secs (Lakshmi et al., 2000; Donglian et Pinker, 2004), cité par Giguère, (2009).

L'eau joue le rôle de tampon et atténue les fluctuations de température, et cela par son inertie thermique. Dans les zones urbaines, toutes les surfaces d'eau (fontaines, plans d'eau,...) participent à la diminution de la température par évaporation. De plus, les surfaces d'eau combinées à des mouvements d'air les traversant peuvent aussi contribuer à un rafraîchissement de l'air par convection. (Reiter, 2007). Cet effet dépend de différents facteurs :

- la longueur de la masse d'eau dans la direction des vents dominants,
- la vitesse de l'air,
- la présence ou l'absence de jets d'eau,
- la densité construite de la zone sous le vent de la surface d'eau.



Figure 3.44: L'influence des surfaces d'eau sur la température de l'air. (Reiter, 2007).

La gestion durable des eaux pluviales pour objectif d'augmenter la capacité de rétention d'eau de pluies semble être parmi les dispositifs qui peuvent jouer réellement sur l'humidification et le rafraîchissement de l'air. Par ailleurs, des pratiques peuvent être bénéfique, comme : la plantation des arbres, l'utilisation de revêtements perméables qui favorise une infiltration profonde des eaux pluviales, ou même la création de plans d'eau en ville. **La figure 3.45**, illustre les contributions potentielles du couvert naturel à la mise en œuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ». (Dubois, 2014).

Des mesures ponctuelles de l'air environnant à proximité d'un grand jet d'eau dans le sud de la France ont montré qu'il y avait un effet d'humidification et de refroidissement. (Groupe ABC 1997), cité par (Vinet, 2000). D'autre part, Nishimura et al. (1998), ont étudié l'effet rafraîchissant d'installations d'eau artificielles (étang, cascade artificielle et brumisateurs) localisées au sein d'espaces urbains relativement restreints. En faisant des relevés in situ (température ambiante, humidité relative et vitesse du vent) dans un parc de la ville d'Osaka, les résultats indiquent une réduction de la température ambiante d'environ 3 °C du côté sous le vent d'une cascade et de brumisateurs sur une distance pouvant atteindre 35 mètres à certains moments de la journée.

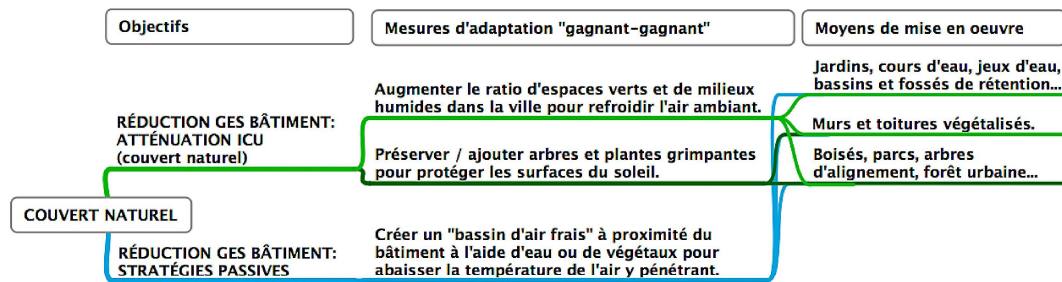


Figure 3.45 : Contributions potentielles du couvert naturel à la mise en œuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ». Source : (Dubois, 2014).

3.13.5.3 L'Architecture

En milieu urbain, la chaleur anthropique peut être responsable d'une augmentation de 2 à 3 °C. (Taha, 1997), cité par (Giguère, 2009).

Les choix architecturaux sont déterminants des besoins énergétiques d'un bâtiment. L'orientation, la forme, la compacité, l'enveloppe, les équipements et le rapport d'un bâtiment avec l'extérieur sont des caractéristiques qui influencent les gains et les déperditions thermiques. (Dubois, 2014). Les contributions potentielles de l'architecture à la mise en œuvre de mesures d'adaptation, sont la réduction des émissions des GES dans le bâtiment par :

- l'intégration de stratégies architecturales passives et
- par l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions

3.13.5.4 Matériaux de revêtement

Ce levier d'action rassemble toutes les interventions relatives au choix des matériaux de revêtement urbains, soit dans le cadre de nouvelles interventions ou d'interventions sur l'existant. Ces derniers participent à la formation d'un îlot de chaleur urbain à deux niveaux :

- ils modifient la part d'énergie solaire réfléchi, stockée et réémise dans l'atmosphère et altèrent l'infiltration des eaux pluviales dans le sol.
- Limiter l'absorption, l'émission et le stockage de l'énergie solaire dans la ville peut être réalisé en faisant un choix de matériaux de revêtement adaptés.

3.13.6 CONCLUSION

À l'heure actuelle, les études sur les microclimats urbains sont d'actualité et en plein essor. La micro climatologie est une science qui fait intervenir les différents éléments du bilan énergétique au niveau des surfaces de manière très complexe, en raison des interrelations entre plusieurs paramètres.

Cette partie nous a permis de comprendre la notion du climat, ses éléments et ses différentes échelles de manifestation ; ainsi que la compréhension des processus qui sont à l'origine de la formation et de transformation des climats urbains à travers l'étude des interactions entre la morphologie urbaine et l'environnement climatique et les modifications engendrées sur le bilan énergétique. Les mécanismes physiques notamment les écoulements de l'air, fortement perturbé par le milieu urbain, une diminution de l'évapotranspiration, des apports anthropiques de chaleur, et des perturbations radiatives et thermiques, dues principalement à la géométrie de la ville et aux propriétés radiatives des matériaux urbains. La connaissance de ces mécanismes apporte la base nécessaire aux simulations.

Il existe des liens étroits entre la morphologie urbaine et le microclimat. La connaissance de ces liens qui constitue la base pour l'établissement de recommandations, nécessite des modélisations numériques des différents phénomènes microclimatiques en milieu urbain, qui peut être envisagée grâce à des logiciels de simulation. Nous présentons dans le chapitre suivant les outils numériques qui correspondent au thème de notre recherche.

CHAPITRE 4

LES MODELS D'ANALYSE

4.1 INTRODUCTION

À l'échelle urbaine, les études aérauliques et d'ensoleillement, permettent de croiser programmation urbaine et ambiances sensibles.

Dans le cadre de notre recherche, deux types d'analyse sont possibles:

- **Une étude physique:** qui permet de déterminer les caractéristiques physiques et aérauliques d'un espace donné.
- **Une étude spatiale:** qui permet de relier les aspects physiques observés aux caractéristiques morphologiques de l'espace.

La simulation numérique permet d'explorer les effets croisés des divers paramètres physiques et climatiques concernés. Elles possèdent l'avantage de pouvoir comparer de nombreuses configurations urbaines.

La modélisation numérique des différents phénomènes microclimatiques, en milieu urbain, peut être envisagée grâce à des logiciels de simulation, qui se déclinent en deux catégories. Radiatifs (ombres portées, éclairement, rayonnement solaire, températures des parois...) et les outils de simulation des phénomènes aérauliques (vitesse et direction du vent, intensité des turbulences...). (Zekri, 2010).

Dans ce chapitre nous présentons succinctement certains de ces outils en insistant sur leurs caractéristiques et sur les points qui peuvent être utiles à notre démarche.

4.2 Simulations aérauliques

4.2.1 Les codes CFD (Computational Fluid Dynamics)

Dans de nombreuses branches de l'ingénierie, les calculs des phénomènes et des effets d'écoulement de fluide ont également besoin d'être faites. Le sujet de la CFD (computational fluid dynamics) est apparu pour répondre à ce besoin. Plusieurs logiciels ont été créés, et sont largement utilisés, qui cherchent à satisfaire à cette exigence. Ils se répartissent en deux catégories, à savoir les codes à usage général, dont PHOENICS était la première, et les codes à usage spécial tels que ceux portant sur les phénomènes moins généraux qui se produisent dans les turbomachines, l'électronique de refroidissement, l'ingénierie de puissance, et les flux environnementaux. Les comparaisons entre les différents modèles ne sont pas régulièrement réalisées. Ainsi, il est délicat

de comparer les différents outils de simulation aéroulique entre eux. (Vinet, 2000). Nous allons présenter certains de ces outils.

FLUENT est un code CFD qui traite tous les types d'écoulement couplés ou non à des transferts de chaleur. Sa méthode de discrétisation est celle des volumes finis. Les écoulements considérés peuvent être laminares ou turbulents et les transferts de chaleur peuvent être traités. Les domaines d'applications de FLUENT / UNS sont larges et principalement industriels (aérospatiale, turbomachines, automobiles, électronique, échangeurs de chaleur, canalisations, hydrologie, etc.). (Vinet, 2000).

MERCURE, est un modèle d'écoulement atmosphérique et de dispersion de polluants à petite échelle. Il résout les équations de la mécanique des fluides avec des paramétrisations spécifiques à l'atmosphère. Une méthode de discrétisation par différences finies et volumes finis est utilisée. Les données en entrée sont les valeurs météorologiques (vent, température, humidité en fonction de l'altitude), un fichier d'altitudes du relief (IGN) et la position des bâtiments est à digitaliser. En sortie, les champs de vent, de température et d'humidité sont obtenus. (Vinet, 2000).

PHOENICS, développé par CHAM¹, est un logiciel **polyvalent** qui utilise les techniques de CFD (Computational Fluid Dynamics). Cet outil propose la plus riche base de données de cas traités en CFD, disponibles et adaptables par l'utilisateur. Les prédictions obtenues par Phoenics ont fait l'objet de tests de validation qui ont prouvé sa fiabilité et sa précision. C'est un logiciel qui peut exprimer toute sa précision et sa puissance de résolution. Validé par une importante collection d'applications en mécanique des fluides, transferts thermiques, réactions chimiques et interactions fluide-structure.

4.3 Simulations radiatifs

Un certain nombre de modèles ont été élaborés, afin de simuler différent processus. Nous allons présenter certains de ces outils en insistant sur leurs caractéristiques.

Le modèle LUMPS (Local Scale Urban Meteorological Parametrization Scheme) consiste en une série d'équations permettant de calculer les flux de chaleurs dans l'environnement urbain à échelle locale (flux de

¹ Concentration, Heat and Momentum Limited (Barkley House, UK)

stockage, flux de chaleur sensible et latente). (Grimmond et al.,2002), cité par (Ringebach. N, 2004).

TOWNSCOPE, est un logiciel développé par le laboratoire LEMA (Université de Liège, Belgique). C'est un outil d'aide à la décision lors de phases de conception urbaine, en mettant principalement en avant l'accessibilité solaire. Il est composé d'un système d'information urbaine tridimensionnel couplé à des outils d'évaluation solaire. Le calcul des rayonnements diffus, directs et réfléchis est associé à des écoulements de vents et à des analyses de morphologie urbaine. TOWNSCOPE a été couplé avec un algorithme de confort développé par l'université de Séville dans laquelle les paramètres radiatifs en entrée.

Le modèle TEB (Town energy Budget), (Masson, 2000), a été développé par le Centre National de Recherche Météorologique « CNRM » de Toulouse, conçu pour être aussi général que possible, dans le but de pouvoir représenter n'importe quelle ville et n'importe quelle condition météorologique. Son objectif est de simuler les flux de chaleur entre une surface urbanisée et l'atmosphère. Ce modèle est issu du modèle **ISBA** (Interaction Soil Biosphere Atmosphere), qui est un schéma de surfaces naturelles végétalisées. Ce dernier calcule les bilans hydriques et énergétiques à la surface.

Le Code Solene développé par le laboratoire CERMA², propose une large gamme de fonctions de simulation qui permettent d'appréhender les ensembles construits suivant divers paramètres physiques, et de fonction de visualisation qui rendent compte des comportements observés dans l'espace et dans le temps. (Groleau, 1998).

Les modèles, comme LUMPS et TEB évaluent les flux de surface à l'aide d'algorithmes combinant les paramètres de surface avec des variables aérodynamiques et thermodynamiques permettant de prendre en compte une ville entière, d'autre part, les simulation avec le code Solene se fait à une échelle plus réduite (rue, place, îlot, quartier). (Ringebach. N, 2004).

Il semble que Solene, est le logiciel le plus approprié pour notre démarche. Une présentation de cet outil dans ce qui suit.

² Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture (Ecole National Supérieure d'Architecture de Nantes)

4.4 CHOIX DES LOGICIELS DES SIMULATIONS

Les deux outils utilisés dans le cadre de notre recherche, à savoir: le Code CFD (Computational Fluid Dynamics), PHOENICS, développé par CHAM) et le Code Solene développé par le laboratoire CERMA.

4.4.1 PRESENTATION DU LOGICIEL PHOENICS

Les méthodes de type CFD (Computational Fluid Dynamics) consistent à résoudre à l'aide d'un programme informatique les équations régissant le mouvement des fluides (Equations de Navier-Stokes)³. PHOENICS⁴ est un logiciel **polyvalent** qui utilise les techniques de CFD (Computational Fluid Dynamics). Ce logiciel permet de prédire quantitativement comment **fluides** (air, eau, vapeur, huile, sang, etc) **circuler** dans et autour : moteurs, du matériel de fabrication, bâtiments, êtres humains, lacs, rivières et océans,etc. PHOENICS est en effet utilisé principalement par:

- **scientifiques** pour interpréter leurs observations expérimentales;
- **ingénieurs** pour la conception des avions et d'autres véhicules, et de l'équipement qui produit de l'énergie ou qui transforme les matières;
- **architectes** pour la conception des bâtiments;
- **spécialistes de l'environnement** pour la prédiction, et si le contrôle possible, de l'impact et les risques de l'environnement; et
- **enseignants** et **les élèves** pour l'étude de la dynamique des fluides, transfert de chaleur, de combustion et des disciplines connexes.

4.4.1.1 Les principaux modules, pour l'entrée, traitement de données et la sortie

PHOENICS remplit trois fonctions principales:

- a) **définition du problème (à savoir le prétraitement)**, dans lequel l'utilisateur prescrit la situation à simuler et des questions qui sont sans réponse;

³ les **équations de Navier-Stokes**, sont des [équations aux dérivées partielles](#) non linéaires qui sont censées décrire le mouvement des [fluides « newtoniens »](#) (liquide et gaz visqueux ordinaires) dans l'[approximation des milieux continus](#). La résolution de ces équations modélisant un fluide comme un milieu continu à une seule phase, si elle est possible, est ardue. Source : <https://fr.wikipedia.org>

⁴ Le nom PHOENICS, est une abréviation pour : Parabolique hyperbolique ou elliptique numérique Intégration Code série.

- b) **simulation (traitement des données)**, par des moyens de calcul, de ce que les lois de la science impliquent dans les circonstances prescrites;
- c) **présentation (post-traitement)** des résultats du calcul, par le biais d'affichages graphiques, tableaux de chiffres, et d'autres moyens.

PHOENICS, comme beaucoup des codes CFD, a un module distinct du logiciel, ou un ensemble de modules, pour chacune des trois fonctions ci-dessous.

4.4.1.2 La structure de PHOENICS

PHOENICS a un arrangement «planétaire», avec un noyau central de sous-programmes appelés EARTH, et un programme de satellite, qui accepte les entrées à travers l'interface de la réalité virtuelle (VR) ou autrement, qui correspondent à une simulation d'écoulement particulier.

EARTH et **SATELLITE** sont des programmes distincts. **SATELLITE** est un programme informatique de préparation; il écrit un fichier de données qui lit EARTH. Les utilisateurs de PHOENICS travaillent principalement avec **SATELLITE**, mais ils peuvent également accéder à EARTH de manière contrôlée. **GROUND** est le sous-programme **EARTH** dont les utilisateurs accèdent en incorporant des caractéristiques particulières de leur propre. Le diagramme ci-dessous est un schéma des trois principales fonctions de PHOENICS, à savoir :

1.Pre-processeur : définition du problème

2.Solver : simulation

3.Post-processeur : présentation des résultats

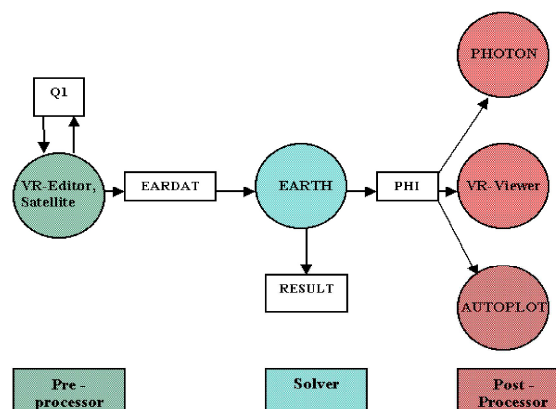


Figure 4.1: Présentation schématique des trois principales fonctions de PHOENICS. Source : (CHAM, 2005).

4.4.1.3 Les fichiers inter-communication

Les quatre noms dans les cases rectangulaires blancs dans le schéma ci-dessus font référence à des fichiers qui sont utilisés pour la communication entre les modules, comme suit:

- **Q1**, le fichier de données d'entrée lisible par l'utilisateur, écrit dans **PIL**⁵, et est la principale expression de ce que l'utilisateur souhaite atteindre.
- **EARDAT**, un fichier ASCII⁶ qui exprime sous forme TERRE-compréhensible ce que l'utilisateur a prescrit par voie de Q1.
- **PHI**, qui est écrit par TERRE selon un format qui permet PHOTON, Autoplot et le Viewer pour afficher les résultats du calcul graphique.
- **Résultat**, qui est un fichier ASCII pour exprimer les résultats sous forme de tableau et sous forme ligne-imprimante-terrain.

4.4.1.4 Définition du problème dans PHOENICS

La définition du problème implique des déclarations sur:

- **la géométrie**, formes, tailles et positions des objets et des espaces intermédiaires;
- **matériaux**, soit thermodynamique, le transport et d'autres propriétés des fluides et solides impliqués;
- **processus**, par exemple: si les matériaux sont inertes ou réactives; si la turbulence est à simuler et si oui par quel modèle; si les températures doivent être calculés dans les deux fluides et solides; et si les contraintes dans les solides doivent être calculés;
- **grille**, soit la manière et la finesse de la sous-division de l'espace et le temps, à savoir ce qu'on appelle la "discrétisation"; et
- d'autres paramètres numériques (non-physiques) qui affectent la vitesse, la précision et de l'économie de la simulation.

4.4.1.5 Comment PHOENICS rend les prédictions

PHOENICS simule les phénomènes physiques prescrits par:

- exprimant les lois de la physique et la chimie, et les modèles qui les complètent, sous la forme d'équations reliant les valeurs de

⁵ PHOENICS Input Language (langue d'entrée de PHOENICS)

⁶ ASCII : Abréviation pour, American Standard Code for Information Interchange

pression, température, concentration ,etc, qui prévalent à des **groupements** de points répartis à travers l'espace et le temps;

- la localisation de ces **groupements** de points (qui constituent la grille de calcul) suffisamment rapprochés les uns des autres pour représenter la continuité des objets et des fluides réels;
- la résolution des équations de, les méthodes itératives erreur de réduction systématique, dont les progrès sont rendue visibles sur l'écran de VDU;
- les calculs permettant d'être interrompue, et les réglages de contrôle à modifier, en tant que l'utilisateur désire;
- se terminant lorsque les erreurs ont été suffisamment réduites.

4.4.1.6 Caractéristiques classiques de PHOENICS

PHOENICS possède toutes les caractéristiques qui sont communs aux codes de CFD commerciaux. Nous présentant ici seulement les caractéristiques classiques, sous deux rubriques, à savoir: physique, et mathématique.

4.4.1.6.1 Physique

- PHOENICS simule les phénomènes d'écoulement qui sont:
 - laminaire ou turbulent
 - compressible ou incompressible
 - stable ou instable
 - chimiquement inerte ou réactif
 - mono-ou multi-phases
 - en ce qui concerne le rayonnement thermique:
 - transparent
 - participer par voie d'absorption et d'émission
 - participante par diffusion.
- L'espace dans lequel s'écoule le fluide peut être:
 - vide de solides, ou ;
 - totalement ou partiellement rempli par les solides finement divisés au repos (comme dans «poreux moyen» des flux), ou ;

- partiellement occupé par des matières solides qui ne sont pas faibles par rapport à la taille des cellules de calcul locales.
- Dans les deux derniers cas, les solides peuvent interagir thermiquement avec les matières solides (c'est-à-dire que PHOENICS peut gérer un transfert de chaleur conjugué).
- Ces solides immergés peuvent également participer à transfert de chaleur par rayonnement.
- Les contraintes et les déformations thermiques et mécaniques induites dans les solides immergés peuvent également être calculées par PHOENICS.
- Les autres propriétés des fluides et des solides thermodynamiques, les transports (y compris radiatif), chimiques et peuvent être de complexité arbitraire.

4.4.1.6.2 Mathématiques

- Les équations résolues par PHOENICS sont celles qui expriment les soldes de : masse ; élan ; énergie ; matériel (espèce chimique) et autres entités conservées (par exemple de charge électrique), sur des éléments distincts de l'espace et le temps, c'est à dire «volumes finis» appelés «cellules».
- Les cellules sont disposées de manière ordonnée (c'est à dire "structurée") dans une grille qui peut être: Cartésien; cylindrique polaire ou "Corps-équipée", c'est à dire arbitrairement curviligne, et qui peut être segmentée en "blocs" distinctes.
- Ces équations expriment les influences de:
 - diffusion (y compris l'action visqueuse et conduction de la chaleur),
 - convection,
 - variation dans le temps,
 - sources et des puits.
- Afin de réduire les erreurs numériques qui peuvent résulter de la nature asymétrique des termes de convection, PHOENICS peut faire usage d'une grande variété de «régimes d'ordre supérieur», y compris RAPIDE, SMART, Van Leer, et bien d'autres.

- Les variables dépendantes de ces équations sont donc:
 - fraction en masse ou de volume,
 - la vitesse et la pression,
 - la température ou l'enthalpie,
 - concentration,
 - charge électrique ou d'autres biens conservés.
- La masse et la quantité de mouvement équations sont résolues d'une manière semi-couplé par une variante de l'algorithme simple et bien connue.
- Parce que l'ensemble du système d'équation est non-linéaire, la procédure de résolution est itératif, comprenant les étapes consistant à:
 - calculer les déséquilibres de chacune des entités ci-dessus pour chaque cellule;
 - calcul des coefficients des équations linéaires (ISED) qui représentent la façon dont les déséquilibres vont changer à la suite de (petits) changements à la résolu-pour les variables;
 - résoudre les équations linéaires;
 - correction des valeurs des résolu-pour les variables, et de celles auxiliaires, telles que les propriétés du fluide, ce qui en dépendent:
 - répéter le cycle d'opérations jusqu'à ce que les modifications apportées aux variables soient suffisamment petites.
- Diverses techniques sont utilisées pour résoudre les équations linéaires, y compris:
 - algorithme de matrice tri diagonale
 - (Une variante de) «Tout à fait implicite algorithme" de pierre,
 - gradient conjugué et solveurs conjugués résiduel.

4.4.1.8 Mise en marche

Après l'installation de PHOENICS, quatre icônes doivent être présentes, intitulé: PHOENICS commander ; PHOENICS-VR ; WINDF et POLIS. Une démonstration détaillée serra présenter dans l'annexe III.

4.4.2 MODELE THERMO-RADIATIF DE SIMULATION SOLENE

L'élaboration du logiciel de simulation solaire Solene, été le fruit des recherches sur les paramètres solaires de contrôle d'ensoleillement des projets, menées par le laboratoire CERMA de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. (Groleau, 2000). L'échelle d'espace adoptée peut être celle d'un bâtiment, d'une rue, d'un petit ensemble de rues et bâtiments (fragment urbain), ou éventuellement d'un quartier. (Bouyer, 2009). L'échelle de temps correspond à des cycles journaliers, avec un pas de temps allant de 5 minutes à 1 heure. Le choix de la durée du pas temps dépend essentiellement de la finalité des résultats souhaités.

Le model Solene, propose divers modes de visualisation en 3D qui permettent d'observer dans l'espace et dans le temps, les comportements de la géométrie simulée. (Athamnia, 2012). Le modèle permet de simuler les grandeurs et les phénomènes suivants :

- la potentialité solaire des enveloppes des bâtiments et leur intensité lumineuse ;
- les facteurs de vue du ciel;
- l'ensoleillement en termes de tracé d'ombre et de durée;
- les différentes composantes du rayonnement solaire (flux direct et diffus incidents), flux infrarouge, inter réflexions;
- les facteurs de forme ; et les températures de surface.

4.4.2.1 LES FONCTIONS DE SOLENE

SOLENE est organisé autour d'un nombre limité d'objets liés entre eux : le projet, la géométrie, les ciels, les descripteurs, les matériaux et d'un ensemble de fonctions de traitement qui permettent d'effectuer diverses simulations et quelques post-traitements spécifiques. (Groleau, 2000)

4.4.2.1.1 Le projet

Le projet Solene comporte l'ensemble des objets contenus à un instant dans l'application de l'utilisateur ainsi que l'ensemble du contexte d'affichage. Le projet peut être travaillé au cours de plusieurs séances. (Groleau, 2000).

4.4.2.1.2 Les géométries

La géométrie de la scène simulée peut être modélisée soit directement avec l'interface graphique du logiciel, soit par l'importation (format .cir) des géométries issues de logiciels de dessin D.A.O (Archicad, Autocad, SketchUp...).

La géométrie apparaît sous la forme d'un ensemble de faces planes adjacentes les unes aux autres. Chaque contour de face possède un certain nombre de descripteurs qui le définit. Par ailleurs, chaque face est associée à un matériau qui détermine son comportement radiatif et thermique. Les fonctions applicables aux géométries sont:

- les transformations géométriques (translation, rotation, triangulation,...) ;
- la visualisation des géométries (contexte d'affichage, descripteurs,...) ;
- la simulation des phénomènes physiques : ensoleillement, rayonnement et température de surface.

4.4.2.1.3 Les types de ciel

Ce sont des géométries particulières, qui acceptent une partie seulement des traitements qu'on peut appliquer aux géométries. Un ciel est un hémisphère discrétisé géodésiquement en facettes triangulaires supportant des conditions de ciel (solaires ou lumineuses) ; ce ciel sera utilisé dans les simulations. (Groleau, 2000).

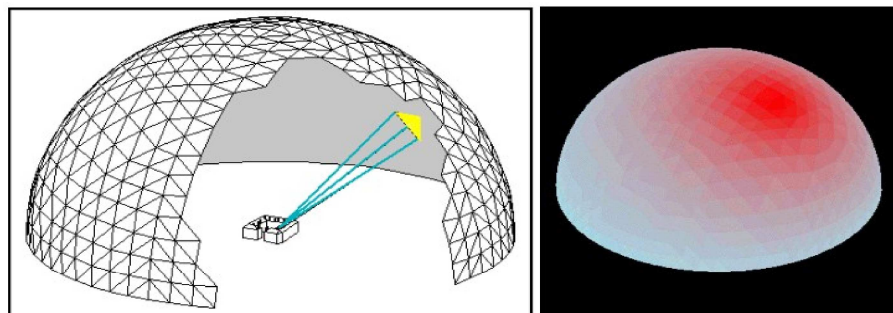


Figure 4.2 : la géométrie ciel dans Solene. Source : (Groleau, 2000).

4.4.2.1.4 Les descripteurs

Les descripteurs sont généralement les résultats des différentes simulations appliquées aux géométries (apports solaires, durée

d'ensoleillement,...), Ils permettent ainsi l'analyse et la visualisation des géométries à travers divers critères suivant une légende associée à la gamme de valeurs. Un descripteur simple ou fonction du temps, correspond à une série de valeurs numériques stockée dans des fichiers d'extension .val.

4.4.2.1.5 Les matériaux

Les matériaux sont définis dans une base de matériaux accessibles à l'utilisateur ; ils représentent les caractéristiques solaires (réflexion, émissivité) et physiques des matériaux (capacité thermique, conductance et masse volumique) des faces des géométries. A chaque face est associé un matériau, déterminant ainsi son comportement vis-à-vis des phénomènes physiques qui lui sont appliqués. (Groleau, 2000).

4.4.2.2 LES APPLICATIONS DE SOLENE

Les applications sont variées et les modes d'exploitation des résultats des simulations permettent, à partir d'un modèle géométrique 3D, d'aborder entre autres :

- les questions d'ensoleillement (en termes de tracés d'ombre mais aussi de durée d'ensoleillement) et d'énergétique solaire en dissociant le traitement des composantes directes et diffuses (Groleau, 2000) ;
- Les questions d'énergétique solaire en appréhendant les composantes directes et diffuses du rayonnement incident solaire sur les facettes du projet.
- Les multi-réflexions solaires, grâce à la mise en place d'un modèle de résolution basé sur la radiosité des surfaces, impliquant l'évaluation des facteurs de forme. Les surfaces de la géométrie sont alors caractérisées par leurs coefficients solaires d'absorption et de réflexion ;
- L'évaluation de l'éclairement naturel, directement en provenance du soleil et du ciel, en utilisant des modèles de luminances de ciel (normalisés CIE ou quelconques) ou indirectement en gérant les multi-réflexions en fonction des propriétés de réflexion et de transmission des surfaces par la même méthode de radiosité ;

- Des fonctions diverses d'analyse de l'éclairement comme les facteurs de ciel, les facteurs de lumière du jour sur des plans horizontaux...
- Les problèmes de rayonnement thermique, tenant compte des deux types de spectre, solaire et thermique IR, dans des scènes urbaines, permettant d'évaluer les températures de surface des parois et d'appréhender le niveau de confort en extérieur.

4.4.2.2.1 LA SIMULATION SOLAIRE

Les questions d'ensoleillement en termes de tracés d'ombre mais aussi de durée d'ensoleillement avec des rendus sous forme d'animation temporelle.

4.4.2.2.1.1 Simulation des flux solaires direct et diffus incidents

Solene calcule la position du soleil en fonction du jour, de l'heure solaire et de la latitude, permettant ainsi de connaître l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport aux différentes facettes de la géométrie ainsi que les masques de l'environnement immédiat. L'évaluation du flux solaire direct incident est alors immédiate et les facettes ensoleillées reçoivent un flux solaire pondéré par l'angle d'incidence. La formule de Brinchambault, est ainsi utilisée déclinée pour trois types de conditions atmosphériques pour un ciel très pur, pour des conditions normales et pour une situation de zone industrielle, qui calcule la valeur du flux solaire direct pour une surface perpendiculaire aux rayons solaires. (Bouyer, 2009). On utilise généralement la formule établie pour des conditions standard :

$$I = 1230 \exp \frac{-1}{3,8 \sin(h+1,6)} \quad (4.1)$$

Les facettes ensoleillées reçoivent alors un flux solaire direct correspondant à la valeur de I pondérée par l'angle d'incidence des rayons solaires sur les facettes. Sa valeur énergétique est notée R_{direct} [W.m^{-2}]. Pour les flux solaires diffus, la méthode d'évaluation repose sur une représentation de la voûte céleste. Solene intègre un modèle de radiance, qui est déterminé grâce à un modèle de ciel implémenté dans le code Solene qui comprend plusieurs types de ciel (ciel clair, ciel couvert, totalement ou partiellement couvert par exemple) et qui prend aussi en

compte la nébulosité et l'opacité nuageuse. Ce modèle de radiance permet de déterminer le flux solaire diffus afin de prendre en compte les effets directionnels. (Hénon, 2008), cité par (Athamnia, 2012). L'addition des flux solaires directs et diffus donne le flux solaire global incident pour chaque facette et pour chaque pas de temps.

4.4.2.2.1.2 Simulation des inter-réflexions solaires et du bilan radiatif

Le calcul des inter-réflexions dans le modèle *Solene* est basé sur le principe de radiosité, s'appliquant uniquement sur des surfaces parfaitement diffuses. La radiosité d'un élément de surface i est égale à la somme des énergies émises et réfléchies. Elle est donnée selon l'expression ci-dessous (Groleau et Miguet, 1998) Cité par (Athamnia, 2012) :

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j \cdot F_{ji} \quad (4.2)$$

où B_i est la radiosité de l'élément i ($W m^{-2}$), E_i est le flux d'énergie réfléchi par l'élément i ($W m^{-2}$), ρ_i est sa réflectivité (fraction d'énergie incidente réfléchi dans l'environnement), F_{ji} est le facteur de forme (fraction d'énergie quittant l'élément j et atteignant l'élément i) et n est le nombre de surfaces élémentaires de l'environnement.

Dans le domaine solaire, l'énergie incidente globale calculée en chaque point de la scène constitue la valeur initiale. A l'issue du calcul des multi-réflexions solaires, la valeur du flux solaire absorbé est alors connue en chaque point de la scène. (Athamnia, 2012).

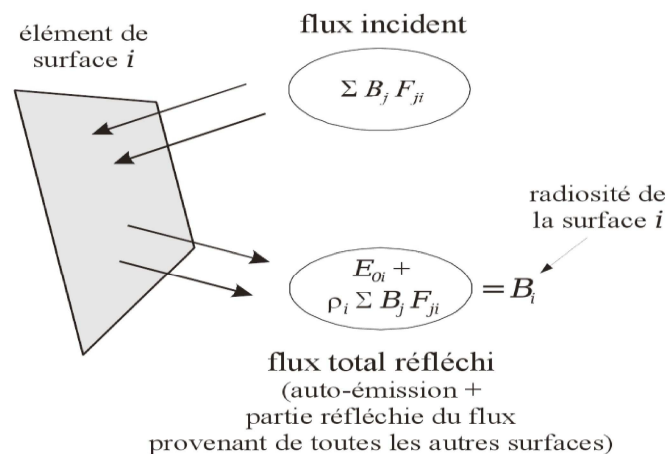


Figure 4.3 : Bilan radiatif sur un élément de surface i . Sa radiosité est égale à l'émission directe de la surface augmentée de la partie réfléchi de l'irradiation (Miguet, 2000), adopté de (Bouyer, 2009).

4.4.2.2.1.3 Calcul des facteurs de forme

Les facteurs de forme sont des nombres sans dimension compris entre 0 et 1. Ils permettent notamment de traduire le rapport entre la quantité d'énergie quittant une surface source pour atteindre une surface réceptrice et la quantité totale ayant quitté la surface source.

4.4.2.2.1.4 Simulation énergétique ou thermo radiative

Connaissant les facteurs de forme, il est possible d'exprimer la densité de flux IRT échangée (ou grande longueur d'onde, noté GLO) entre chaque élément de surface à partir de la loi de Stefan-Boltzmann (**Equation 4.3**):

$$R_{\text{IRTnet}} = \sum_{j=1}^n \sigma F_{ij} (\epsilon_i T_{S_i}^4 - \epsilon_j T_{S_{ij}}^4) \quad (4.3)$$

Le bilan de flux infrarouge dépendant des températures de surface, la simulation énergétique consiste à des allers-retours itératifs entre l'estimation des flux IRT et la simulation directe des températures de surface grâce à des modèles spécifiques d'aménagements (végétation, sols et bâtiments). Ces modèles dépendent principalement des flux solaires absorbés, des flux convectifs liés au vent et des flux latents liés au niveau d'humidité de l'air ambiant. Ils décrivent comment ces trois (ou plus) sollicitations climatiques externes contribuent à l'échauffement de la surface externe de l'aménagement.

4.4.2.3 Les entrées de la simulation

Trois types de conditions sont nécessaires : les paramètres physiques de la géométrie modélisée, les paramètres géographiques et temporels et enfin les conditions météorologiques.

4.5 CONCLUSION

Les simulations informatiques permettent aujourd'hui de construire virtuellement, des environnements architecturaux et urbains. Les maquettes virtuelles ainsi créées représentent les objets dans les trois dimensions de l'espace et peuvent contenir tous les attributs nécessaires à leur visualisation réaliste.

Dans ce chapitre, on a passé en revue quelques modèles de simulation développés par différentes équipes et laboratoires. Cette revue sur les outils de simulation et modélisation, met en évidence la grande diversité des modèles qui permettent aujourd'hui la compréhension des

phénomènes micro climatiques et leurs interactions avec les paramètres de la morphologie urbaine.

Nous avons présenté par la suite, les outils des simulations numériques que nous allons utiliser dans le cadre de cette recherche. Il s'agit du Code **CFD** (Computational Fluid Dynamics), **PHOENICS**, développé par CHAM, pour la simulation de l'écoulement du vent ; et le **Code Solene**, développé par le laboratoire CERMA pour la simulation des paramètres solaires de contrôle d'ensoleillement.

Le choix de ces modèles s'est appuyé sur leur capacité à modéliser ces paramètres physiques qui représentent les variables dépendantes dans le cadre de notre recherche. De plus, ces modèles proposent divers modes de visualisation en 3D qui permettent d'observer dans l'espace et dans le temps, les comportements de la géométrie simulée.

CHAPITRE 5

PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

5.1 PRESENTATION DE LA VILLE DE BISKRA

Biskra appelé autrefois Vescether (Ptolémée), Vescera, Bescera, Pescara (Léon l'Africain). (Cote. M, 1991). Elle est la porte du grand Sud, située au nord du Sahara, au pied du massif de l'Aurès et des monts du Zab (**Zibans**), Biskra est surnommée la « reine des Zibans ». Sa superficie est de 21 671 Km², et sa population avoisine les 775 797 habitants (2010), soit une densité moyenne de 36 habitants par Km². Source : (ONS).

Enchaînée par deux rivières : Oued Foddala descendant du djebel Belezma et l'oued Abdi descendant du djebel Mahmel qui parcourent 120km pour arriver chacun de son côté au couloir "Faj" et qui donnent naissance à l'oued ZARZOUR.

Le climat de Biskra est idéal situé entre le nord continental et le sud saharien avec des températures moyennes de 11°C en janvier.

5.1.1 Situation et données climatiques

La ville de Biskra se situe au Sud-est de l'Algérie (Latitude: 34 ° 47'N., longitude: 5 ° 44'E), (**Figure 5.1**), son altitude est de 128 mètre/au niveau de la mer. Biskra est limité par :

Le Nord : Wilaya de Batna et M'sila.

Le Sud : Wilaya de Ouargla. et El-Oued.

L'Est : Wilaya de Khenchela.

L'Ouest : Wilaya de Djelfa.

La wilaya présente un relief diversifié avec, une chaîne montagneuse et les hauts plateaux au nord ; avec l'altitude de « djebel Tekriout » 1942 m. les grand plateaux se trouvent au sud de la wilaya notamment sur la région de Ouled Djellal ; et Sidi Khaled. Les plaines steppiques s'étendent sur l'axe El-Outaya et Doucen.



Figure 5.1: Carte des divisions administrative d'Algérie, source : <https://www.populationdata.net/cartes/algérie-divisions-administratives/>

5..1.1.1 Classification climatique

- Le climat est de type saharien, chaud et sec en été, plutôt tempéré en hiver. D'après la classification zonale climatique du territoire algérien (voir Annexe I), BISKRA est située dans la zone climatique d'hiver H2a et la zone climatique d'été E2.
- un été plus chaud, moins humide où l'écart de température diurne est important
- un hiver froid et sec avec un écart de température diurne important.

5..1.1.2 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données climatiques présentées dans cette section correspondent à la période 1990 – 2000, valeurs moyennes sur 10 ans.

5..1.1.2.1 TEMPÉRATURE DE L'AIR

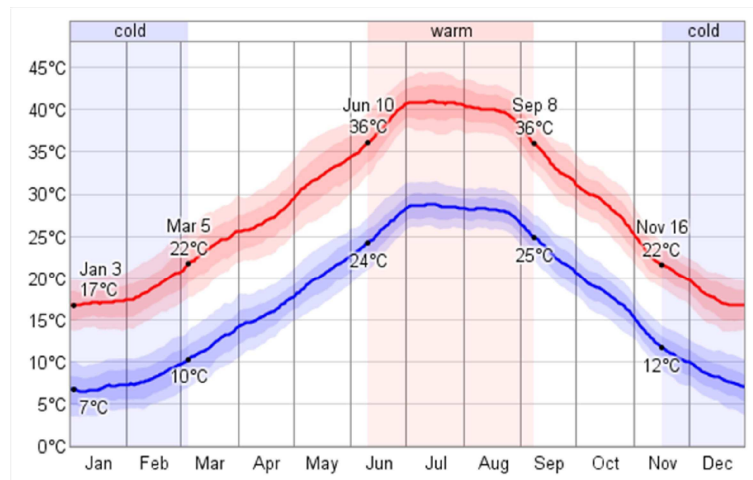


Figure 5.2: La moyenne quotidienne minimale (bleu) et maximale (rouge) la température avec des bandes percentile (bande intérieure du 25 au 75^{ème} percentile, bande extérieure du 10 au 90^{ème} percentile). Source : <https://weatherspark.com>

- la température moyenne mensuelle minimale la plus basse atteint 7,1C° durant le mois de janvier
- la température moyenne mensuelle maximale la plus élevée atteint 40.81C° durant le mois de juillet
- la température moyenne annuelle est de 22,26C° avec des extremums de 34,41C° en juillet et 8,28°C en janvier
- l'amplitude thermique la plus importante est mesurée en novembre avec 23.90 K°
- l'amplitude thermique la plus faible est mesurée en janvier avec 11.65 K°

La courbe des températures moyennes mensuelles évolue d'une manière régulière, les amplitudes entre deux mois consécutifs sont relativement équivalentes.

Par contre, l'amplitude entre les extrémums des valeurs moyennes mensuelles est de 26,13C°

Les variations diurnes varient entre 13C° et 16C°, et peuvent évoluer au-delà de 23C° pendant la saison froide (hiver) durant laquelle les températures nocturnes peuvent être négatives.

La saison chaude dure du 10 Juin à 8 Septembre avec une température moyenne journalière élevée supérieure à 36 C°. Le jour le plus chaud de l'année est le 15 Juillet, avec une température moyenne maximale de 41C° et inférieure de 29 C°.

Ainsi que la saison froide dure du 16 Novembre à 5 Mars avec une température quotidienne moyenne élevée en dessous de 22 C°. Le jour le plus froid de l'année est le 8 Janvier, avec une température moyenne minimale de 6 C° et maximale de 17 ° C. La figure 5.4, démontre la fraction moyenne du temps passé à différentes plages de température: froid (en dessous de -9 C°), le gel (-9 C° à 0 C°) et froide (0 C° à 10 C°) et froide (10 C° à 18 C°), confortable (18 C° à 24 C°), chaud (24 C° à 29 C°), chaud (29 C° à 38 C°) et étouffante (au-dessus de 38 C°).

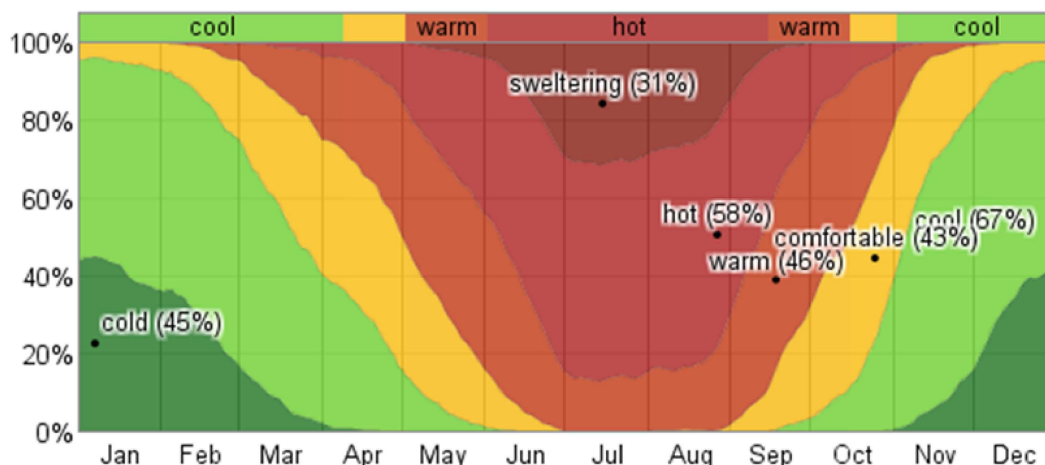


Figure 5.3: La fraction moyenne du temps passé à différentes plages de température. Source : <https://weatherspark.com>

5..1.1.2.2 Ensoleillement

L'ensoleillement, et l'énergie induite par ce dernier, sont considérables. En hiver, le nombre d'heures d'ensoleillement atteint 10 heures. La longueur du jour varie de manière significative au cours de l'année. Le jour le plus court est de 21 Décembre avec 9:49 heures du jour; jour le plus long est de 20 Juin avec 14:29 heures du jour; dans le même temps, l'énergie incidente sur le sol dépasse 600 Wh/m². (**Figure 5.4**) : Le nombre

d'heures au cours de laquelle le Soleil est visible (ligne noire), avec des degrés divers de la lumière du jour, crépuscule et nuit, indiqués par les bandes de couleur.

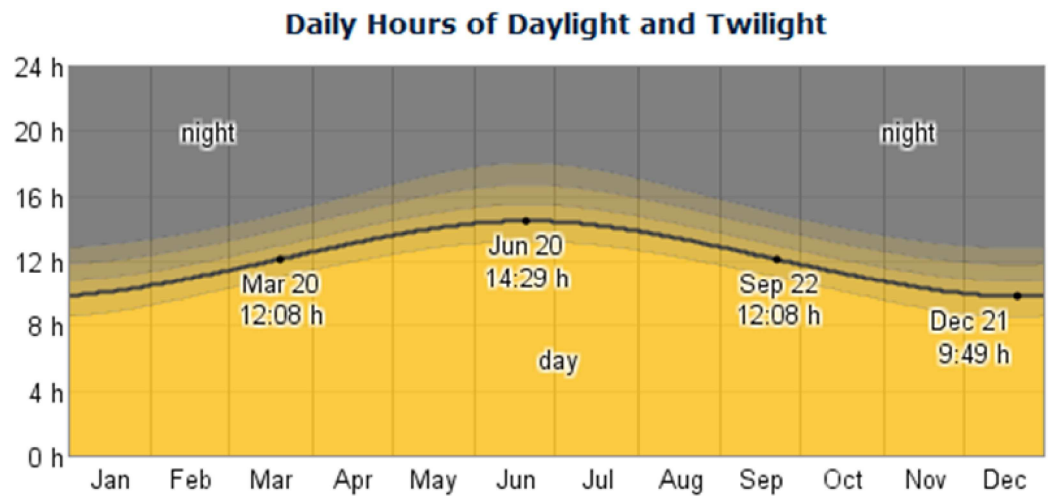


Figure 5.4: Heures quotidiennes de lumière du jour et crépuscule. Source : <https://weatherspark.com>

5.1.1.2.3 Type de ciel

Le calcul de la couverture nuageuse pendant la journée permet de déterminer du type de ciel dominant pour une région donnée, la variation de cette couverture (exprimé par le taux de la nébulosité du ciel en %), détermine le type de ciel :

- Clair (nébulosité <10%).
- Partiellement nuageux (nébulosité comprise entre 10% -70%).
- Couvert (> ou = nébulosité de 70%).

Elle permettra de caractériser le climat de la ville de manière générale ainsi que le gisement solaire et l'éclairement lumineux.

La couverture moyenne des nuages varie de 18% (la plupart du temps clair) à 39% (la plupart du temps clair).

Le ciel est le plus froid le 26 Avril et le plus clair sur Juillet 18. La partie plus claire de l'année commence autour du Juin 15. La partie plus froide de l'année commence environ le 30 Août.

Le 18 Juillet, jour le plus clair de l'année, le ciel est clair, la plupart du temps clair, ou en partie ensoleillé 63% du temps, et couvert ou couvert 5% du temps.

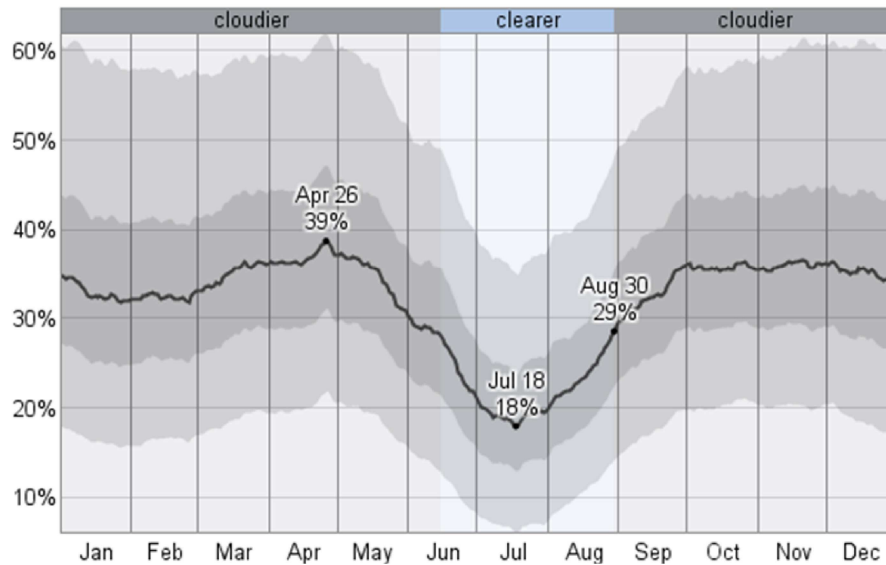


Figure 5.5 : Couverture moyenne des nuages. Source : <https://weatherspark.com>

La couverture médiane du nuage journalier (ligne noire) avec des bandes percentile (bande intérieure du 40ème au 60ème percentile, bande extérieure du 25 au 75e percentile).

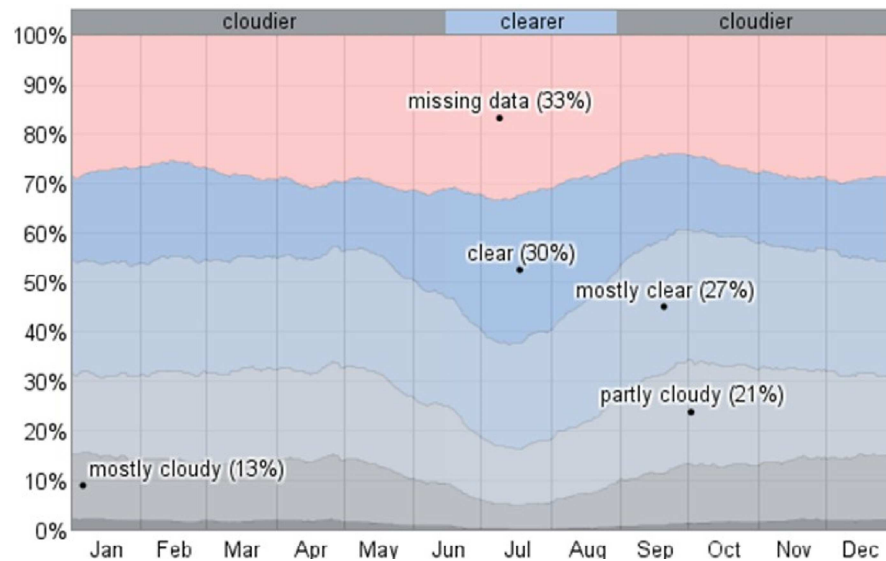


Figure 5.6: La fraction du temps passé dans chacune des catégories de couverture du ciel. Source : <https://weatherspark.com>

La figure 5.6, montre la fraction du temps passé dans chacune des catégories de couverture du ciel. De haut (plus bleu) vers le bas (le plus gris), les catégories sont claires, la plupart du temps clair, partiellement nuageux, couvert, et couvert. Rose indique les données manquantes.

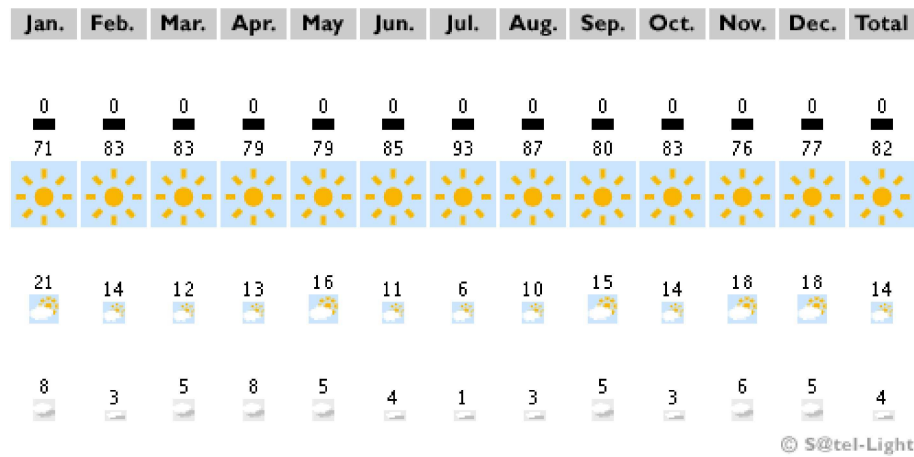


Figure 5.7: Types de ciel dominant pour la région de Biskra, (Période entre 1996-2000). Source : <http://www.satel-light.com>

5..1.1.2.4 Humidité relative

La courbe de l'humidité relative décroît inversement à celle des températures et des radiations solaires, il varie généralement entre 15% (sec) et 81% (humide) au cours de l'année, et tombe rarement en dessous de 10% (très sec), ou supérieure à 95% (très humide).

L'air est plus sec environ vers la fin du mois de Juin, au moment où l'humidité relative descend en dessous de 19% (sec); il est plus humide environ au début du mois de Janvier, dépassant 74% (humide).

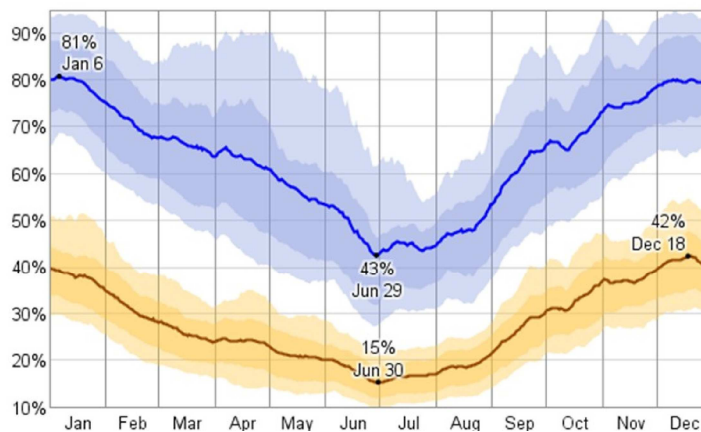


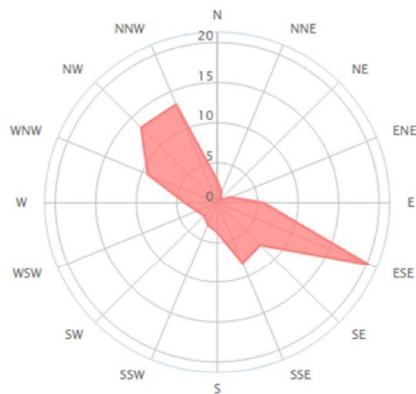
Figure 5.8: L'humidité relative : La moyenne quotidienne maximale (bleu) et minimale (brun). Source : <https://weatherspark.com>

5..2.1.2.5 Les vents

Les vents qui prédominent à BISKRA sont le plus souvent sur le nord-ouest (16% du temps), au sud-est (12% du temps), et au nord (12% du temps). (Figure 5.9).



(a)



(b)

Figure 5.9 : (a) : Roses mensuelles des vents -(b) : Rose annuelle des vents. Ville de Biskra. Source : <https://windfinder.com>

Les statistiques représentées dans la figure de vent basées sur des observations entre 05/2014 – 03/2016 tous les jours de 7h à 19h.

Mois de l'année	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	1-12
Direction du vent	↙	↙	↙	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Probabilité du vent >= 4 Beaufort (%)	55	56	70	40	49	48	37	35	40	31	32	1	41
Vitesse du vent moyenne (m/s)	7	7	7	5	6	6	5	5	5	5	5	4	6
Temp. de l'air moyenne (°C)	15	16	20	26	30	34	37	37	33	27	21	15	25

Figure 5.10 : Statistiques de vent de Biskra. Source : <https://windfinder.com>

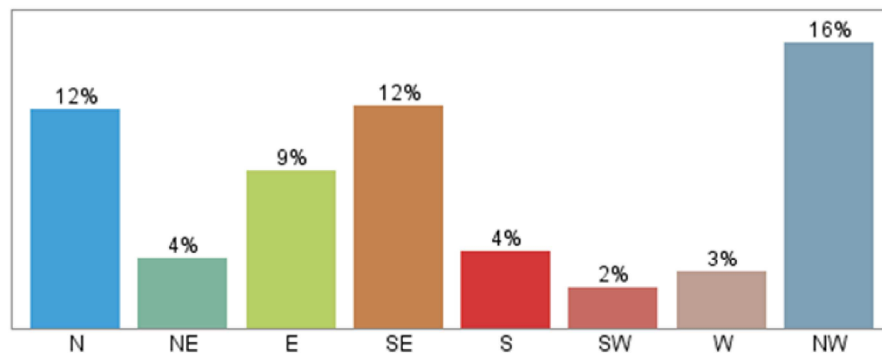


Figure 5.11 : fraction du temps passé avec le vent soufflant dans les différentes directions sur l'année. Source : <https://weatherspark.com>

Au cours d'une année les vitesses de vent varient de 0 m / s à 11 m / s (calme à vent frais), dépassant rarement 15 m / s (vent fort), avec des vitesses moyennes qui varient entre 2,3 m/s et 2,9 m/s, pour une moyenne annuelle de 2,4 m/s, et une fréquence moyenne de 45%. Ces vents peuvent être frais et humides pendant la période hivernale. Les vents de sable (sirocco) soufflent au moins une fois par an, entre juin et août principalement. (Figure 5.11). La plus haute vitesse moyenne du vent est 6 m/s, se produit vers le 13 Avril, date à laquelle la vitesse moyenne maximale du vent est de 11 m/s. La plus faible vitesse moyenne du vent est de 3 m/s qui se produit vers le 12 Octobre, date à laquelle la vitesse moyenne maximale du vent est de 7 m/s.

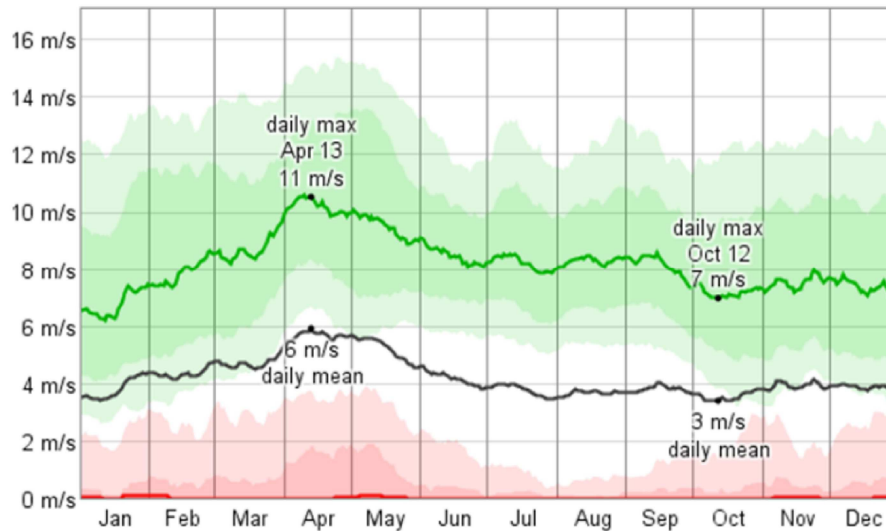


Figure 5.12 : Vitesse du vent La moyenne quotidienne maximale (vert) et minimale (rose). Source : <https://weatherspark.com>

5..1.1.2.6 Pluviométrie

Une pluviométrie faible avec une moyenne annuelle de 133,46 mm. Une répartition très irrégulière au cours de l'année, avec des maxima en janvier, avril et novembre, et des minima en février et juillet.

La répartition annuelle des précipitations est marquée par une longue période de sécheresse (six mois: de mai à octobre), ainsi que le mois de février où les précipitations sont très faibles (inférieures à 10 mm). Les autres mois de l'année paraissent recevoir plus de précipitations pluvieuses. **La figure 5.13**, présente les fractions de jours dans laquelle différents types de précipitations sont observées. L'ordre de gravité est de haut en bas dans ce graphique, avec le plus grave au fond. La probabilité que la précipitation sera observée varie tout le long de l'année, vers le 1^{er} Octobre, survenant à 17% des jours, ainsi qu'au 7 juillet les précipitations sont moins susceptibles, survenant dans 8% des jours.

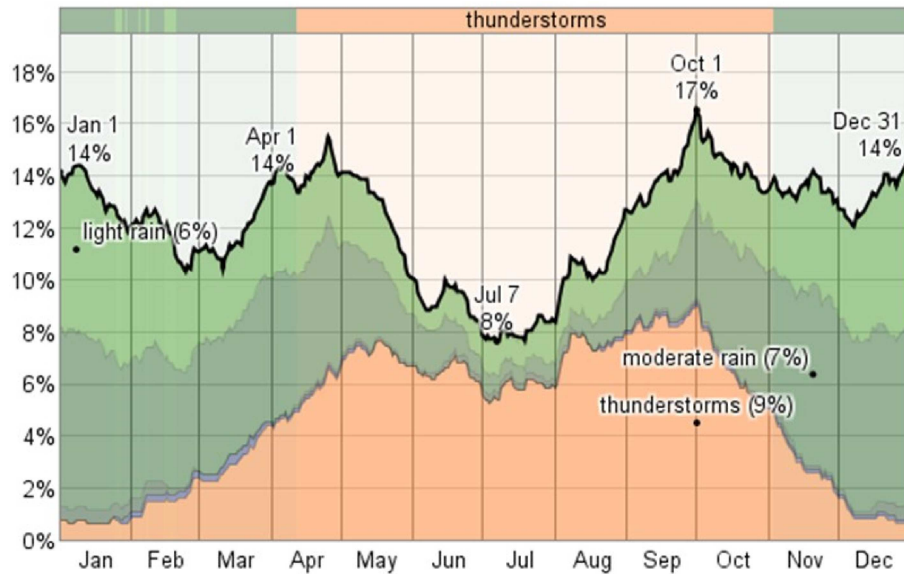


Figure 5.13 : Probabilité de précipitations. Source : <https://weatherspark.com>

5..1.1.3 Synthèse

Le graphique ci-dessous met en évidence une période très chaude et sèche, du mois de juin au mois de septembre, et une autre, hivernale, plus froide et un peu plus humide, d'octobre à mars.

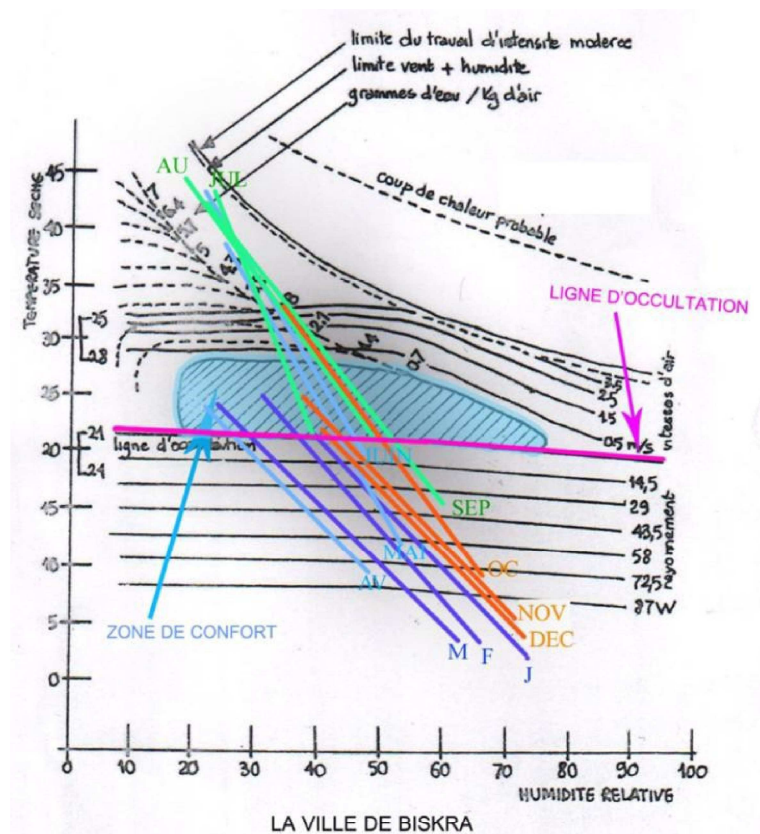


Figure 5.14: Le diagramme d' Olgay. Source : (Daich, 2011)

5.2 Le cadre d'étude

Au cours des dernières décennies, la ville de Biskra a connu un rythme d'urbanisation accéléré, cette croissance urbaine a engendré des extensions urbaines sous forme de lotissements et de grands ensembles (ZHUN). Une dynamique qui a aboutie à une urbanisation peu contrôlée, répétant les mêmes techniques et les mêmes formes urbaines et peu soucieuse de l'environnement climatique. Cette urbanisation (réglementaire) n'offre pas de réelles perspectives d'intégration des leviers d'action qui prend en charge les facteurs environnementaux dans l'aménagement, l'urbanisme et l'architecture (ex : modification des propriétés radiatives des surfaces, des espaces végétalisés, de la forme urbaine, etc...) pour lutter contre l'augmentation de la température en ville. Notre objectif est d'étudier les caractéristiques morphologiques de ces nouvelles formes urbaines de la ville de Biskra qui appartient au milieu aride, et leurs impacts sur le microclimat et le confort thermique des usagers en espaces extérieurs.

Dans le cadre de cette recherche, notre domaine d'étude se situe dans la partie d'extension nord de la ville de Biskra, réglementé par un plan d'occupation des sols (POS 01 de la zone d'extension nord de la ville de Biskra) (Source : DUC Biskra). En effet, cette zone a été considérée comme l'une des pôles d'équilibre de la ville en matière d'organisation spatiale. La mise en valeur de cette partie et son intégration dans le tissu urbain de la ville a pour but de répondre en une partie, des besoins de la ville en matière d'équipements et d'habitations. La période de la création de la zone en question, a été marquée par l'avènement d'une nouvelle formule en matière d'habitat (collectif et individuel), connue par l'abréviation LSP (Logement Socio-participatif), qui s'inscrit dans le cadre de la politique d'aide de l'état à l'accession à la propriété. Cette nouvelle façon de construire très rapidement s'est traduite par une génération de configurations urbaines, notamment à l'échelle de l'îlot urbain, unité de base de la forme urbaine. Chaque îlot se compose de plusieurs bâtiments à plusieurs étages (de 2 à 5 étages) enfermant partiellement un espace ouvert, ou les parkings et les routes d'accès constituent l'essentiel de ces espaces ouverts dans ces domaines.

5.2.1 Présentation du POS extension nord

5.2.1.1 Situation

Le domaine du POS¹ de la zone d'extension nord de la ville de Biskra est d'une superficie de 50 Ha, situé sur les hauteurs de la ville à l'intersection du prolongement du front d'Oued et l'entrée nord de la ville (RN 3), « lieudit route de Batna » (**Figure 5.15**). Cette zone est caractérisée comme ayant une altitude plus élevée de la ville (**Figure 5.16**), le terrain d'assiette est partiellement plat, parsemé de quelques dépressions qui sont à l'origine des anciens cours d'eau; se qui a donné lieu à certaines difficultés, notamment l'organisation spatiale (**Figures 5.17 et 5.18**).

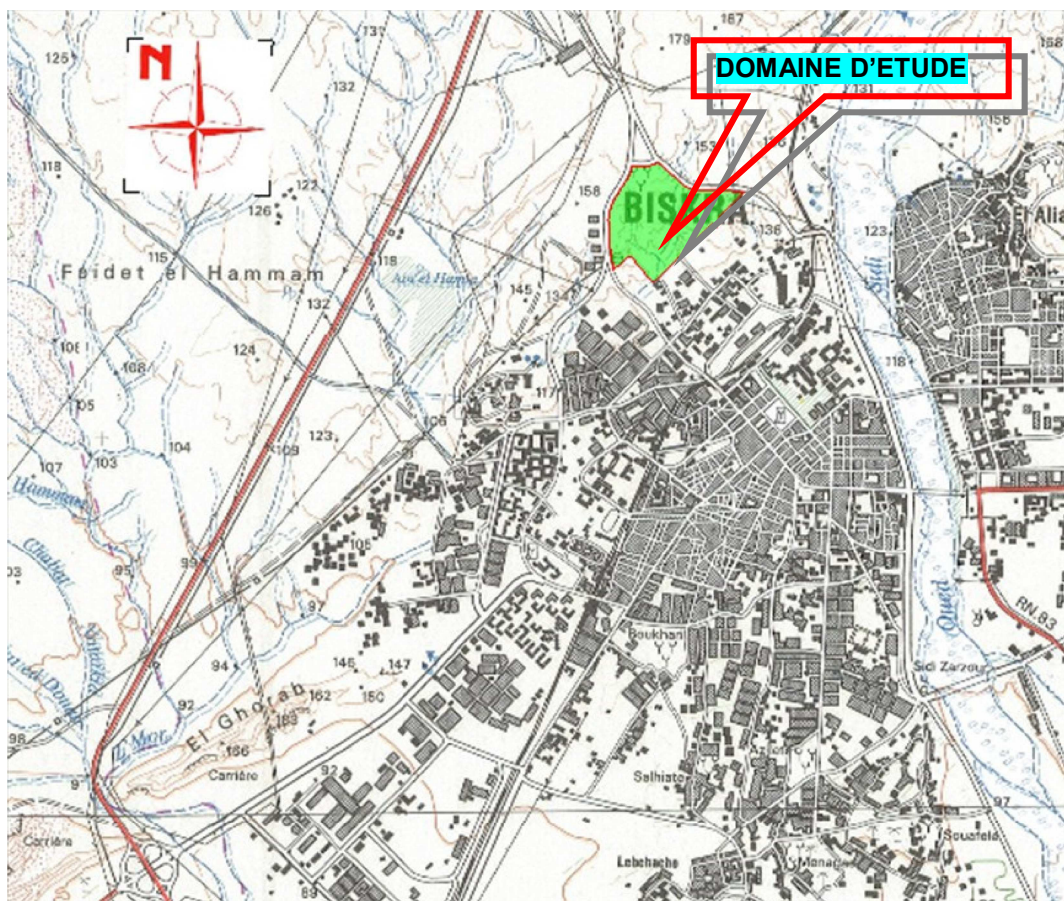


Figure 5.15: Plan de situation de la zone d'extension nord de la ville de Biskra, extrait de la carte de Biskra N°320. Source : (DUC Biskra).

¹ Plan d'Occupation des Sols (POS) : Document qui fixe les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols.

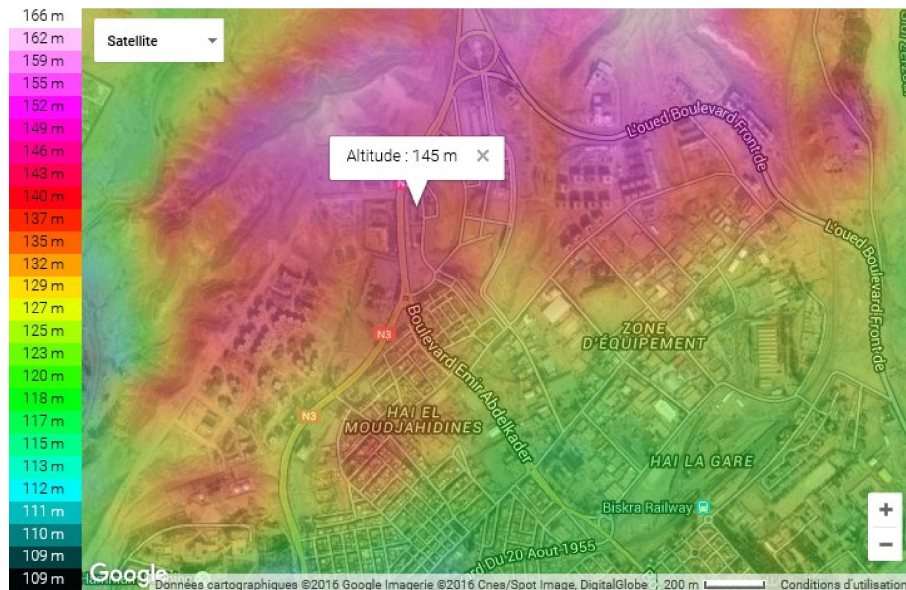


Figure 5.16 : Carte topographique de la partie nord de la ville de Biskra. Source : <http://fr-ch.topographic-map.com/places/Biskra-1585849/>

5.2.2 Critères de choix

Un intérêt particulier s'est porté sur la zone d'extension nord de la ville de Biskra. Le choix de cette partie de la ville est motivé par :

- la diversité de la morphologie urbaine entre les différents ilots;
- les caractéristiques distinctes de la structure physique (densité bâtie, facteur du ciel vu, ...etc.) de chacun des ilots urbains.
- la période de constructions (tissu récent), ce qui permet de vérifier s'il existe une volonté, pour la prise en compte par les concepteurs, de la dimension climatique dans leurs projets architecturaux et urbains.
- Cette zone est caractérisée comme ayant une altitude plus élevée de la ville, par conséquent elle sera bien exposée aux vents dominants.

5.2.3 Corpus d'étude

La rue canyon est souvent considérée comme l'unité géométrique de base (qui correspond à une rue de longueur infinie), la section de la ville est ainsi approchée par une simple répétition de ces unités. Par conséquent, de nombreux modèles, avec des niveaux différents de complexité, ont été développés et partiellement validés. Ils possèdent l'avantage de pouvoir

comparer de nombreuses configurations de rue et notamment de rapport d'aspect (H/W). En effet, certains paramètres peuvent être mis en relation, mais ne peuvent qu'approcher la réalité physique de la ville, qui n'est pas une répétition de rues parallèles, mais un environnement géométrique complexe, dans lequel les comportements thermiques ou aérauliques sont délicats à déterminer. Dans le cadre de notre recherche, le choix du corpus d'étude concerne des projets d'habitat collectif, connue par l'abréviation LSP (Logement Socio-participatif), qui s'inscrit dans le cadre de la politique d'aide de l'état à l'accession à la propriété. Nous nous intéressant particulièrement sur l'échelle de l'îlot urbain, qui est considéré comme unité de base de la forme urbaine. Chaque îlot se compose de plusieurs bâtiments à plusieurs étages, enfermant partiellement un espace ouvert, ou les parkings et les routes d'accès constituent l'essentiel de ces espaces ouverts dans ces domaines. Les formes et les typologies d'agencement des bâtiments varient considérablement d'un projet à l'autre, et parfois dans le même projet. Pour définir les configurations de référence représentatives de l'ensemble des typologies, une analyse typo-morphologique basée sur des critères bien définis peut alors être proposée sur toutes les configurations appartenant à notre zone d'étude.

5.2.4 Analyse typo-morphologique

L'étude typo-morphologique met en évidence l'analyse des éléments constituant la morphologie urbaine du secteur d'étude notamment : la forme (orientations, volumes, dimensions et proportions); limites verticales et horizontales; caractéristiques des matériaux; la végétation et les plans d'eau. Selon [Panerai et al, \(1999\) cité par Athamnia, \(2012\)](#), l'étude typo-morphologique peut être décomposée en cinq points : l'analyse du réseau viaire, du réseau parcellaire, du contexte urbain du quartier, du rapport entre les espaces construits et non construits et enfin du bâti.

5.2.4.1 Le maillage

Le maillage est le support structurel du tissu urbain, constitué par les réseaux de voies, ce dernier est influencé par la topographie du site en question. Etant donné que le terrain d'assiette de notre zone d'étude est

parsemé de quelques dépressions qui sont à l'origine des anciens cours d'eau; ce qui a donné lieu à un maillage particulier.

On a distingué trois types de voie: artérielle, de desserte et de distribution.

Elles se structurent en réseaux et couvrent l'ensemble de l'espace urbain.

(Figure 5.17).

- **Les rues principales ou artérielles** ont une largeur de 12 à 25 mètres permettant un stationnement de chaque côté. Elles sont considérées comme des rues structurantes et de liaisons inter-quartiers.
- **Les rues ordinaires** constituent l'essentiel du maillage avec une largeur de 6 à 8 mètres, elles contribuent à la desserte locale et assure la liaison entre les différents ilots.
- **Les voies de distribution** font partie de la voirie urbaine, mais elles ne livrent pas de passage à la circulation d'une rue à l'autre, elles sont considérées comme des liaisons entre les rues ordinaires et l'intérieurs des ilots urbains.

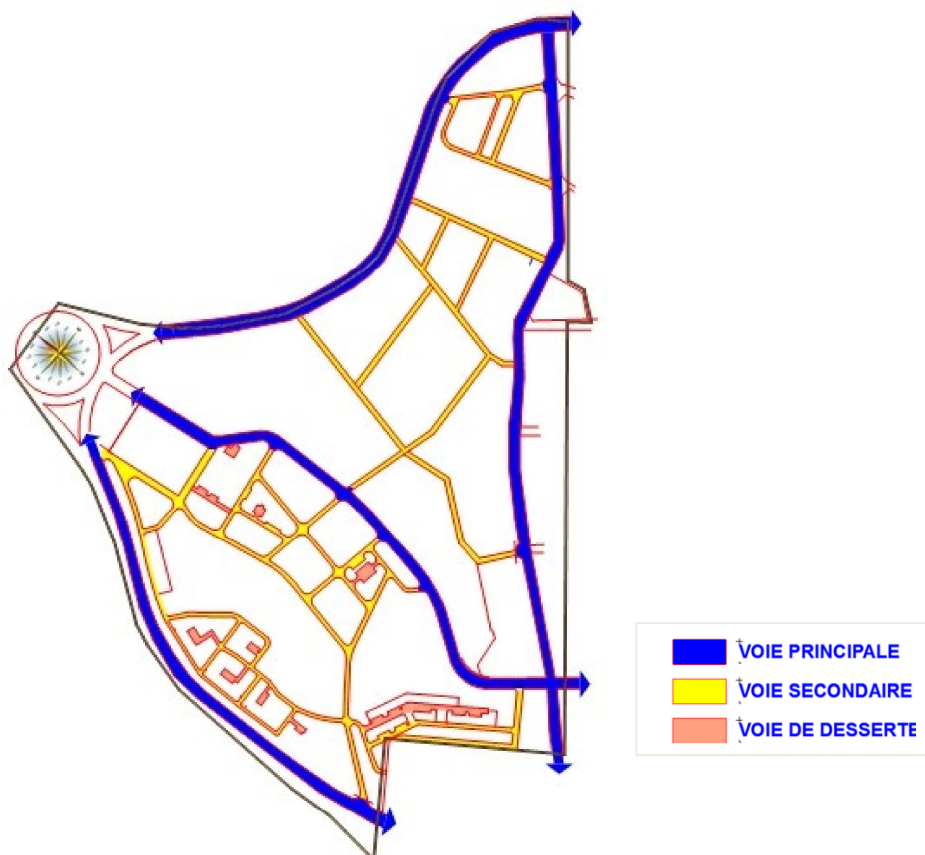
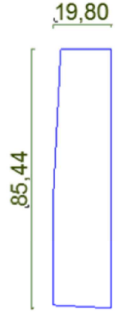


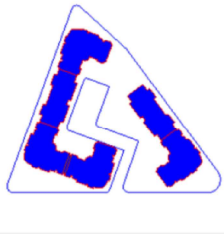
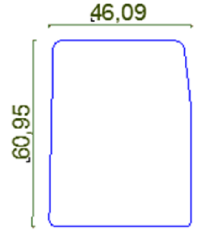
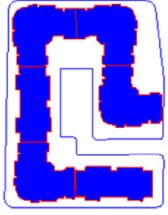
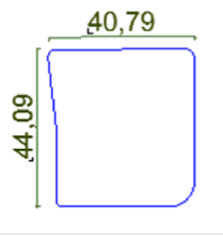
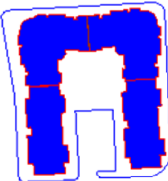
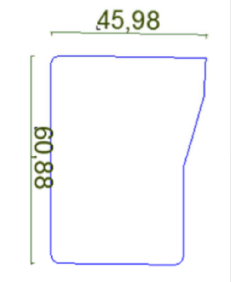
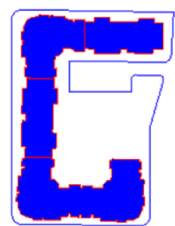
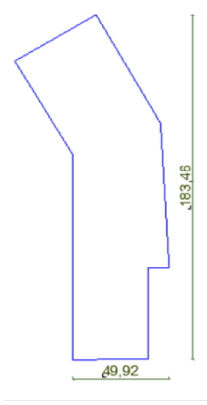
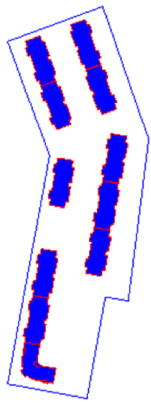
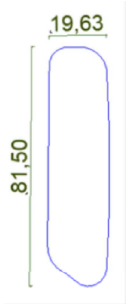
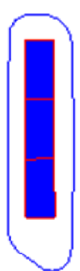
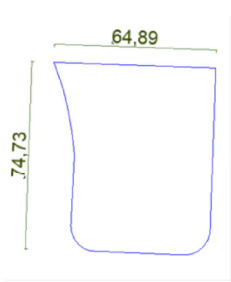
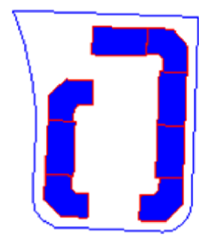


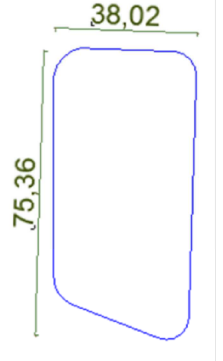
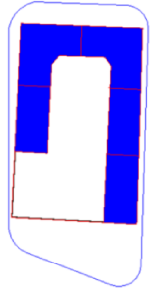
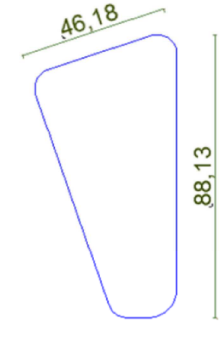
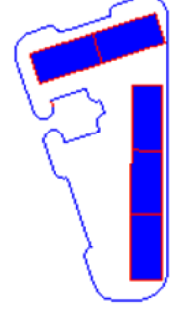
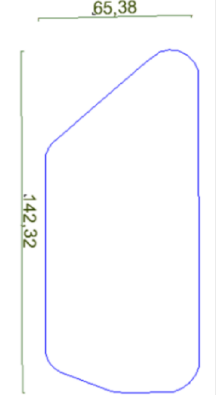
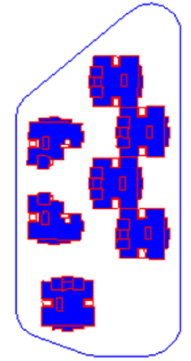

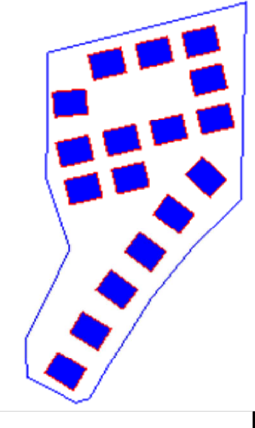
Figure 5.17: Représentation schématique du réseau viaire, (POS 01 de la zone d'extension nord de la ville de Biskra). Source : (Auteur, 2016).

5.2.4.2 Classification

La deuxième étape d'analyse consiste à classer les configurations urbaines des îlots selon leurs géométries (carré, rectangulaire, triangulaire, etc...), leurs tailles, ainsi que leurs typologies d'agencements des bâtiments et le degré d'ouverture. (**Tableau 5.1**).

N° ILOT	FORME GENERALE DE LA PARCELLE	SURFACE (M ²)	TYPE D'AGENCEMENT DES BATIMENT	ETAGE	CES	Dv	POROSITE
1		1586,67		R+4	42,02	6,72	57,98
2		3614,62		R+4	37,06	5,93	62,94
3		2745,49		R+4	48,61	7,78	51,39
4		3201,00		R+4	41,65	6,66	58,35

5		RECTANGULAIRE	1719,74		EN U	R+4	50,10	8,02	49,90
6		RECTANGULAIRE REFRACTE	10052,31 M:		En rangées parallèles séparées par une rue-semi aéré	R+4	21,17	3,39	78,83
7		RECTANGULAIRE	1587,62		EN BARRE	R+4	32,69	5,23	67,31
8		RECTANGULAIRE	3778,08		EN BOUCLE AVEC DEUX OUVERTURES	R+4	37,15	5,94	62,85

9		RECTANGULAIRE	2645,40		EN U	R+2	34,00	3,40	66,00
10		TRAPEZOIDAL	2787,16		DEUX BARRE PERPENDICULAIRE	R+4	18,21	2,91	81,79
11		RECTANGULAIRE	7392,58		PAVILLONNAIRE-Compacte	R+4	34,17	5,47	65,83
12		IRREGULIER	41269,34		PAVILLONNAIRE- aéré	R+5	40,00	7,92	60,00

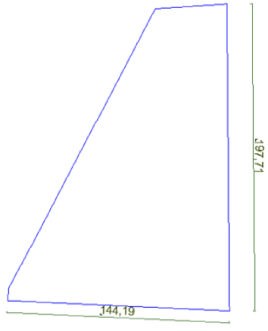
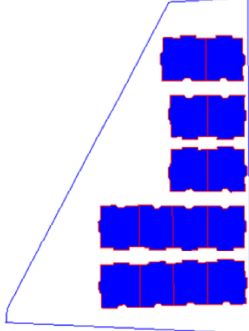
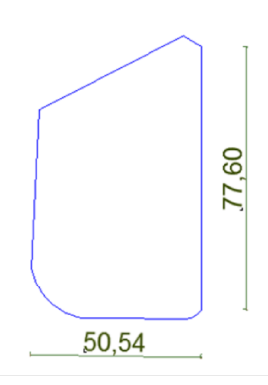
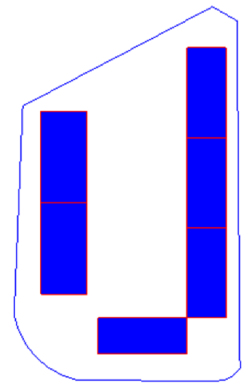
13		TRAPEZOIDAL	18748,03		En rangées parallèles séparées par des unes	R+3	42,00	4,93	58,00
14		RECTANGULAIRE	3557,25		EN U	R+4	32,00	5,00	68,00

Tableau 5.1 : Caractéristiques morphologiques des ilots urbain appartenant à la zone d'étude. Source : (Auteur, 2016).

5.2.4.3 Typologie des ilots

On particularise cinq types de volumes distincts. La pluparts sont homogènes de hauteurs identiques (R+4) est seulement trois types différents (R+2, R+3 et R+5). Deux se présentent en forme de L (Mauve), le deuxième type, et en forme de U (Jaune). Le troisième type s'étale en forme de barre (Bleu). Le quatrième en forme pavillonnaire (Vert), et le cinquième en forme de deux ou plusieurs barres (Violet), formant une ou plusieurs rues. La figure ci-dessous représente la distribution de ces classes de référence pour tout le domaine du POS (Figure 5.20). Les bâtiments sont structurés par une trame plus au moins régulière où les voies transversales ont une largeur moyenne, ces axes gardent la même largeur le long de leurs parcours.

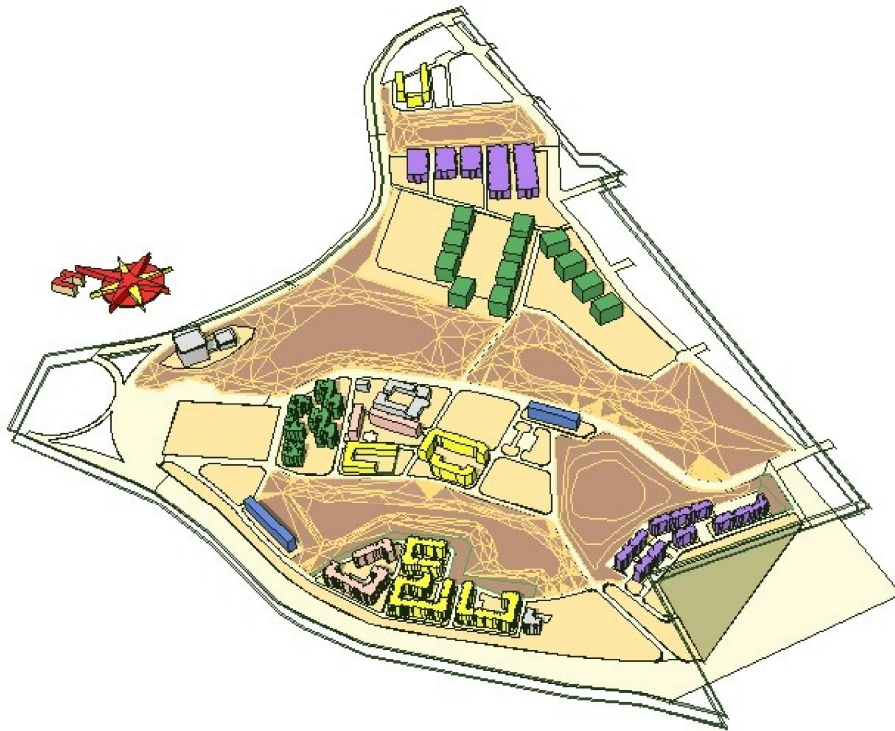


Figure 5.18: Vue en 3D du POS 01, extension nord de la ville de Biskra.
Source : (Auteur, 2016).

5.2.4.4 Choix des typologies représentatives

Dans le cadre de notre recherche, le choix du corpus d'étude concerne des formes d'îlots urbains fréquemment utilisées, appartenant aux parcs d'habitat collectif, quel que soit leur formule (social, LSP, promotionnel, etc....). Il s'agit de groupes de bâtiments disposés autour d'un espace ouvert, sous différentes formes (pavillonnaire, U, L,...etc.).

Il est à noter que l'examen des opérations et le plan parcellaire montrent que la notion de l'îlot est réduite au résultat d'un découpage, il n'est pas considéré comme une unité architecturale, il est toujours réalisé en plusieurs fragments attribués à des architectes différents. Par ailleurs, la conception se fait habituellement en deux temps : le temps des urbanistes, et celui des architectes, comme c'était le cas pour certaines villes nouvelles (Mazouz, 2013), ce qui est le cas pour notre zone d'étude. Par conséquent, ils en résultent des formes et des compositions diversifiées dans un même fragment urbain, ces formes sont souvent inadaptées à l'aspect urbain et/ou climatique.

Pour notre zone d'étude, l'observation des différentes configurations (tableau 5.1), a convergé sur trois catégories morphologiques qui ont été donc classées comme trois typologies d'îlots urbains de référence (Figure 5.19) :

- **Type A** : groupes de bâtiments disposés en forme de « U » autour d'un espace ouvert.
- **Type B** : groupes de bâtiments disposés en rangées parallèles séparées par une rue.
- **Type C** : groupes de bâtiments disposés en forme de pavillonnaire créant plusieurs espaces ouverts.

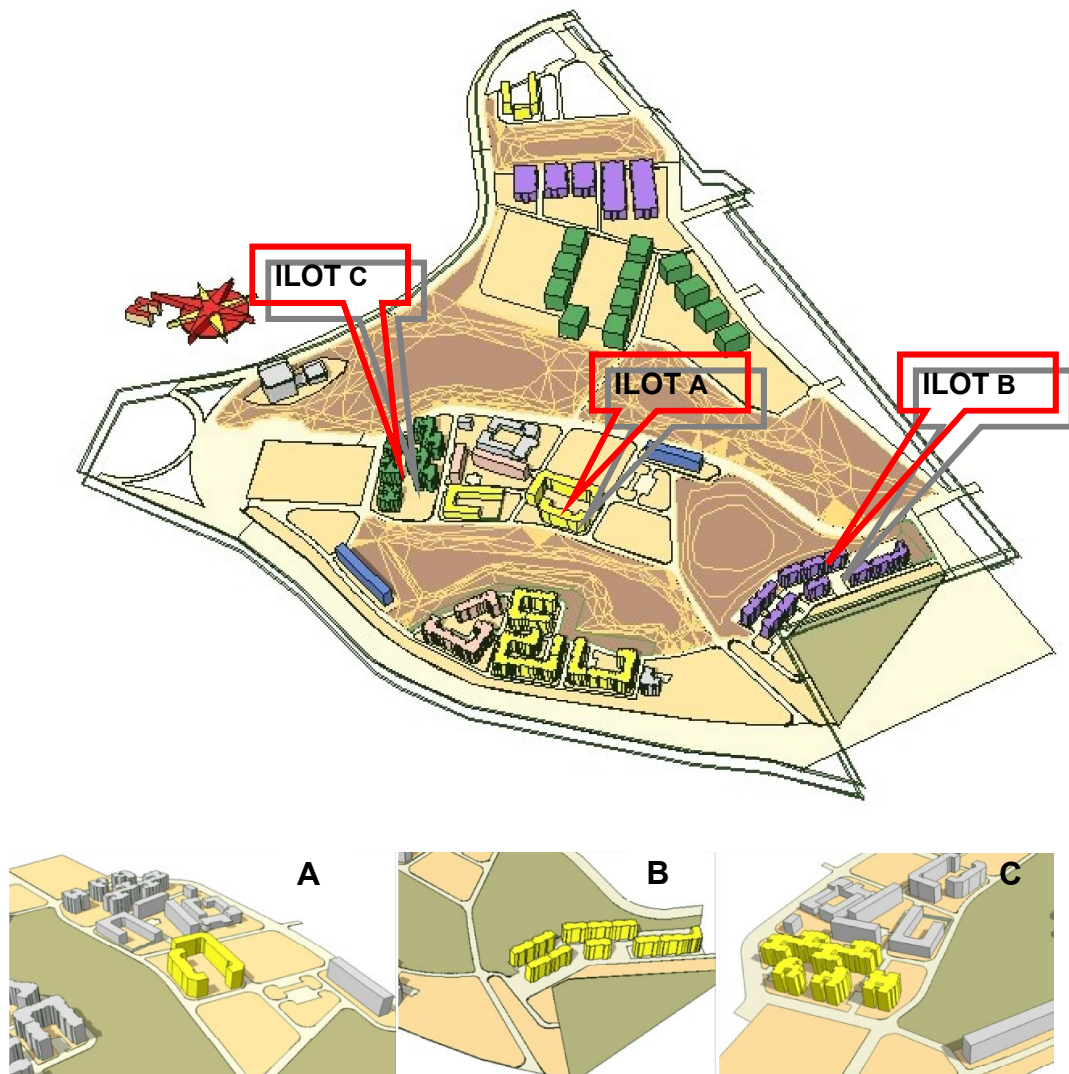


Figure 5.19: Typologies d'îlots urbains de référence. Source : (Auteur, 2016).

5.2.4.5 Analyse morphologique des îlots représentatifs

Dans un premier temps, les trois typologies représentatives vont être analysées selon l'objectif de cette recherche, et l'hypothèse énoncée. Cependant, il sera utile de diversifier les possibilités d'agencements au sein de l'îlot urbain, dans le but de comprendre dans quelle mesure, le type d'agencement peut avoir des influences sur les paramètres climatiques. Nous présentons dans les tableaux ci-dessous un résumé d'un nombre de caractéristiques morphologiques pour chaque typologie.

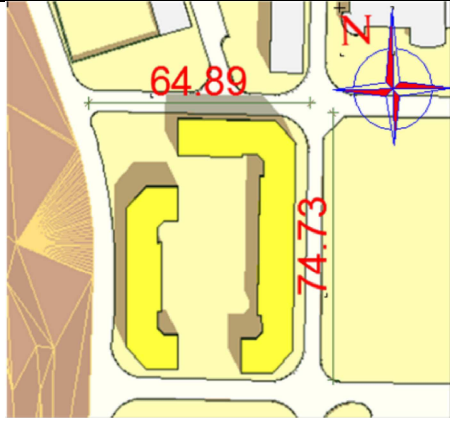

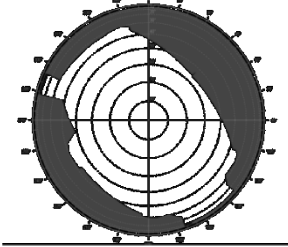
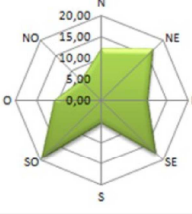


Type A			
groupes de bâtiments disposés en forme de U autour d'un espace ouvert			
VUE EN PLAN		Forme de la parcelle	Réctangulaire
		Surface (m ²)	3778,08
		Emprise au sol (%)	37,15
		Nombre de bâtiments	8
		Hauteur (ml)	16
		Typologie d'agencement	Boucle semi-ouverte
		Surface plancher (m ²)	7017,80
		Surface de l'enveloppe (m ²)	6746,16
		La densité volumique: $D_v = \frac{V_b}{A_s}$	5,95
		La porosité (%) <small>$Porosité_{quartier} = \frac{\text{Surface totale des percements}}{\text{surface total de la façade urbaine}} \times \cos\theta$</small>	15,83
GEOMETRIE 3D			
		PROJECTION STERIOGRAPHIQUE	ROSE DES ORIENTATIONS
			
PHOTOGRAPHIE			

Tableau 5.2 : Analyse morphologique de l'îlot « A ». Source : (Auteur, 2016).

Type B			
groupes de bâtiments disposés en rangées parallèles séparées par une rue			
VUE EN PLAN		Forme de la parcelle	Réctangulaire
		Surface (m ²)	10 052,31
		Emprise au sol (%)	21,17
		Nombre de bâtiments	11
		Hauteur (ml)	16
		Typologie d'agencement	En rangées parallèles séparées par une rue-semi aéré
		Surface plancher (m ²)	10640,37
		Surface de l'enveloppe (m ²)	8724,00
		La densité volumique: $D_v = \frac{V_b}{A_s}$	3,39
		La porosité (%)	78,83
$\text{Porosité}_{\text{quartier}} = \frac{\text{Surface totale des percements}}{\text{surface total de la façade urbaine}} \times \cos\theta$			
Facteur de vue de ciel	39,96		
GEOMETRIE 3D			
		PROJECTION STERIOGRAPHIQUE	ROSE DES ORIENTATIONS
PHOTOGRAPHI			

Tableau 5.3 : Analyse morphologique de l'ilot « B ». Source : (Auteur, 2016).

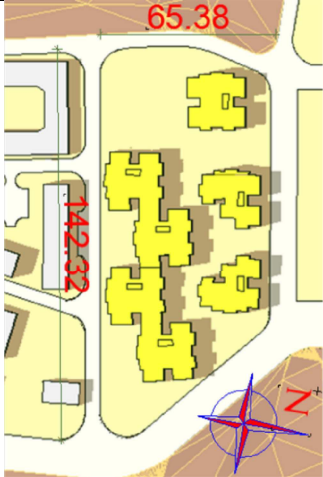

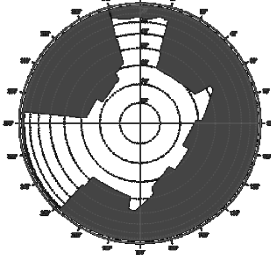
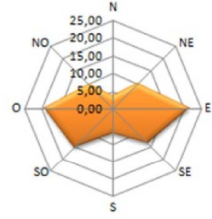

Type C			
groupes de bâtiments disposés en forme de pavillonnaire créant plusieurs espaces ouverts			
VUE EN PLAN		Forme de la parcelle	Réctangulaire
		Surface (m ²)	7392,58
		Emprise au sol (%)	34,17
		Nombre de bâtiments	7
		Hauteur (ml)	16
		Typologie d'agencement	PAVILLONNAIRE-Compacte
		Surface plancher (m ²)	12630,25
		Surface de l'enveloppe (m ²)	8764,00
		La densité volumique: $D_v = \frac{V_b}{A_S}$	5,47
		La porosité (%)	65,83
$Porosité_{quartier} = \frac{Surface\ totale\ des\ percements}{surface\ total\ de\ la\ façade\ urbaine} \times \cos\theta$			
Facteur de vue de ciel	38,92		
GEOMETRIE 3D			
		PROJECTION STERIOGRAPHIQUE	ROSE DES ORIENTATIONS
PHOTOGRAPHIE			

Tableau 5.4 : Analyse morphologique de l'ilot « C ». Source : (Auteur, 2016).

5.2.5 Corpus théorique

Un corpus théorique sera définie. Pour chaque typologie, correspondent plusieurs possibilités d'agencement, l'influence de certaines modifications concernant la disposition des bâtiments sur la parcelle est étudiée. Plusieurs indicateurs morphologiques ayant potentiellement influences sur l'écoulement du vent et l'ensoleillement, ferons les critères les plus judicieux dans la formulation du corpus. (Rapport d'aspect,

Ouverture /Fermeture, FCV,...). Par ailleurs, nous allons considérer que certaines caractéristiques restent fixes, qui concernent :

- la parcelle (forme, surface, orientation) ;
- et les bâtiments (nombres formes, hauteurs).

En effet, cela peut avoir des répercussions sur certains indicateurs morphologique (variation du facteur de vue de ciel, porosité,...), à l'inverse de la densité (surfacique, volumique,...) et le coefficient d'emprise au sol. Notre objectif est d'extraire de chaque ilot représentatif, plusieurs typologies comparables entre elles, en basant sur les critères sus indiqués, et de mettre en exergue l'effet de la variation de chaque élément.

5.2.5.1 Formulation du corpus théorique

- **Type A**

Pour un groupe de bâtiments disposés en forme de boucle plus ou moins ouverte, implantés autour d'un espace ouvert, nous avons choisies « Ouverture /Fermeture » comme critères pour la construction des variantes types. Quatre classes ont été proposées, l'ilot peut ainsi être ouvert :

- d'un seul côté (**n1**) ;
- de deux cotés (**n2**) ;
- de quatre coté (**n4**) ;
- ou sur pilotis (**np**).

Par conséquent nous avons dégagé **18 variantes**, qui sont illustrées dans la **figure 5.20**.

- **Type B**

La même démarche pour le « type B », selon le mode d'agencement des bâtiments sur l'ilot (groupes de bâtiments disposés en rangées parallèles séparées par une rue), les critères choisies pour la construction des variantes types sont: **le rapport d'aspect (H/W)**; et « **Ouverture /Fermeture** ». Pour ce dernier, étant donné la forme réfractée de la rue qui suit la forme géométrique de la parcelle en

question, nous avons ajouté un deuxième jeu de variantes basé sur le critère sus indiqué, cette fois avec une rue droite, tout en gardons le rapport d'aspect de la configuration de base.

- « **Ouverture /Fermeture** » : Six classes ont été proposées, l'ilot peut ainsi être ouvert :
 - de deux cotés (**n2**) ;
 - de trois cotés (**n3**) ;
 - de quatre cotés (**n4**) ;
 - de cinq cotés (**n5**) ;
 - de sept cotés (**n7**) ;
 - de huit cotés (**n8**) ;
- **Le rapport d'aspect H/W** : trois valeurs ont été considérées : 0,5 ; 1 et 2.

De ce fait, nous avons dégagé **11 variantes** (dont une répétitive), qui sont illustrées dans la **figure 5.21**.

- **Type C**

Pour ce type les bâtiments sont disposés en forme de pavillonnaire (connectés et non connectés), créant plusieurs espaces ouverts. Les critères utilisés pour la construction des variantes types sont: le rapport d'aspect ; « Ouverture /Fermeture » (trois classes proposées : n3 ; n4 et n6), ainsi que l'orientation des bâtiments. De ce fait, nous avons dégagé **09 variantes**, qui sont illustrées dans la **figure 5.22**.

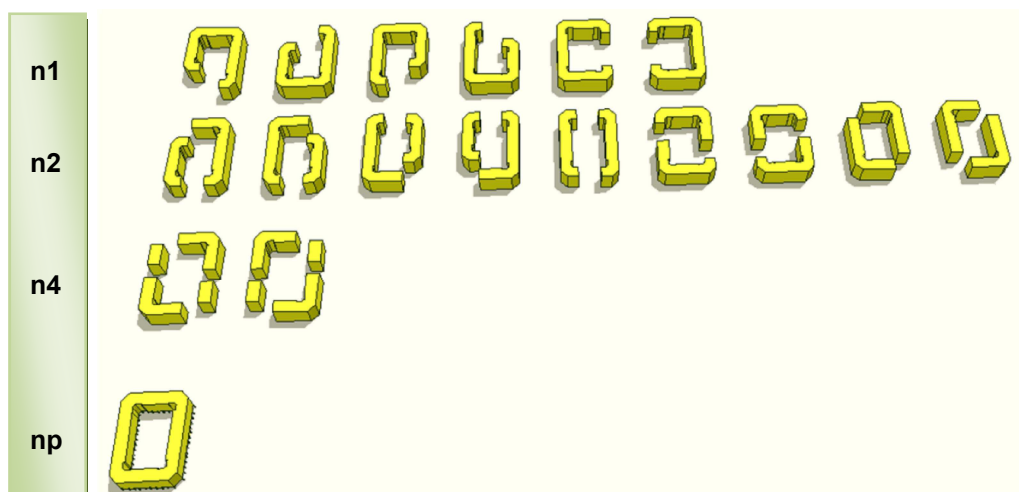


Figure 5.20: Résultats de la formulation du corpus théorique « type A » ; **Source** : (Auteur, 2016).

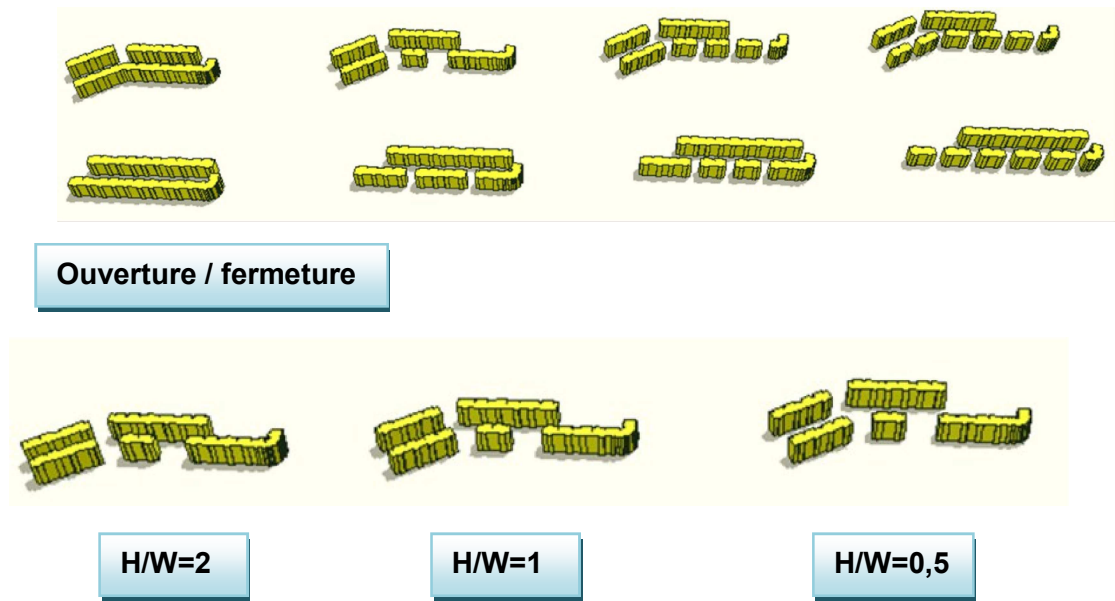


Figure 5.21: Résultats de la formulation du corpus théorique « type B » ; **Source** : (Auteur, 2016).

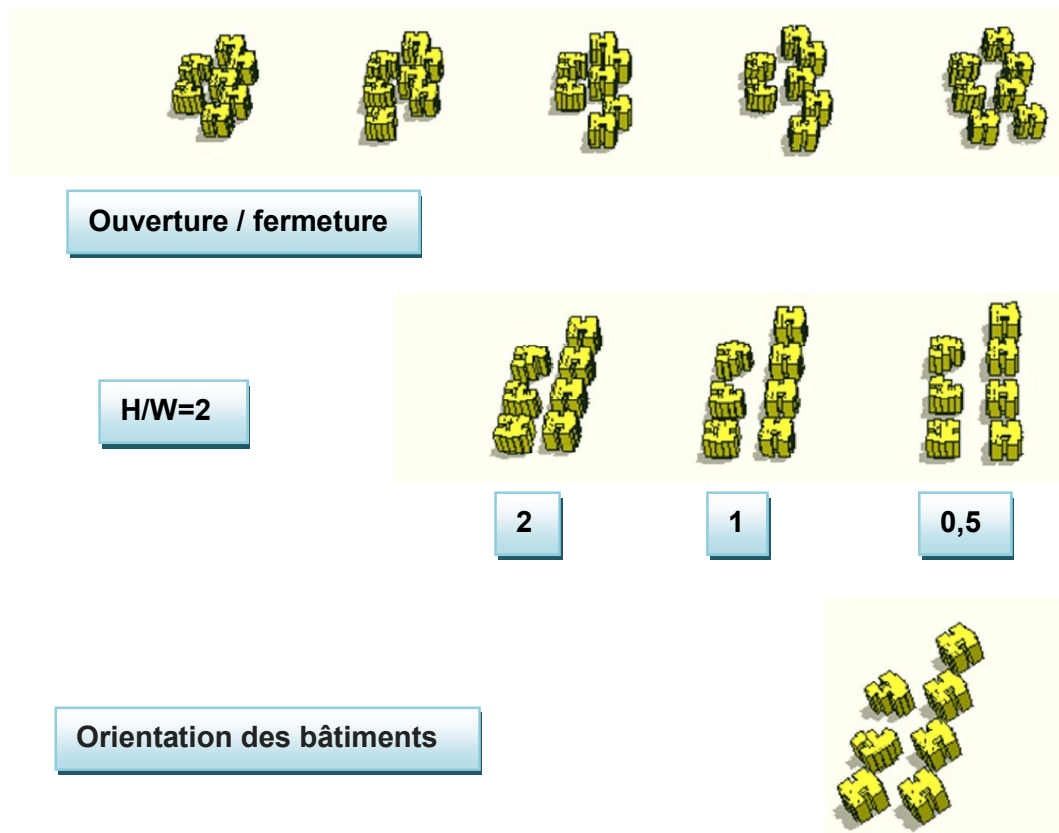


Figure 5.22: Résultats de la formulation du corpus théorique « type C » ; **Source** : (Auteur, 2016).

Pour les trois typologies (A, B et C), nous sommes arrivés à dégager 37 variantes, qui sont illustrées dans le **tableau 5.6**.



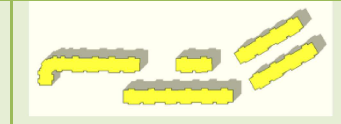



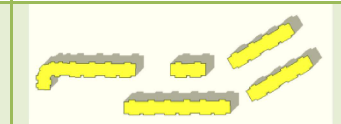



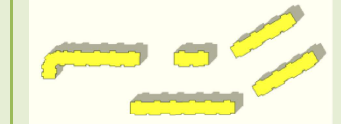
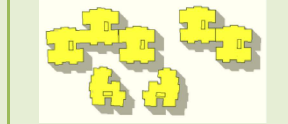


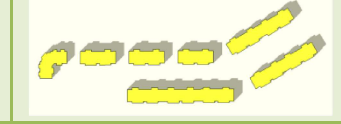







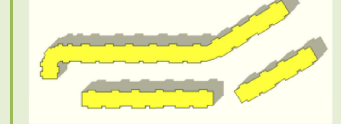


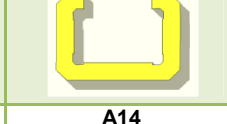
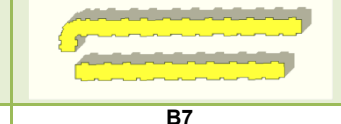



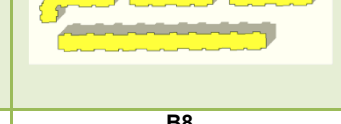


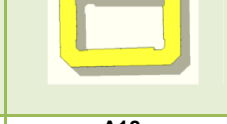


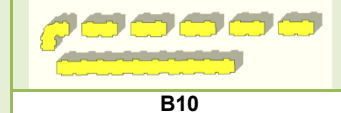
TYPE A		TYPE B	TYPE C
			
A1	A2	B1	C1
			
A3	A4	B2	C2
			
A5	A6	B3	C3
			
A7	A8	B4	C4
			
A9	A10	B5	C5
			
A11	A12	B6	C6
			
A13	A14	B7	C7
			
A15	A16	B8	C8
			
A17	A18	B9	C9
			
		B10	

Tableau 5.5 : Résultats de formulation du corpus théorique. Source : (Auteur, 2016).

5.2.6 CHOIX DES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES

Dans le deuxième chapitre nous avons recensé une large gamme d'indicateurs. Nous présenterons, à partir d'une structuration thématique, les indicateurs morphologiques et environnementaux recensés. Dans un premier temps, ces indicateurs seront calculés pour les trois ilots. Une analyse comparative entre les trois typologies représentatives sera opérée, ensuite, nous entamons une phase de croisement entre les différents indicateurs d'études. Ensuite, nous appliquant la même démarche pour tout le corpus théorique. Le but est de vérifier l'effet de chaque indicateur morphologique dans l'amélioration des conditions microclimatiques, à savoir sur l'ensoleillement et l'écoulement du vent. Cela peut rendre compte en partie de la complexité et du couplage des phénomènes et d'autres part de la réalité complexe de la forme urbaine.

5.2.6.1 Le facteur de vue de ciel

Le facteur de vue du ciel est un indicateur qui affecte la température de l'air ainsi que la quantité d'énergie solaire incidente. (Athamnia, 2012).

Le calcul de cet indicateur a été opéré à l'aide du logiciel « Solene ».

Nous présentons dans la figure ci-dessous, les valeurs calculées pour les trois ilots représentatifs, ainsi que le déroulement des calculs sera présenter dans le chapitre suivant.

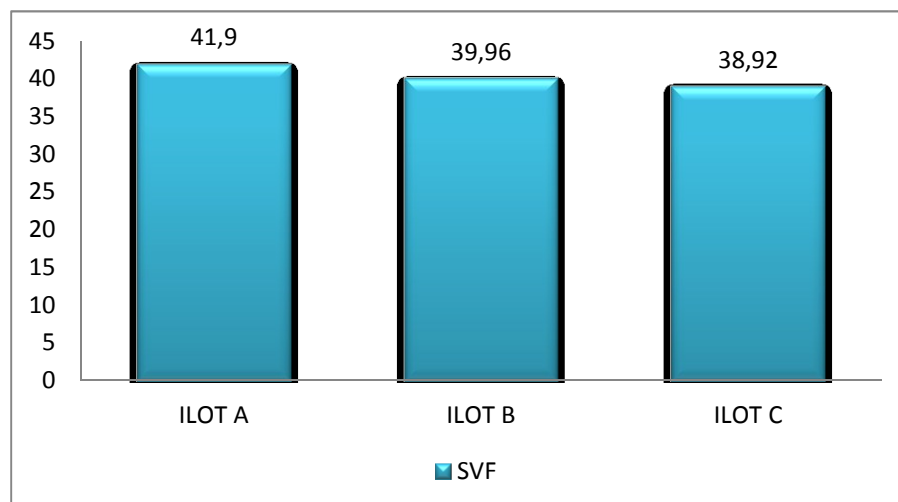


Figure 5.23: Représentation des facteurs de vue de ciel pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).

Les figures ci-dessous représentent les valeurs calculées pour toutes les variantes du corpus.

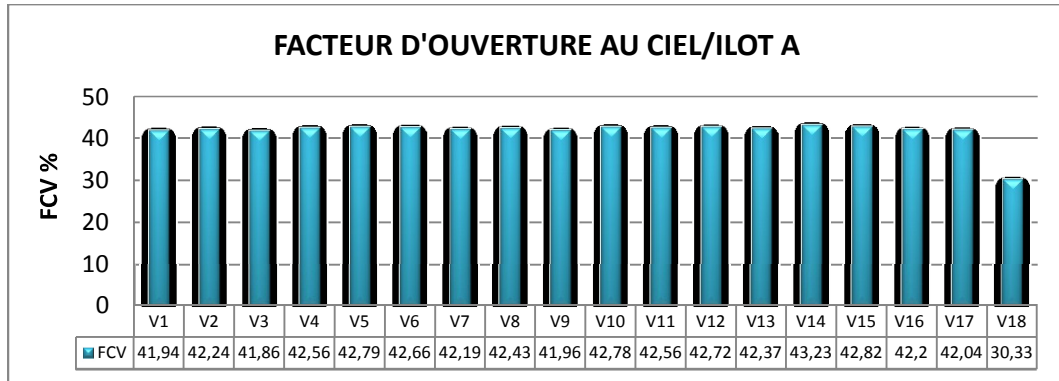


Figure 5.24 : Représentation des facteurs de vue de ciel pour toutes les variantes du type A. Source : (Auteur, 2016).

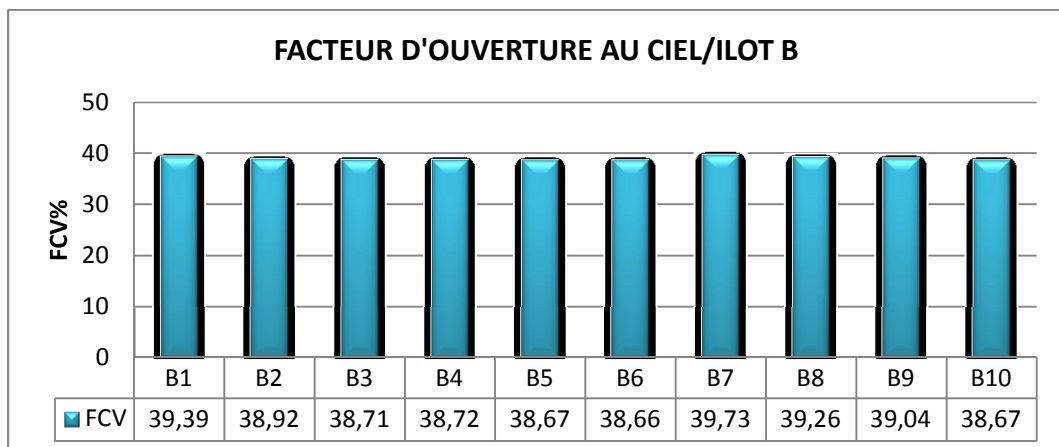


Figure 5.25 : Représentation des facteurs de vue de ciel pour toutes les variantes du type B. Source : (Auteur, 2016).

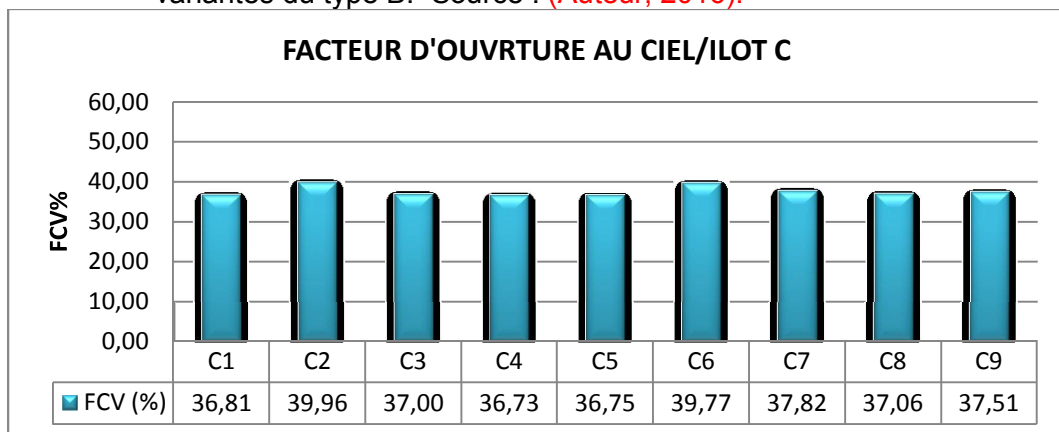


Figure 5.26 : Représentation des facteurs de vue de ciel pour toutes les variantes du type C. Source : (Auteur, 2016).

5.2.6.2 Le rapport H/W

Cet indicateur peut avoir des effets notables sur l'écoulement, la dispersion des polluants et l'accessibilité des rayonnements solaires avec l'intensité d'îlot de chaleur.

Le rapport d'aspect (rapport entre la hauteur des bâtiments H et la largeur des rues W) est utilisé pour caractériser les rues en milieu urbain. Cette méthode peut être applicable uniquement pour « l'îlot B ». L'équation proposée par Masson, (2000) est utilisée pour définir le rapport d'aspect des trois typologies. Elle s'écrit comme suit :

$$AR = \frac{S_{\text{vertical}}}{S_a - S_{\text{bati}}}$$

Les résultats des calculs affiche une valeur plus faible pour « l'îlot B », par contre « l'îlot A » présente le rapport d'aspect le plus grand.

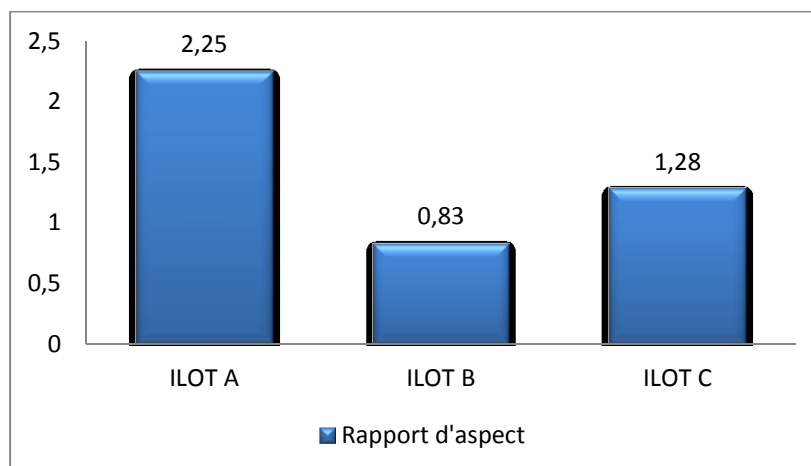


Figure 5.27 : Représentation graphique du rapport d'aspect pour les trois îlots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).

5.2.6.3 La densité

D'un point de vue climatique, la densité interfère avec certaines préoccupations climatiques urbaines comme l'îlot de chaleur urbain.

La densité surfacique, est le rapport entre l'emprise au sol des bâtiments et la surface de la parcelle. Elle est bornée entre 0 et 1. Les valeurs calculées pour les trois îlots sont comprises entre 0,21 pour « l'îlot B » (qui représente la plus faible occupation au sol) et 0,37 pour « l'îlot A »

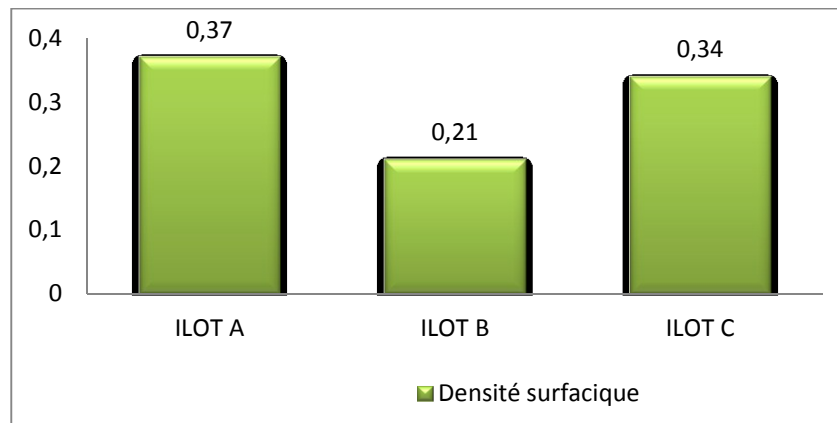


Figure 5.28 : Représentation graphique de la densité surfacique pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).

La densité volumique représente la relation entre la volumétrie construite et la surface de la parcelle.

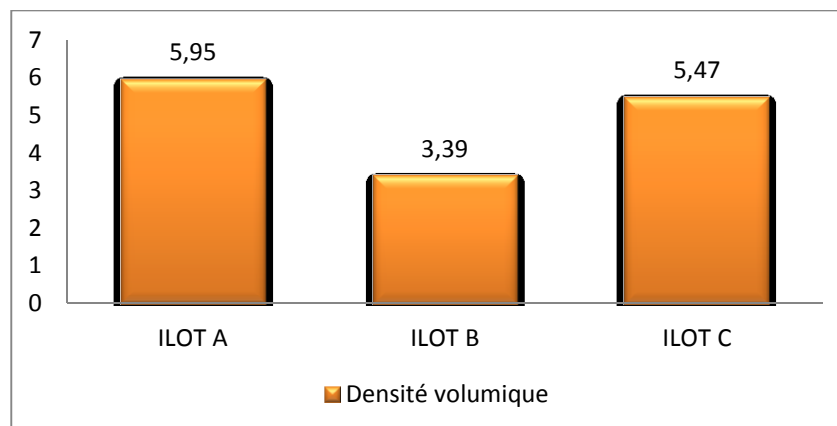


Figure 5.29 : Représentation graphique de la densité volumique pour les trois ilots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).

5.2.6.4 La porosité

Cet indicateur peut considérablement affecter la vitesse du vent au sein d'un quartier ainsi que la température de l'air.

Le calcul de la porosité pour chaque ilot urbain est le rapport entre la surface totale de ces percements et la surface totale de sa façade urbaine. Sa valeur dépend de son mode d'agencement et de son orientation par rapport aux vents dominants. Le calcul de la porosité des différents ilots est fait par la relation suivante:

$$Porosité_{quartier} = \frac{Surface\ totale\ des\ percements}{surface\ total\ de\ la\ façade\ urbaine} \times \cos\theta$$

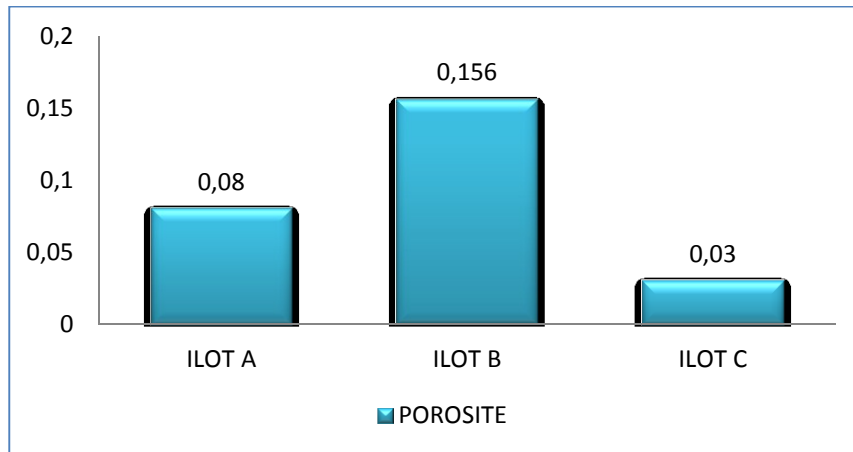


Figure 5.30 : Représentation graphique de la porosité pour les trois îlots représentatifs. Source : (Auteur, 2016).

Les valeurs calculées pour les trois îlots sont comprises entre 0,03 pour « l'îlot C » et 0,156 pour « l'îlot B ». Ces différences sont dues principalement du degré d'ouverture de l'îlot et l'orientation par rapport aux vents dominants.

Les figures ci-dessous représentent les valeurs calculées pour toutes les variantes du corpus.

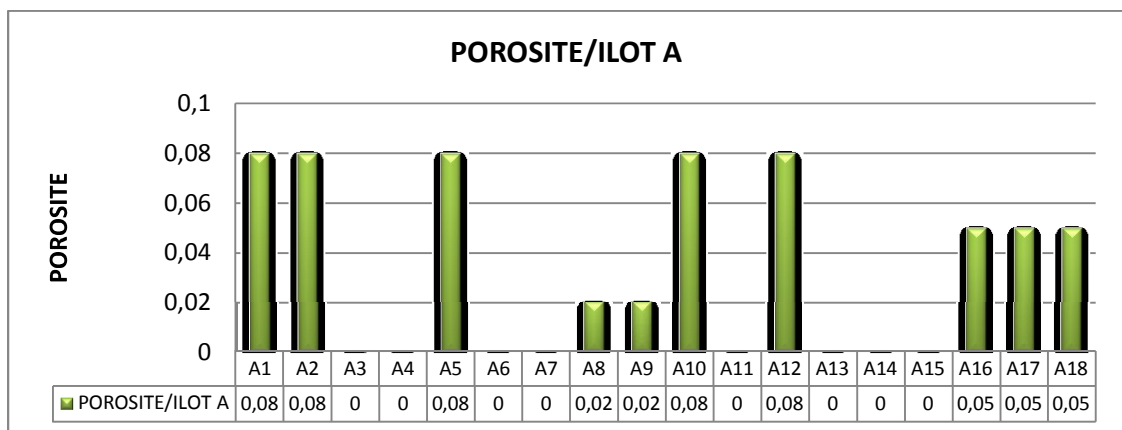


Figure 5.31 : Représentation graphique de la porosité pour les variantes du type A. Source : (Auteur, 2016).

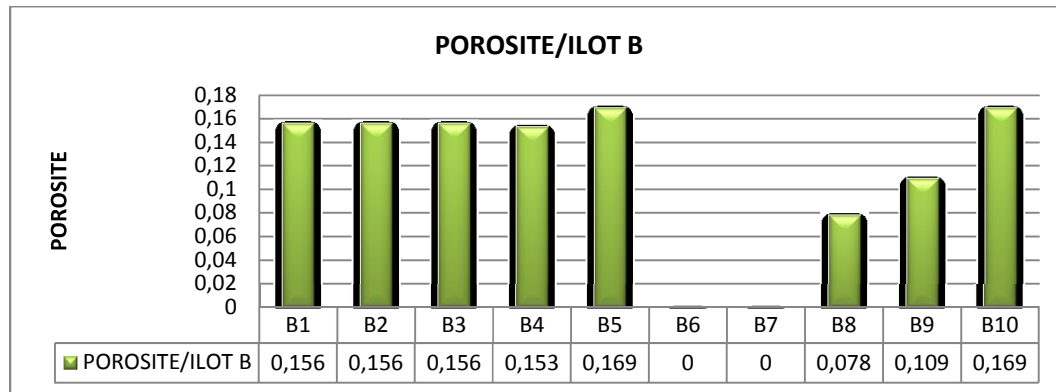


Figure 5.32 : Représentation graphique de la porosité pour les variantes du type B. Source : (Auteur, 2016).

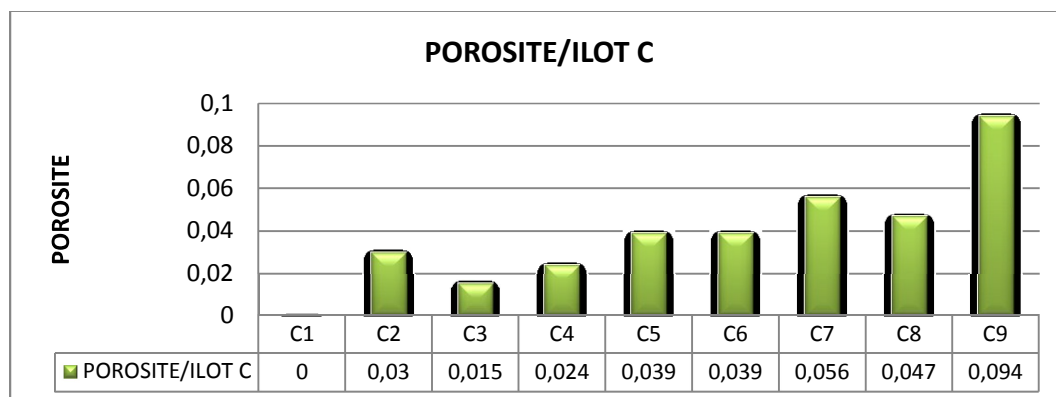


Figure 5.33 : Représentation graphique de la porosité pour les variantes du type C. Source : (Auteur, 2016).

5.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons commencé par la présentation de la ville de Biskra, son appartenance à un climat de type saharien, chaud et sec en été, plutôt tempéré en hiver ; ainsi que ses données climatiques qui vont être utilisées comme des valeurs d'entrées pour les simulations numériques dans la section suivante. Ensuite une présentation du cas d'étude qui a conduit à l'aide d'une analyse typo-morphologique de définir un corpus théorique composé de 37 variantes issues de trois typologies de références. Ces variantes en été composé de façon à ce que l'on puisse comparer les effets des différentes variables, sur les écoulements du vent est l'ensoleillement. De ce fait en a calculé des indicateurs physico morphologiques, pour pouvoir tester les corrélations qui peuvent exister entre forme urbaine et paramètres climatiques.

Dans le chapitre suivant nous allons effectuer des simulations numériques des écoulements du vent et de l'ensoleillement pour l'ensemble du corpus

théorique en utilisant le code **CFD** (Computational Fluid Dynamics), « **PHOENICS** », développé par CHAM, et le code « **Solene** » développé par le laboratoire CERMA qui ont été présentés dans le chapitre 4.

Le but est de vérifier à l'aide de la simulation numérique l'effet de chaque indicateur morphologique dans l'amélioration des conditions de l'ensoleillement et de l'écoulement du vent. Cela peut rendre compte en partie de la complexité et du couplage des phénomènes et d'autres part de la réalité complexe de la forme urbaine.

CHAPITRE 6

MODELISATION NUMERIQUE

6.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons effectuer des simulations numériques des écoulements du vent et de l'ensoleillement pour l'ensemble du corpus théorique en utilisant le code **CFD** (Computational Fluid Dynamics), « **PHOENICS** », développé par CHAM, et le code « **Solene** » développé par le laboratoire CERMA. Le but est de vérifier l'effet de chaque indicateur morphologique dans l'amélioration des conditions de l'ensoleillement et de l'écoulement du vent.

6.2 SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT DU VENT

6.2.1 Les conditions de la simulation

Les informations sont données en fonction du type de modèle de vent utilisé et des données météorologiques disponibles appropriées au site.

6.2.1.1 La période des simulations

Etant donné que l'objectif recherché, est d'étudier le rôle que peut jouer la morphologie urbaine sur l'amélioration des conditions microclimatiques à l'échelle urbain, notamment en matière de ventilation des zones urbaines. Dans notre étude, nous allons utiliser les données du vent qui correspondent à la période estivale, comme des valeurs d'entrées des simulations aéraulique.

6.2.1.2 Vitesse et direction du vent

A partir des données climatiques de Biskra, (chapitre 3 section (5..2.1.2.5), cette ville est prédominé en période estivale par des vents sud-est (12% du temps), avec une vitesse moyenne de 3,9 m/s.

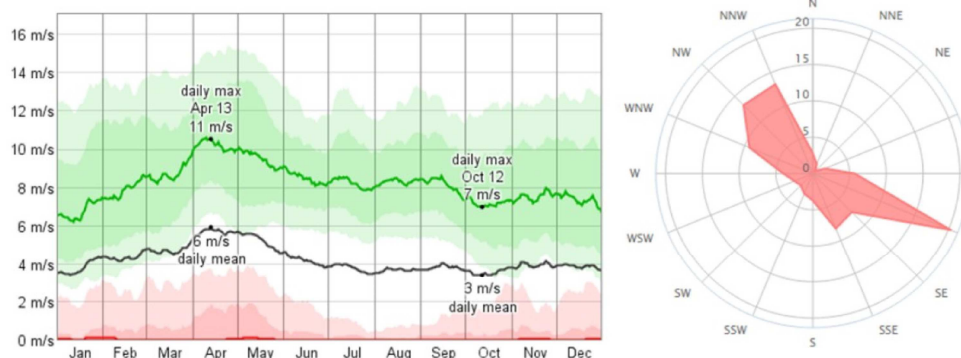


Figure 6.1 : (a)Vitesse du vent ; (b) Rose annuelle du vent. Source : <https://weatherspark.com>

6.2.1.3 Création du domaine

Les dimensions du domaine dépendent de la taille de la zone modélisée et des conditions aux limites utilisées. Pour objectif d'éviter les effets de blocage, la zone d'étude doit être placée suffisamment loin des limites du domaine. Pour un fragment urbain, la frontière supérieure du domaine doit être placée entre 8 et 10 où est la hauteur du bâtiment le plus haut. (COST action 732, 2007), cité par (Athamnia, 2012).

Par conséquent, ces règles de dimensionnement en conduit à la création d'un domaine avec les paramètres suivants :

- La taille : X= 600m, Y= 600m et Z= m50.
- Le maillage : X= 300, Y= 300 et Z= 25. (soit : 2 250 000,00 cellules)

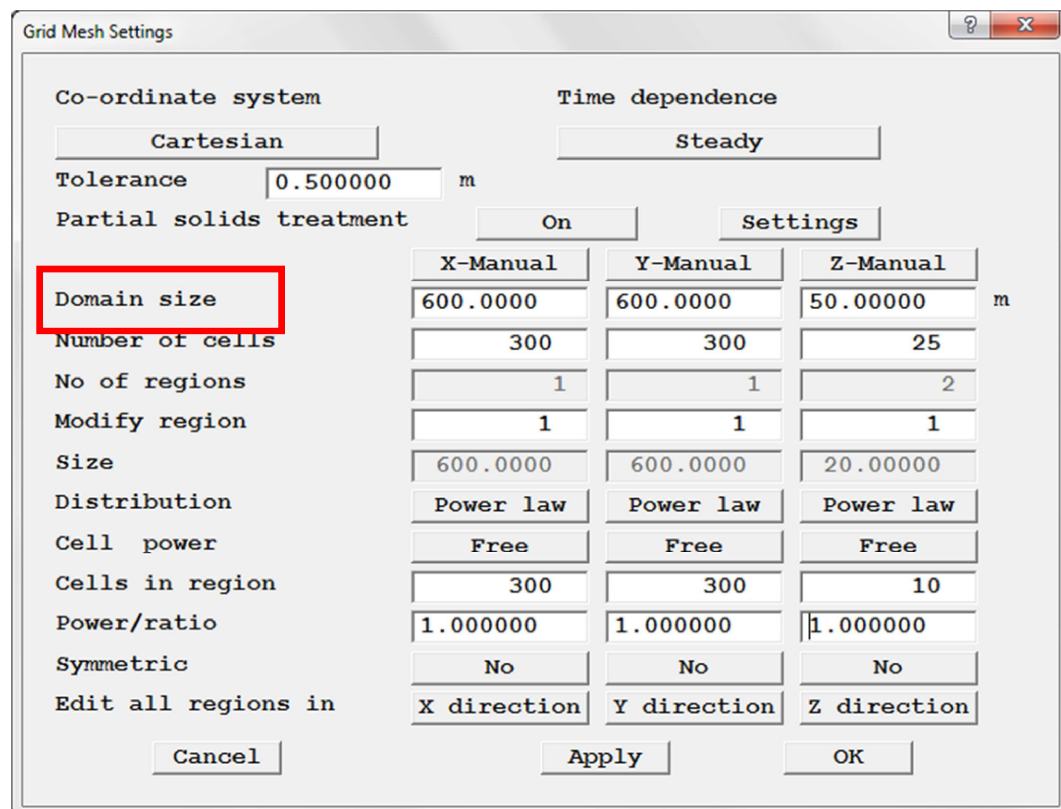


Figure 6.2: Taille du domaine et nombre des cellules de maillage. Source : (Auteur, 2016).

6.2.1.4 Le modèle de turbulences

Le conditionnement de l'écoulement dépend du type de modèle de vent utilisé et des données météorologiques associées. Nous avons choisis KE, qui correspond à l'écoulement de l'aire sous l'équation de RANS¹.

¹ RANS :(Reynolds-averaged Navier-Stokes), est un modèle de turbulence qui repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées.

6.2.1.5 Modélisation de la géométrie

La géométrie simulée a été modélisée par le logiciel ArchiCad et exporté sous format STL² vers le logiciel Phoenix.

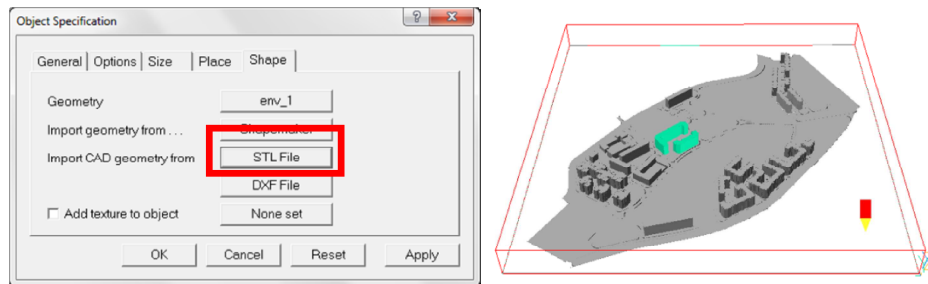


Figure 6.3: Importation de la géométrie (STL File). Source : (Auteur, 2016).

6.2.2 Analyse des résultats de l'écoulement du vent pour les trois typologies

Notre analyse sera basée sur la répartition des champs des vitesses du vent sur l'îlot. Une échelle d'évaluation a été proposée qui constitue la variable de base pour notre analyse. La définition de cette échelle c'est inspiré d'une classification basée sur le confort thermique en plein air et non sur la force du vent sur les piétons ou les bâtiments. Les classes représentent : «stagnante», «pauvre», «faible», «satisfaisant» et «bon» ventilations naturelles au niveau des piétons dans les canyons de la rue, respectivement. (Ng et al, 2008).

Pour se faire, nous proposons une classification des vitesses du vent basé sur la combinaison de plusieurs des critères de confort aéraulique (en se référent à l'échelle de Beaufort), et l'amélioration de la ventilation urbaine.

Cinq classes peuvent être proposées :

Classe 1	$V < 1,7 \text{ m/s}$	(Très faible)
Classe 2	$1,7 \text{ m/s} < V < 3,9 \text{ m/s}$	(Faible)
Classe 3	$3,9 \text{ m/s} < V < 5 \text{ m/s}$	(Optimale)
Classe 4	$5 \text{ m/s} < V < 6 \text{ m/s}$	(Fort)
Classe 5	$V > 6 \text{ m/s}$	(Très fort)



² STL, (Stéréolithographie), utilisés pour la description des formes de corps solides. C'est une représentation triangulaire d'une géométrie en 3 dimensions.

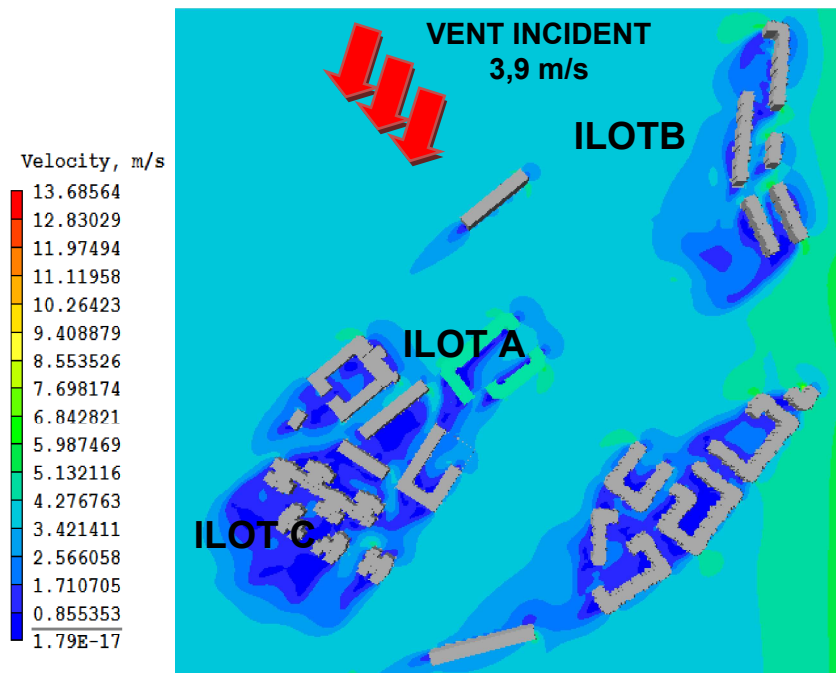


Figure 6.4: Simulation des écoulements du vent pour les trois îlots à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

L'îlot A : Le vent incident induit des surventes importantes au cœur de l'îlot, ces vitesses perdent de leur intensité en aval. Elles s'expliquent par la position des ouvertures sur un même axe parallèle avec la direction du vent, se qui a produit un effet de canalisation. La zone de survitesse occupe alors une partie importante. D'autre part la disposition des bâtiments en forme de « L » joue le rôle de brise vent diminuant ainsi la vitesse au niveau des coins créés par l'agencement des bâtiments. On distingue aussi la présence d'un petit tourbillon de décollement à l'entrée du cœur de l'îlot. **(Figure 6.5).**

Le cœur d'îlot est caractérisé par des vitesses de l'ordre de 2,56 m/s à 4,26 m/s avec des zones très protégées (0,8 m/s à 1,7 m/s) au niveau des coins, ces vitesses occupent 65% de la surface de l'îlot. **(Figure 6.6).** On voit enfin que des vitesses très élevées, de l'ordre de 6,82 m/s, apparaissent aux points de séparation.

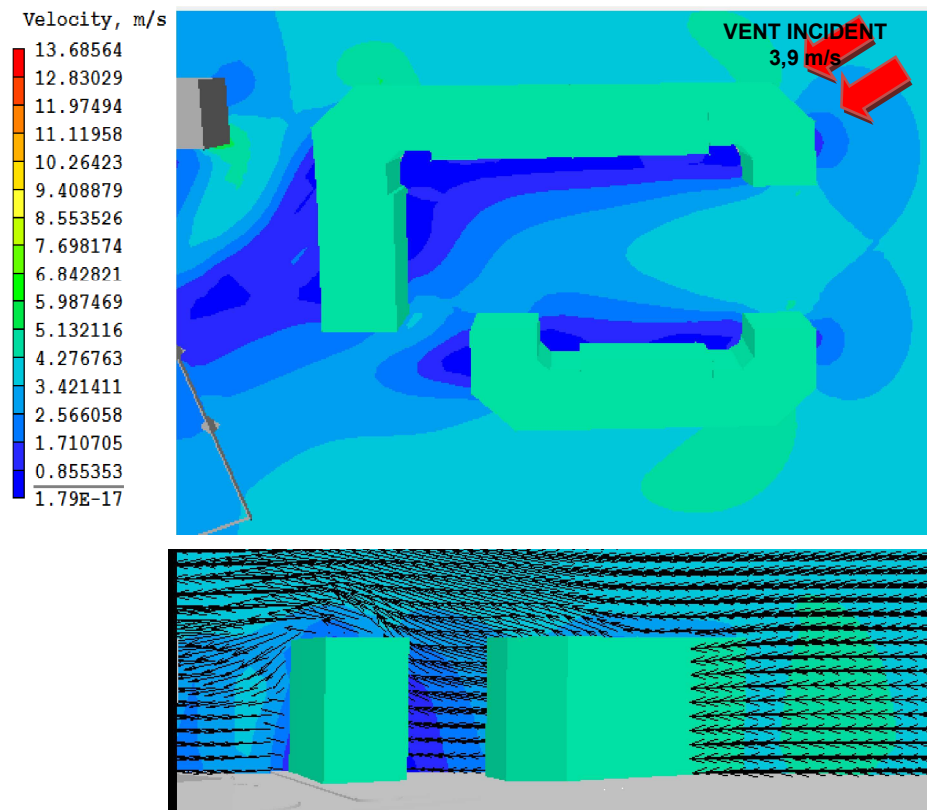


Figure 6.5: Simulation des écoulements du vent pour l'îlot A, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

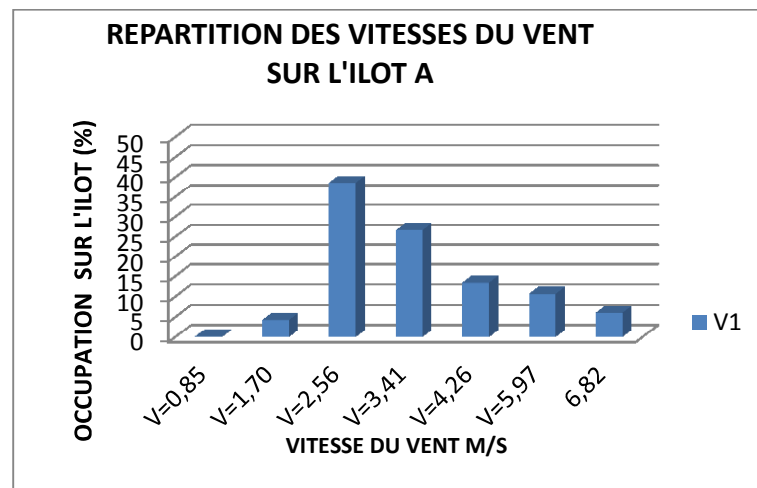


Figure 6.6: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot A, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

La figure 6.5, indique des valeurs d'occupation des champs de vitesse élevées pour la « classe 3 » avec un taux de 40,13%; d'autre part des valeurs très faibles pour la « classe 1 » de l'ordre de 4,44%, et 6,08% pour la « classe 5 ».

L'îlot B : Le vent incident induit des surventes importantes au niveau des ouvertures de l'îlot, ces vitesses perdent de leur intensité dans les zones sous le vent. La zone de protection au vent située dans les sillages des bâtiments est bordée par des zones où le gradient de vitesse du vent est important, ce sont les couches de cisaillement, qui prolongent l'effet de coin à l'arrière des bâtiments. Des zones d'inconfort pour les piétons apparaissent aux points de séparation entre le flux d'air contournant le bâtiment et la zone protégée à l'arrière de celui-ci.

Elles s'expliquent par la position des ouvertures de l'îlot. L'espacement entre les blocs peut engendrer un effet de double coin. Les espaces entre les bâtiments sont souvent des accélérateurs de vent. **(Figure 6.7).**

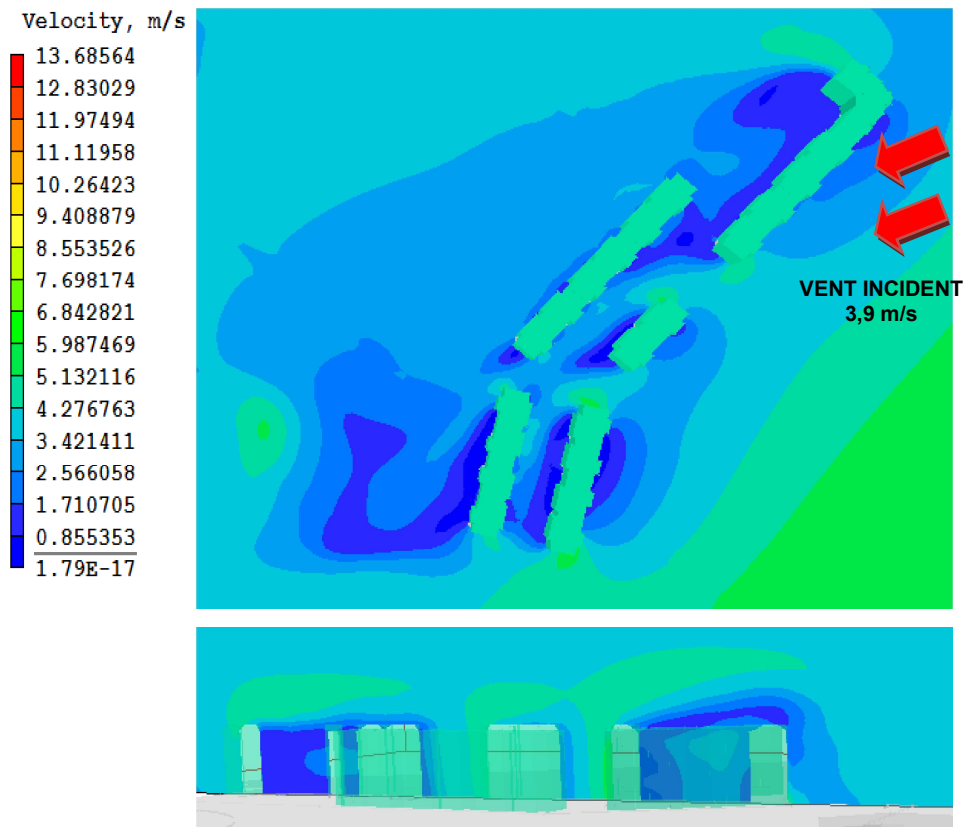


Figure 6.7: Simulation des écoulements du vent pour l'îlot B, à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

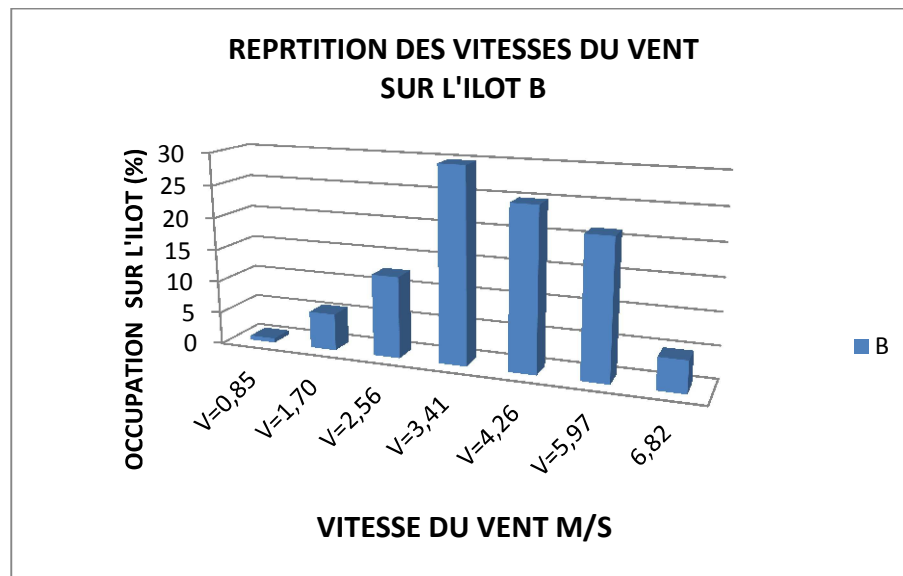


Figure 6.8: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot B, à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

Les valeurs d'occupation des champs de vitesse sur l'îlot B, indiquent la dominance de la « classe 3 » avec un taux de 54,76%; d'autre part les valeurs les plus faibles, sont enregistrés pour la « classe 1 » avec un taux de 6,53%, et 4,91% pour la « classe 5 ». (Figure 6.8).

L'îlot C : l'écoulement en amont est perturbé par les masques formés par les bâtiments voisins et d'autre par la faible porosité de la façade sud de l'îlot qui forme un angle presque droit avec l'axe du vent, ce qui réduisent ainsi la vitesse du vent incident. Les zones de surventes apparaissent au niveau des coins des bâtiments et des espaces près des ouvertures entre les blocs. Cependant, les zones de faibles vitesses se trouvent l'intérieur de l'îlot. (Figure 6.9).

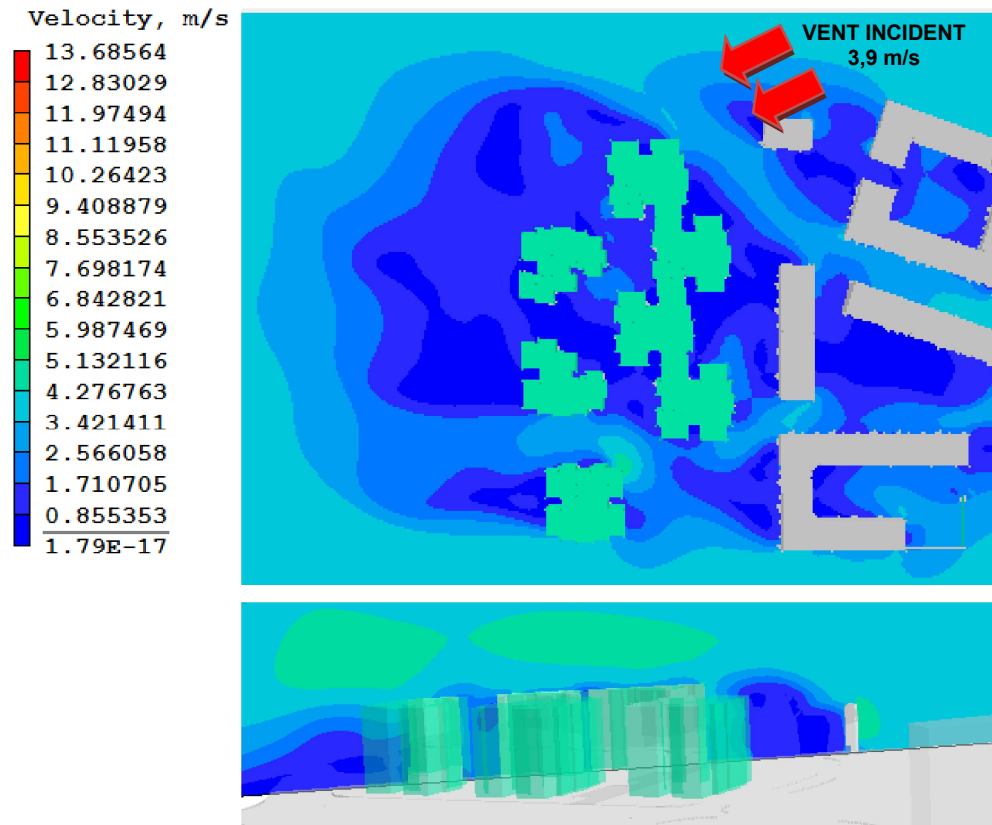


Figure 6.9: Simulation des écoulements du vent pour l'îlot C, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

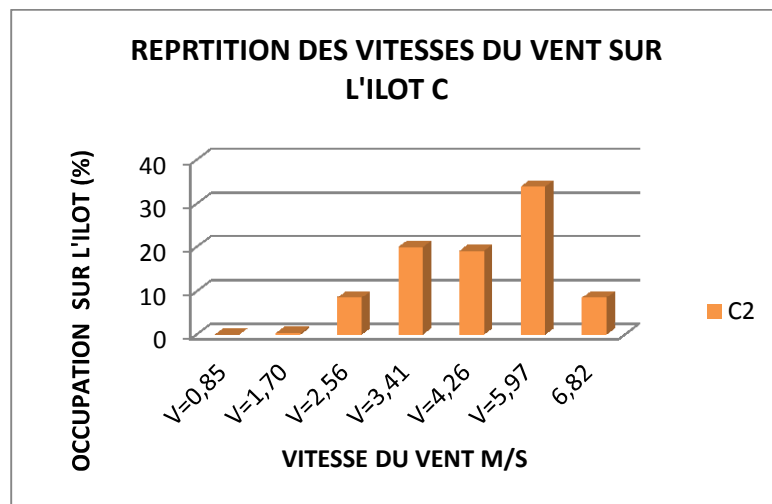


Figure 6.10: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot C, à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

La **figure 6.10**, indique des valeurs d'occupation des champs de vitesse élevées pour la « classe 3 » avec un taux de 39,09%. Par contre des valeurs très faibles ont été enregistrée pour la « classe 1 » de l'ordre de 0,34% et « La classe 5 » avec un taux de 8,53%.

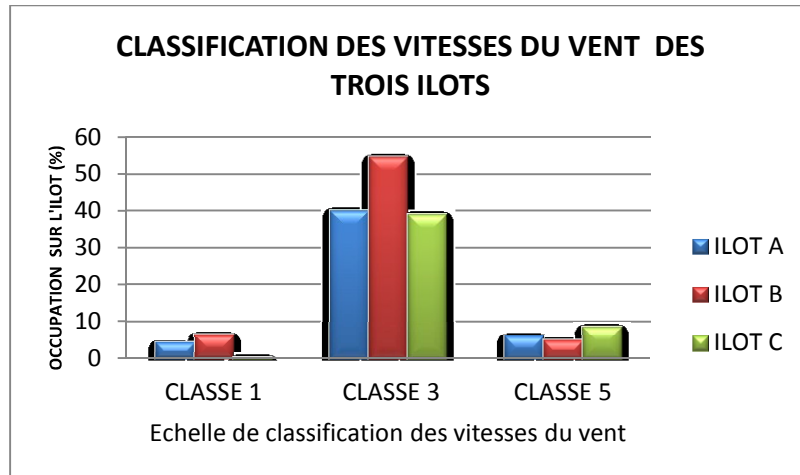


Figure 6.11: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les trois îlots. Source: (Auteur, 2016).

D'après les résultats la **figure 6.11**, on peut distinguer que « l'îlot B » représente les meilleures conditions en matière d'occupation de surface par des vents à des vitesses confortables et qui peut être efficaces en matière de ventilation.

6.2.3 ANALYSE DES EFFETS

6.2.3.1 Effets de « Ouverture /Fermeture » de l'îlot

Type A

Classe « n1 »

Il semble que la vitesse du vent ne varie pas seulement en fonction de l'ouverture de l'îlot, mais aussi de sa disposition par rapport à la direction du vent. (**Figure 6.12**). Par ailleurs, l'examen des résultats indique une amélioration des champs des vitesses « classe 3 » relatif à l'échelle d'évaluation, par rapport à la situation de référence (Ilot A). (**Figure 6.14**). La variante « A10 », représente la valeur la plus élevée, tandis que la plus faible, concerne la variante « A13 ». Cela peut être expliqué du fait que la partie sud de l'îlot contient moins d'obstacle.

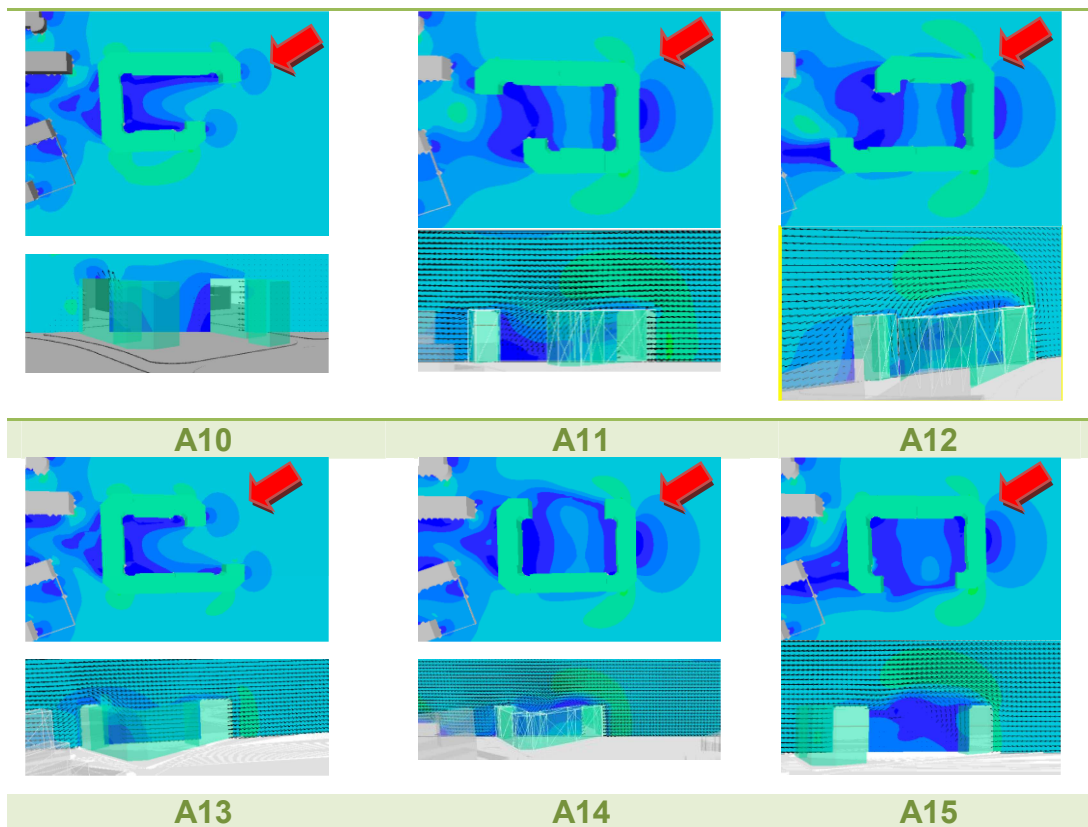


Figure 6.12: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type A (Classe n1), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

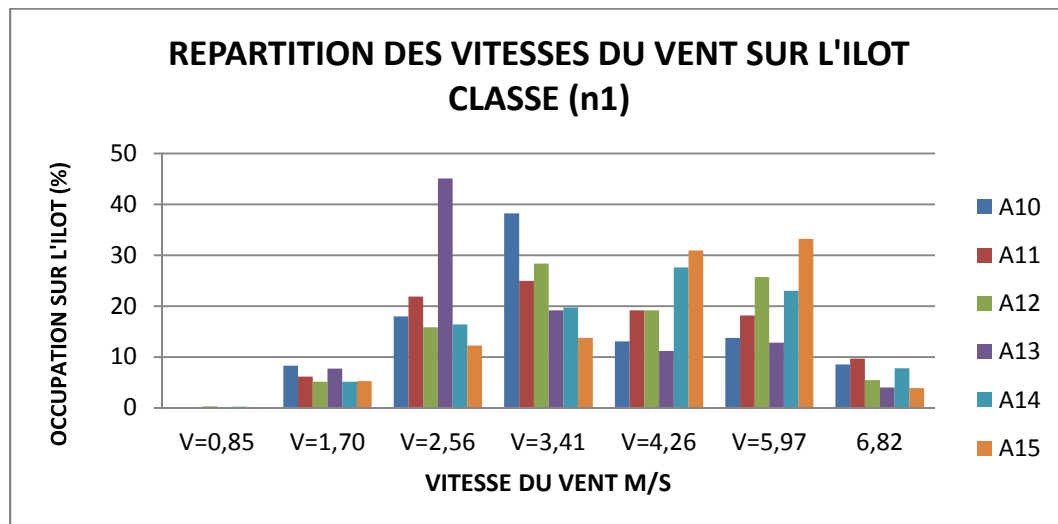


Figure 6.13: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour plusieurs variantes de type A (Classe n1), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

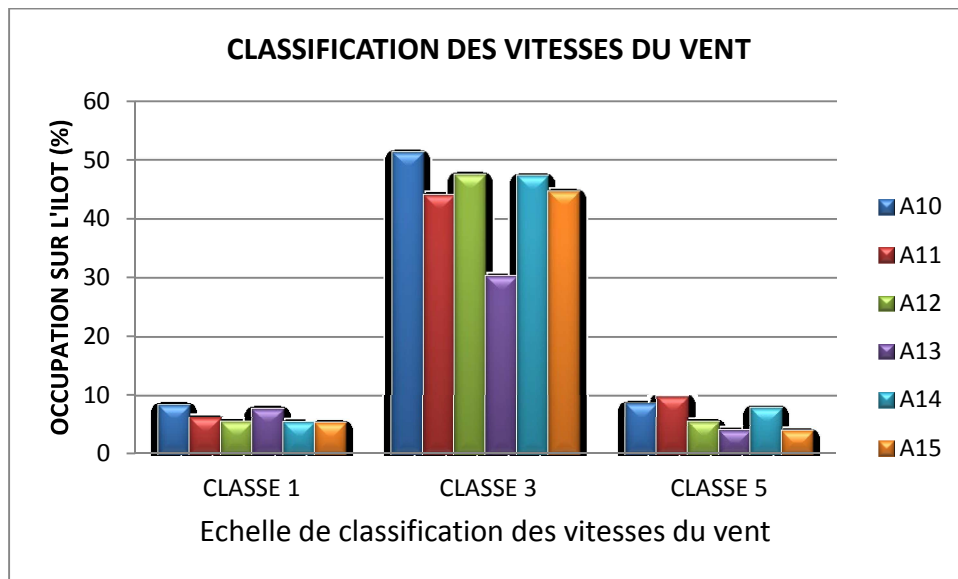


Figure 6.14: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les ilots. Source: (Auteur, 2016).

Classe « n2 »

L'examen des résultats indique une modification des champs des vitesses par rapport à la situation de référence (Ilot A), mais aussi par rapport aux variantes de la classe « n1 ». (Figure 6.15). Les variantes A1, A5, A6 et A7, représente les meilleurs valeurs. Cela peut être expliqué par l'effet de canalisation pour les variantes A1 et A5, du fait que leurs ouvertures se trouvent parallèlement avec le couloir du vent. D'autre part, pour les variantes A6 et A7, **une déviation en vrille de l'écoulement en contact avec leurs façades sud selon une incidence approximative de 45 degrés.** Derrière cet obstacle la vitesse de l'écoulement est accélérée.

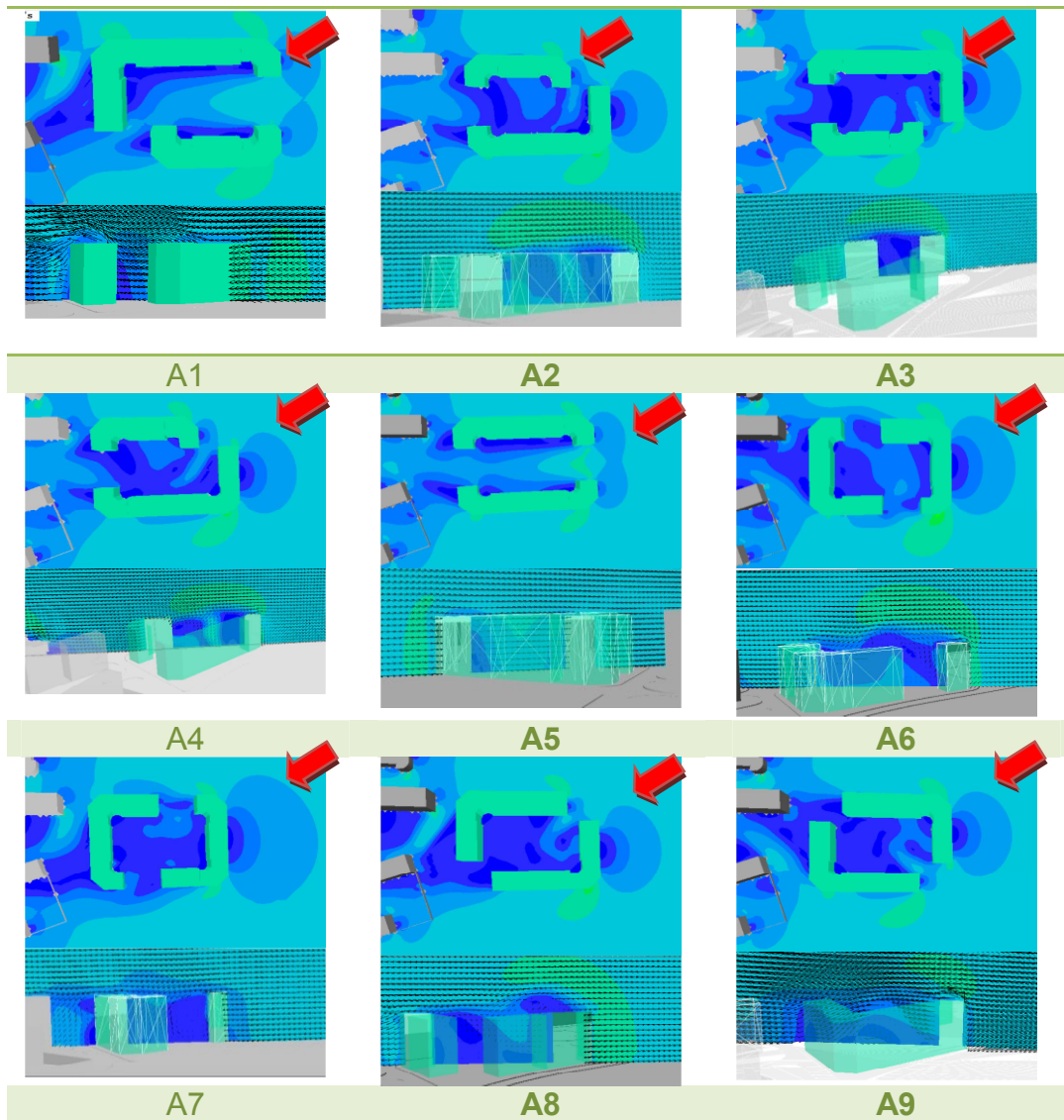


Figure 6.15: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type A (Classe n2), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

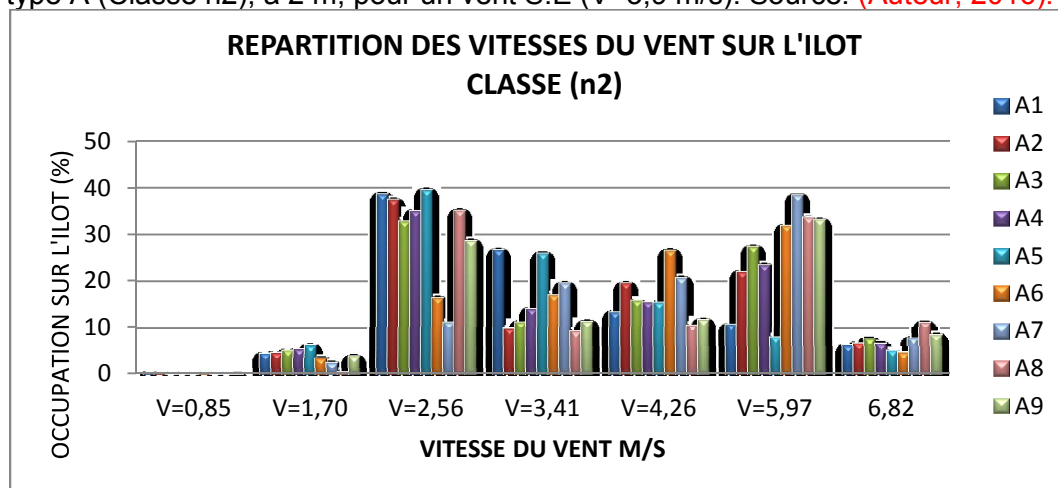


Figure 6.16: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type A (Classe n2), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

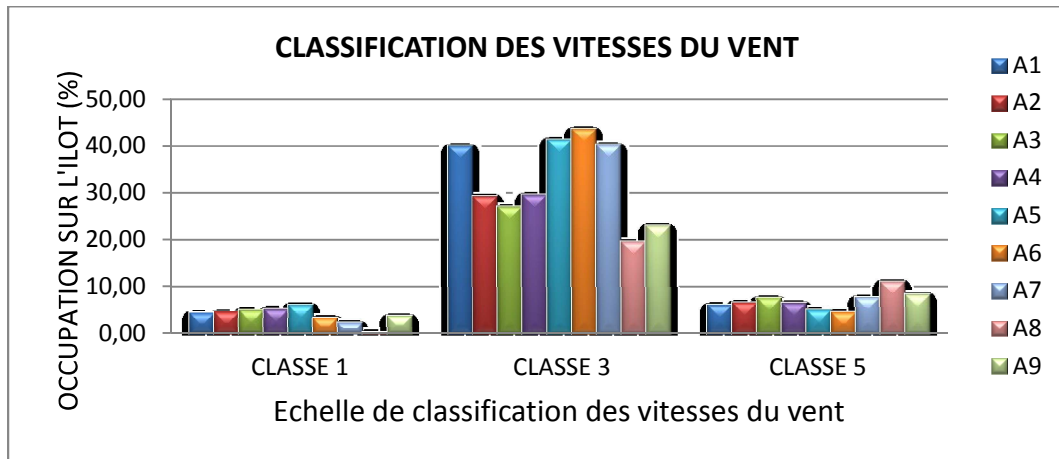


Figure 6.17: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les ilots. Source: (Auteur, 2016).

Classe « n4 »

L'examen des résultats indique une amélioration des champs des vitesses « classe 3 » relatif à l'échelle d'évaluation, par rapport à la situation de référence (Ilot A), mais aussi par rapport aux autres variantes. (Figures 6.18-6.19-6.20). Il semble que, le nombre des ouvertures de l'ilot ainsi que leurs emplacements, jouent un rôle remarquable dans améliorations de l'écoulement du vent.

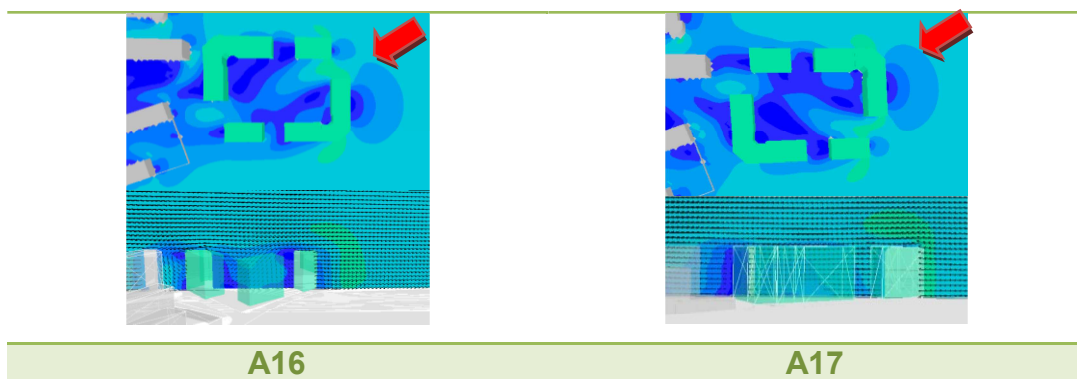


Figure 6.18: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type A (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

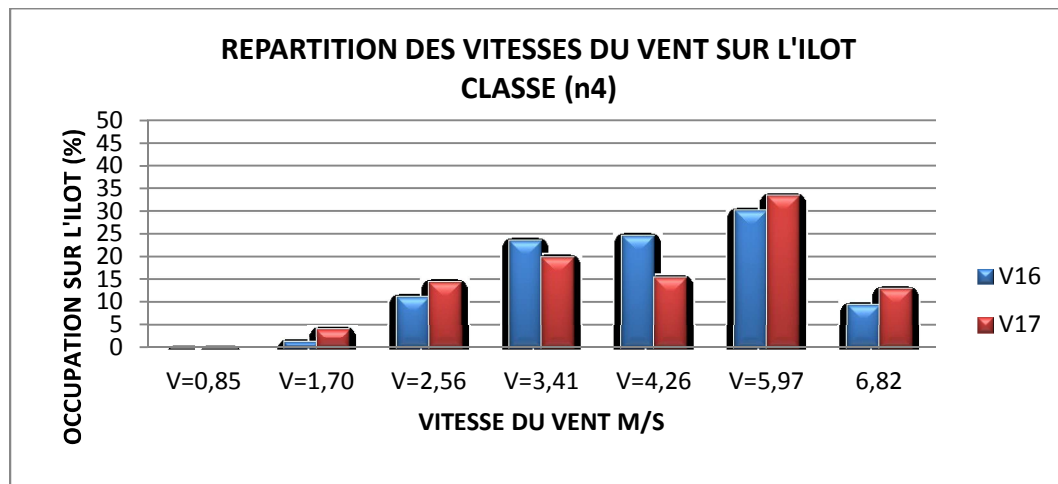


Figure 6.19: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour plusieurs variantes de type A (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

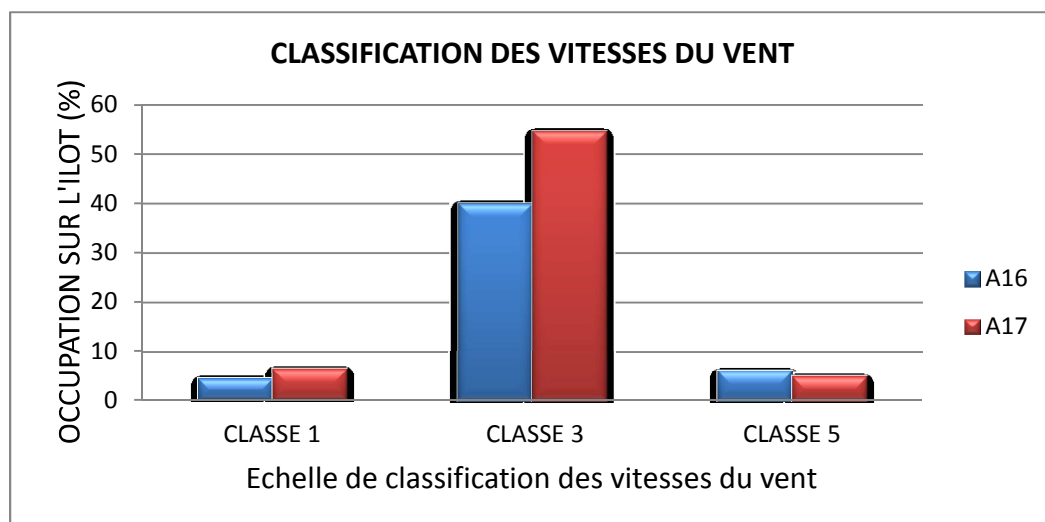


Figure 6.20: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les ilots. Source: (Auteur, 2016).

Classe « np »

La mise sur pilotis de l'ensemble des bâtiments a créé un « **effet de passage sous immeuble** », reliant l'avant des bâtiments, en surpression et leurs arrières en dépression. Le vent s'accélère alors en s'engouffrant au travers de ces ouvertures reliant la façade au vent et la façade sous le vent. Ce qui a induit de très hautes vitesses de vent à travers celles-ci. (Figure 6.21).

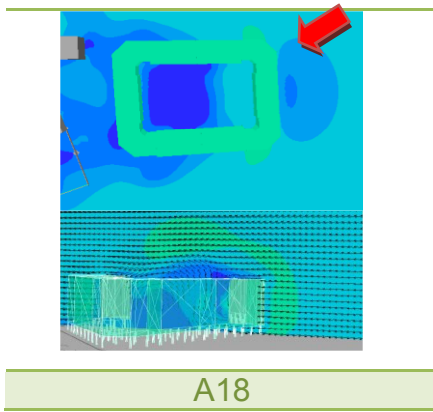


Figure 6.21: Simulation des écoulements du vent pour variante de type A (Classe np), à 2 m, pour un vent S.E (S=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

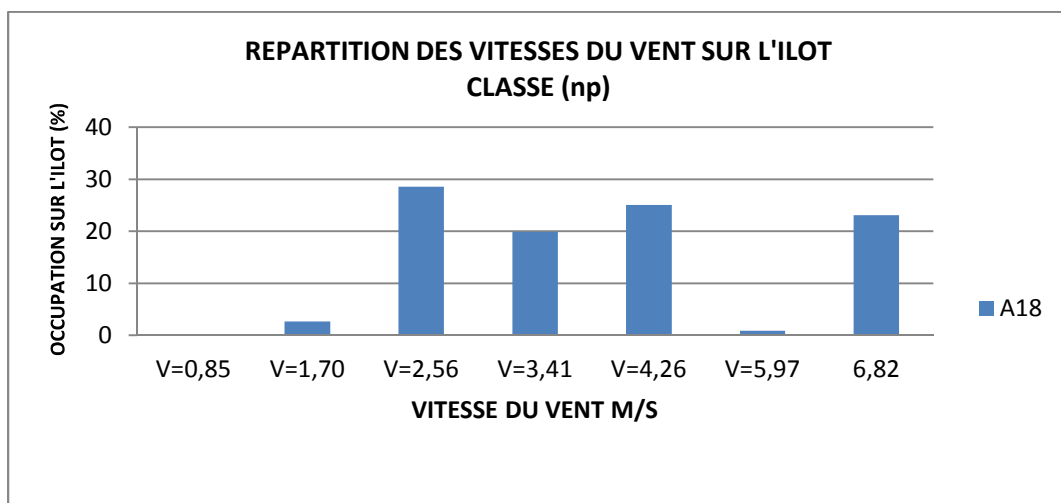


Figure 6.22: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour variante de type A (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

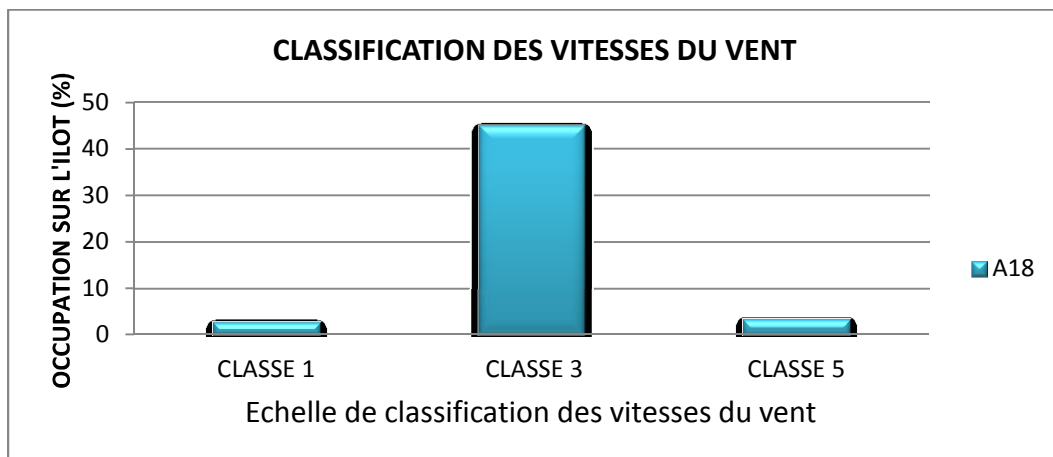


Figure 6.23: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: (Auteur, 2016).

Type B

L'examen des résultats indique une amélioration des champs des vitesses par rapport à la situation de référence (Ilot B), mais aussi entre variantes. Les variantes B2, B4, B6, B8 et B9, représentent les meilleures valeurs. Cela peut être expliqué par l'effet d'une déviation en vrille de l'écoulement en contact avec leurs façades au vent selon une incidence approximative de 80 degrés. Derrière cet obstacle la vitesse de l'écoulement est accélérée. La porosité de la façade au vent, jouent un rôle remarquable, le vent s'accélère alors en s'engouffrant au travers de ces ouvertures reliant la façade au vent et la façade sous le vent. L'écoulement est aussi influencé par la forme de la rue. Un effet de coin au point de déviation de la rue a pour incidence de créer une zone de survitesse importante aux arêtes du bâtiment.

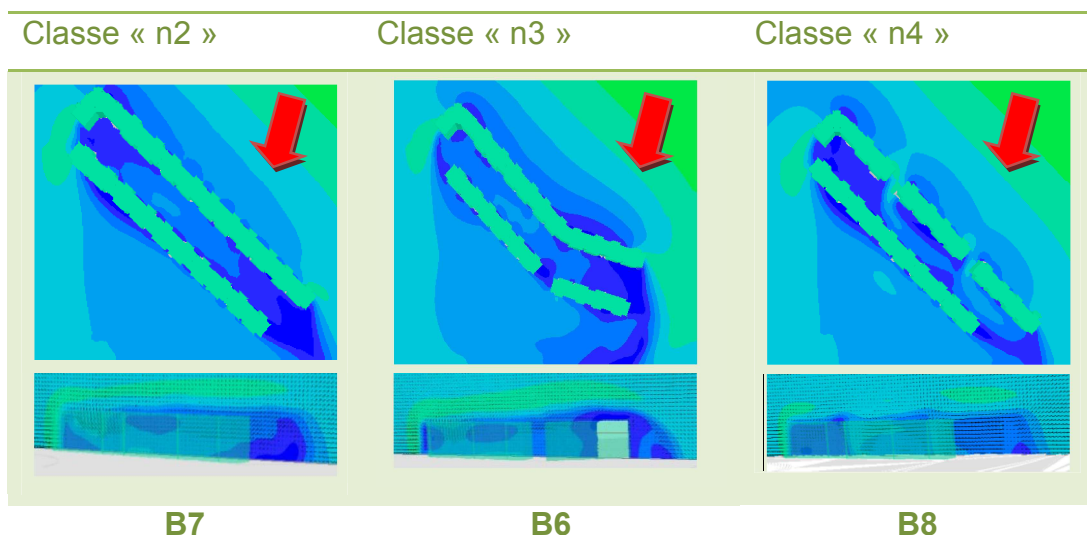


Figure 6.24: Simulation des écoulements du vent pour variante de type B (Classe n2 ; n3 et n4), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

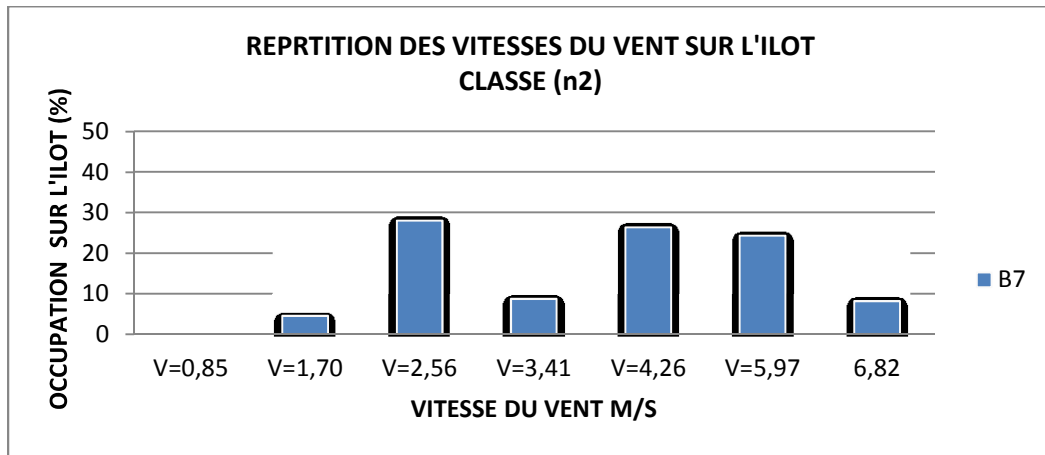


Figure 6.25: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour variante de type B (Classe n2), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: l'auteur, (2016).

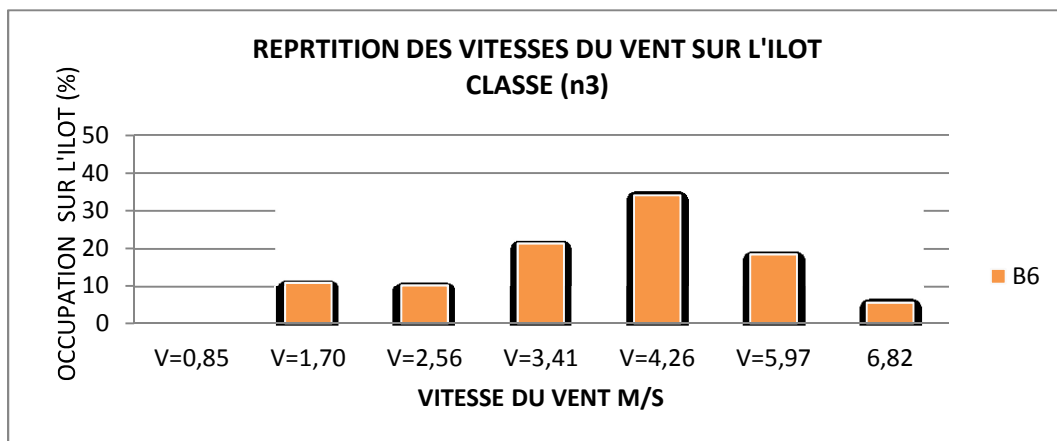


Figure 6.26: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour variante de type B (Classe n3), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

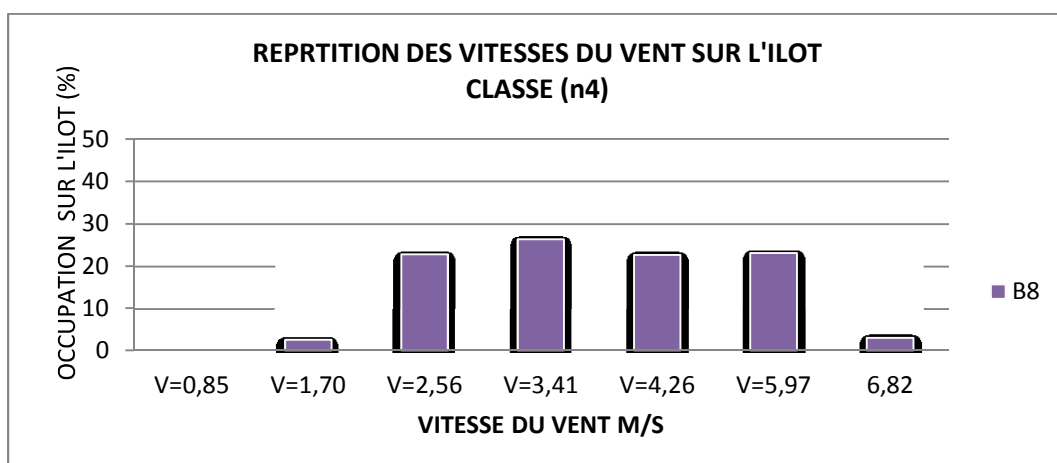


Figure 6.27: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour variante de type B (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

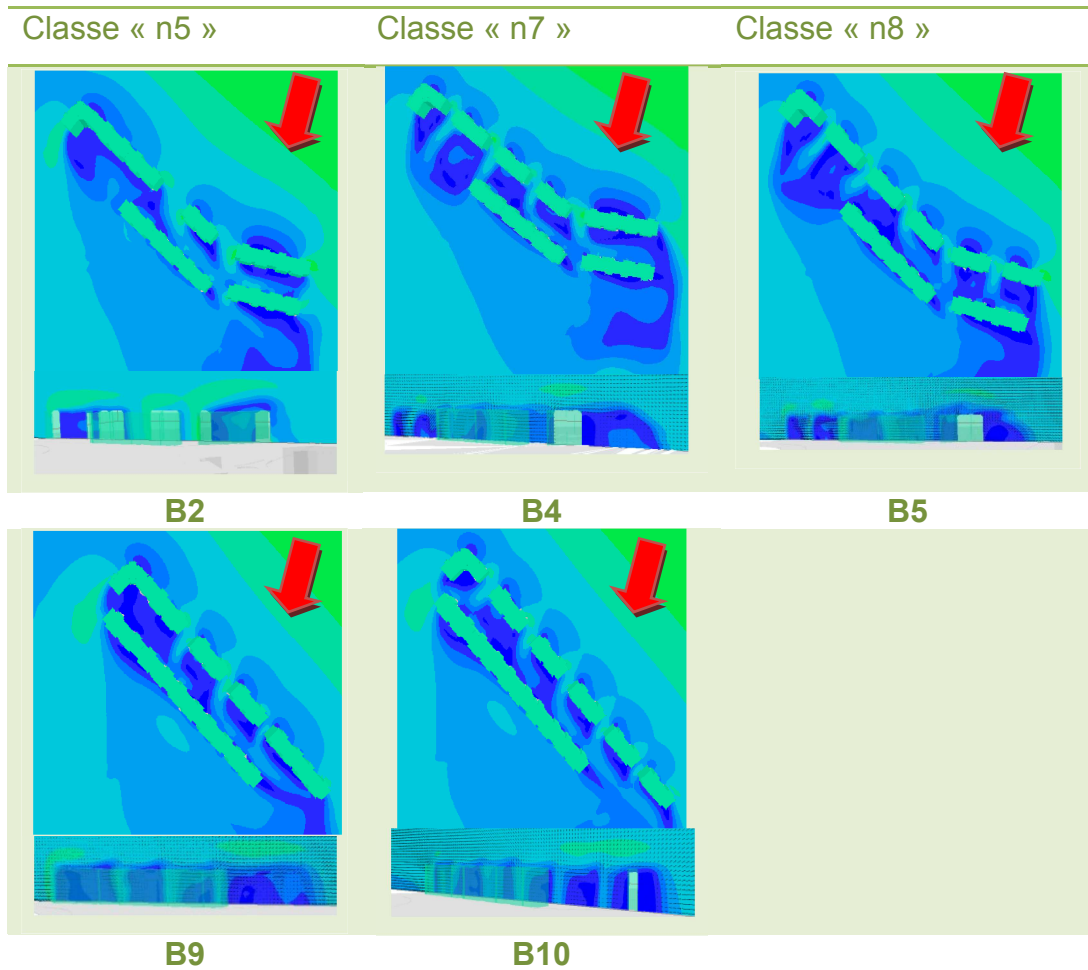


Figure 6.28: Simulation des écoulements du vent pour variante de type B (Classe n5 ; n7 et n8), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

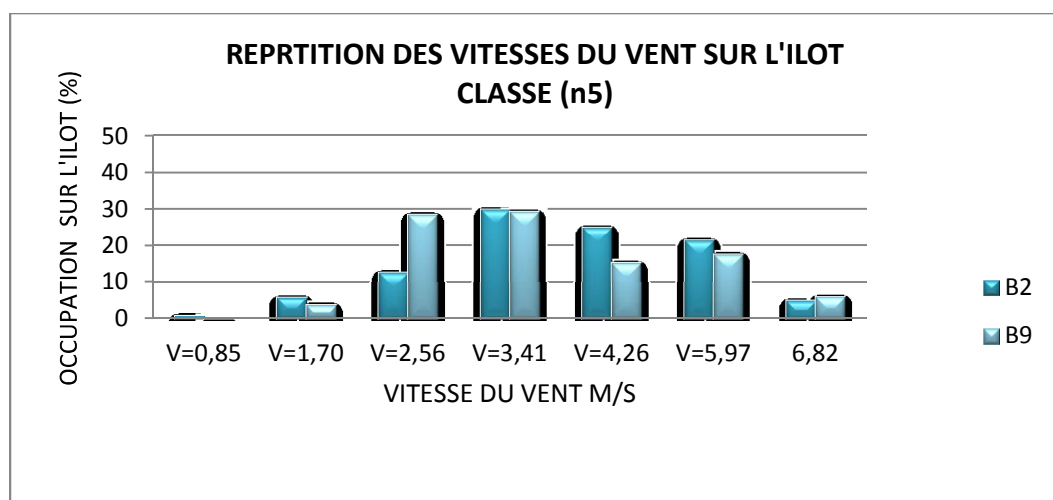


Figure 6.29: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type B (Classe n5), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

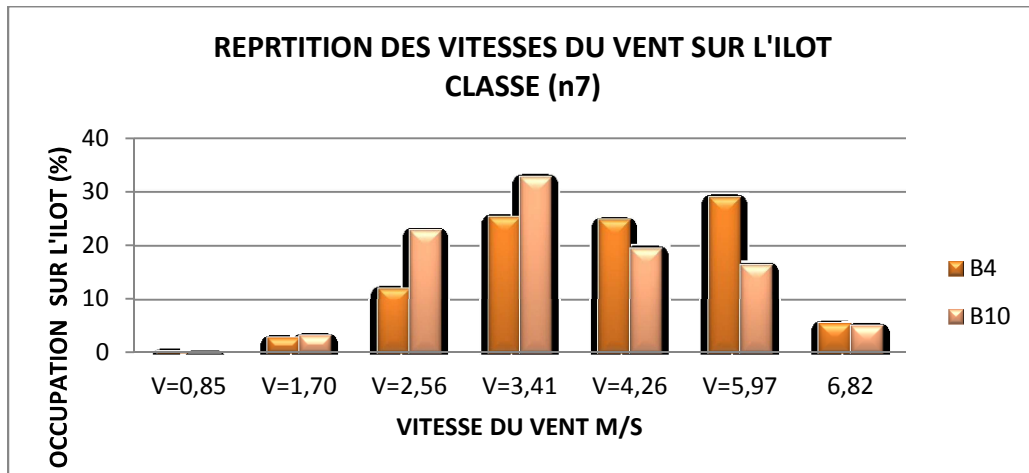


Figure 6.30: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour plusieurs variantes de type B (Classe n7), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

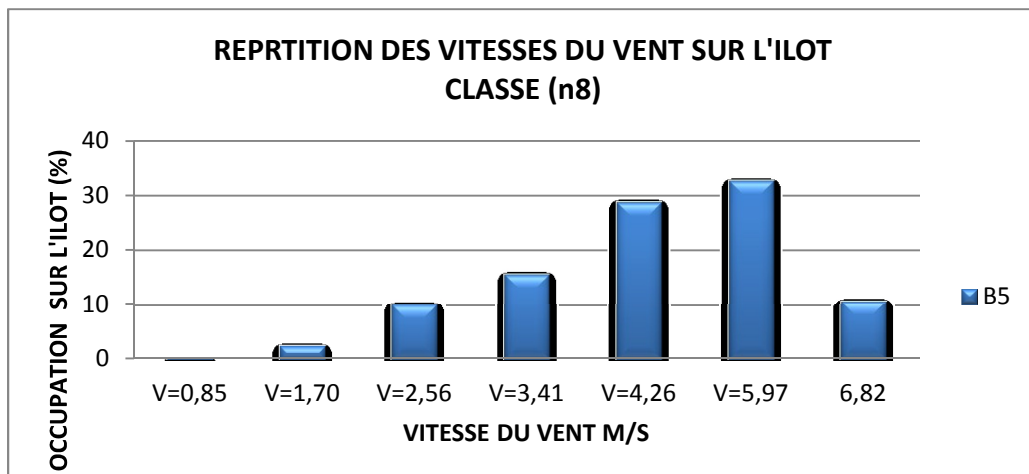


Figure 6.31: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour variante de type B (Classe n8), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

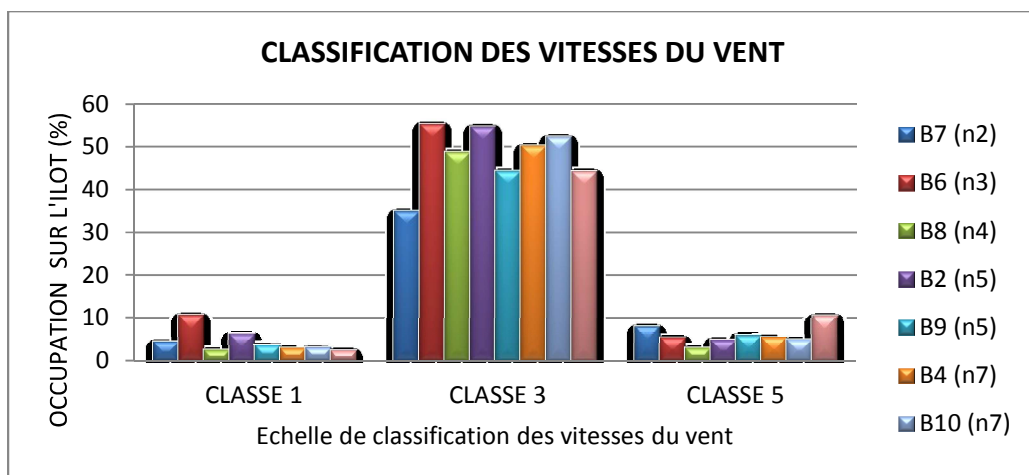


Figure 6.32: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les ilots. Source: (Auteur, 2016).

Type C

L'examen des résultats indique une amélioration des écoulements du vent par rapport à la situation de référence (Ilot C), mais aussi entre variantes. (Figures : 6.32 ; 6.33). Les variantes : C2, C3, C4 et C5 présentes les meilleures valeurs en « classe 3 » relatif à l'échelle d'évaluation. Cela peut être expliqué par l'influence de la porosité de la façade au vent, qui joue un rôle remarquable, le vent s'accélère alors en s'engouffrant au travers de ces ouvertures reliant la façade au vent et la façade sous le vent. L'écoulement est aussi influencé par les retraits des bâtiments, induisant ainsi des effets de coins créant des zones de survitesses importantes aux arêtes des bâtiments.

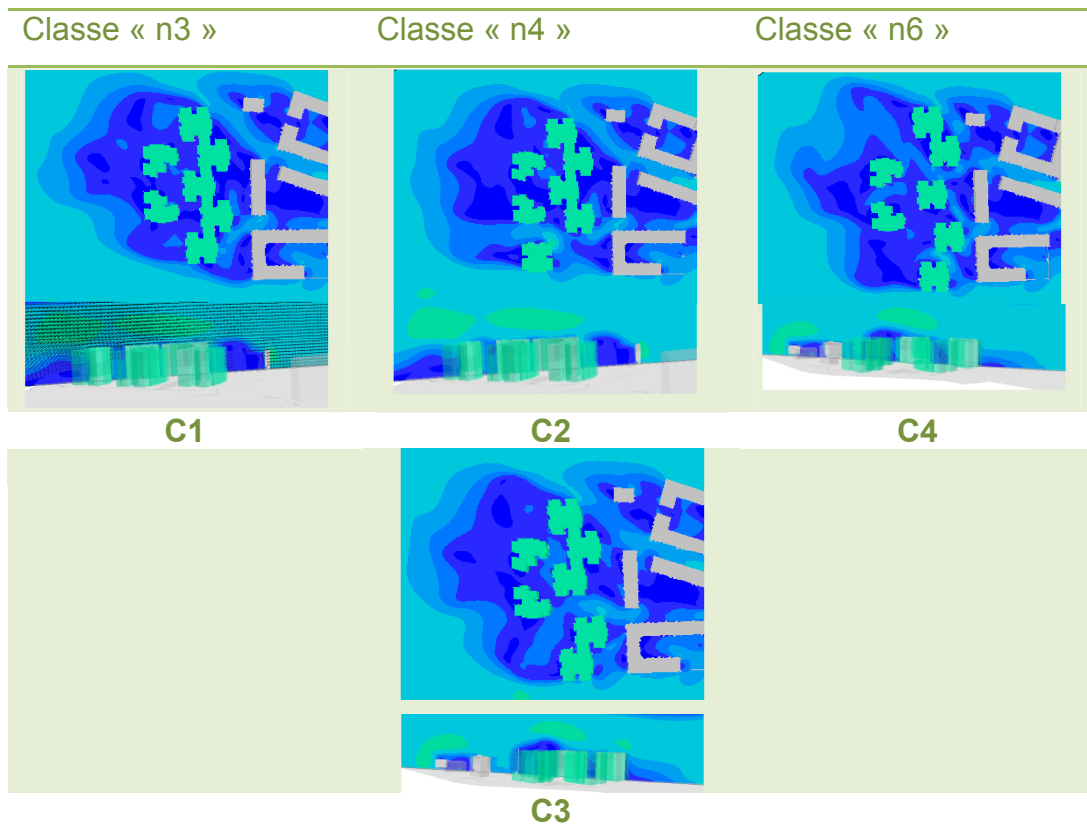


Figure 6.33: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type C (Classe n3 ; n4 et n6), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

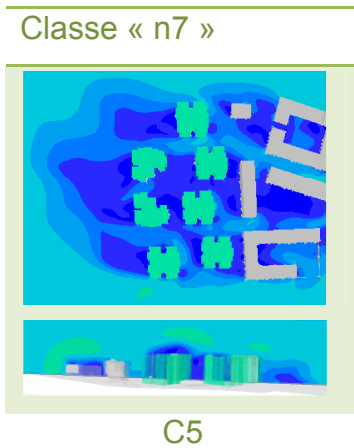


Figure 6.34: Simulation des écoulements du vent pour variante de type C (Classe n7), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

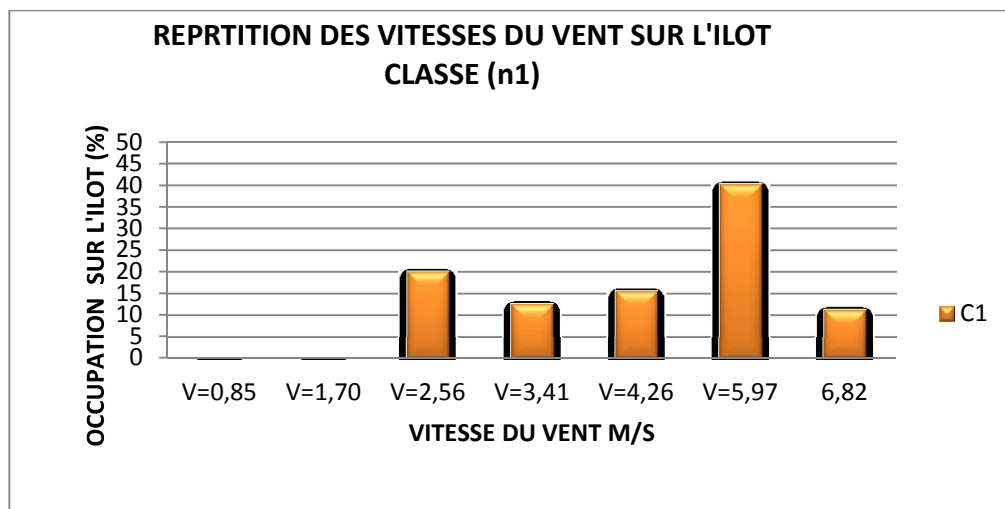


Figure 6.35: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour variante de type C (Classe n1), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

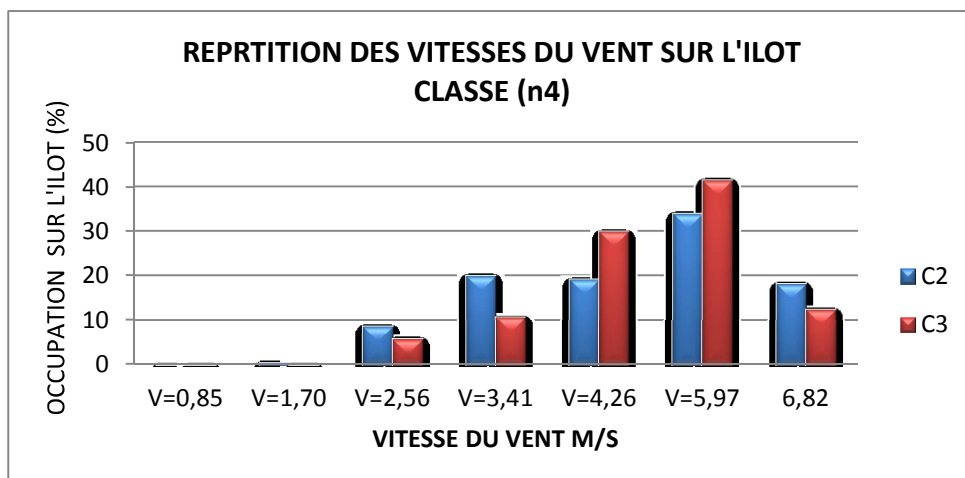


Figure 6.36: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour plusieurs variantes de type C (Classe n4), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

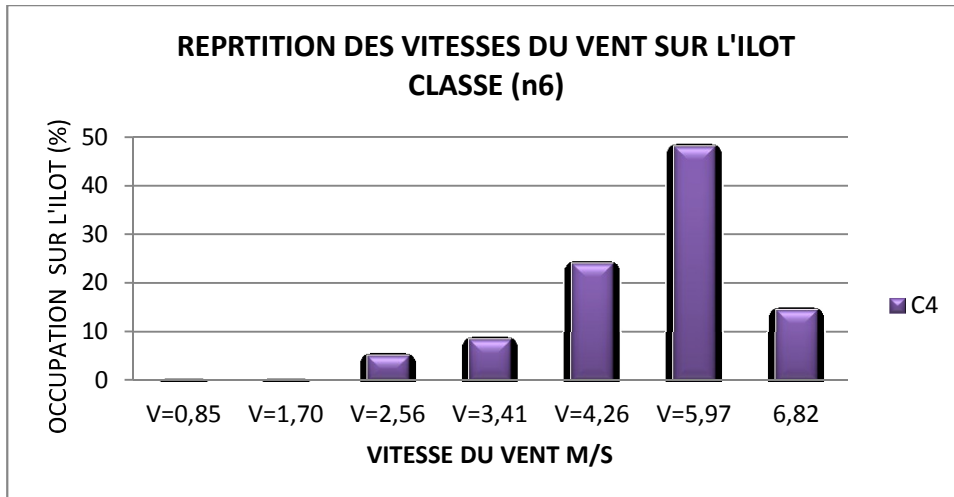


Figure 6.37: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type C (Classe n6), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

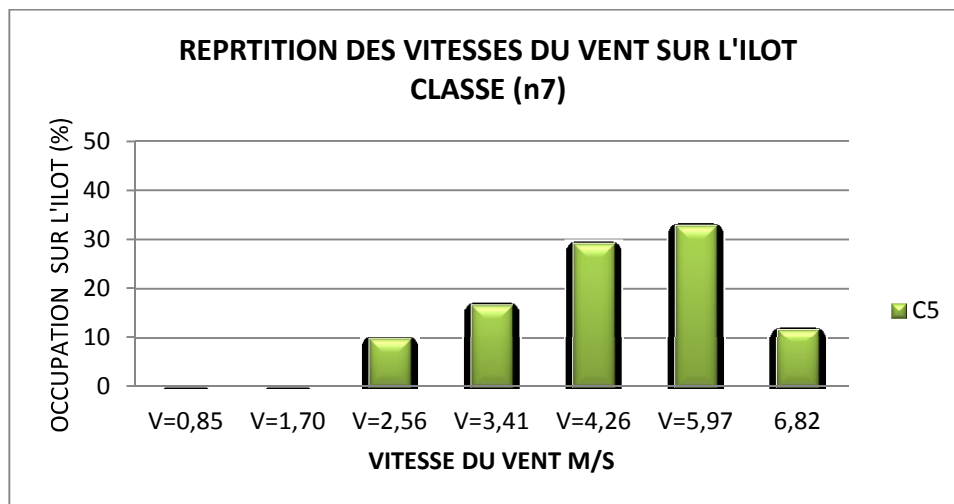


Figure 6.38: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type C (Classe n7), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

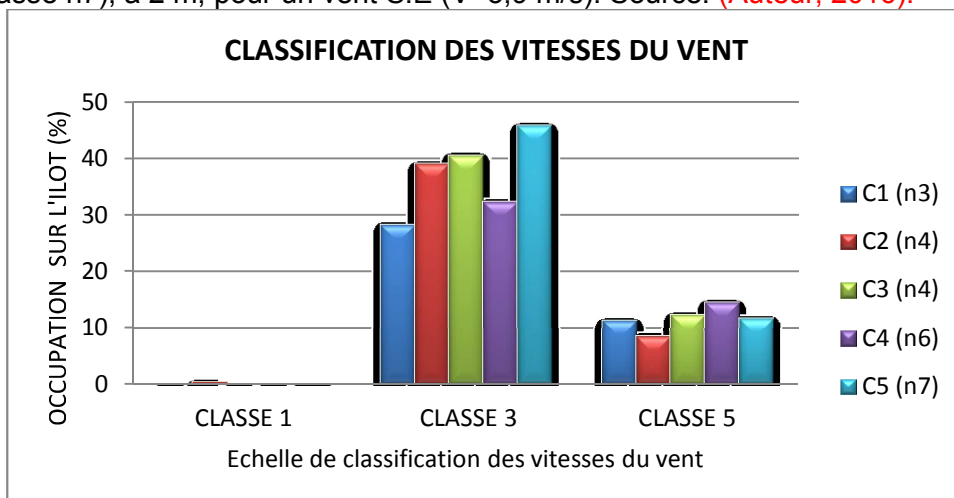


Figure 6.39: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: (Auteur, 2016).

6.2.3.2 Effets du rapport d'aspect (H/W)

Type B

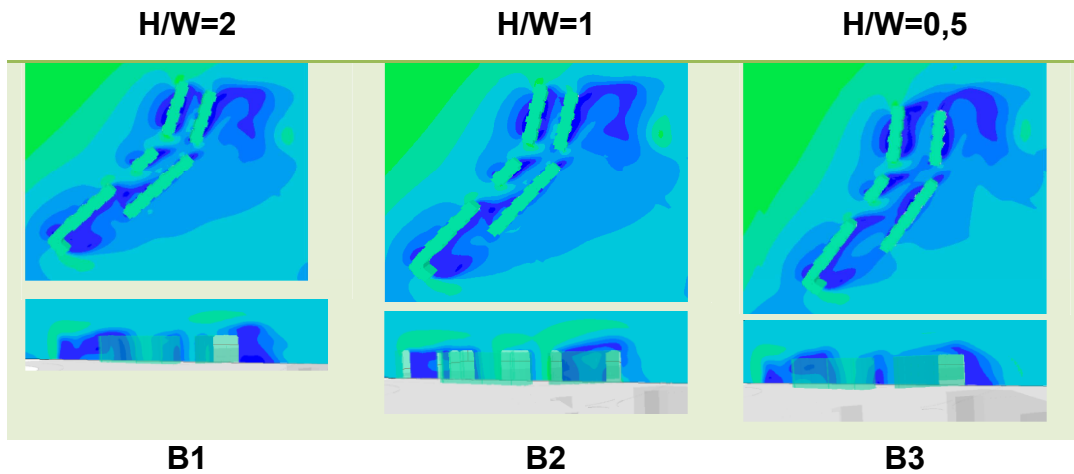


Figure 6.40: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type B (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

L'examen de la **figure 6.40**, nous renseigne que l'écoulement du vent pour les trois variantes B1 ; B2 ; et B3, est presque identique en basant sur l'échelle de classification ; en particulier, les valeurs de la « classe1 ». Bien que les variations du rapport d'aspect (H/W) entraînent des modifications sur les champs des vitesses relatives à la « classe 3 » (V=3,41 m/s ; V=4,26 m/s). **Figure 6.41**. Lorsque « H/W » diminue, le taux d'occupation par « V=3,41 m/s » diminue ; et le taux d'occupation par « V=4,26 m/s » augmente. **Figure 6.40**.

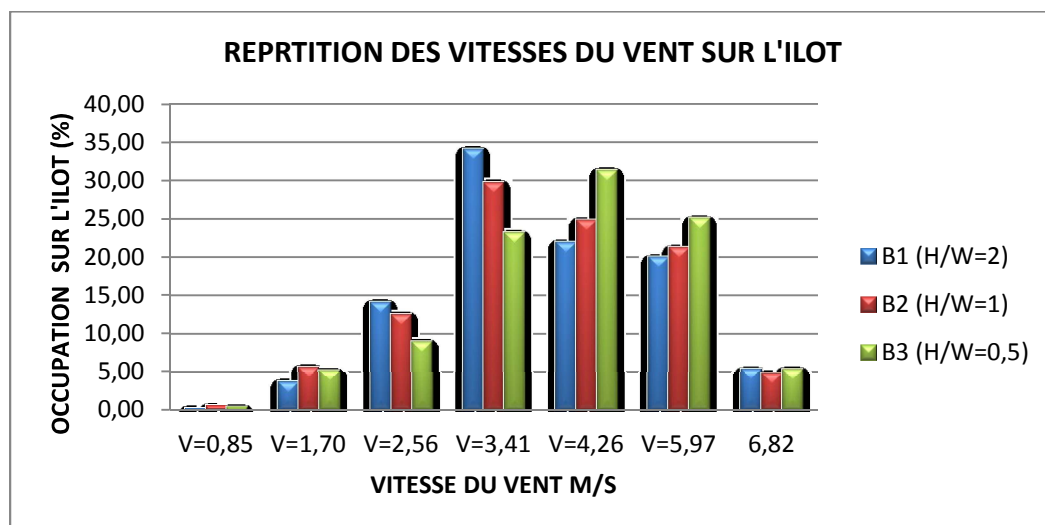


Figure 6.41: Répartition des vitesses du vent sur l'ilot, pour plusieurs variantes de type B (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

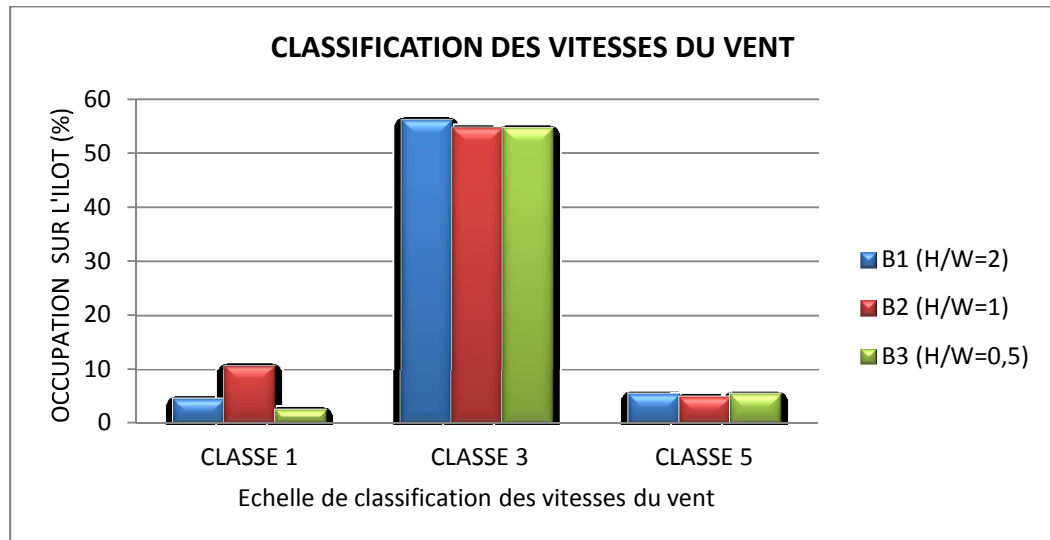


Figure 6.42: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les ilots. Source: (Auteur, 2016).

Type C

L'écoulement du vent pour les trois variantes C6 ; C7 ; et C8, représentant des rapports d'aspect différents, est légèrement modifié. (Figure 6.43). En basant sur l'échelle de classification ; en particulier, les valeurs de la « classe3 », la variante « C7 », avec un rapport d'aspect ($H/W=1$) représente les meilleurs résultats avec un taux qui dépasse 62%. Bien qu'il soit observable que la diminution du rapport d'aspect peut engendrer des survitesses. Figure 6.44.

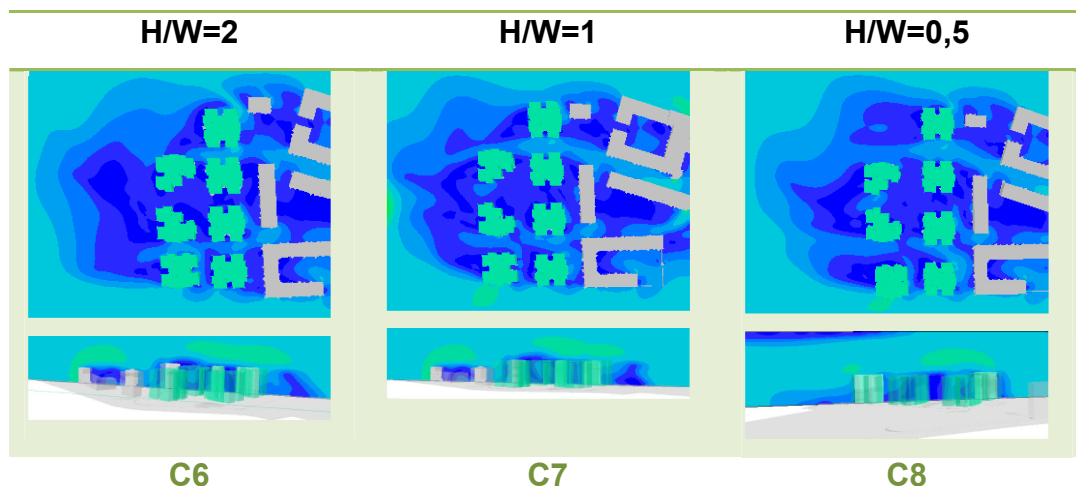


Figure 6.43: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type C (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E ($V=3,9$ m/s). Source: (Auteur, 2016).

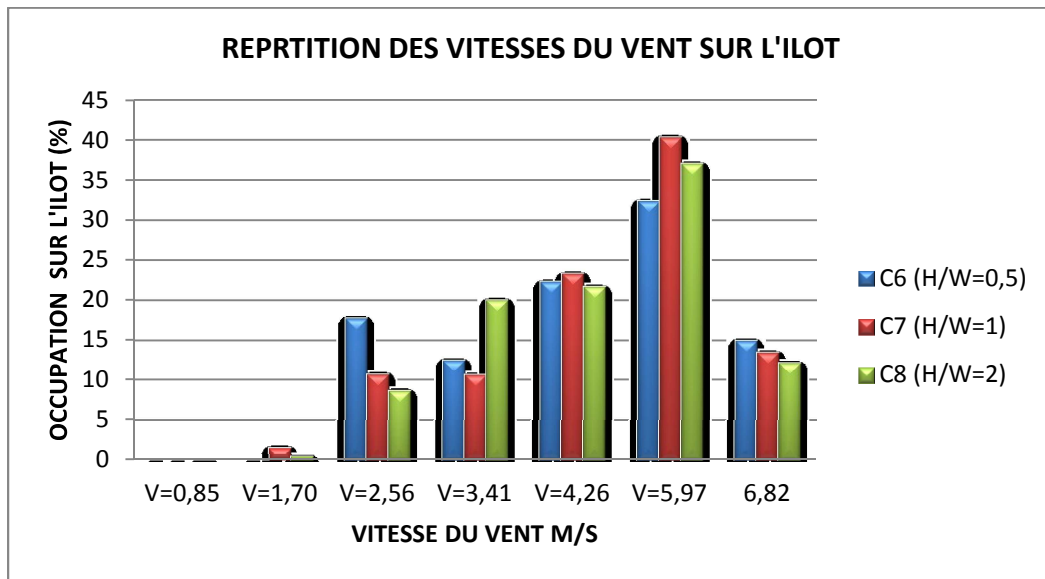


Figure 6.44: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour plusieurs variantes de type C (Variation H/W), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

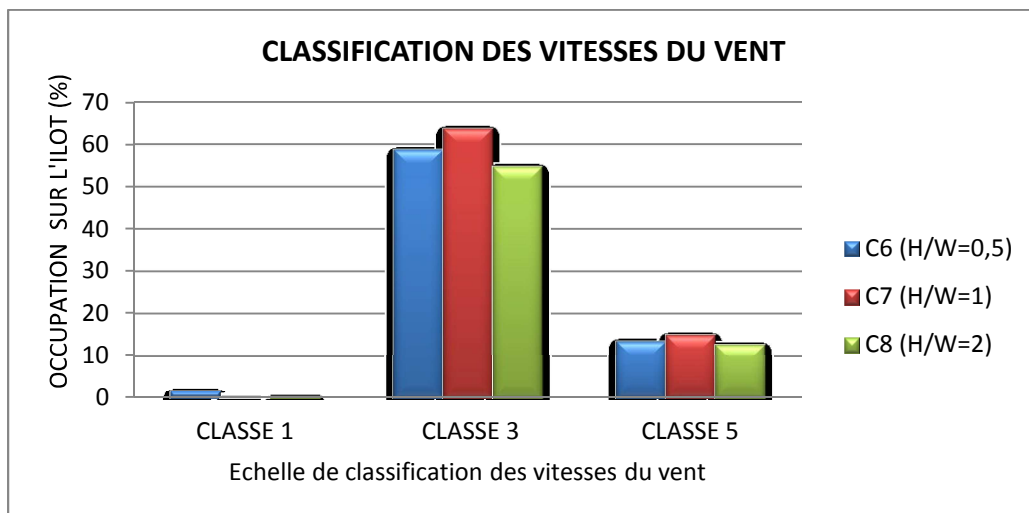


Figure 6.45: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: (Auteur, 2016).

6.2.3.3 Effets de l'orientation des bâtiments

Type C

L'examen de la **figure 6.46**, indique une modification de l'écoulement du vent entre les bâtiments et au cœur de l'îlot. Cela peut être justifié du fait que cette variation du profil des bâtiments a induit des décollements des filets fluides et la création de tourbillons. La zone de survitesse occupe alors une partie importante.

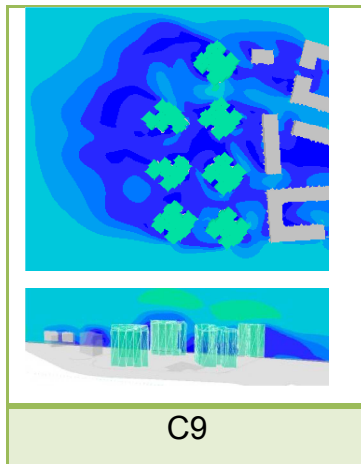


Figure 6.46: Simulation des écoulements du vent pour plusieurs variantes de type C (Variation d'orientation), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

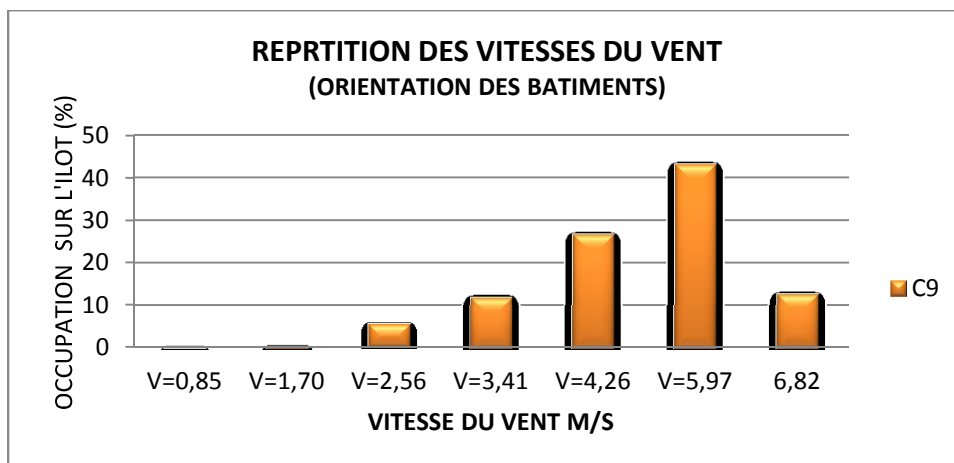


Figure 6.47: Répartition des vitesses du vent sur l'îlot, pour variante de type c (Variation d'orientation), à 2 m, pour un vent S.E (V=3,9 m/s). Source: (Auteur, 2016).

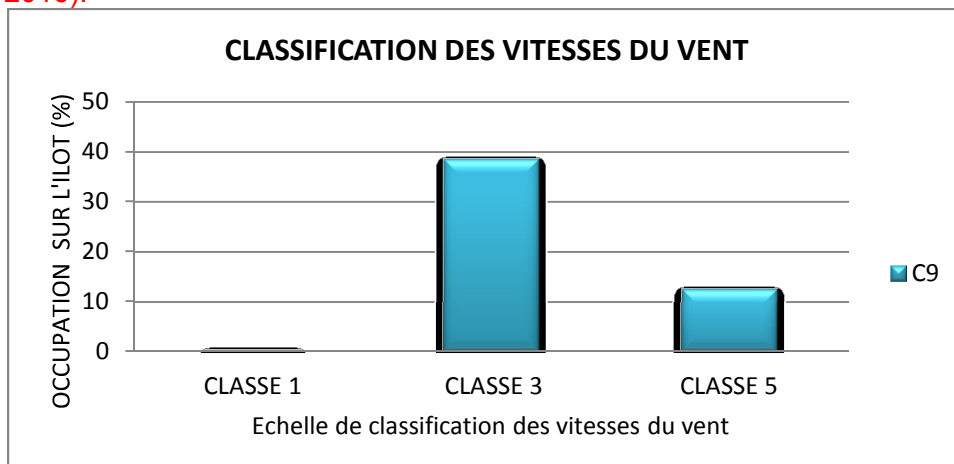


Figure 6.48: Classification des vitesses du vent selon leurs répartitions sur les îlots. Source: (Auteur, 2016).

6.2.4 Synthèse de l'analyse de l'écoulement du vent

Dans cette partie on a pu observer que la moindre modification dans la configuration urbaine modifie considérablement les écoulements du vent au sein de l'îlot urbain. L'accessibilité au vent dépend d'abord du tissu amont par rapport aux vents (présence de masque) et elle est, évidemment, plus difficile en milieu urbain. À l'échelle de l'îlot, le mode d'agencement des bâtiments (typologie), la porosité et l'orientation des façades par rapport aux vents et la disposition par rapport aux masques proches, ont des effets notables sur l'amélioration des conditions de ventilation urbaine.

Une étude aéraulique des configurations urbaines existantes permettra d'identifier les zones peu aérées et les zones d'inconforts. Le vent peut être redirigé à l'aide de plusieurs dispositifs architecturales ou urbains afin d'améliorer la ventilation et le confort des espaces extérieurs.

6.3 SIMULATION DE L'ENSOLEILLEMENT

6.3.1 Définition des paramètres d'entrée

Trois types de conditions sont nécessaires : les paramètres physiques de la géométrie modélisée, les paramètres géographiques et temporels et enfin les conditions météorologiques.

6.3.1.1 Les paramètres d'environnement

Les informations géographiques nécessaires aux simulations dans Solene sont la latitude et la longitude, pour Biskra : (Latitude: 34 ° 47'N., longitude: 5 ° 44'E).

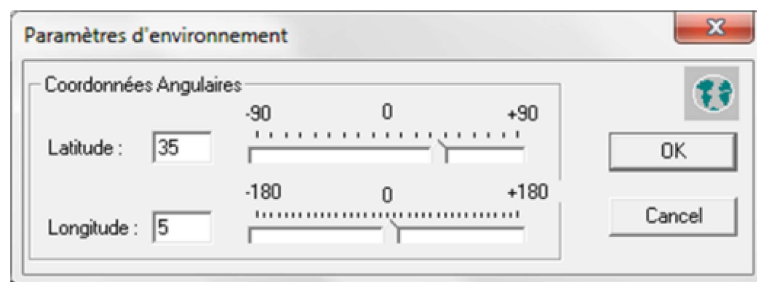


Figure 6.49 : Fenêtre de configuration des paramètres d'environnement utilisés dans Solene. Source : Solene

6.3.1.2 Période des simulations

Afin de caractériser le potentiel de l'ensoleillement d'une configuration urbaine, il a été proposé de calculer la durée d'insolation et la quantité d'énergie solaire globale, que peut recevoir cette partie sur une journée de référence. A Biskra, le jour le plus long est le 20 Juin avec 14:29 heures du jour; dans le même temps, l'énergie incidente sur le sol dépasse 600 Wh/m². Pour notre cas, nous avons choisi le 21 juin qui correspond au solstice d'été, comme journée représentative, et 12 H 00 le moment de la journée pour les simulations de l'ensoleillement.

6.3.1.2 Le type de ciel

La période choisie pour le déroulement des simulations, est caractérisée par un ciel clair. (**Figure 6.50**).

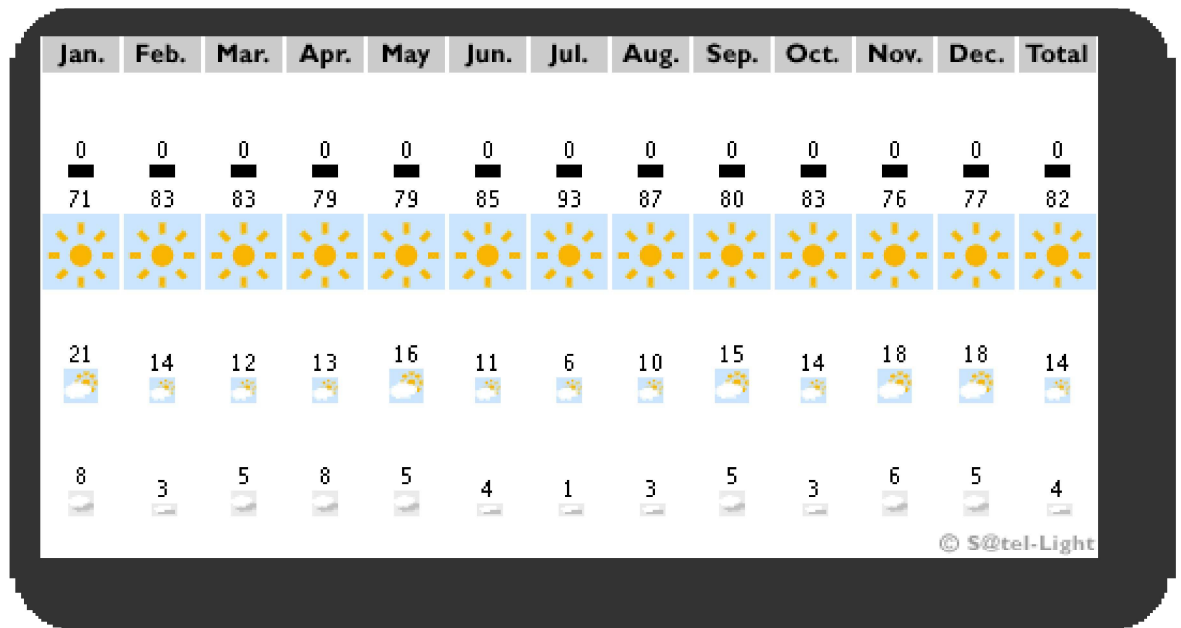


Figure 6.30. Types de ciel dominant pour la région de Biana, (1996-2000). Source : <http://www.satel-light.com>

6.3.1.3 La géométrie

La géométrie simulée a été modélisée par le logiciel « ArchiCad », puis transporté vers « SketchUp » qui permet l'importation sous format (.cir). La géométrie apparaît sous la forme d'un ensemble de faces planes adjacentes les unes aux autres. Chaque contour de face possède un certain nombre de descripteurs qui le définit. Par ailleurs, chaque face est associée à un matériau qui détermine son comportement radiatif et thermique.

6.3.1.4 Affectation des matériaux

Les matériaux sont définis dans une base de matériaux accessibles à l'utilisateur ; ils représentent les caractéristiques solaires (réflexion, émissivité) et physiques des matériaux (capacité thermique, conductance et masse volumique) des faces des géométries.

	coefficient	Surface en béton claire (Murs et toitures)	surface en dallage de béton (Sol)
Propriétés thermiques	Réflexion	0.9	0.9
	Conductance	0.9	0.75
	Masse volumique (kg/m ³)	2100	2300
	Capacité calorifique massique (J/kg)	870	960
Propriétés solaires	absorption	0.45	0.50
	réflexion	0.2	0.25
	transmission	0.35	0.25
Propriétés lumineuses	absorption	0.2	0.3
	réflexion	0.55	0.4
	transmission	0.25	0.3

Tableau 6.1 : Valeurs des paramètres physiques des matériaux utilisées pour les trois îlots représentatifs. Source : <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be>. Adopté de, (Mahaya, 2014)

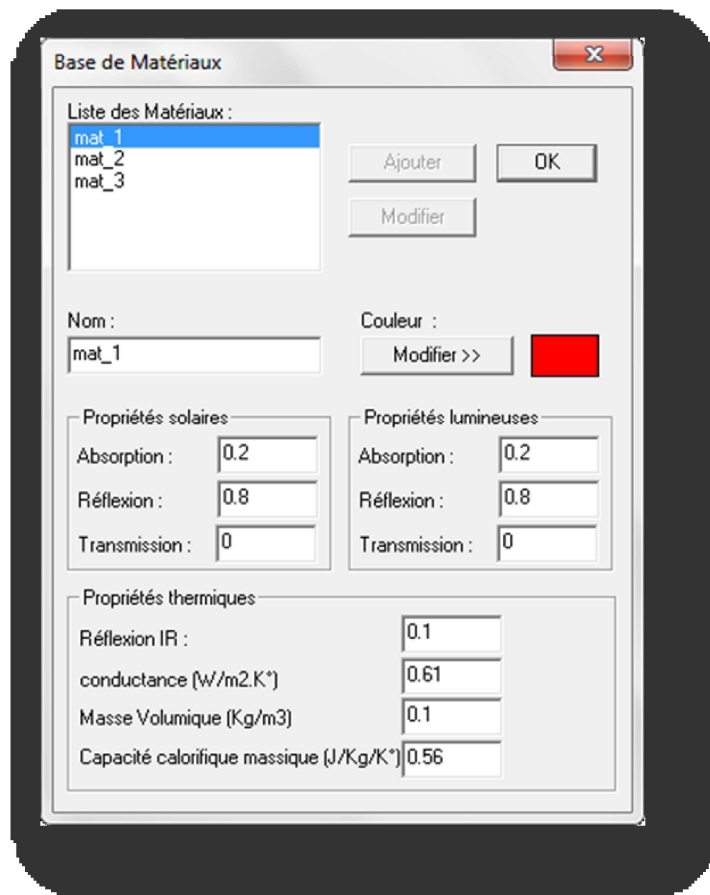


Figure 6.51 : Fenêtre de configuration de base de matériaux utilisés dans Solene
Source : Solene

6.3.2 Calcul du facteur de ciel vu

SOLENE permet le calcul et la simulation du facteur de vue de ciel (descripteur géométrique, qui rend compte des caractéristiques spatiales des tissus). Le facteur de vue de ciel, SVF (Sky View Factor), exprime en premier temps le rapport entre le sol et le ciel, introduisant ainsi la notion de l'ouverture ou la fermeture de l'espace et permet de mettre en exergue les zones d'échanges entre les deux surfaces considérées : le sol et le ciel. Sa valeur est entre 0 et 100 %.

Ce descripteur est évalué à partir de valeurs maximale et minimale de chaque îlot calculé principalement par le nombre de contour rapporté à la surface. Des valeurs pondérées pour chaque descripteur permettent en premier temps de comparer les trois proto types d'îlots urbains.

Le calcul des facteurs de vue de ciel a été opéré pour toute la géométrie des volumes des îlots (surfaces horizontales et verticales). Une phase de triangulation est appliquée sur toute la géométrie plus le sol, cette phase est nécessaire pour lancer la simulation. **(Figure 6.52).**

Par souci de précision, cette triangulation a été opérée sur une maille de l'ordre de un mètre. Le ciel choisi pour la simulation est un ciel clair type (C.I.E) avec un nombre de faces égal à 512.

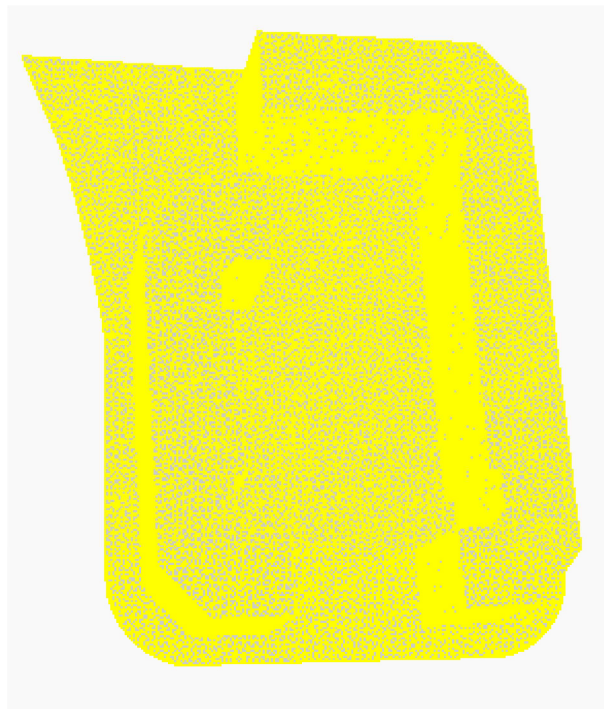


Figure 6.52 : Triangulation de géométrie par le logiciel Solène.
Source : (Auteur, 2016).

Enfin les géométries masques ont été présent en considération. Les autres données exploitées sont : la latitude du site : 34,5° Nord.

Les résultats des expérimentations sont présentés dans les tableaux en dessous :

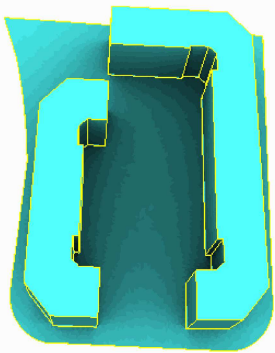
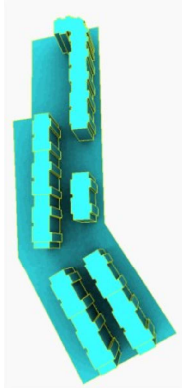
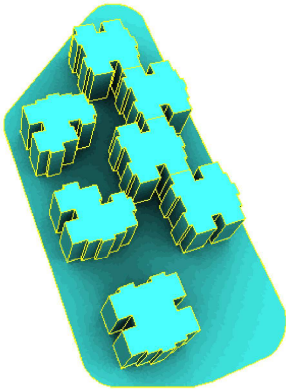
Les différents îlots		SVF
îlot A		41,90 <p>les résultats de l'expérimentation sur l'îlot A affichent un pourcentage de ciel visible de 41,9 %, une valeur supérieure par rapport aux îlots B et C. Ce résultat est dû probablement à l'aspect géométrique de l'îlot, une organisation aérée des bâtiments, dégageant ainsi un cœur d'îlot bien ouvert et vaste. On constate aussi, que plus on s'éloigne des bâtiments vers l'intérieur plus le facteur de vue de ciel augmente.</p>
îlot B		38,92 <p>L'îlot B présente le facteur de vue de ciel le plus bas, avec 38,92 %, une disposition assez compacte des bâtiments, en forme de deux bars parallèles avec un rapport d'aspect un peu réduit, formant un espace ouvert (Rue) un peu sombre ; exception faite pour le percement entre les bâtiments. Nous remarquons aussi que, les toitures de tous les bâtiments possèdent un fort pouvoir d'échange avec le ciel.</p> <p>Nous remarquons aussi que pour les trois îlots, les toitures de tous les bâtiments possèdent une forte opportunité d'échange avec le ciel.</p>
îlot C		39,96 <p>L'îlot C est plus sombre avec 39,96 % de ciel visible. Ce fait est le résultat de la proximité des volumes les uns des autres d'une part, et de l'organisation assez compacte de certains bâtiments d'autre part, ainsi qu'aux décrochements qui se présentent sur tous les volumes de ces bâtiments, créant des zones d'ombre et de masque, par conséquent, les facettes des parois qui donnent sur les espaces intérieurs d'îlot n'échangent que faiblement avec le ciel.</p>

Tableau 6.2 : Facteur de ciel vu pour les trois îlots. Source : (Auteur, 2016).

6.3.3 Calcul de la durée d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement représente pour une date donnée la durée pendant laquelle un élément de surface du sol reçoit directement de rayonnement solaire direct. Elle peut affecter la température radiante moyenne, composante physique du confort thermique qui intègre les flux de courtes et de grandes longueurs d'ondes. Plus la durée d'ensoleillement augmente, plus la quantité d'énergie solaire incidente est élevée, ce qui peut accroître les risque d'inconfort. (Athamnia, 2012).

L'îlot **A** est celui qui reçoit le plus de rayonnement solaire avec 43,49% du temps, suivi par l'îlot **B** avec 41,38 % du temps, ainsi que l'îlot **C** reçoit la plus faible durée d'ensoleillement avec 40,33 %. **Tableau 6.3.** Il semble que les différences des durées d'ensoleillement calculées pour chaque îlot sont dues principalement à la densité volumique et l'orientation. Il existe aussi une relation linéaire entre durée d'ensoleillement et facteur de ciel vu. (Figure 6.53).


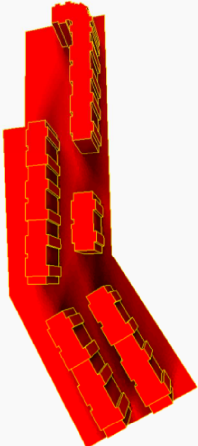
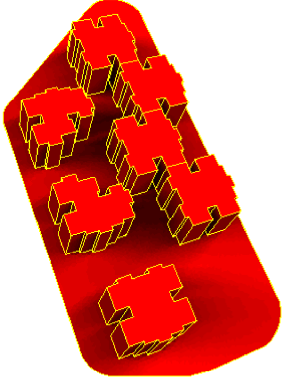
îlot A	îlot B	îlot C
		
6h05/14h 43,49 %	5h47/14h 41,38 %	5h38/14h 40,33 %

Tableau 6.3 : La durée d'ensoleillement des trois îlots pour la journée du 21/06. Source : (Auteur, 2016).

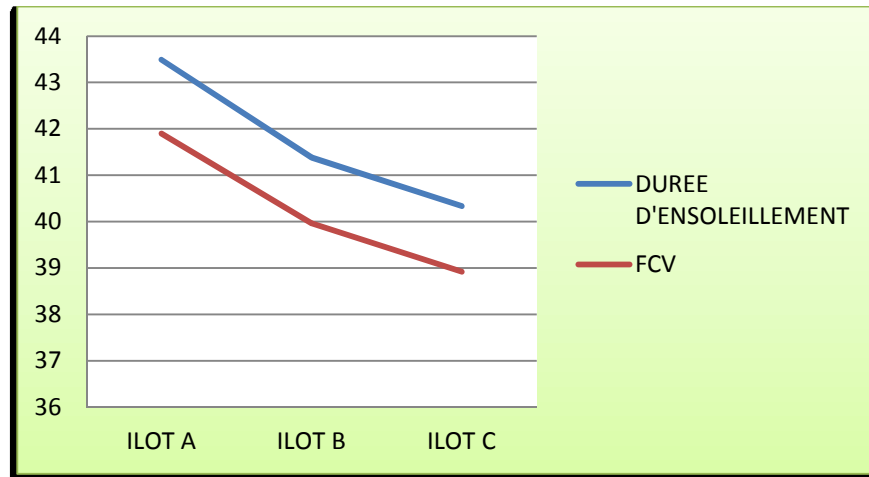


Figure 6.53 : Représentation graphique du lien entre la durée d'ensoleillement et le facteur de ciel vue. Source : (Auteur, 2016).

6.3.4 Calcul de l'énergie solaire globale

Il existe une relation étroite entre le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale et la température au-dessus du sol. (Riou CH, 1976). Selon Pierre Thomas, (2000), La température varie dans le même sens que l'irradiation, plus l'irradiation est forte, plus il fait chaud.

Le calcul de l'énergie solaire globale a été opéré pour toute la géométrie des volumes des îlots (surfaces horizontales et verticales). Une phase de triangulation est appliquée sur toute la géométrie plus le sol, cette phase est nécessaire pour lancer la simulation. *Solene* calcule la position du soleil en fonction du jour, de l'heure solaire et de la latitude, permettant ainsi de connaître l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport aux différentes facettes de la géométrie ainsi que les masques de l'environnement immédiat. L'évaluation du flux solaire direct incident est alors immédiate et les facettes ensoleillées reçoivent un flux solaire pondéré par l'angle d'incidence. Sa valeur énergétique est notée R_{direct} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]. Pour les flux solaires diffus, la méthode d'évaluation repose sur une représentation de la voûte céleste. *Solene* intègre un modèle de radiance, qui est déterminé grâce à un modèle de ciel implémenté dans le code *Solene* qui comprend plusieurs types de ciel. Ce modèle de radiance permet de déterminer le flux solaire diffus. L'addition des flux solaires directs et diffus donne le flux solaire global incident pour chaque facette et pour chaque pas de temps.

L'îlot **C** est celui qui reçoit le plus de l'énergie solaire globale avec une valeur de $284,55 \text{ W/M}^2$, suivi par l'îlot **A** avec $267,96 \text{ W/M}^2$, ainsi que l'îlot **B** reçoit la plus faible quantité d'énergie solaire globale avec $240,51 \text{ W/M}^2$.

Figure 6.54. Il semble qu'un lien existe entre l'énergie solaire globale reçu et le facteur de ciel vu. À l'exception de l'îlot c qui reçoit une valeur supérieure d'énergie solaire globale, et cela peut être due aux toitures des bâtiments qui possèdent une forte opportunité d'échange avec le ciel par rapport aux îlots A et B. **Figure 6.55.**

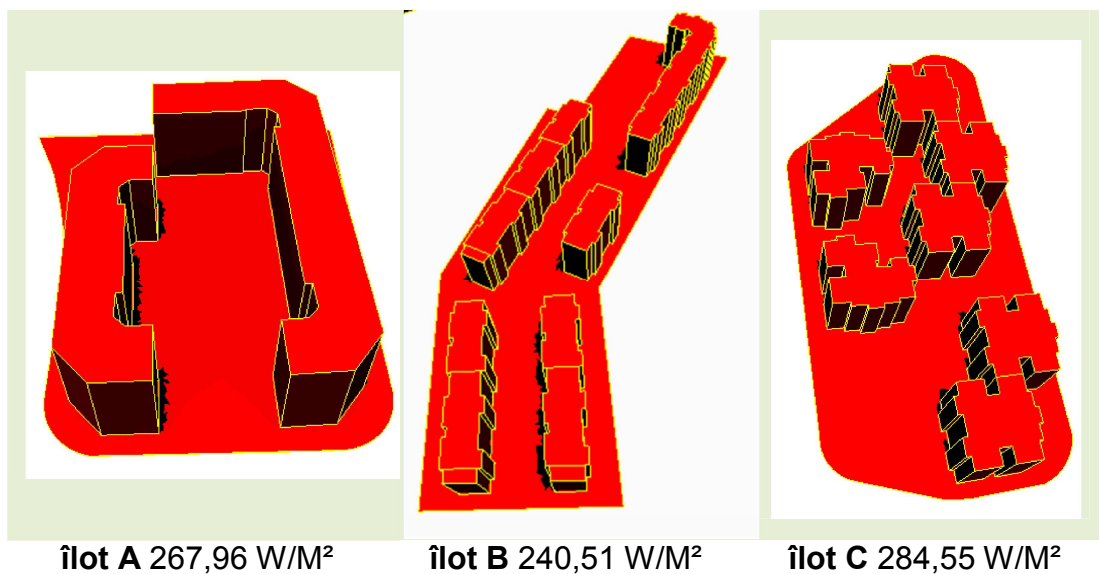


Figure 6.54 : Représentation de l'énergie solaire globale simulée des trois îlots, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : (Auteur, 2016).

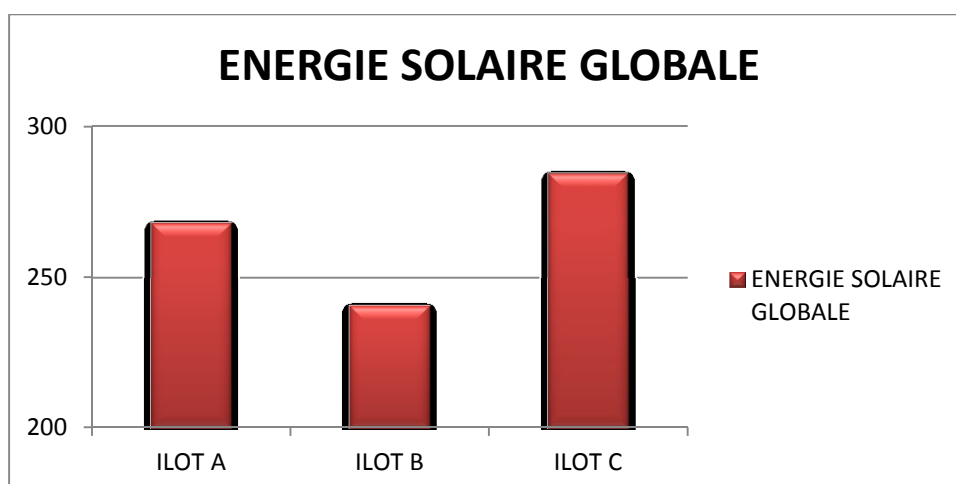


Figure 6.55 : Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées des trois îlots, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : (Auteur, 2016).

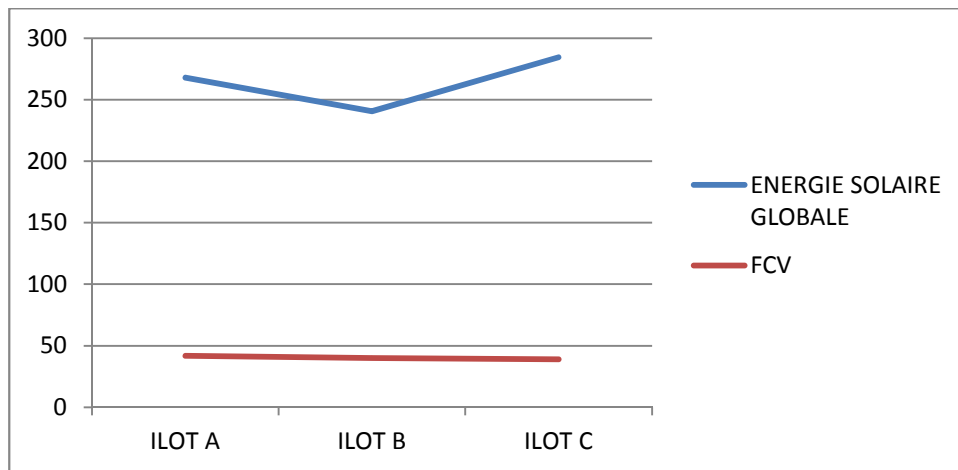


Figure 6.56: Représentation graphique du lien entre l'énergie solaire globale et le facteur de ciel vue. Source : (Auteur, 2016).

6.3.5 ANALYSE DES EFFETS

6.3.5.1 Effets de « Ouverture /Fermeture » de l'ilot

Type A

Les espacements entre les bâtiments rendent la géométrie de ce type d'ilot plus ouverte au ciel. Les résultats de l'expérimentation affichent des pourcentages de ciel visible trop rapprochés pour l'ensemble des variantes issues de l'ilot A (41% - 43%), à l'exception de la variante « A18 » qui représente la valeur la plus faible avec 30,33 %. En effet, la mise sur pilotis de l'ensemble des bâtiments réduit son ouverture au ciel.

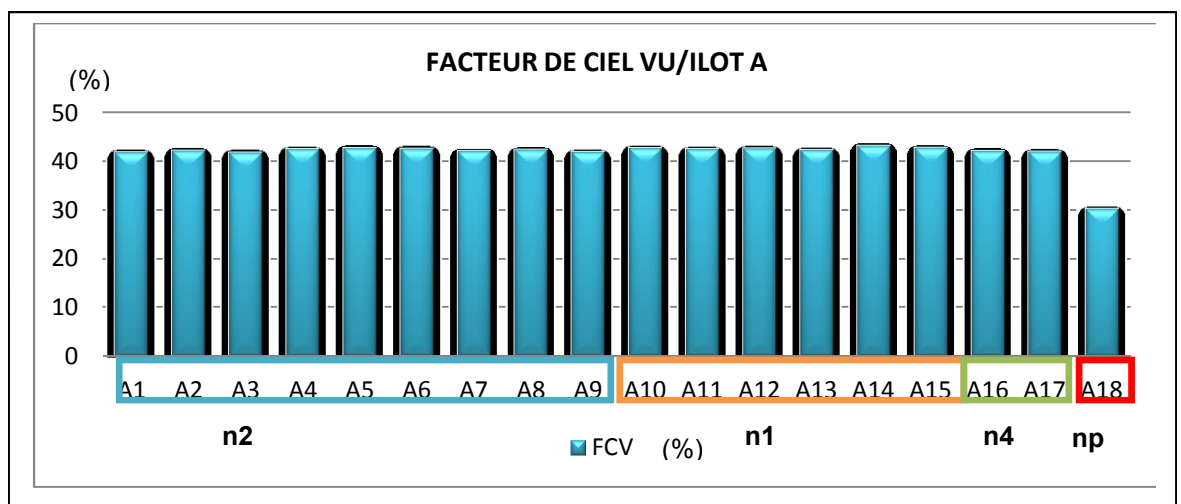


Figure 6.57 : Représentation graphique des pourcentages de ciel vu calculées pour toutes les variantes de l'ilot A. Source : (Auteur, 2016).

Les résultats de simulation de la durée d'ensoleillement pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot A sont présentés dans la **figure 6.58**.

La plus faible durée d'ensoleillement est obtenue pour les variantes « A17 et A18 ». Ces faibles durées sont principalement dues d'une part par la faible pourcentage de ciel vu pour la variante « A18 », et d'autre part par le nombre d'ouvertures de l'îlot qui génèrent des ombres entre les bâtiments, ainsi que leurs dispositions par rapport à la trajectoire du soleil.

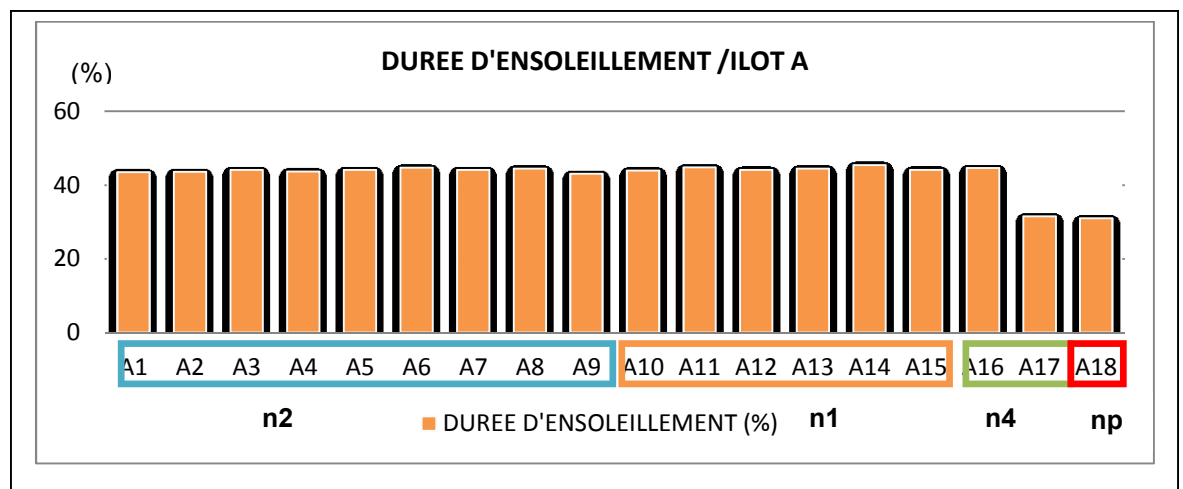


Figure 6.58 : Représentation graphique des valeurs de la durée d'ensoleillement calculées pour toutes les variantes de l'îlot A, pour la journée du 21 juin. Source : (Auteur, 2016).

Les résultats de simulation de l'énergie solaire globale pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot A sont présentés dans la **figure 6.59**.

Les valeurs sont trop rapprochés pour plupart des variantes issues de l'îlot A avec des valeurs entre 249,68 W/M² et 271,22 W/M², à l'exception des variantes « A3, A7, A10, A12, A15, A16 et A17 » qui reçoivent plus d'énergie solaire globale avec des valeurs entre : 271,22 W/M² et 312,49 W/M². D'autre part la variante « A18 » est celle qui reçoit la quantité la plus faible avec 181,96 W/M². Il existe un lien entre l'énergie solaire globale reçu et le facteur de ciel vu, à l'exception des variantes qui reçoivent les plus fortes valeurs d'énergie solaire globale. **Figure 6.60**. Pour ce type d'agencement, le critère « ouverture/férmerture » de l'îlot, semble avoir un effet lorsque le nombre est important, plus l'îlot est aéré, plus la surface de l'enveloppe qui reçoit le rayonnement solaire est importante, augmentant ainsi la quantité de l'énergie solaire globale. De

plus, le critère «ouverture/férmerture » peut avoir un effet notable sur la quantité d'énergie globale reçue, lorsque le pourcentage de ciel vu est modifié, (le cas de la variante A18).

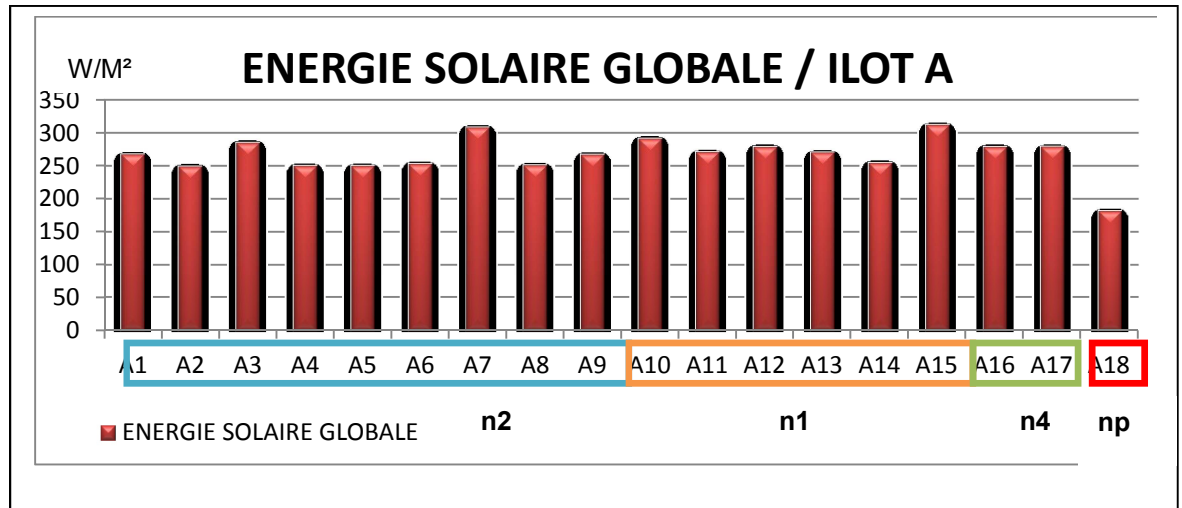


Figure 6.59 : Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées pour toutes les variantes de l'ilot A, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : (Auteur, 2016).

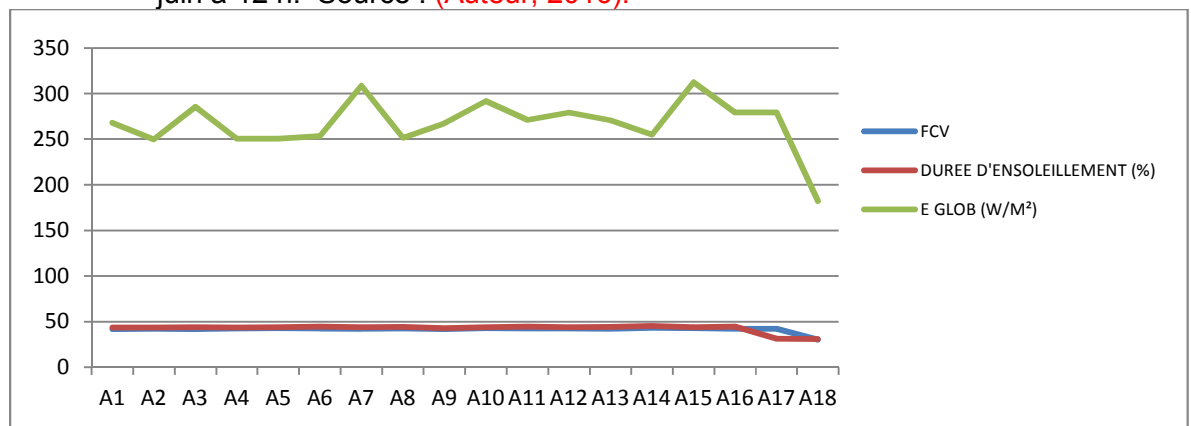


Figure 6.60: Représentation graphique du lien entre le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : (Auteur, 2016).

Classe « n1 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU	DUREE D'ENSOLEILLEMENT	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
A10	42,78	43,91	291,87
A11	42,56	44,82	271,21
A12	42,72	44,11	279,22
A13	42,37	44,43	270,74
A14	43,23	45,42	255,05
A15	42,82	44,12	312,49

Tableau 6.4: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe n1 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n2 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU	DUREE D'ENSOLEILLEMENT	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
A1	41,94	43,49	267,96
A2	42,24	43,55	249,68
A3	41,86	44,08	285,53
A4	42,56	43,69	250,43
A5	42,79	44,05	250,36
A6	42,66	44,67	253,32
A7	42,19	44,06	308,73
A8	42,43	44,46	251,41
A9	41,96	43,02	267,49

Tableau 6.5: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe n2 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n4 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU	DUREE D'ENSOLEILLEMENT	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
A16	42,20	44,62	279,22
A17	42,04	31,50	279,38

Tableau 6.6: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe n4 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « np »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU	DUREE D'ENSOLEILLEMENT	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
A18	30,33	30,98	181,96

Tableau 6.7: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot A « classe np ». Source : (Auteur, 2016).

Type B

Les résultats de l'expérimentation affichent des pourcentages de ciel visible trop rapprochés pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot B.

Le critère « ouverture/fermeture » de l'îlot, affecte le pourcentage de ciel vu de presque 3 % pour l'ensemble des variantes. (Figure 6.61).

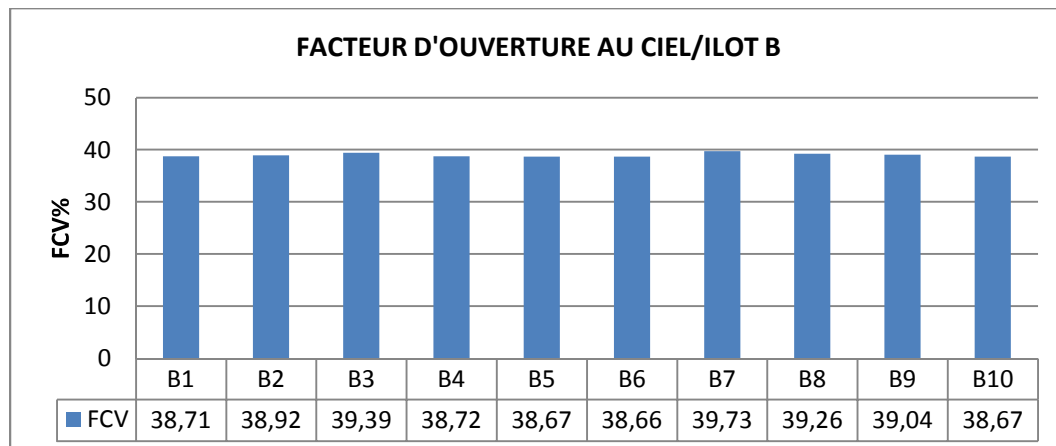


Figure 6.61: Représentation graphique des pourcentages de ciel vu calculées pour toutes les variantes de l'îlot B. Source: (Auteur, 2016).

Les résultats de simulation de la durée d'ensoleillement affichent des valeurs trop rapprochés pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot B.

Le critère « ouverture/fermeture » de l'îlot, affecte la durée d'ensoleillement de presque 1,5 % pour l'ensemble des variantes. (Figure 6.62).

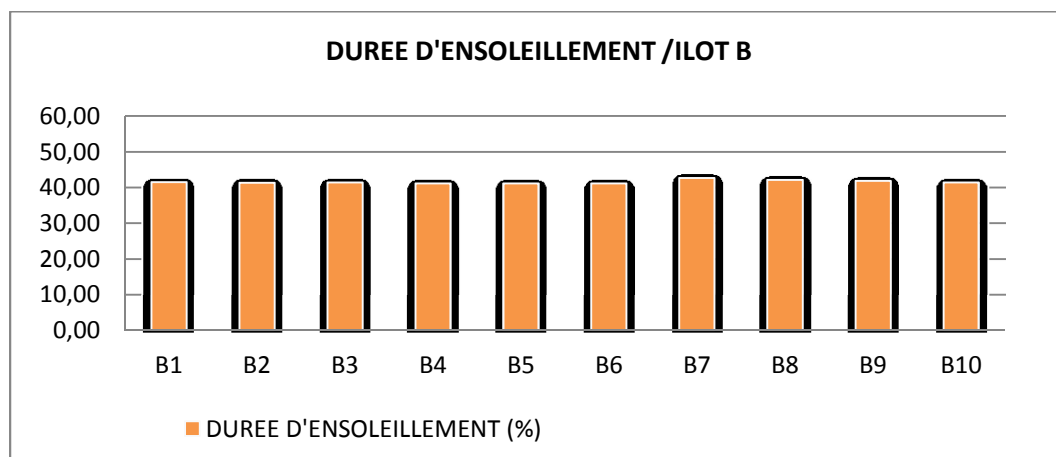


Figure 6.62 : Représentation graphique des valeurs de la durée d'ensoleillement calculées pour toutes les variantes de l'îlot B, pour la journée du 21 juin. Source : (Auteur, 2016).

Les quantités d'énergies solaires globales sont trop rapprochées pour plupart des variantes issues de l'îlot B. La variante « B2 », est celle qui reçoit la quantité la plus faible avec $240,51 \text{ W/M}^2$, inférieur de 16% par rapport à la variante « B7 » qui reçoit plus d'énergie solaire globale avec $288,73 \text{ W/M}^2$. Il existe un lien entre l'énergie solaire globale reçu, pourcentage de ciel vu et durée d'ensoleillement. (**Figure 6.64**). Pour ce type d'agencement, le critère «ouverture/fermeture », ne semble pas avoir un effet notable sur la quantité d'énergie globale reçu pour l'ensemble des variantes, du fait que l'influence de ce critère sur le FCV et la durée d'ensoleillement est négligeable.

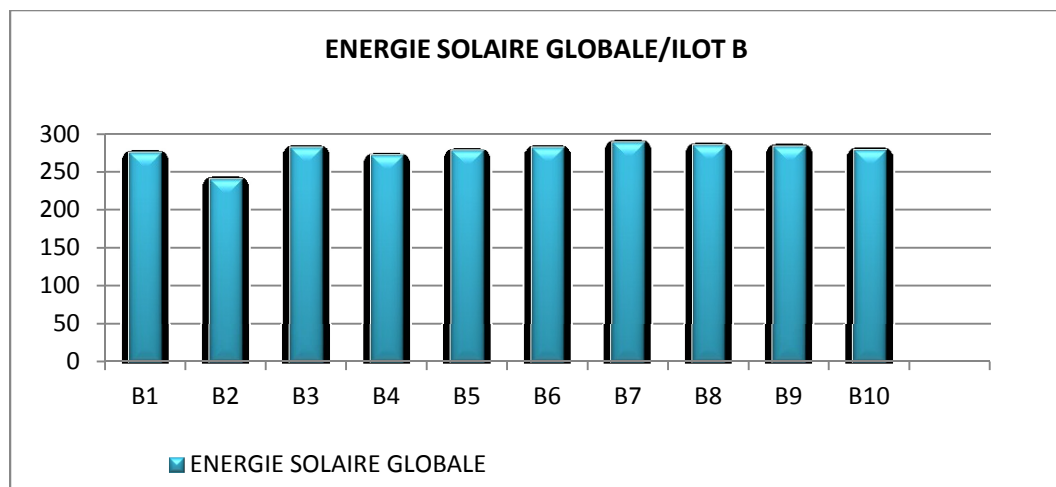


Figure 6.63 : Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées pour toutes les variantes de l'îlot B, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : (Auteur, 2016).

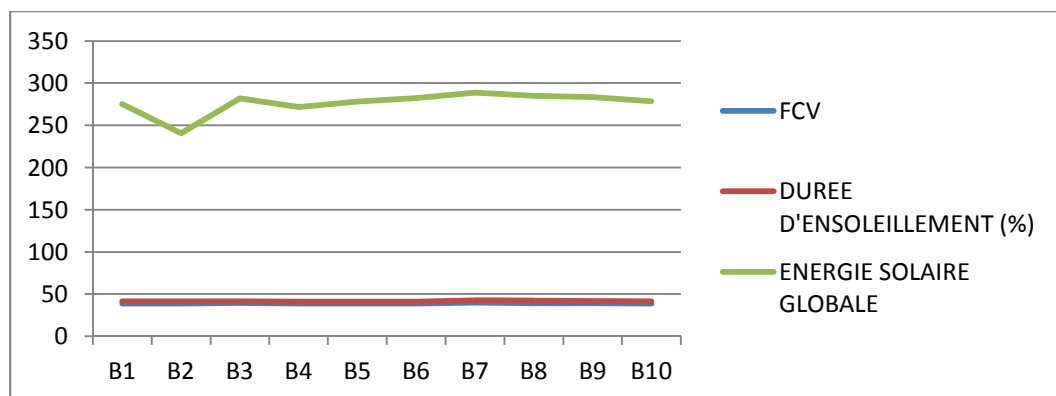


Figure 6.64: Représentation graphique du lien entre le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : (Auteur, 2016).

Classe « n2 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B7	39,73	42,66	288,73

Tableau 6.8: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot B « classe n2 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n3 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B6	38,66	41,15	282,19

Tableau 6.9: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot B « classe n3 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n4 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B8	39,26	42,12	285,05

Tableau 6.10: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot B « classe n4 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n5 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B2	38,92	41,38	240,51
B9	39,04	41,87	283,49

Tableau 6.11: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot B « classe n5 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n7 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B4	38,72	41,16	271,91
B10	38,67	41,41	278,76

Tableau 6.12: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot B « classe n7 ». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n8 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B5	38,67	41,14	278,16

Tableau 6.13: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'îlot B « classe n8». Source : (Auteur, 2016).

Type C

Les résultats de l'expérimentation affichent des pourcentages de ciel visible trop rapprochés pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot C.

La variante « C2 » présente le pourcentage de ciel vu le plus haut avec 39,96%, suivi par la variante C6 avec 39,77%. Tandis que la variante C4 affiche la valeur la plus faible avec 36,73%, les autres variantes affichent des pourcentages de ciel visible trop rapprochés. Le critère « ouverture/fermeture » de l'îlot et l'augmentation du rapport d'aspect, affectent le pourcentage de ciel vu de presque 8 %. (Figure 6.63).

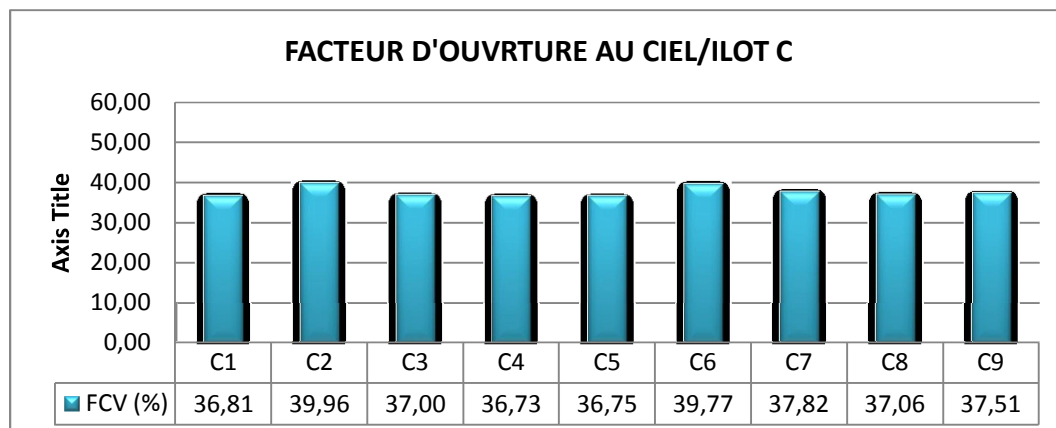


Figure 6.65: Représentation graphique des valeurs des facteurs de ciel vu calculées pour toutes les variantes de l'îlot C. Source: (Auteur, 2016).

Les calculs des durées d'ensoleillement affichent des valeurs trop rapprochés pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot C. La plus longue durée d'ensoleillement est obtenue pour les variantes « C8 », avec 41,41%, tandis que la variante C5 affiche la valeur la plus faible avec 39,55%.

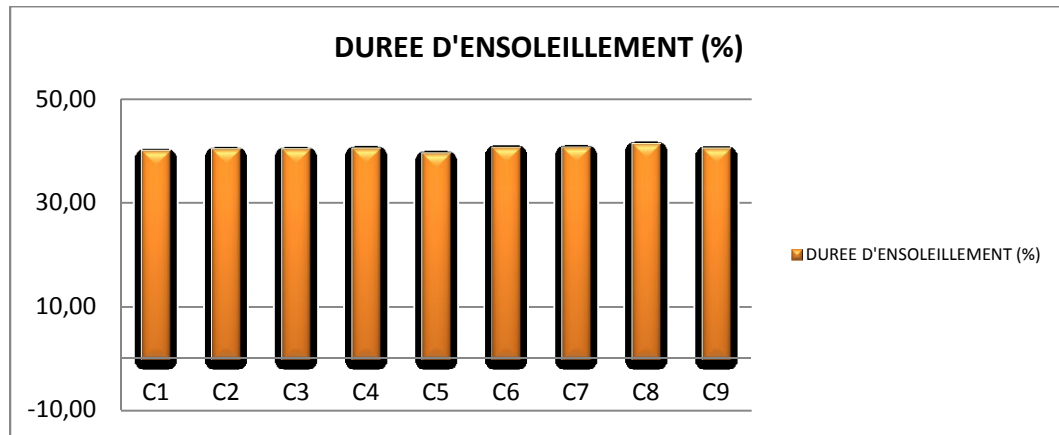


Figure 6.66 : Représentation graphique des valeurs de la durée d'ensoleillement calculées pour toutes les variantes de l'îlot C, pour la journée du 21 juin. Source : (Auteur, 2016).

Les résultats de simulation de l'énergie solaire globale pour l'ensemble des variantes issues de l'îlot C sont présentés dans la **figure 6.67**. Les valeurs sont trop rapprochées pour plupart des variantes issues de « l'îlot C » avec des valeurs entre 277,02 W/M² et 284,55 W/M². La variante « C9 » est celle qui reçoit la quantité la plus faible avec 277,02 W/M².

Il existe un lien entre l'énergie solaire globale reçue, la durée d'ensoleillement et le facteur de ciel vu. **Figure 6.68**.

Pour ce type d'agencement, le critère « ouverture/fermeture », a très peu d'effet sur la quantité d'énergie globale reçue pour l'ensemble des variantes.

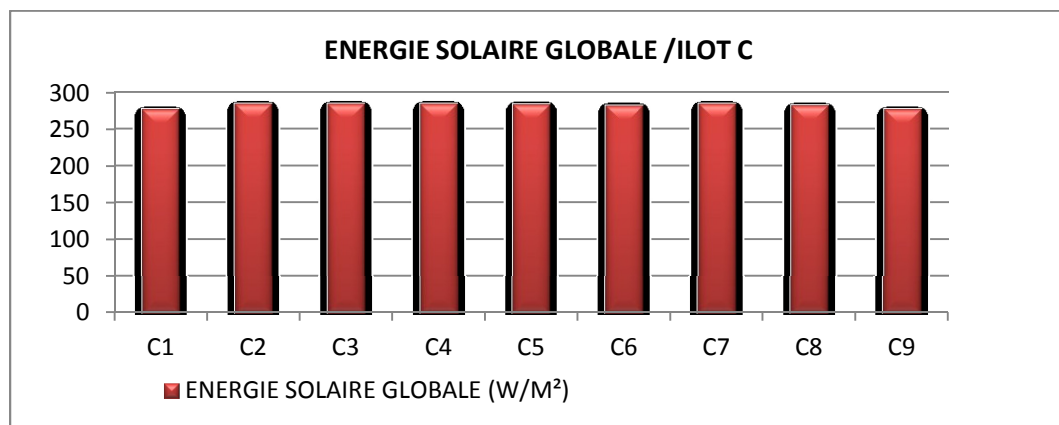


Figure 6.67 : Représentation graphique des valeurs de l'énergie solaire globale calculées pour toutes les variantes de l'îlot C, pour la journée du 21 juin à 12 h. Source : (Auteur, 2016).

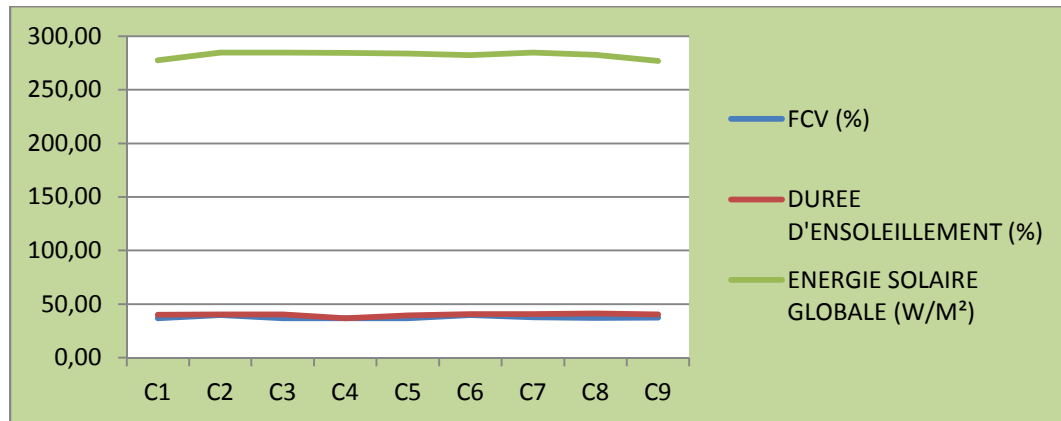


Figure 6.68: Représentation graphique du lien entre le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : (Auteur, 2016).

Classe « n3 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
C1	36,81	40,05	277,35

Tableau 6.14: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot C « classe n3». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n4 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
C2	39,96	40,33	284,55
C3	37,00	40,38	284,55

Tableau 6.15 Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot C « classe n4». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n6 »

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
C4	36,73	40,41	284,42

Tableau 6.16: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot C « classe n6». Source : (Auteur, 2016).

Classe « n7»

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
C5	36,75	39,55	283,72

Tableau 6.17: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot C « classe n7». Source : (Auteur, 2016).

6.3.5.2 Effets du rapport d'aspect (H/W)

Type B

D'après les résultats présentés ci-dessous pour les variantes avec un rapport H/W égal à 0,5 et 2 (B1 et B3), (**Tableau 6.18**), on peut observer qu'il existe un lien entre le rapport d'aspect et les valeurs calculées pour le pourcentage de ciel vu, la durée d'ensoleillement et la quantité d'énergie solaire globale reçue. De plus la valeur d'énergie solaire globale reçue diminue lorsque le rapport H/W est égal à 1. (**Figure 6.69**).

ILOT	H/W	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
B1	2	38,71	41,40	275,27
B2	1	38,92	41,38	240,51
B3	0,5	39,39	41,56	282,17

Tableau 6.18: Valeurs de : H/W, facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot B. Source : (Auteur, 2016).

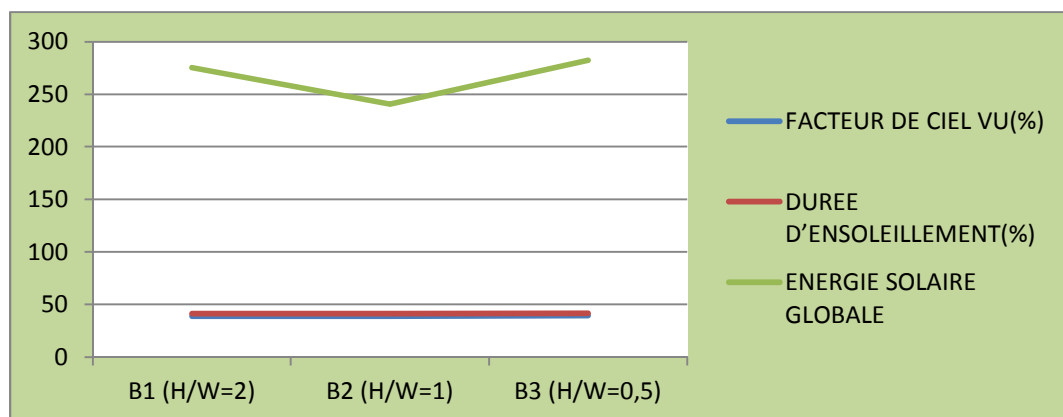


Figure 6.69: Représentation graphique du lien entre : H/W, le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : (Auteur, 2016).

Type C

Les résultats (Tableau V. 6) font ressortir le lien entre le rapport d'aspect et les valeurs calculées pour le pourcentage de ciel vu, la durée d'ensoleillement et la quantité d'énergie solaire globale reçue. Ces derniers diminuent avec augmentation de la valeur de « H/W ». (**Figure 6.70**).

Pour ce type d'agencement, les différences sont notables, surtout avec H/W=0,5.

ILOT	H/W	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
C6	0,5	39,77	40,66	282,15
C7	1	37,82	40,74	282,62
C8	2	37,06	41,41	284,55

Tableau 6.19: Valeurs de : H/W, facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour les variantes de l'ilot C. Source : (Auteur, 2016).

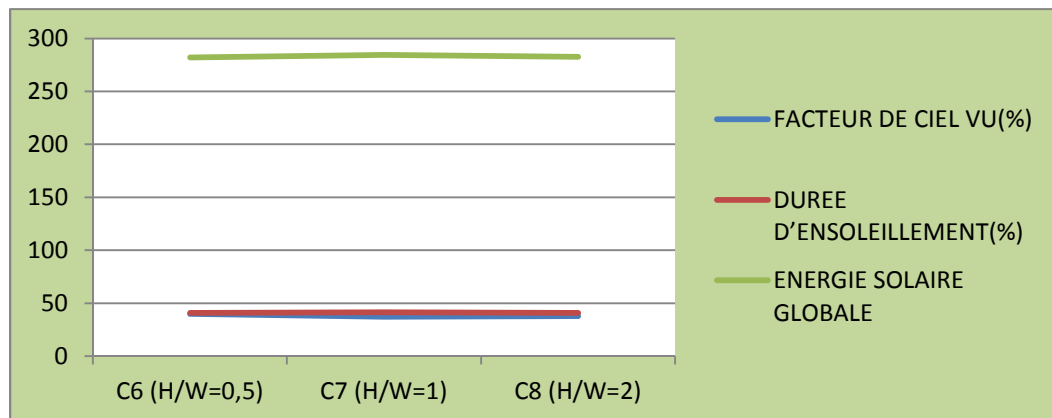


Figure 6.70: Représentation graphique du lien entre : H/W, le facteur de ciel vu, la durée d'ensoleillement et l'énergie solaire globale. Source : (Auteur, 2016).

6.3.5.3 Effets de l'orientation des bâtiments

Type C

Une comparaison des résultats obtenus pour la variante « C9 », avec ceux obtenus pour la variante « C8 » (variante modifiée), indique que cette variation du profil des bâtiments avait comme incidence, une diminution de la quantité d'énergie globale reçue de presque 2,7%.

ILOT	FACTEUR DE CIEL VU(%)	DUREE D'ENSOLEILLEMENT(%)	ENERGIE SOLAIRE GLOBALE
C9	37,51	40,47	277,02

Tableau 6.20: Valeurs du facteur de ciel vu, de la durée d'ensoleillement et de l'énergie solaire globale pour la variante C9. Source : (Auteur, 2016).

6.3.6 Synthèse de l'analyse de l'ensoleillement

D'après les résultats obtenus, on a pu dans un premier temps d'observer que chaque îlot représente des durées d'ensoleillement différentes. Il semble que ces différences sont dues principalement à la densité volumique et l'orientation. Pour l'effet du critère «ouverture/férmerture » dépend principalement de la typologie d'agencement des bâtiments.

Ce dernier, peut avoir un effet notable sur la quantité d'énergie globale reçue, lorsque le pourcentage de ciel vu est modifié.

En a pu aussi observer qu'il existe un lien entre le rapport d'aspect est les valeurs calculées pour le pourcentage de ciel vu, la durée d'ensoleillement et la quantité d'énergie solaire globale reçu. Ces derniers diminuent avec l'augmentation de la valeur de « H/W ».

Pour l'effet d'orientation des bâtiments, cette variation du profil des bâtiments, a modifié le pourcentage de ciel visible et la durée d'ensoleillement, affectant ainsi la quantité d'énergie globale reçue.



CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

Le confort thermique dans un espace extérieur dépend, en partie, des variations de paramètres microclimatiques (température de l'air, vitesse du vent et de l'ensoleillement...). Ces variations sont influencées par différentes caractéristiques urbaines et morphologiques. L'objectif de cette recherche, réside dans la caractérisation, de l'impact entre phénomènes physiques et formes urbaines. La mise en exergue de ces relations, était possible par l'application d'une démarche basée sur la simulation informatique. Dans cette recherche, une approche paramétrique de calcul est présentée pour évaluer les effets des différentes morphologies urbaines sur l'environnement de la ventilation naturelle au niveau des piétons et l'ensoleillement.

La première partie de cette recherche présente un cadre théorique, qui englobe des données se basant essentiellement sur les différentes recherches bibliographiques se rapportant au thème de la recherche.

Cette lecture bibliographique a permis la compréhension des relations entre la morphologie urbaine, et les paramètres physiques de confort.

On a pu distinguer deux grandes familles d'indicateurs, ceux, en relation avec le rayonnement solaire et la température des surfaces, dites **thermo-radiatifs** (le facteur de vue du ciel, le rapport H/W, la densité surfacique et l'albédo des surfaces) ; et d'autres en relation avec la vitesse du vent, dites **aérauliques** (la densité ou la porosité d'un tissu urbain et la nature de l'agencement des tissus urbains). Il ressort de cette recherche bibliographique qu'un phénomène physique peut être appréhendé par plusieurs indicateurs.

D'autre part, cette lecture bibliographique, nous a permis également de comprendre la notion du climat, ses éléments et ses différentes échelles de manifestation ; ainsi que la compréhension des processus qui sont à l'origine de la formation et de transformation des climats urbains à travers l'étude des interactions entre la morphologie urbaine et l'environnement climatique et les modifications engendrées sur le bilan énergétique. La connaissance des mécanismes physiques notamment les écoulements de l'air, fortement perturbé par le milieu urbain, la diminution de l'évapotranspiration, des apports anthropiques de chaleur, et les

perturbations radiatives et thermiques, dues principalement à la géométrie de la ville et aux propriétés radiatives des matériaux urbains, a apporté la base nécessaire aux simulations.

Dans la deuxième partie, une présentation de la zone d'étude a conduit à l'aide d'une analyse typo-morphologique de distinguer les formes d'îlots urbains les plus représentatives, et de définir un corpus théorique composé de 37 variantes issues de trois typologies de références. Ces variantes ont été composées de façon à ce que l'on puisse comparer les effets des différentes variables, sur les écoulements du vent et l'ensoleillement. De ce fait on a calculé des indicateurs physico-morphologiques, pour pouvoir tester les corrélations qui peuvent exister entre forme urbaine et paramètres climatiques.

Dans l'analyse de l'écoulement du vent, on a pu observer que la moindre modification dans la configuration urbaine modifie considérablement les écoulements du vent au sein de l'îlot urbain. L'accessibilité au vent dépend d'abord du tissu amont par rapport aux vents (présence de masque) et elle est, évidemment, plus difficile en milieu urbain. À l'échelle de l'îlot, le mode d'agencement des bâtiments (typologie), la porosité et l'orientation des façades par rapport aux vents et la disposition par rapport aux masques proches, ont des effets notables sur l'amélioration des conditions de ventilation urbaine.

Une étude aérodynamique des configurations urbaines existantes permettra d'identifier les zones peu aérées et les zones d'inconforts. Le vent peut être redirigé à l'aide de plusieurs dispositifs architecturaux ou urbains afin d'améliorer la ventilation et le confort des espaces extérieurs.

Pour le deuxième volet de l'expérimentation, le calcul des facteurs de vue de ciel a été opéré pour toute la géométrie des volumes des îlots (surfaces horizontales et verticales). Une phase de triangulation a été appliquée sur toute la géométrie plus le sol. Ensuite la durée d'ensoleillement et la quantité d'énergie globale pour chaque îlot ont été calculées. Cette opération a été faite pour les trois typologies représentatives (Type A, Type B et Type C), puis généralisée pour l'ensemble du corpus. Le but était de tester l'effet des critères proposés dans le chapitre précédent.

D'après les résultats obtenus, on a pu dans un premier temps d'observer que chaque îlot représente des durées d'ensoleillement différentes. Il semble que ces différences sont dues principalement à la densité volumique et l'orientation. Pour l'effet du critère « ouverture/fermeture » dépend principalement de la typologie d'agencement des bâtiments.

Ce dernier, peut avoir un effet notable sur la quantité d'énergie globale reçue, lorsque le pourcentage de ciel vu est modifié.

Une analyse de l'impact de certains critères sur les paramètres physiques simulés, nous a permis de distinguer que la durée d'ensoleillement est dépendante du critère « ouverture/fermeture » de l'îlot et du rapport d'aspect, du fait qu'ils affectent le pourcentage de ciel vu. A l'exception pour le « type A ». Pour ce type d'agencement, le nombre d'ouverture de l'îlot ne semble pas avoir un effet notable sur la durée d'ensoleillement, sauf lorsque le pourcentage de ciel vu est modifié.

En a pu aussi observer qu'il existe un lien entre le rapport d'aspect est les valeurs calculées pour le pourcentage de ciel vu, la durée d'ensoleillement et la quantité d'énergie solaire globale reçu. Ces derniers diminuent avec l'augmentation de la valeur de « H/W ».

Pour l'effet d'orientation des bâtiments, cette variation du profil des bâtiments, a modifiée le pourcentage de ciel visible et la durée d'ensoleillement, affectant ainsi la quantité d'énergie globale reçue.

Le rayonnement solaire est un paramètre à prendre en considération lors de la conception d'un nouvel espace extérieur ou lors de la réhabilitation d'un espace existant afin d'offrir la possibilité d'améliorer les conditions de confort extérieur.

Limites de la recherche

Quelques limites liées à la méthodologie doivent être exposées :

L'étude d'impact entre phénomènes physiques et formes urbaines dans cette recherche s'est focalisée sur trois typologies d'ilot urbain. Il serait intéressant d'élargir cette étude à l'ensemble des formes génériques, afin de mieux comprendre les particularités de chaque forme

La période des simulations aéraulique ne tient pas en considération la saison d'hiver.

Pour les simulations de l'ensoleillement, nous avons choisi le 21 juin qui corresponde au solstice d'été, comme journée représentative, et 12 H 00 le moment de la journée. Il aurait été pertinent de généraliser l'analyse pour toutes les périodes de l'année afin de permettre une comparaison plus exhaustive en termes des conditions d'ensoleillement.

Recommandations

Étant donné que l'optimisation de la perméabilité urbaine pour assurer une bonne ventilation naturelle dans les zones urbaines est un problème de conception majeur rencontré par les urbanistes et les architectes. La conception d'une stratégie de ventilation naturelle est l'une des opérations de conception les plus délicates qu'il soit, compte tenu de la complexité des phénomènes en jeu. Une étude aéraulique lors de la conception d'un nouvel espace des quartiers existants permettra d'identifier les zones peu aérées et les zones d'inconforts, des dispositifs pourront être mis en place pour rediriger l'air pour améliorer le confort des espaces extérieurs.

La ventilation naturelle des zones urbaines peut être compromise en milieu urbain par le confinement dû principalement à la densité des constructions et à la faible porosité.

Le rayonnement solaire est également un paramètre à prendre en considération lors de la conception d'un nouvel espace extérieur ou lors de la réhabilitation d'un espace existant afin d'offrir la possibilité d'améliorer les conditions de confort extérieur.

Nous proposons un certain nombre recommandations basées sur les résultats de cette recherche et les suggestions de la littérature, qui sont importants pour la planification urbaine et la conception, comme suit:

- Les ilots urbains devraient être aménagés en bâtiments autonomes

assurant une meilleure porosité pour leurs façades aux vent, ouvrant les espaces publics intérieurs aux vents incidents, favorisant ainsi la ventilation des espaces et limitant les effets de coin.

- L'alignement classique des bâtiments et des rues en quadrillage régulier n'est pas la configuration la plus favorable à la ventilation des espaces extérieurs. Lorsque les bâtiments sont implantés diagonalement à la direction des vents dominants, les zones de haute et de basse pression englobent alternativement le bâti, assurant une meilleure ventilation naturelle des espaces et une ventilation naturelle des bâtiments.
- L'orientation de la grille des rues dans la planification de réseau est un paramètre important dans les performances de ventilation naturelle urbain. Les rues principales doivent être disposées le long de la direction des vents dominants.
- Alignement des rues correctement et en laissant des espaces libres suffisants qui peuvent être liés entre eux sont tout aussi importants
- La combinaison de plusieurs stratégies (de conception du bâtiment et urbanisme) est recommandée car il est généralement plus efficace que toute stratégie unique.
- Protéger partiellement les rues et les espaces publics de l'ensoleillement direct et favoriser la dissipation de la chaleur par le vent (en période estivale).
- Une multitude d'installations générant de l'ombre ainsi que divers types de végétation peuvent être employés avec l'effet supplémentaire de rafraîchissement de l'air par évapotranspiration
- Limiter l'absorption, l'émission et le stockage de l'énergie solaire dans la ville en faisant un choix de matériaux de revêtement adaptés. A l'échelle urbaine, les matériaux de revêtement caractérisés par un albédo et une émissivité élevés contribuent à la réduction de la température de l'air ambiant et de l'ICU et ainsi à l'amélioration du confort thermique extérieur

Perspectives

L'étude d'impact entre phénomènes physiques et formes urbaines dans cette recherche s'est focalisée sur trois typologies d'îlots urbains. Il serait intéressant d'élargir cette étude à l'ensemble des formes génériques, afin de mieux comprendre les particularités de chaque forme et identifier, pour des conditions climatiques données, les plus pertinentes en termes de confort extérieur.

Afin de tester l'impact qualitatif sur la perception des ambiances thermiques climatiques, il est important d'intégrer les conditions de confort extérieur.

Il serait intéressant d'analyser les comportements convectifs dus aux impacts des formes urbaines par la prise en compte des différences de mouvement d'air que les formes urbaines peuvent occasionner.

BIBLIOGRAPHIE

Abdallah Farhi, «Macrocéphalie et pôles d'équilibre: la wilaya de Biskra», L'Espace géographique, 2001/3 tome 30, p. 245-255.

Abdallah Farhi. Biskra : de l'oasis à la ville saharienne (Note). In: Méditerranée, tome 99, 3-4-2002. Le sahara, cette «autre Méditerranée» (Fernand Braudel) pp. 77-82.

AHMED OUAMEUR Fouad. Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics, Etude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec, Mémoire de maîtrise, Faculté des études supérieures de l'Université Laval. (2007).

Alain BORIE, François DENIEUL (1984). Méthode d'analyse des tissus urbains traditionnels, « Cahiers techniques : Musées et Monuments ».

ALLAIN. R., (2004), Morphologie urbaine: géographie, aménagement et architecture de la ville, Armand Colin, Paris, 254 p.

Albert Lévy, « Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine », Espaces et sociétés 2005/4 (no 122), p. 25-48.DOI 10.3917/esp.122.0025

ATHAMENA KHALED. Indicateurs pour l'analyse de la contribution d'un projet urbain à l'ilot de chaleur. Architecture, aménagement de l'espace. (2008).

ATHAMENA KHALED. Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes. (2012)

BERGHOUT Belkacem. Effet De L'implantation D'un Bâtiment Collectif Sur Le Confort Hygrothermique Intérieur Cas De Biskra, Algérie

Bouyer Julien. Modélisation et simulation des microclimats urbains, Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments". Thèse de doctorat, École polytechnique de l'Université de Nantes, France. (2009).

Bozonnet Emmanuel, Francis Allard, M. Chazelas, G. Guarracino, M. Musy. Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique. Jac Fol. Futur de l'habitat, Co-édition Jean-Michel Place / PUCA, pp.139-154, (2008).

Britter, R.E. ; Hanna,S.R. Flow and dispersion in urban areas. Annual Review of Fluid Mechanics, 35, 469–496. (2003).

CHAM, Rapport technique: TR 001. (2005).

Chao Yuan, Edward Ng. Building porosity for better urban ventilation in high-density cities- A computational parametric study, Building and Environment 50 (2012).

CERMA. Logiciel de simulation d'ensoleillement, d'éclairage et de rayonnement. Guide d'utilisation Solene". Ecole d'architecture de Nantes, France. (1998).

Chirag Deb, A. Ramachandraiah, A simple technique to classify urban locations with respect to human thermal comfort: Proposing the HXG scale (2011).

Colombert M., Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville, Thèse de doctorat Génie urbain, Université Paris-Est, (2008).

Dahmani Krime, Moudjari Messaoud. Praxis d'habitat social revers et couronnements, Edition OPU N°5379, ISBN 978.9961.0.1621.3, 02/2013, P 336.

De Munck Cécile. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Institut National Polytechnique de Toulouse. Novembre 2013.

D. Walton, V. Dravitzki, M. Donn, The relative influence of wind, sunlight and temperature on user comfort in urban outdoor spaces, Building and Environment 42 (2007) 3166–3175

Daich Safa. Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques, Cas de la ville de Biskra. Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider de Biskra. (2011).

Dictionnaire Grand Larousse universel, (1997).

Dimoudi, A. et Nikolopoulou, M. Végétation in urban environment: microclimate analysis and benefits, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 69-76. (2003)

Dubois Catherine. Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique. Thèse de doctorat en cotutelle. Université Laval Québec, Canada et Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse, France (2014).

Emmanuel Bozonnet. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon. Engineering Sciences [physics]. Université de la Rochelle, (2005).

Emmanuel Bozonnet, Francis Allard, M. Chazelas, G. Guarracino, M. Musy. Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique. Jac Fol. Futur de l'habitat, Co-édition Jean-Michel Place / PUCA, pp.139-154, (2008).

Emmanuelle Valette et Erwan Cordeau. Les îlots de chaleur urbains - Répertoire de fiches connaissance. Institut d'aménagement et d'urbanisme-ile de France. Novembre 2010

Encyclopédie Universalis © Universalis France S. A.

Fazia Ali-Toudert, Helmut Mayer, Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate, Building and Environment 41(2006)94 -108

Flavia Cristina Osaku Minella; Francine Aidie Rossi; Eduardo Leite Krüger, Analysis of the daytime effect of the sky view factor on the microclimate and on thermal comfort levels in pedestrian streets of Curitiba. Ambient. constr. Vol.11 n ° 1, (2011).

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans 77: 247–257.

Gandemer, J et Guyot, A. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti : Guide méthodologique et conseils pratiques, France. (1976).

Gandemer, J et Guyot, A. La protection contre le vent. Paris : CSTB, 132 p. (1981).

Giguère Mélissa, Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains, P 1-95, (2009).

Givoni, B: Man Climate and Architecture. London : Applied Science Publishers, second edition. (1976).

Groleau Dominique, Solene : Un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains. Les professionnels de la construction, confort intérieur : outil d'aide à la conception et à la prévision du confort thermique, acoustique et d'éclairage ; Etude de cas, Rouen, 10-11 fév 2000, CERMA.

Grégoire Pigeon. Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOU. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier - Toulouse III. (2007).

Guo, Fei , Fan, Yue , Zhang, Hezi. Natural Ventilation Performance in a High Density Urban Area. Based on CFD Numerical Simulations in Dalian. (2015).

Honjo Knodel Susan, Evaluation de l'environnement thermique urbain comme outil d'aménagement du territoire. Etude de cas dans deux quartiers de la ville de São Paulo (Brésil). Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université de Genève. (2012).

Jennifer Spagnolo, Richard de Dear, A Field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, (2002)

Jérôme Vinet, Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Engineering Sciences. Université de Nantes, (2000).

Johnston, J., Newton, J. Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements. Ecology Unit, London, 95 p. (2004)

Kasbadji Merzouk. Carte des Vents de l'Algérie- Résultats Préliminaires.- Rev. Energ. Ren. (1999) 209-214

Khandaker Shabbir Ahmed, Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments, Energy and Buildings 35 (2003) 103–110

Kofoed Niels-Ulrik and Maria Gaardsted. Prise en compte du vent dans les espaces urbains. Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S.) (2004).

MAHAYA Chafik. Optimisation de la forme urbaine par l'évaluation du potentiel solaire. Mémoire de Magister en architecture. Université Mohamed Khider – Biskra. Avril 2014.

Maignant Gilles, « Dispersion de polluants et morphologie urbaine », L'Espace géographique, 2007/2 Tome 36, p. 141-154.

Masson Valéry. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94:357–397. (2000)

Matzarakis A, Mayer H, Iziomon M. Application of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int J Biometeorol* 43:76–84. (1999).

Matzarakis, A. Modelling of radiation fluxes in urban areas and their relevance to thermal conditions of humans. Third Symposium on the urban environment. 163-164. (2000).

Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H., 2000: Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. In: *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium* (ed. by R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R. Oke and A. Auliciems): Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99, Sydney, WCASP-50, WMO/TD No. 1026, 273-278.

Matzarakis A, Rutz F, Mayer H (2007) Modeling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51:323–334

MAZOUZ SAID. Fabrique de la ville en Algérie et pérennisation d'un modèle: le cas de la nouvelle ville ALI MENDJELI a Constantine. *Courrier du Savoir – N°15*, Mars 2013, pp.23-30

M. Cote, « Biskra », in *10 | Beni Isguen – Bouzeis*, Aix-en-Provence, Edisud (« Volumes »,no 10), décembre 1991, p. 1517-1522.

Marjory Musy. Du Microclimat au bâtiment Concevoir en milieu urbain : prise en compte des interactions bâtienvironnement urbain. Ecole Nationale Supérieure Architecture. Nantes. Octobre, 2007. (Web:<http://www.grenoble.archi.fr>)

Marjory Musy. Approches physiques des ambiances urbaines: Caracterisation et conception. CERMA – UMR CNRS 1563- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. 2008.

Nastaran Makaremi, Elias Salleh, Mohammad Zaky Jaafar, AmirHosein GhaffarianHoseini, Thermal comfort conditions of shaded outdoor, spaces in hot and humid climate of Malaysia, *Building and Environment* 48 (2012).

NG, Edward. Policies and Technical Guidelines for Urban Planning of High Density Cities – Air Ventilation Assessment (AVA) of Hong Kong. The

6th International Ventilation & Energy Conservation in Building. IAQVEC. Sendai, Japan. (2007).

NG Edward, Cheng V, Chan C. Urban climatic map and standards for wind environment - feasibility study. Technical input report no. 1: methodologies and findings of user's wind comfort level survey. Hong Kong Planning Department. (2008).

Nicolas RINGENBACH. Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine. Mesures, modélisation et validation sur STRASBOURG. Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg I. (2004).

Nikolopoulou Marialena, Baker, N. and Steemers, K. Thermal comfort in outdoor urban spaces, Proc. PLEA 1998: Environmentally Friendly Cities, Lisbon, (eds.) E. Maldonado & S. Yannas, James & James, London.

Nikolopoulou Marialena, Nick Baker And Koen Steemers, thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter, Solar Energy Vol. 70, No. 3, pp. 227–235. (2001).

Nikolopoulou Marialena. Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain: une approche bioclimatique. Projet RUROS, France. (2004)

Nikolopoulou Marialena, Spyros Lykoudis, Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, Building and Environment 41 (2006) 1455–1470

Nishimura, N., T. Nomura, H. Iyota, et S. Kimoto. Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology. Solar Energy 64 (4-6): 197-207. 1998.

Oke T.R. Overview of interactions between settlements and their environments. WMO experts meeting on Urban and Building climatology, WPC-37, WMO, Genève. (1982).

Oke, T. R. Boundary layer climates. Second Edition. 435 pp. University press, Cambridge, ISBN 0 415 04319 0. 1987.

Oke, T. R. Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings 11(1-3), pp. 103--113. (1988).

Olivier Cantat. « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps », *Norois* [En ligne], 191 | 2004/2, mis en ligne le 10 septembre 2008. URL : <http://norois.revues.org/1373> ; DOI : 10.4000/norois.1373

Panerai Philippe ; Castex, J.; Depaule, J-C. Formes urbaines: de l'îlot à la barre. Barazakh, ALGERIE,, 1997 – 196p.

Paneraï Philippe ; Depaule. CJ ; Demorgon. M. Analyse urbaine. Barazakh, ALGERIE, 2009, 187 p.

Paneraï Philippe ; Mangin. D. Projet urbain. Barazakh, ALGERIE, 2009, 187 p.

Patrick Stella. Les îlots de chaleur urbains comment y faire face ? Des recherches scientifiques à la mise en œuvre des solutions. Club IDEES. Nanterre. Novembre. (2015).

Patricia Regina Chaves Drach, Gisele Silva Barbosa and Oscar Daniel Corbella. Effects of Urban Morphology Changes on Ventilation: Studies in Wind Tunnel. Journal of Civil Engineering and Architecture 9 (2015) 853-868

Penwarden, A.D. Acceptable wind speeds in towns, *Build. Sci*, Vol. 8, pp. 259-267. (1973).

Pierre Thomas. Évolution saisonnière de l'insolation et de la température en un lieu donné. Laboratoire des Sciences de la Terre, ENS Lyon. (Web: <http://planet-terre.ens-lyon.fr>). (2000).

Reiter Sigrid. Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain Faculté des Sciences Appliquées Architecture et Climat, Juin 2007.

Richard R. Shaker, Taly Dawn Drezner, A New Technique for Predicting the Sky-View Factor for Urban Heat Island Assessment

RIOU CH. Relation entre le rayonnement solaire et la température. O.R.S.T.O.M, 1976.

Ruey-Lung Hwang a, Tzu-Ping Lin b, Andreas Matzarakis, Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort, Building and Environment (2010)

Santos, I. G.; Lima, H.G; Assis, E.S. A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of the city of BELO HORIZONTE, BRAZIL. (2003).

Siew-Ann Tan, Tien-Fang Fwa, Influence of Pavement Materials on the Thermal Environment of Outdoor Spaces, Building and Environment, Vol. 27, No. 3, pp. 289-295, (1992).

Sorre Max. La notion de microclimat. In: Bulletin de l'Association de géographes français, N°301-302, 38e année, Novembre décembre 1961. pp. 162-169.

Takashi Asaeda, Vu Thanh Ca, Heating of paved ground and its effects on the near surface atmosphere, Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993). IAHS Publ. no. 212, (1993).

Theodore Stathopoulou, Hanqing Wub, John Zacharias, Outdoor human comfort in an urban climate, Building and Environment 39 (2004) 297 – 305

Thorsson, S. et al. Different Methods for Estimating the Mean Radiant Temperature in an Outdoor Urban Setting. International Journal of Climatology, v. 27, n. 14, p. 1983-1993, (2007).

Tsoka Stella, Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons Application au cas des éco-quartiers. Architecture, space management. (2011).

YAN LAPLANTE. Le concept d'enveloppe éolienne dans l'intégration du phénomène vent à la conception architecturale. Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels. Université Laval. QUÉBEC. (2006).

Zekri Elyes. Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain. Thèse de Doctorat. Université de Nantes. Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. octobre (2010).

Sites WEB :

<http://www.algerie-meteo.com>

<http://www.aria.fr>

<http://www.biskra.climatemps.com/>

<http://www.climatechallenge.be>

<http://www.cnrm-game-meteo.fr>

<http://www.energieplus-lesite.be>

<http://www.espaces-publics-places.fr>

<http://fr.mapsofworld.com>

<https://fr.wikipedia.org>

<http://fr.climate-data.org>

<http://www.climatechallenge.be>
<http://fr-ch.topographic-map.com/places/Biskra-1585849/>
<http://hst247-a13-1-mg.espaceweb.usherbrooke.ca>
<https://fr.scribd.com/doc/48480380/Donnees-climatiques-de-l-Algerie>
<http://klimat.czn.uj.edu.pl>
www.larousse.fr
<http://www.meteo45.com>
<http://www.meteofrance.fr>
http://www.mem-algeria.org/fr/enr/carte_vents.htm
http://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/ilot-chaleur-urbain.php
<http://pierre.garde.free.fr>
<http://pierre.garde.free.fr>
<http://planet-terre.ens-lyon.fr>
<https://www.populationdata.net/cartes/algerie-divisions-administratives/>
<http://www.satel-light.com>
<http://www.sante-environnement-travail.fr>
<http://thebritishgeographer.weebly.com/urban-climates.html>
<http://www.utci.org/>
<https://windfinder.com>
<https://weatherspark.com>
<http://webworld.unesco.org/>
<http://yosemite.epa.gov/oar/globalwarming.nsf/>

ANNEXES

ANNEXE I

1 LES TYPES DE CLIMATS

1.1 Climats tropicaux (A)

Les régions à climat tropical sont principalement situées de part et d'autre de l'équateur, dans la zone intertropicale comprise entre le tropique du Cancer au nord et le tropique du Capricorne au sud. Dans ces climats tous les mois ont des températures moyennes supérieures à 18 ° Celsius. Les précipitations annuelles sont supérieures à 1500 mm.

Il existe trois grands types de climats tropicaux, et leur désignation est basée sur la répartition saisonnière des précipitations :

1.1.1 Tropical humide (Af) : est un climat tropical où les précipitations se produisent toute l'année. Les variations de température mensuelles dans ce climat sont à moins de 3 ° Celsius.

1.1.2 Tropicale mousson (Am) : Les précipitations annuelles est égale ou supérieure à Af, mais la plupart des précipitations tombent dans les 7 à 9 mois les plus chauds. Pendant la saison sèche très peu de pluie.

1.1.3 Tropical humide et sec (Aw) : a une longue saison sèche pendant l'hiver. Les précipitations tombent seulement pendant la saison estivale, est généralement inférieure à 1000 millimètres.

1.2 Climats secs (B)

Les régions à climat sec s'étendent entre 20°-35 ° Nord et du Sud de l'équateur et dans les grandes régions continentales des latitudes moyennes souvent entourées de montagnes. La principale caractéristique de ce type de climat est que l'évaporation potentielle et la transpiration dépassent les précipitations. Les grands types de climats secs sont:

1.2.1 Sec et aride (BW) :

C'est un climat désertique, Il couvre 12% de la surface terrestre et est dominé par la végétation xérophile¹. Le supplément lettres h et k sont utilisés généralement pour distinguer si le climat sec et aride se trouve

¹ Les **xérophiles** (du [grec ancien](#) ξερος *xeros* : sec et φίλος *philos* ami) sont des organismes [extrémophiles](#) vivant dans des milieux très pauvres en eau. Source : <https://fr.wikipedia.org>

dans les régions subtropicales ou dans les latitudes moyennes, respectivement.

1.2.2 Semi aride sec (steppique) (BS):

Ce climat couvre 14% de la surface terrestre. Il reçoit plus de précipitations que le BW. Les lettres h et k supplémentaires sont utilisés généralement pour distinguer si le climat semi-aride sec se trouve dans les régions subtropicales ou dans les latitudes moyennes, respectivement.

1.3 Climats subtropicaux (C) :

Ces climats se situent entre les zones désertiques et tempérées, dans les deux hémisphères. Caractérisés principalement par des étés chauds et humides avec des hivers doux. Il en existe deux types: Les climats subtropicaux secs, et les climats subtropicaux humides

1.3.1 Le climat subtropical humide (Cfa) : a des étés chauds et humides et des orages fréquents. Les hivers sont doux et les précipitations pendant cette saison causée par des cyclones de latitude moyenne.

1.3.2 Les climats océaniques (Cfb) : se trouvent sur les côtes occidentales des continents. Ce type de climat se caractérise par des hivers doux et pluvieux et des étés frais et relativement humides.

1.3.3 Les climats méditerranéens (Cs) : se caractérisent par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

1.4 Climats continental (D)

Le climat continental est celui qui règne dans les régions situées loin de la mer. C'est un climat qui présente de grands contrastes de températures. Les précipitations sont peu abondantes. Les hivers sont sévères avec des tempêtes de neige et des vents forts. Trois types mineurs: Dw - hivers secs; Ds - étés secs; et Df - mouiller toutes les saisons.

1.5 Climats polaires (E) :

Les deux pôles sont recouverts de glace et de neige, mais on aurait tort de croire que l'Arctique et l'Antarctique sont identiques. Le pôle Nord est situé au milieu de l'océan Arctique, tandis que le pôle Sud se trouve sur un continent, l'Antarctique. Celui-ci est entouré par la

mer et ne se trouve à proximité que de la pointe de l'Amérique du Sud et de quelques îles.

2 CLIMAT EN ALGERIE

Située dans une zone de transition, entre les régimes tempérés et subtropicaux, l'Algérie présente une grande sensibilité au climat à cause de la grande variabilité des pluies saisonnières et annuelles.

En égard au caractère aride et semi-aride de son climat, l'Algérie ressentira davantage les effets des changements climatiques. Le dérèglement actuel du cycle « évaporation-pluie » conduit à envisager l'occurrence probable d'événements extrêmes comme les sécheresses prolongées ou les inondations catastrophiques, ce qui constitue une menace sévère sur les écosystèmes terrestres et par conséquent sur la biodiversité.

2.1 ZONES CLIMATIQUES

Pour l'Algérie, on définit les zones suivantes:

- 4 zones climatiques et une sous zone au Nord.
- 3 zones climatiques au Sud.

Pour chaque zone, on distingue les sites d'altitude inférieure à 500 m, comprise entre 500 et 1000 m et supérieure à 1000 m. **Figure 3.6**

La zone A: Elle comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes côtières (climat méditerranéen maritime).

La zone B: Elle comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas Tellien, autre que celle de Chlef (climat méditerranéen continental).

La zone B': C'est une sous-zone de la zone B. Elle comprend la vallée de Chlef, comprise entre la chaîne de l'Ouarsenis et les montagnes du Dahra et des Braz.

La zone C: Elle comprend les hauts plateaux entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne).

La zone D: Elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°.

La zone D2 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°.

La zone D3 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud.

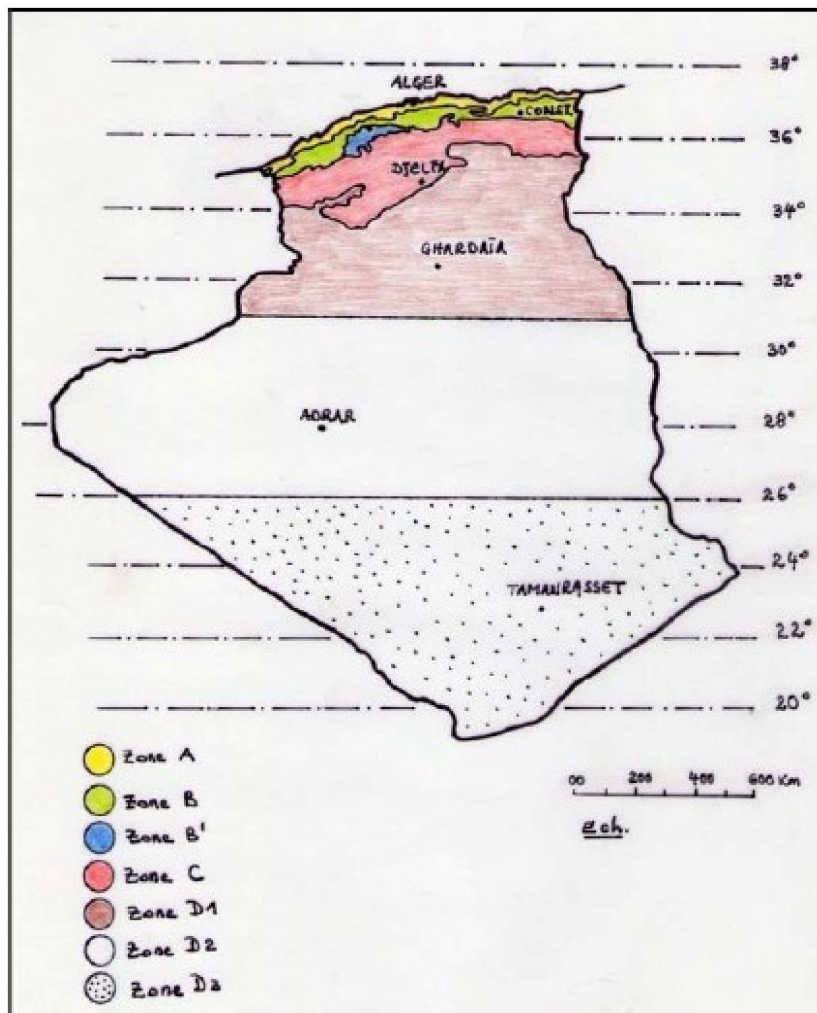


Figure 1 : Zones climatiques de l'Algérie. Source : <https://fr.scribd.com>

Une autre classification plus récente a été faite par le CNERIB². (**Figures 2 et 3**).

- zones d'été (5 zones): E1, E2, E3, E4, E5), et
- zones d'hiver (3 zones): H1, H2, H3, avec des sous-zones.

² CNERIB : Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment

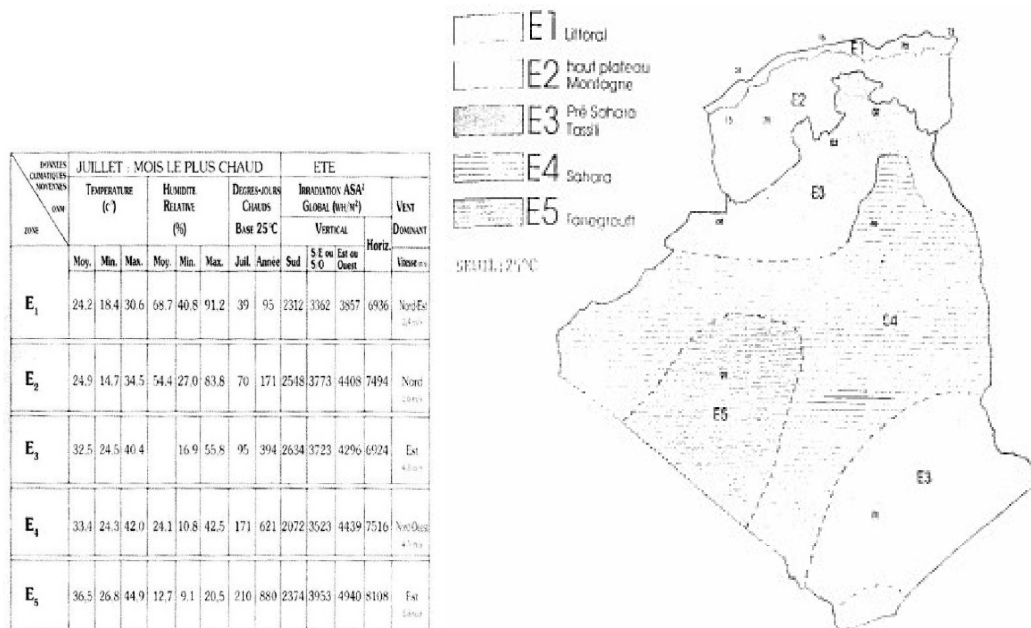


Figure 2 : Zones climatiques d'été de l'Algérie. Source : <https://fr.scribd.com>

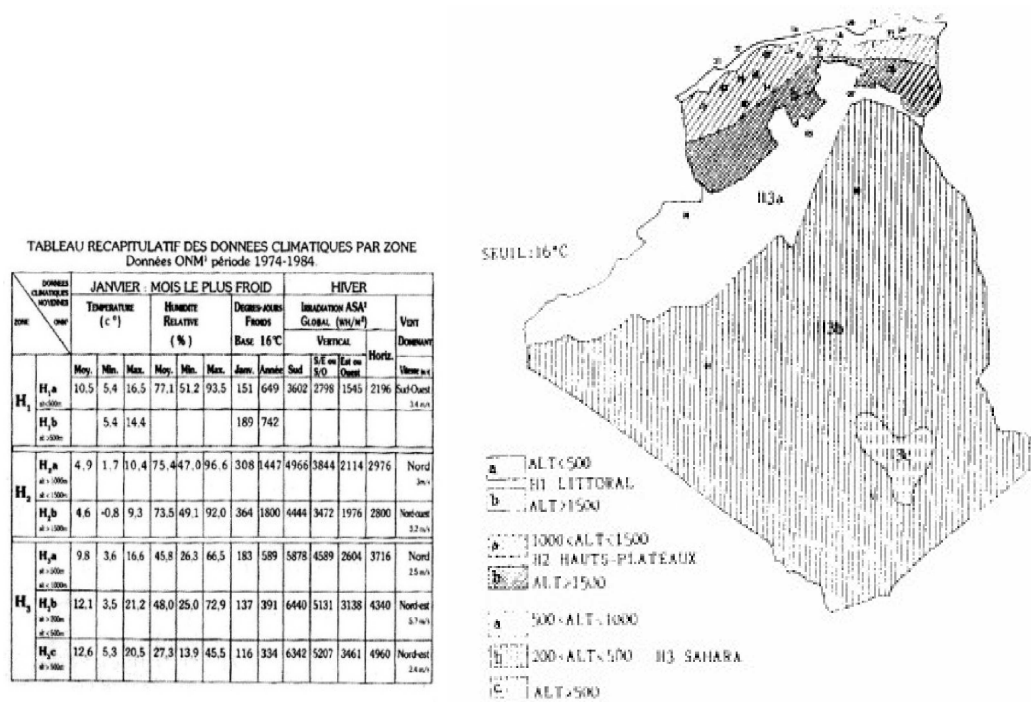


Figure 3: Zones climatiques d'hiver de l'Algérie. Source : <https://fr.scribd.com>

2.3 DONNEES CLIMATIQUES

Données pour l'hiver

Caractéristiques climatiques moyennes par zone	Caractéristiques climatiques du mois le plus froid: Janvier							
	T _{moy}	T _{min. moy}	T _{max. moy}	T _{min. abs}	T _{max. abs}	Ecart diurne	V Variabil.	T _{extérieure de base.}
ZONE A								
< 500 m	12	9	15	5	20	6	4	6
500 – 1000 m	8	4	12	0	17	8	4	1
> 1000 m	5,5	2	9	-2	14	7	4	-1
ZONE B								
< 500 m	10	5	15	1	20	10	4	2
500 – 1000 m	8	4	12	0	17	8	4	1
> 1000 m	5,5	2	9	-2	14	7	4	-1
ZONE B'								
< 500 m (Toute)	9	3	15	-1	20	12	4	0

Données pour l'été

Caractéristiques climatiques moyennes par zone	Caractéristiques climatiques du mois le plus chaud: Juillet								
	T _{moy}	T _{max. moy}	T _{min. moy}	T _{min. abs}	T _{max. abs}	Ecart diurne	V Variabil.	T _{effect. max. moy.}	T _{extérieure sèche de base.}
ZONE B'									
< 500 m (Toute)	29	38	20	15	44,5	18	6,5	29	41
ZONE C									
500 – 1000 m	27	37	17	13	42	20	5	27,5	39,5
> 1000 m									
Zone D1									
< 500 m	29,5	35,5	20	11	45	15,5	9,5	29	40,5
500 – 1000 m	27	32	18	9	41,5	14	9,5	27	36
Zone D2									
< 500 m	31	39	23	18	44	16	5	28	41,5
500 – 1000 m	28	34,5	19,5	14,5	39,5	20	5	26	37
Zone D3									
< 500 m	33,5	41	26	22	45	15	4	28,5	43
500 – 1000 m	31	36,5	22,5	18,5	40,5	14	4	26,5	38,5
> 1000 m	28	35	21,5	17,5	37	13,5	2	26	36

Données pour l'été

Caractéristiques climatiques moyennes par zone	Caractéristiques climatiques du mois le plus chaud: Juillet								
	T _{moy}	T _{max. moy}	T _{mn. moy}	T _{mn. abs}	T _{max. abs}	Ecart diurne	V Variabil.	T _{effect. max. moy.}	T _{extérieure sèche de base.}
ZONE B'									
< 500 m (Toute)	29	38	20	15	44,5	18	6,5	29	41
ZONE C									
500 – 1000 m	27	37	17	13	42	20	5	27,5	39,5
> 1000 m									
Zone D1									
< 500 m	29,5	35,5	20	11	45	15,5	9,5	29	40,5
500 – 1000 m	27	32	18	9	41,5	14	9,5	27	36
Zone D2									
< 500 m	31	39	23	18	44	16	5	28	41,5
500 – 1000 m	28	34,5	19,5	14,5	39,5	20	5	26	37
Zone D3									
< 500 m	33,5	41	26	22	45	15	4	28,5	43
500 – 1000 m	31	36,5	22,5	18,5	40,5	14	4	26,5	38,5
> 1000 m	28	35	21,5	17,5	37	13,5	2	26	36

Tableau 1 : Données climatiques correspondantes à la classification des zones climatiques de l'Algérie. Source : <https://fr.scribd.com>

2.3.1 TEMPERATURE

L'observation de l'évolution des températures en Algérie, met en évidence

- sur l'ensemble du pays, une hausse de température au cours des saisons d'hiver et d'automne, une hausse des températures minimale et maximale sur l'ensemble des stations de l'Algérie du Nord depuis la décennie 70 et se prolongeant jusqu'à nos jours,
- durant ces 20 dernières années, les températures maximales ont augmenté plus que les minimales; cette augmentation est de 2°C environ.

2.3.2 PRECIPITATIONS

Les précipitations en Algérie sont caractérisées par une variabilité très marquante entre le Nord et le Sud et entre l'Est et l'Ouest. La quantité de pluie annuelle décroît à mesure que l'on avance aussi vers le Sud et l'Ouest. (Source : <http://www.algerie-meteo.com>).

Au Sud de l'atlas saharien, les précipitations annuelles tombent à moins de 100 mm, cette valeur étant habituellement considérée comme

marquant le début du désert. Outre l'examen des précipitations pour les mêmes périodes (**Tableau 1**), montre aussi:

- qu'en automne et en hiver, il y a diminution des pluies sur le Nord ; ces deux saisons correspondent au réchauffement important qui affecte le Nord du pays,
- qu'au printemps, la pluviométrie est plus importante à l'Ouest, au Centre et au Sud du pays et qu'il y a diminution des précipitations à l'Est. Il y a environ 10% de baisse des précipitations ces 20 dernières années.

On peut conclure qu'entre les périodes **1931-1960** et **1961-1990** : la hausse de température a été de l'ordre de 0,5°C ; l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle est une conséquence de l'augmentation de la température (l'évapotranspiration est une fonction croissante de la température), la pluviométrie a baissé en moyenne de 10%. Le déficit hydrique sera plus important à l'Ouest qu'au centre et qu'à l'Est du pays.

Pour la période **1990 – 2020**, la hausse de la température moyenne sera comprise **entre 0,8°C et 1,1°C** et la baisse des précipitations moyennes sera de l'ordre de **10%**. L'élévation du niveau de la mer sera comprise entre **5 et 10 cm**. L'intensification de l'évaporation due à l'augmentation de la température s'ajoute à la baisse des précipitations pour diminuer encore plus la quantité des eaux mobilisables au niveau des barrages et des nappes souterraines.

Les projections à l'horizon **2020 et 2050** indiquent que les saisons seront dérégulées et les températures continueront de croître. La période pluvieuse sera concentrée sur une courte période entraînant des risques d'inondations. De même, il y aura une augmentation de la fréquence des sécheresses.

2.3.3 LES VENTS

Les vents en Algérie sont très variables. Les forces éoliennes ne dépassent pas les 120 km/h. Au Sud, ils déplacent chaque année entre 60 et 200 millions de tonnes de poussières dans l'air.. En été, le sirocco, un vent très sec et très chaud (dit le Chehili), se dirige du sud vers le nord. (Source : <https://fr.wikipedia.org>). La **figure 4**, illustre la carte des vitesses

moyennes annuelles du vent estimées à une altitude de 10 mètres au-dessus du sol. Les vitesses varient de 1 à 6 m/s. Quatre classes sont distinguées suivant leur importance, à savoir :

- **classe 1** : $V < 3.0$ m/s
- **classe 2** : $3.0 < V < 4.0$ m/s
- **classe 3** : $4.0 < V < 5.0$ m/s
- **classe 4** : $5.0 < V$

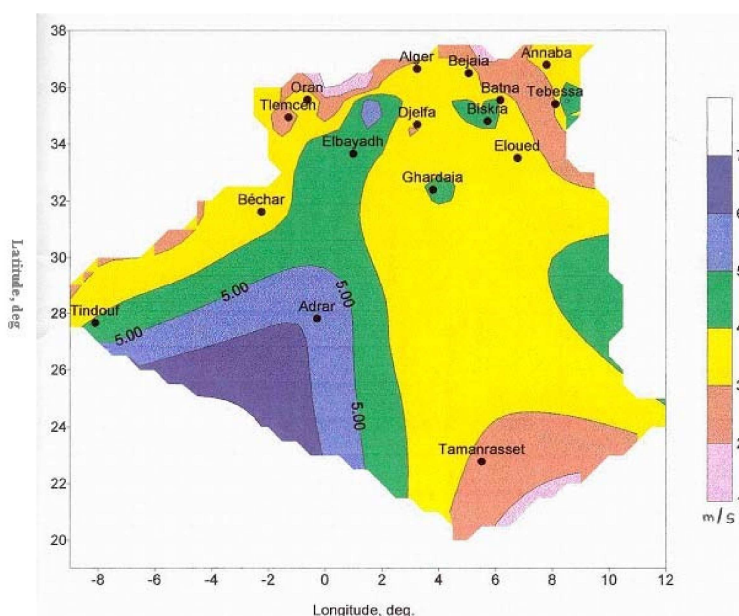


Figure 4 : Carte des vents de l'Algérie. Source : http://www.mem-algeria.org/fr/enr/carte_vents.htm

Une grande partie du territoire se trouve dans la « **classe 2** » avec des vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoun). Autour d'Oran, Tiaret, In Aménas, ainsi que les environs de Biskra, les vitesses de vent sont supérieures à 4 m/s, correspondant à la « **classe 3** ». Alors que dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoun), les vitesses du vent sont maximales « **classe 4** ». Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni Abbès présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s), correspondant à la « **classe 1** ». (Kasbadji, 1999).

ANNEXE II

Données radiatives de matériaux

	Albédo	Emissivité	Référence
Matériaux de construction			
Pierre	0.2-0.35	0.85-0.9	(Oke, 1987)
Pierre - Granite, Gneiss	0.44		(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
Gravier (vrac)	0.08 -0.18	0.92	www.thermique55.com
Calcaire -clair	0.75	0.36-0.9	(Mazria, 1979)
- Sombre	0.50		
Grés - beige (quartzeux)	0.44		(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
- Gris clair	0.38		
- Rouge	0.27		
Asphalte foncé	0.07	0.90	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Béton neuf	0.45	0.90	(Lavigne, 1994)
Béton vieilli	0.1-0.35	0.71-0.9	(Lavigne, 1994), (Oke 1987), (Mazria, 1979)
Bois	0.40	0.95	(Lavigne, 1994)
Brique	0.05-0.2	0.9-0.92	(Oke 1987)
Toitures			
Tuile en terre cuite	0.1-0.35	0.90	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979), (Oke 1987)
Feutre bitumé	0.12		(Mazria, 1979)
Feutre bitumé avec surface aluminisée	0.60		(Mazria, 1979)
Étanchéité en feuilles bitumées,			(Mazria, 1979)
- Brun	0.13		
- vert	0.14		
Papiers goudronné, noir	0.07		(Mazria, 1979)
Tuiles de béton :			
- Rouge	0.18	0.91	
- Blanc	0.73	0.9	(Parker, 1993) (Berdahl, 1997)
- Beige claire	0.63	0.9	
- Marron claire	0.42	0.9	
- Mauve	0.41	0.9	
- Gris rose	0.53	0.9	
Fibre de ciment :			
- Marron	0.26	0.9	(Parker, 1993)
- Gris étain	0.25	0.9	(Berdahl, 1997)
Bardeau d'asphalte			
- Blanc	0.21	0.91	
- Argent	0.20	0.91	(Berdahl, 1997)
- Marron foncé	0.08	0.91	
- Gris	0.08	0.91	
- Vert	0.19	0.91	
- Marron claire	0.19	0.91	
- Noir	0.05	0.91	
Sols			
Herbe haute et sèche	0.31 à 0.33		(Mazria, 1979)
Gazon vert	0.33	0.49	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Sol nu sans végétation	0.25		(Mazria, 1979)
Sable humide	0.09		(Lavigne, 1994)
Sable sec	0.18		(Lavigne, 1994)
Marbre - blanc	0.66	0.931	(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
- sombre	0.44	0.931	(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
Toitures et façades			
Aluminium	0.6-0.85	0.12-0.25	(Parker, 1993), (Mazria, 1979)
Fer	0.10-0.12	0.13-0.28	(Oke 1987)
Acier galvanisé oxydé	0.38	0.28	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Argent	0.93	0.02	(Mazria, 1979)
Cuivre	0.82	0.072	(Mazria, 1979)
Zinc galvanisé		0.23	(Mazria, 1979)
Laiton		0.05	(Mazria, 1979)
Peintures cellulosique			
- blanc	0.82	0.91	
- jaune	0.77	0.91	
- Orange	0.63	0.91	
- Rouge vif	0.66	0.91	
- Rouge sombre	0.47	0.91	(Berdahl, 1997) (Mazria, 1979)
- Gris	0.25	0.91	(Synnefa et al 2007)
- Vert brillant	0.21	0.91	
- Vert claire	0.50	0.91	
- Vert sombre	0.12	0.91	
- Bleu	0.18	0.91	
- Bleu foncé	0.09	0.91	
- Marron	0.23	0.91	
- Marron clair	0.22	0.91	
- Noir	0.05	0.91	
Verre transparent :			
angle zénithal <40°	0.08	0.87 à 0.94	(Oke, 1987)
angle zénithal 40° < α < 80°	0.09 à 0.52	0.87 à 0.92	

Tableau 3.15: données radiatives de matériaux, d'après Athamnia, (2008)

ANNEXE III

1 Mise en marche

Après l'installation de PHOENICS, quatre icônes doivent être présents sur le bureau-dessus, intitulé:

1. PHOENICS commander
2. PHOENICS-VR
3. WINDF
4. POLIS

1.1 Mise en marche par « PHOENICS commander »

La meilleure façon de commencer, est d'activer « PHOENICS Commander », en cliquant sur l'icône de bureau créé lors de l'installation.

(Figure 1).

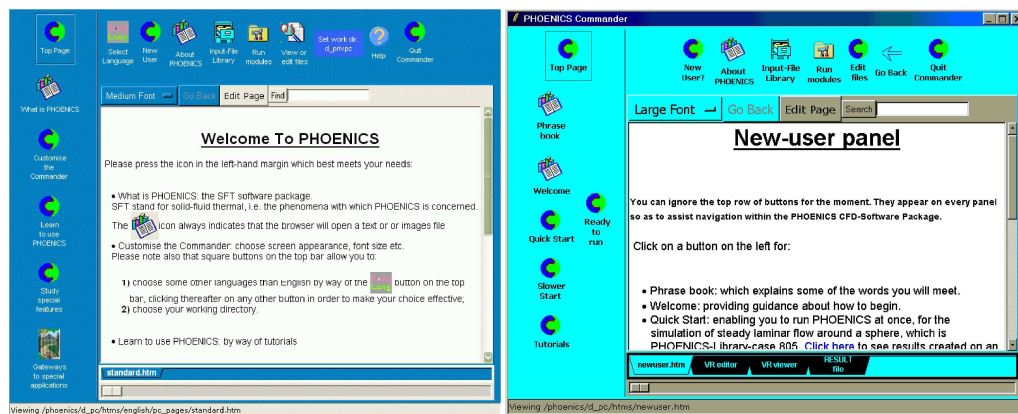


Figure 1 : interface de PHOENICS, Les messages à l'écran expliquent les fonctions de chaque bouton. Source : **CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.**

Les **boutons le long du bord supérieur** donnent accès à la dynamique des fluides computationnelle PHOENICS Software Package. Plus précisément:

- Le bouton «**Nouvel utilisateur**» mènera à une page conçue pour les débutants (Figure 4.2 à droite), ce qui permet de se renseigner sur PHOENICS, pour le voir en action.
- «**About PHOENICS**», pour accéder aux renseignements sur la nature et les capacités du logiciel.
- Les pistes «**Input-File Library**» de plusieurs centaines de cas d'écoulement de simulation que vous pouvez exécuter, avec les modifications que vous prenez soin d'introduire.

- **«Run Modules»** permet d'exécuter des modules individuels de l'emballage, sans restriction ou l'orientation soit près.
- **«Modifier les fichiers »** permet de consulter ou de modifier les fichiers du package PHOENICS qui nous intéressent.

Les **boutons à gauche** sont:

- **Options d'affichage:** pour changer la couleur, la police et d'autres caractéristiques visuelles du « commander ».
- **Activer la modification:** pour mettre un bouton "modifier la page" en vue. Cela permet de modifier la page que nous regardons.
- **Choisissez le répertoire de travail:** La plupart des utilisateurs préfèrent créer un répertoire de travail différent pour chaque projet. Le répertoire de travail par défaut est: / phoenix / d_privpc.
- **Choisissez Versions:** si des alternatives existent.
- **Exécutez vre:** exécuter le module PHOENICS VR-Environnement. Ceci est prévu pour les utilisateurs expérimentés de PHOENICS.
 - **Prêt à fonctionner:** une sélection de « ready-to-run » à partir de « input-file library », disposées de manière qui permet de fonctionner (Figure 4.2 à droite):
 - **Satellite**, pour l'entrée de données
 - **EARTH**, pour l'exécutable, et
 - **PHOTON ou Viewer**, pour l'affichage graphique des résultats.

1.2 Mise en marche par « VR-éditeur »

L'éditeur est utilisé pour:

- le réglage de la taille du domaine de calcul;
- définir la position, la taille et les propriétés des objets qui doivent être introduits en elle;
- spécifier le matériau qui occupe autrement le domaine;
- spécifiant l'entrée et la sortie des conditions aux limites;
- préciser les conditions initiales, nécessaires si le problème est dépendant du temps, et souhaitable sinon pour l'économie;
- la sélection d'un modèle de turbulence, si la situation l'exige;
- spécifier la finesse de la grille de calcul;

- en spécifiant d'autres paramètres influençant la vitesse de convergence de la procédure de solution.

Les fonctions de contrôle de l'ensemble de VR-Editor sont divisées en deux parties distinctes - les contrôles des mouvements et des contrôles de domaine et de l'objet.

Contrôle des mouvements

Quatre paires de boutons fléchés permettent à l'utilisateur de faire pivoter et de déplacer le domaine du modèle contenu dans la fenêtre graphique et pour agrandir l'écran graphique et sortir. Il y a d'autres contrôles d'affichage situés dans les deux premières lignes de l'objet et le combiné de domaine, qui permettent à l'utilisateur de modifier plusieurs autres options de visualisation, tels que cacher des objets ou de contrôler la vue du maillage courant, etc. Toutes les commandes de mouvement sont présentées dans la **figure 4.3**.

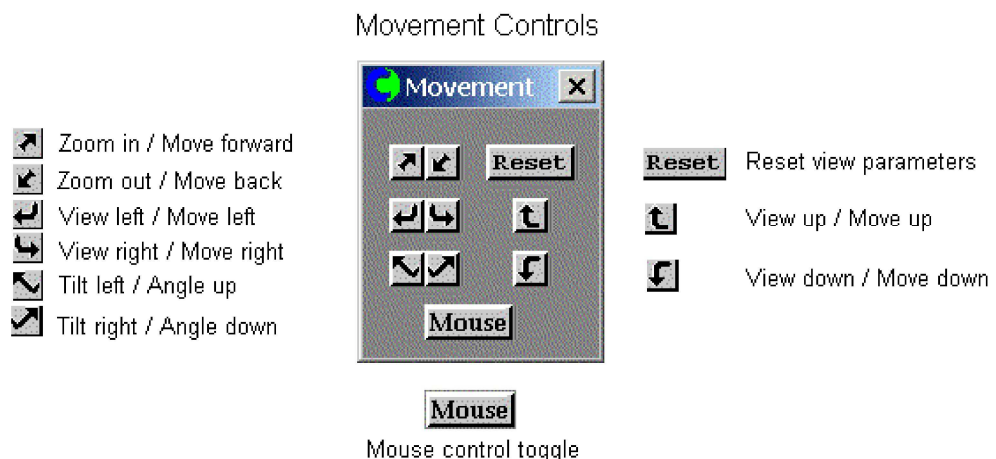


Figure 2 : Contrôle des mouvements de VR-Editor. Source : [CHAM Rapport technique: TR 001. 2005](#).

Commandes principales

Les boutons de contrôle situés dans le plus grand combiné sont appelés les commandes principales. Ceux-ci sont résumés dans la **figure 3**.

Object and Domain Controls

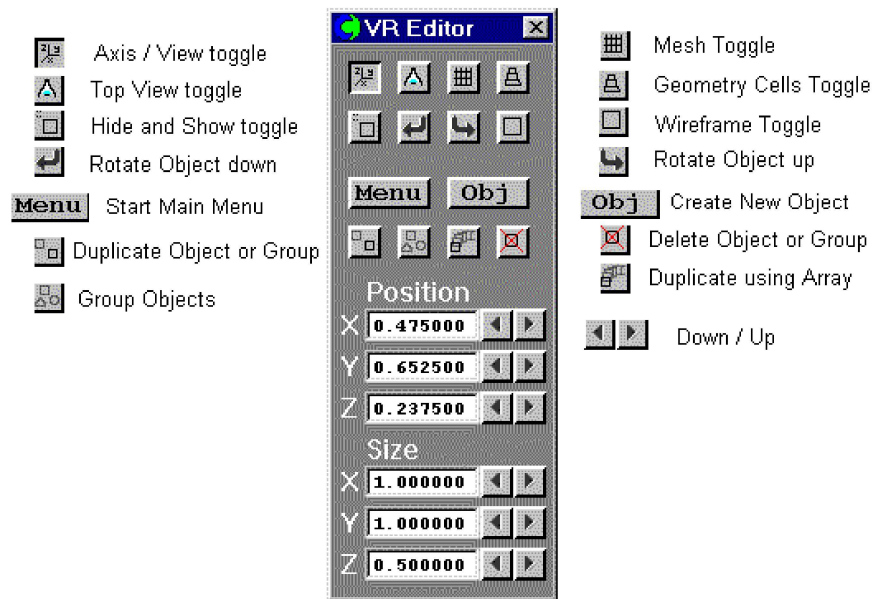


Figure 3 : Contrôles de domaine et de l'objet de VR-Editor. Source : **CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.**

Les contrôles les plus importants, sont : «Start Menu principal» et «Créer un nouvel objet » (**Figure 3**).

- Le bouton **Menu principal** donne l'accès à une série de panneaux de menu en plein écran dans lequel la taille du domaine de calcul, la distribution de la grille, les propriétés physiques du domaine de flux, modèles de turbulence, etc. peut être réglé.

- Le bouton « **objet** » est utilisé pour créer de nouveaux objets et de définir divers paramètres pour ces objets, y compris leur taille et leur position dans le domaine de flux, leurs propriétés physiques, etc.

Les autres boutons de commande situés sous le nouveau bouton d'objet peut être utilisé pour supprimer des objets, des objets en double, les objets de groupe et de créer des tableaux d'objets, comme le montre la Figure 3b. Tous ces contrôles principaux seront utilisés dans la simulation d'écoulement dans la section suivante.

Saisie de données dans le VR-Editor

Pour rendre les paramètres globaux requis pour décrire le domaine de flux, il faut cliquer sur le bouton « Menu ». La première page du menu

principal, apparaît sur l'écran. (**Figure 4**). Pour définir le titre d'une simulation, il suffit de le taper dans la rubrique « TITLE ».

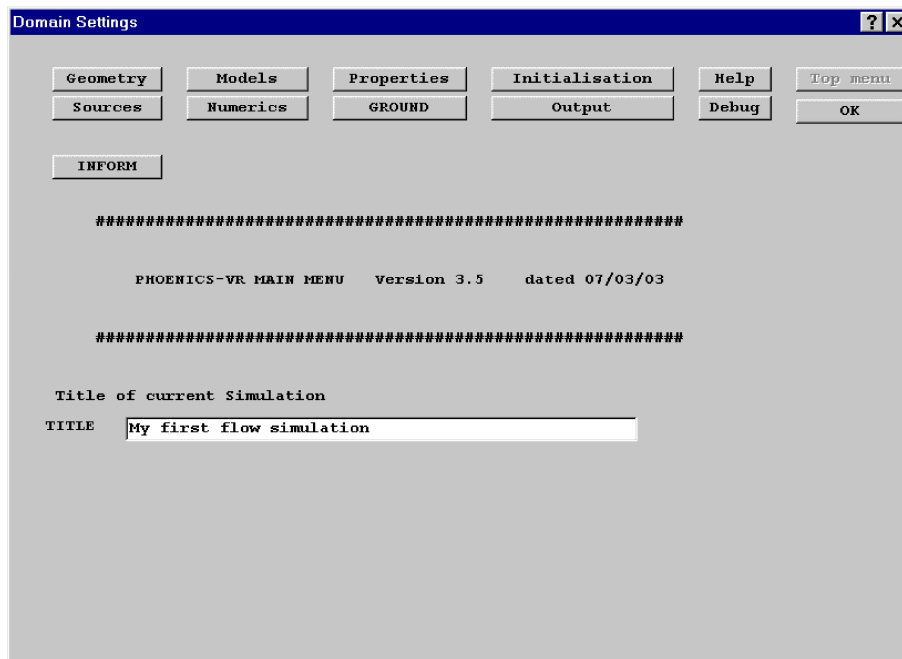


Figure 4: La fenêtre du menu principal. Source : **CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.**

Les boutons exécutent les fonctions suivantes:

- **Géométrie:** paramètres de la grille - systèmes de coordonnées, stable / transitoire
- **Modèles:** Solution de variables, modèles de turbulence, etc.
- **Propriétés:** Densité, viscosité, etc.
- **Initialisation:** Les valeurs initiales.
- **Aide:** Aide sur ce panneau. Aide des objets est obtenue en cliquant sur le ? dans le coin en haut à droite, puis un élément.
- **Menu principal:** Aller au niveau supérieur.
- **Sources:** sources entier domaine, par exemple flottabilité.
- **Numerics:** paramètres de contrôle de la solution.
- **GROUND:** Les valeurs pour SOL.
- **Sortie:** Imprimer-out et les contrôles sur le terrain dumping.
- **INFORM:** Démarrez l'éditeur In-Form.
- **OK:** Retour à VR-Editor. Ce bouton apparaît uniquement sur le panneau supérieur.

- le bouton «Géométrie» pour définir la taille du domaine de flux, ainsi que le nombre de cellules. (Figure 5).

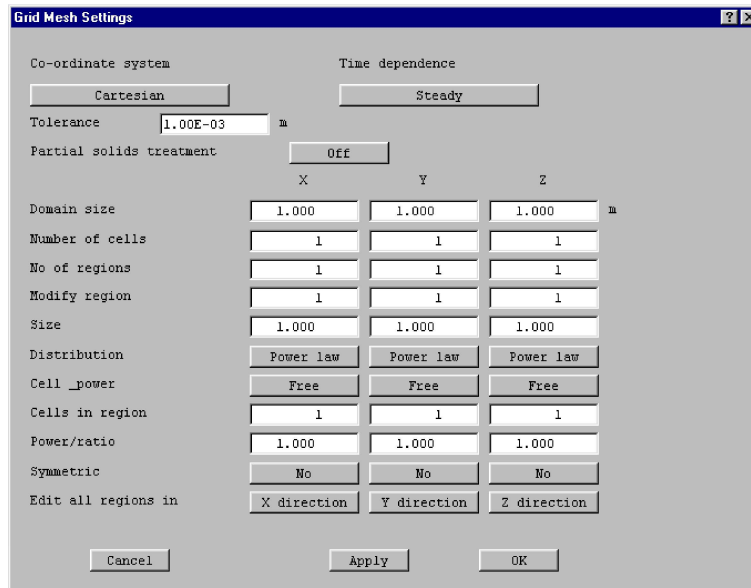


Figure 5: La page 'Géométrie' du Menu principal. Source : CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.

Le bouton «modèles», pour obtenir la page du menu principal illustré à la **figure 6**, pour activer les quantités requises pour être simulé :

- Mettre le bouton «Solution pour des vitesses et de la pression», à «ON».
- définir le modèle de turbulence

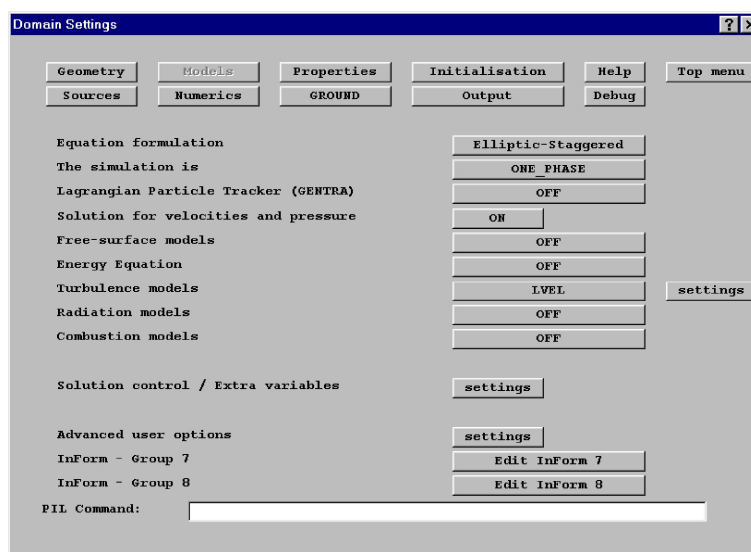


Figure 6: La page «Modèles» du menu principal. Source : CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.

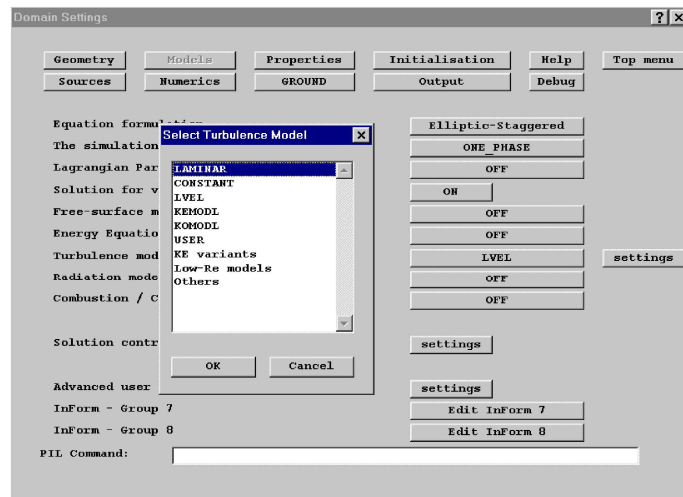


Figure 7: La page «Modèles Turbulence» du menu principal. Source : CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.

1.3 Le VR-Viewer.

Les résultats de simulation de l'écoulement peuvent être visualisés avec le post-processeur « PHOENICS VR » appelé « VR-Viewer ».

Comment accéder à « VR-Viewer ».

Pour accéder à la visionneuse VR, il suffit de cliquer sur le bouton « Run », puis sur « processeur Post », puis 'processeur graphique Post (VR Viewer) » dans l'environnement PHOENICS-VR.

Lorsque la boîte de dialogue des «noms de fichiers de apparaît, cliquez sur 'OK' pour accepter les fichiers de résultats actuels. L'écran représenté sur la figure 15 devrait apparaître.

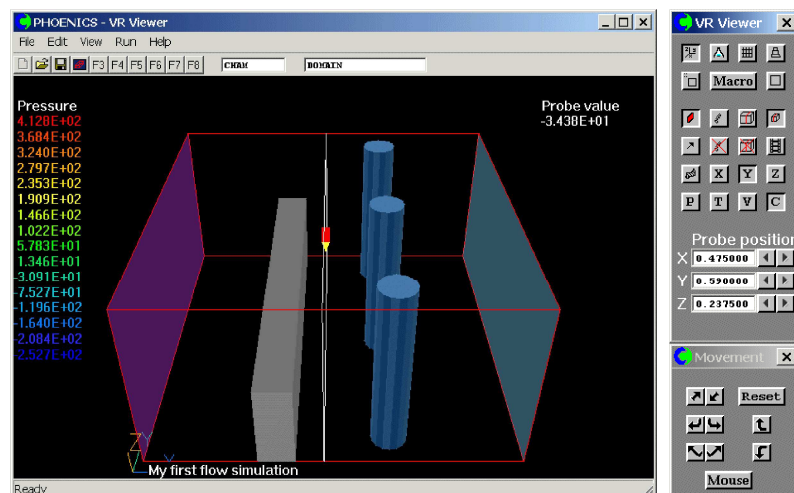


Figure 8: Fenêtre de VR-Viewer. Source : CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.

L'écran VR-Viewer et la main de contrôle Set Boutons.

À première vue, le VR-Viewer est très similaire à la VR-Editor. Il existe cependant des différences dans les contrôles et fenêtre des annotations graphiques qui permettent l'affichage des résultats dans le domaine de flux, par exemple:

- A la gauche de la fenêtre graphique affiche une liste de numéros de couleur. Ceci est la gamme de couleurs, qui correspond à la variable de résultat sélectionnée. Les couleurs associées aux valeurs numériques à l'échelle sont ceux qui seront utilisés lors du traçage des vecteurs d'écoulement, les contours des parcelles, des iso-surfaces et rationalise.

- Les résultats de sonde peuvent être utilisés pour interroger le domaine de flux pour les valeurs de toute variable de résultat sélectionné qui a été résolu pour le solveur Terre. Le numéro qui apparaît en haut à droite de la fenêtre de visualisation indique la valeur de la variable sélectionnée à la position de la sonde actuelle. La position de la sonde actuelle est indiquée dans la fenêtre graphique par la sonde icône en forme de crayon rouge (figure). La position de la sonde peut être modifié en utilisant la «position sonde» flèches situées dans la partie inférieure de la plus grande combiné.
- Un rectangle blanc coupe le domaine de flux. Ce rectangle indique un affichage des résultats plan qui passe par l'emplacement de la sonde. L'orientation du plan de visualisation peut être modifié en utilisant les trois 'affichage de contrôle de l'avion' icônes marquées X, Y et Z, situé vers le centre du panneau de commande. Une fois que l'orientation du plan de visualisation a été sélectionné commande la "position de la sonde» peut être utilisé pour déplacer la sonde et le plan de visualisation associé à travers le domaine d'écoulement.
- Vecteurs, les contours et les iso-surfaces peuvent être tracés en utilisant les trois icônes situées à gauche de la «visualisation des icônes de « contrôle de l'avion». Les vecteurs, les contours et les iso-surfaces sont toutes de couleur en fonction de la variable

courante. La valeur utilisée pour iso-surfaces est la valeur de la variable actuelle à la position de la sonde. Ainsi, le déplacement de la sonde va provoquer des vecteurs, des contours et des iso-surfaces pour être redessinés de manière appropriée.

- rationalise peuvent être tracées en amont ou en aval (ou dans les deux sens) de la position de la sonde actuelle. rationalise multiples peuvent être créées en commençant le long d'une ligne ou autour d'un cercle.

Une brève description des boutons de contrôle de la VR-Viewer est représentée sur la figure 9.

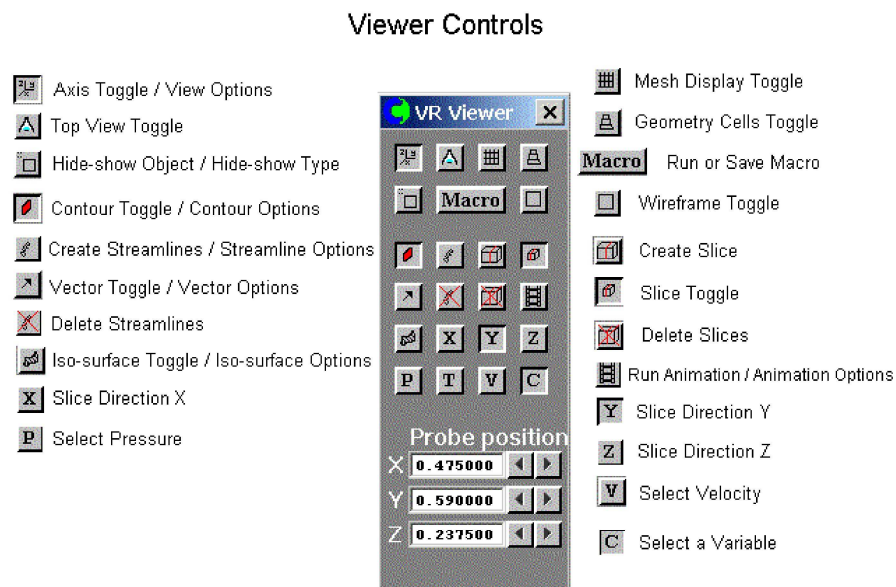
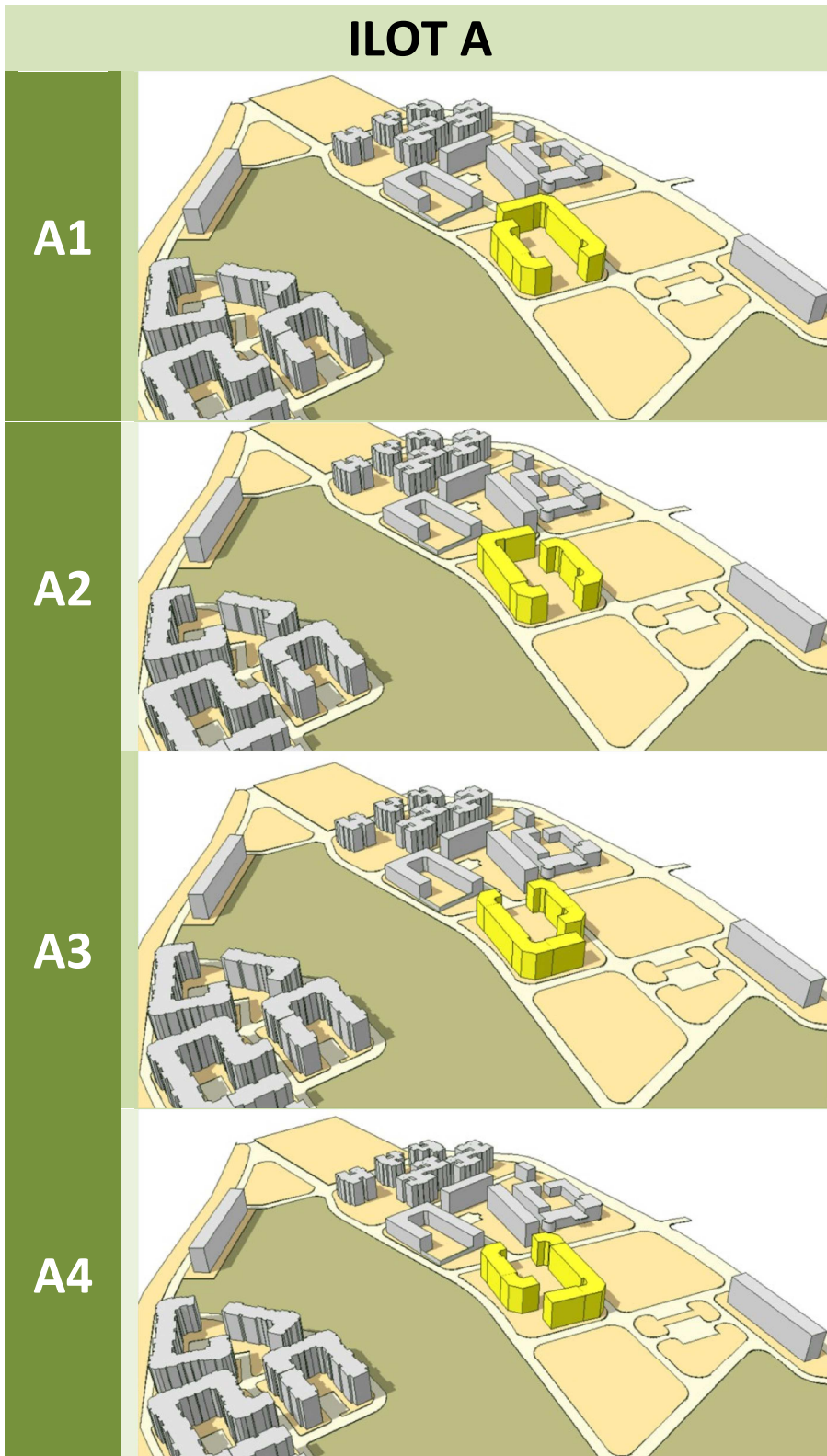
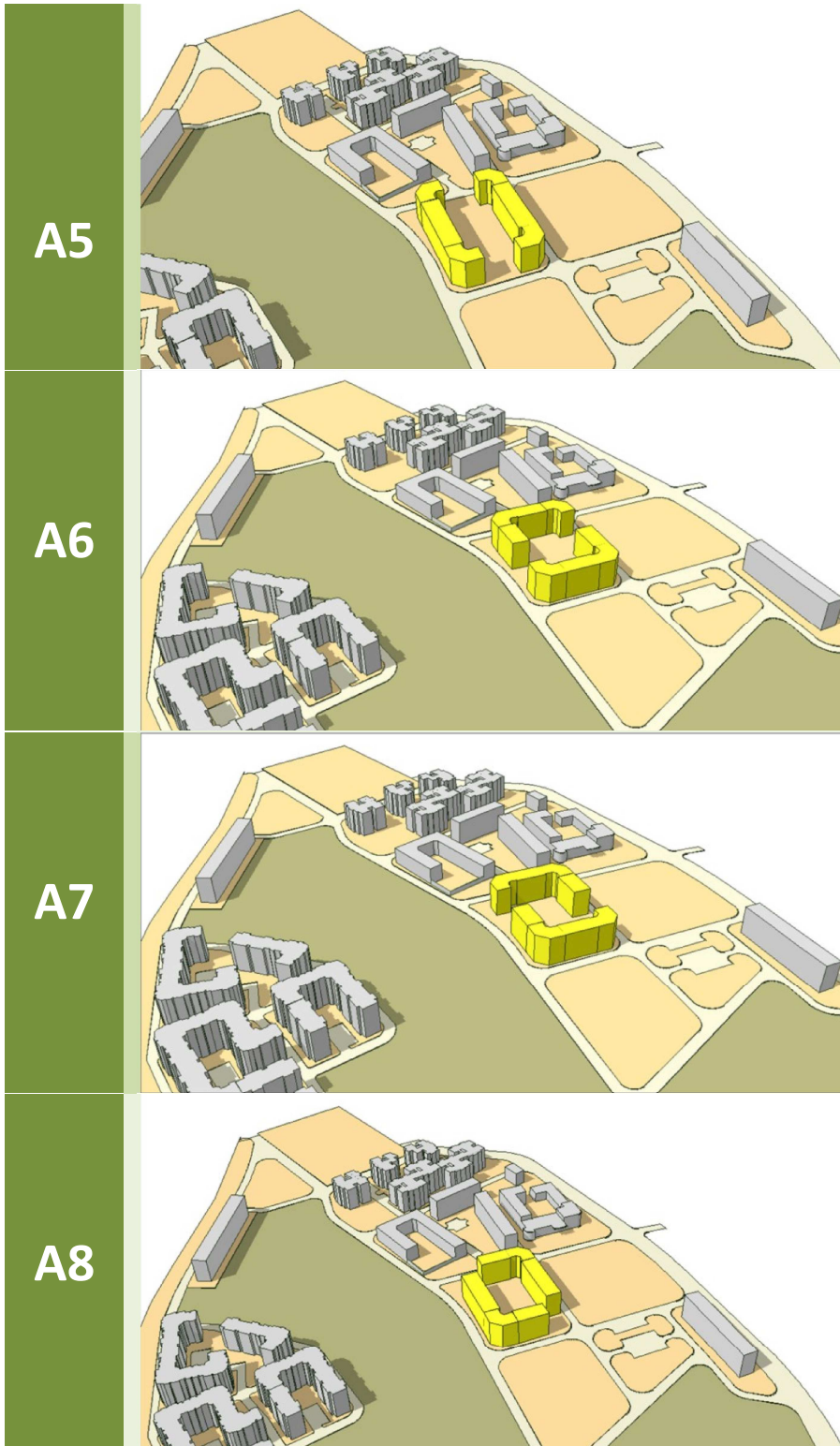


Figure 9: Les commandes de visualisation du combiné VR-Viewer. Source : CHAM Rapport technique: TR 001. 2005.

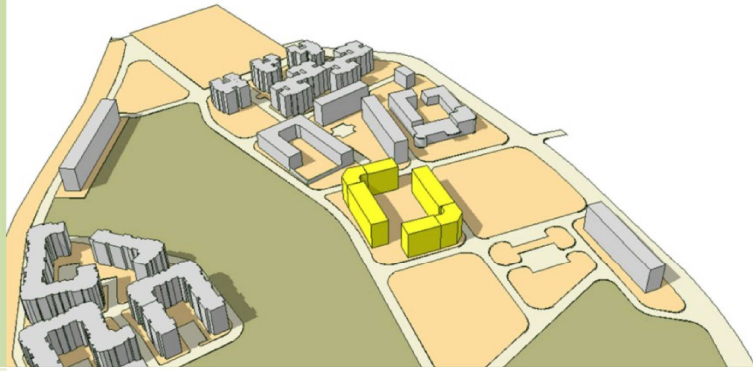
ANNEXE IV

REPRESENTATION EN 3D POUR L'ENSEMBLE DU CORPUS D'ETUDE

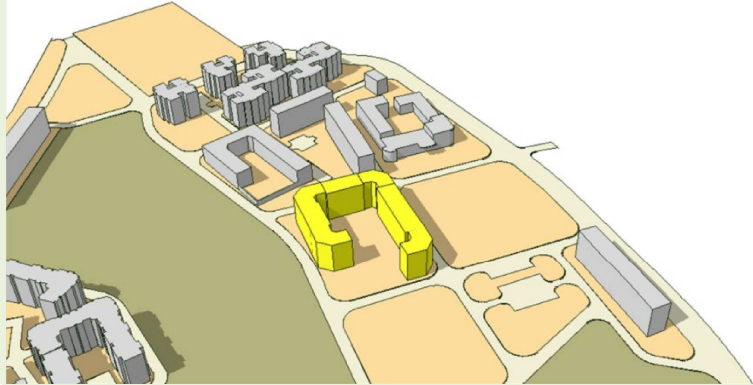




A9



A10



A11



A12



A13



A14



A15



A16

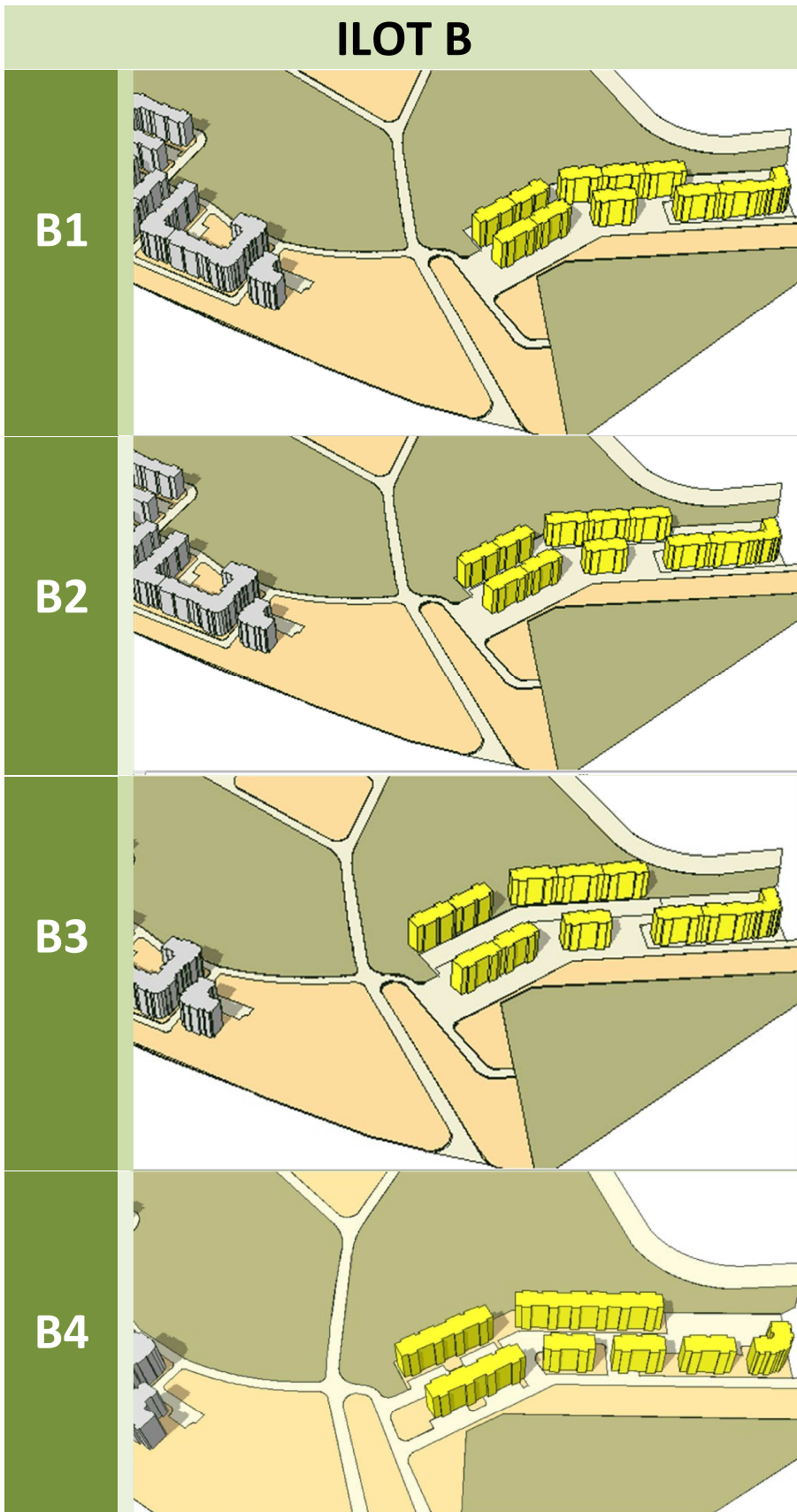


A17

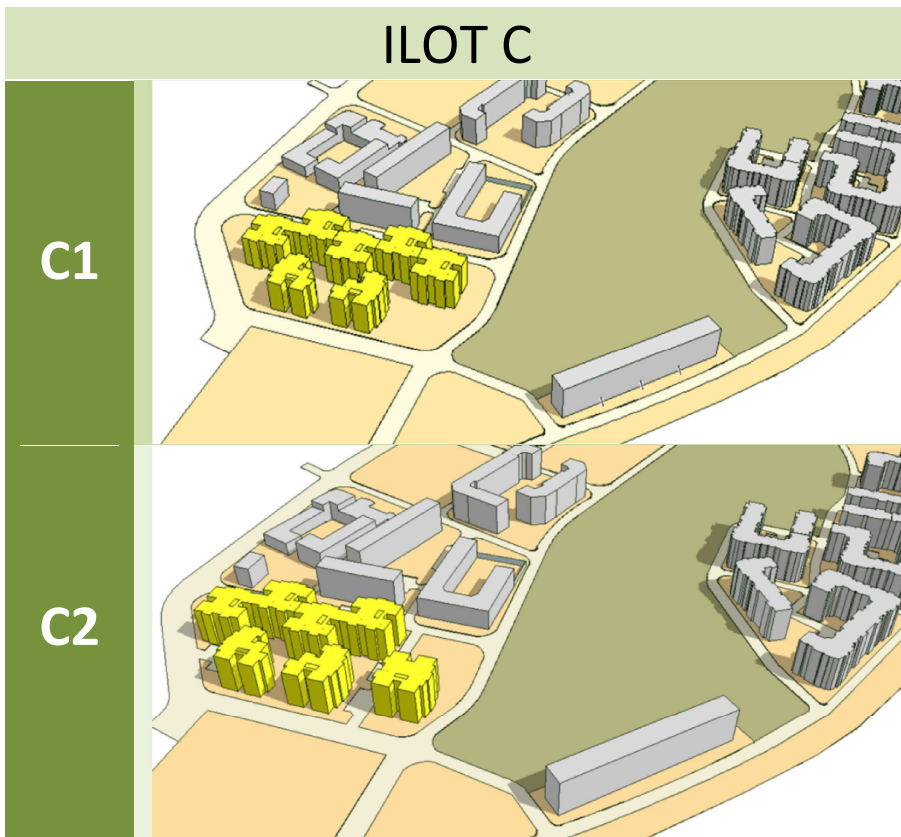


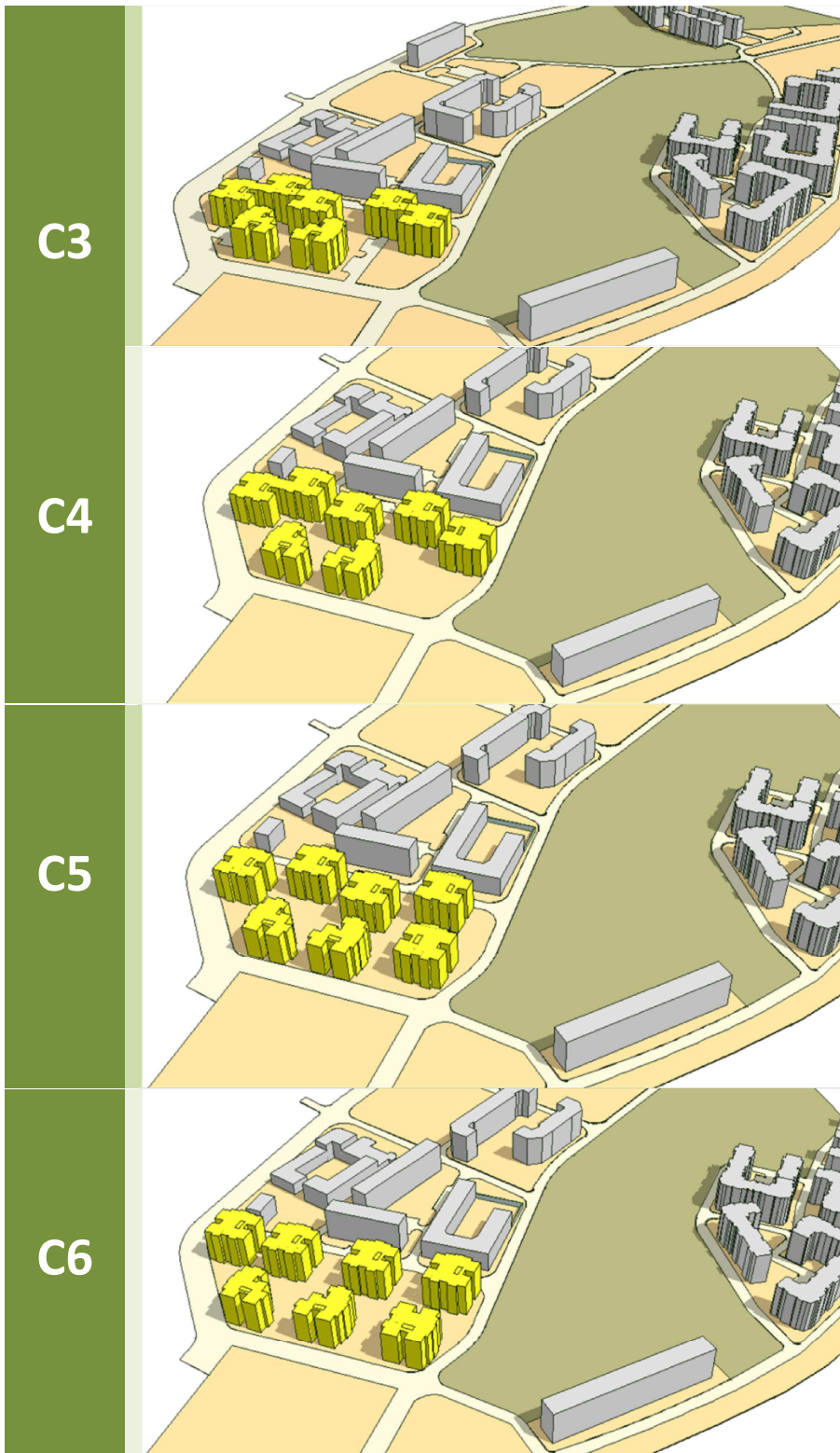
A18

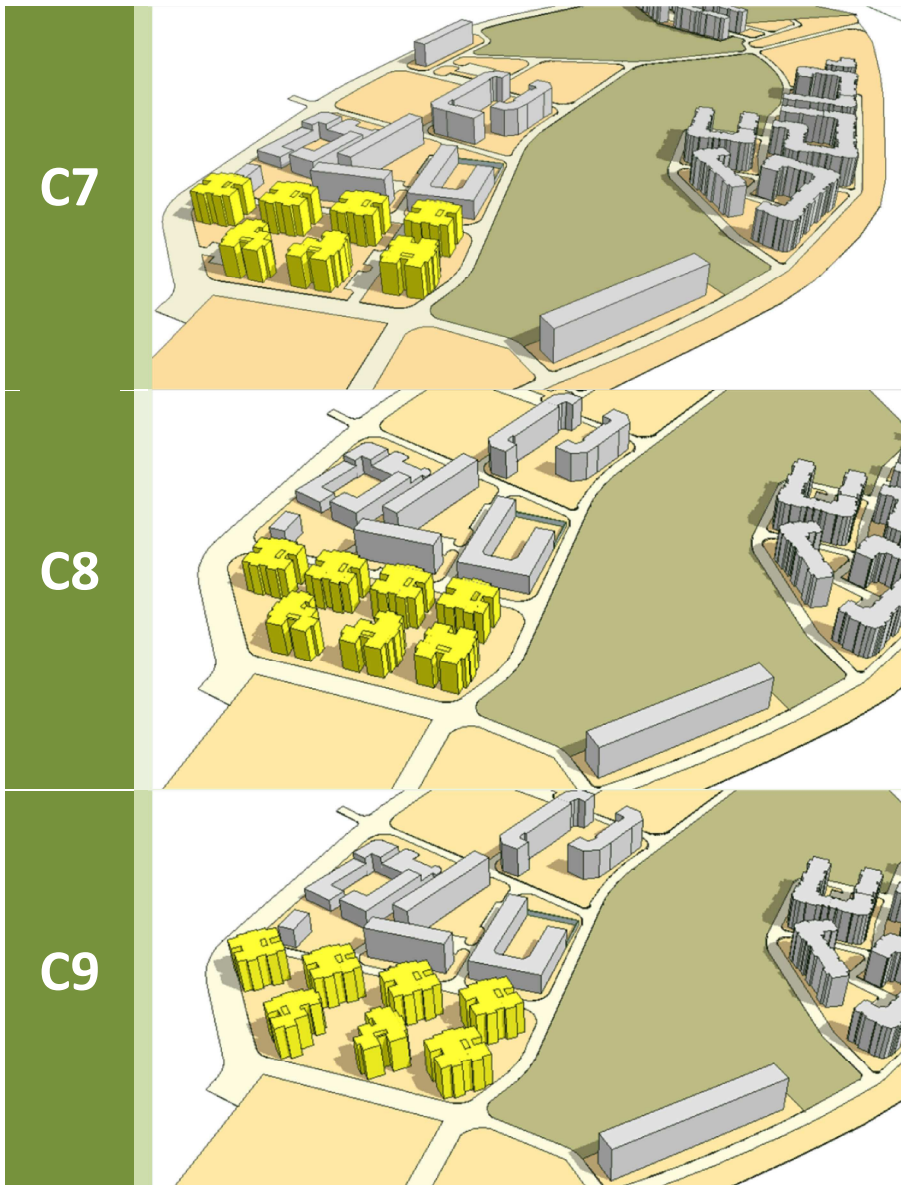








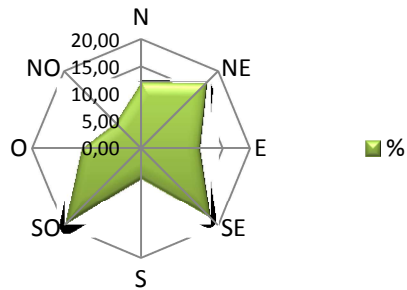




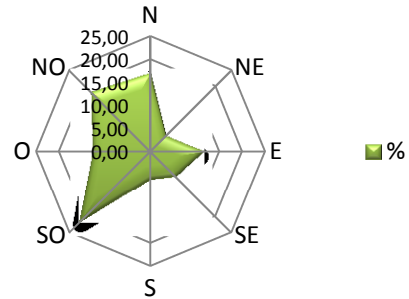
**ANNEXE V : REPRESENTATION DES ROSES D'ORIENTATIONS
POUR L'ENSEMBLE DU CORPUS D'ETUDE**

1 ROSES DES ORIENTATIONS DES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT A

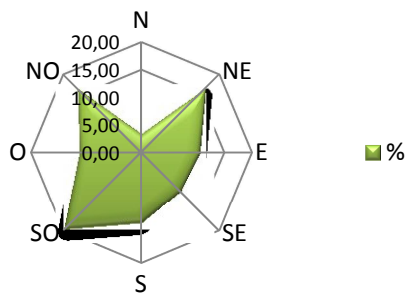
A1



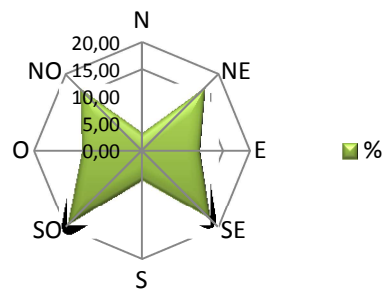
A2



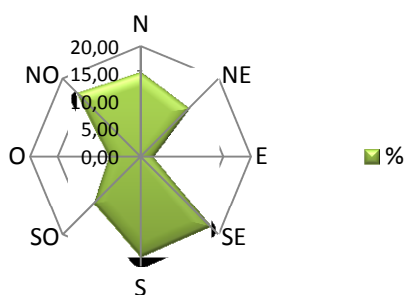
A3



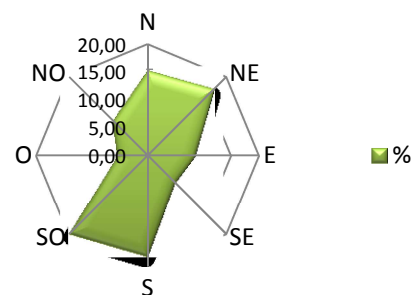
A4



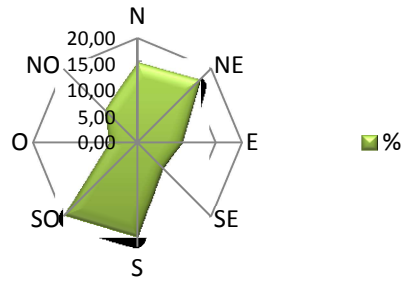
A5



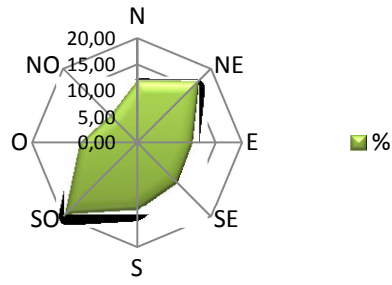
A6



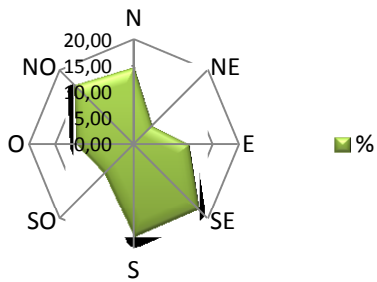
A7



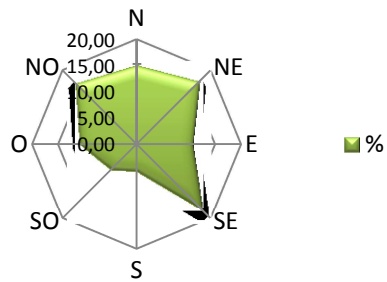
A8



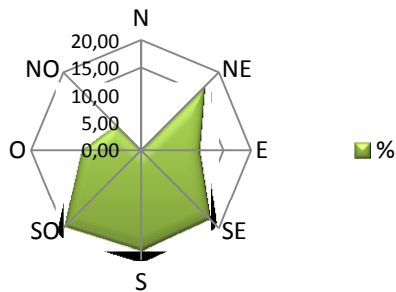
A9



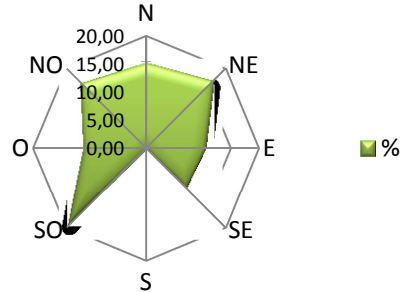
A10



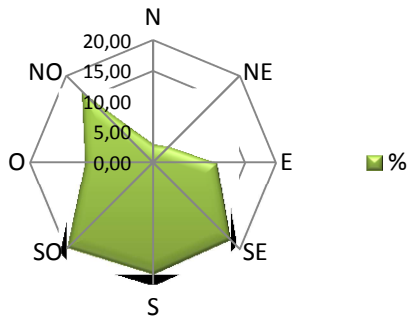
A11



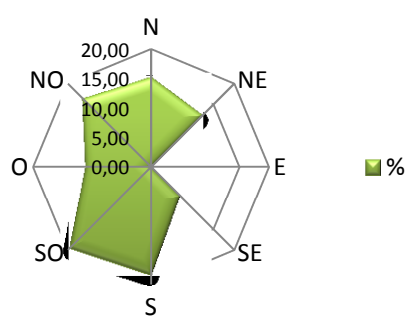
A12



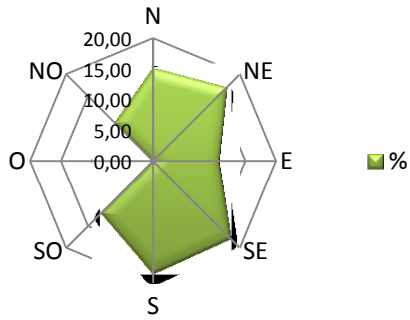
A13



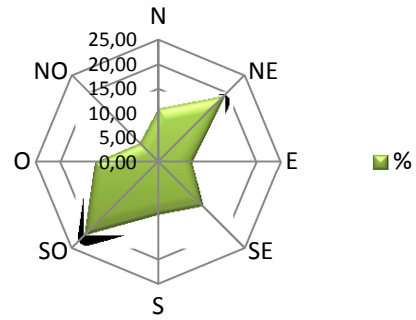
A14



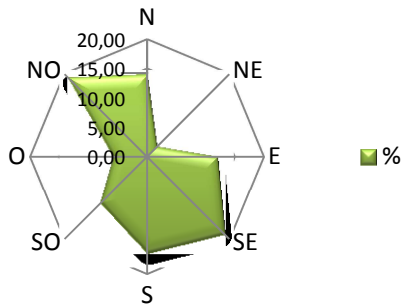
A15



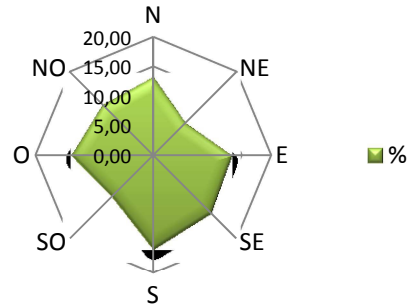
A16



A17

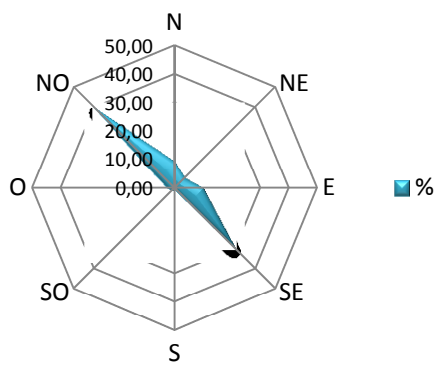


A18

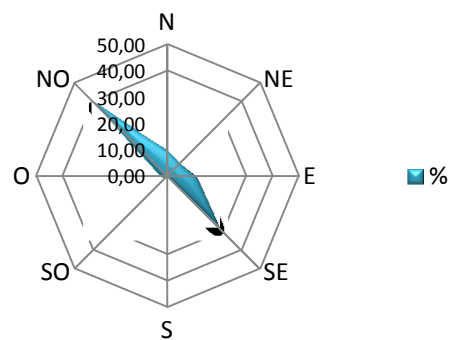


2 ROSES DES ORIENTATIONS DES VARIANTES ISSUES DE L'ÎLOT B

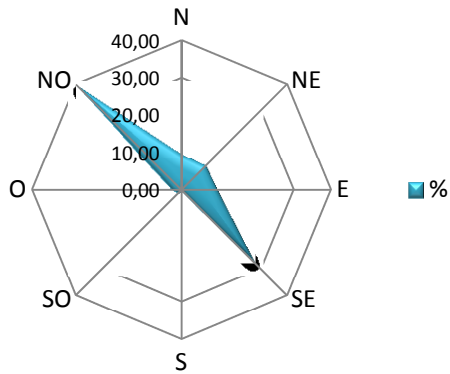
B1



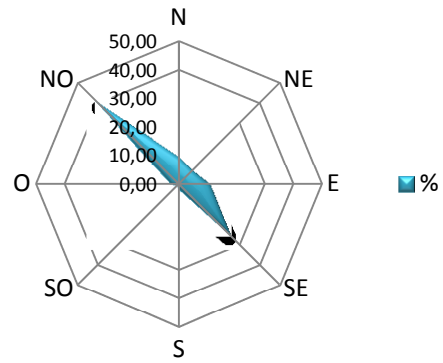
B2



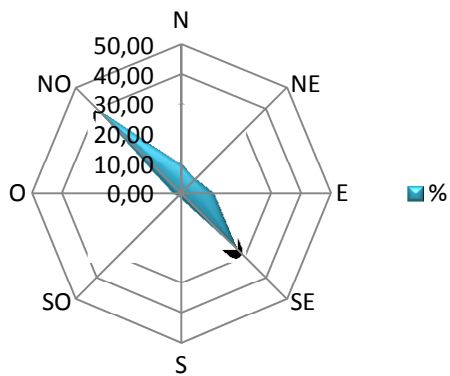
B3



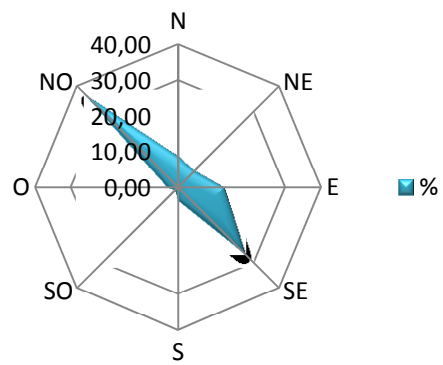
B4



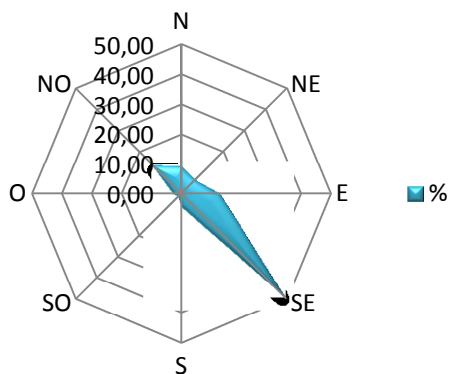
B5



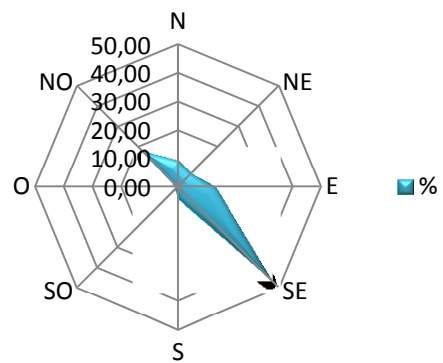
B6



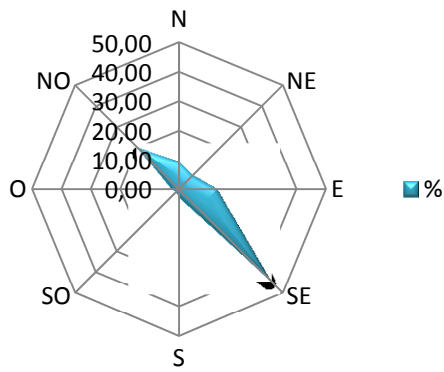
B7



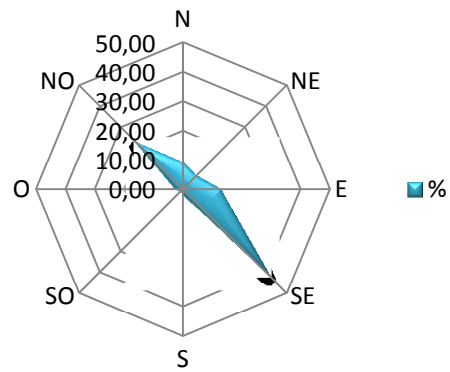
B8



B9

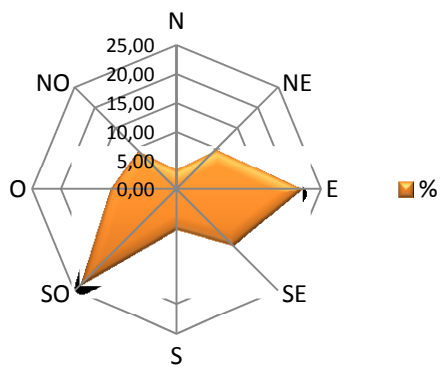


B10

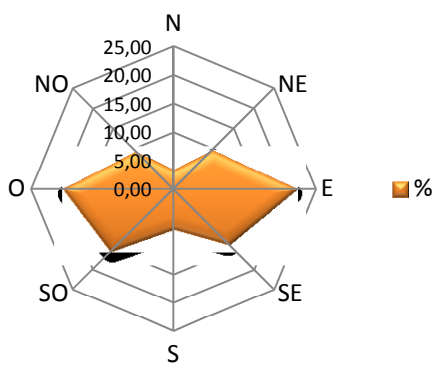


3 ROSES DES ORIENTATIONS DES VARIANTES ISSUES DE L'ÎLOT C

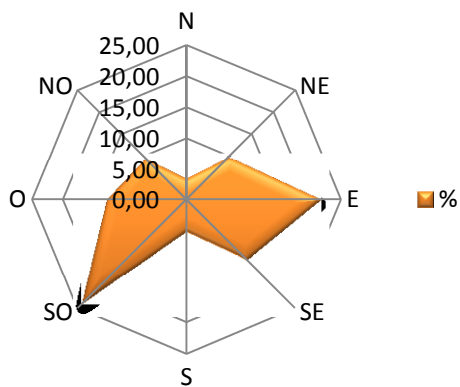
C1



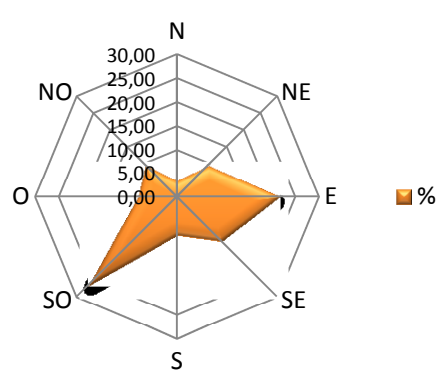
C2



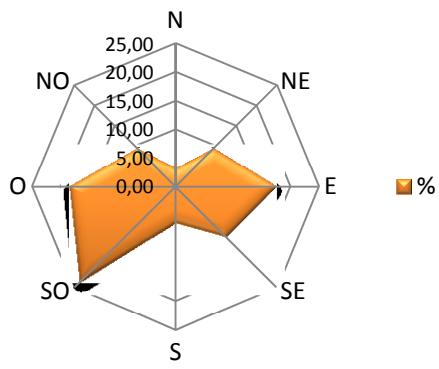
C3



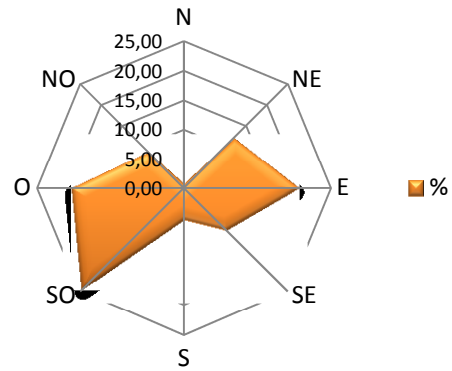
C4



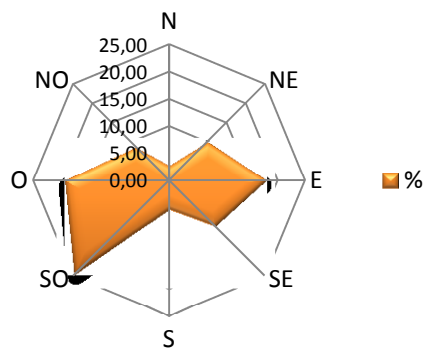
C5



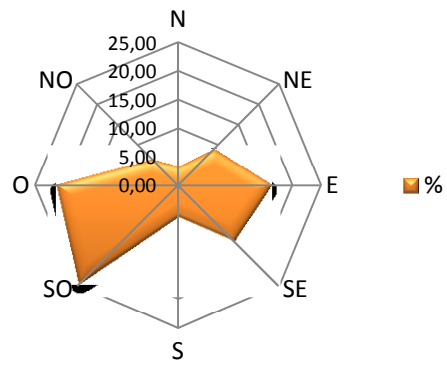
C6



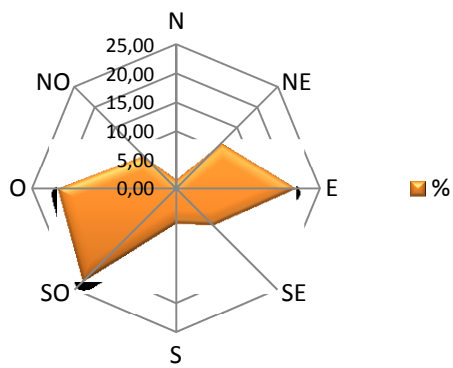
C7



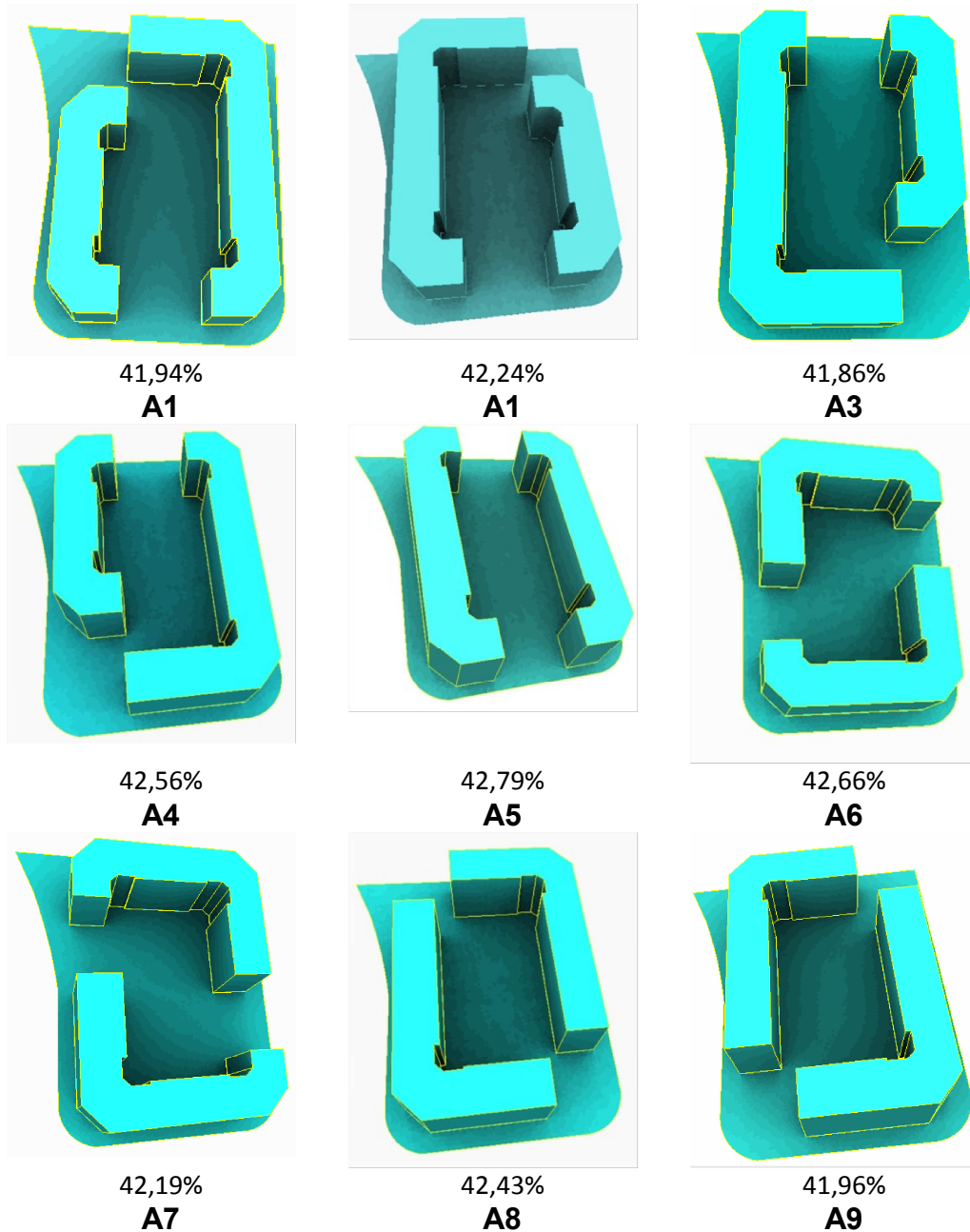
C8

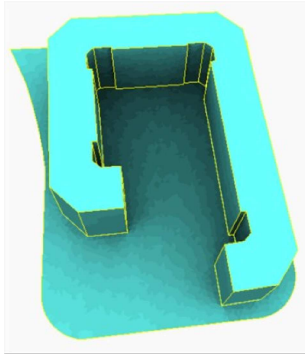


C9

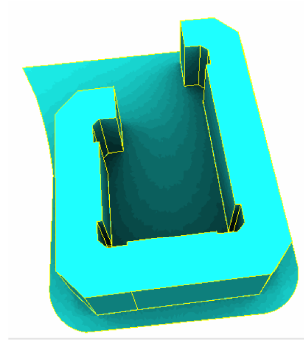


ANNEXE VI

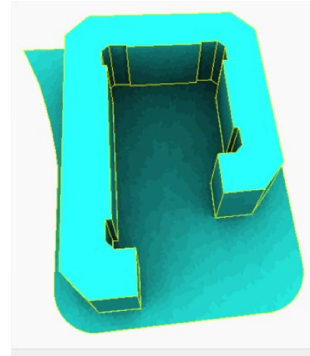
1 REPRESENTATION GRAPHIQUE DU POURCENTAGE DE CIEL VU
POUR L'ENSEMBLE DU CORPUS D'ETUDE1.1 REPRESENTATION GRAPHIQUE DU POURCENTAGE DE CIEL VU
POUR LES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT A.



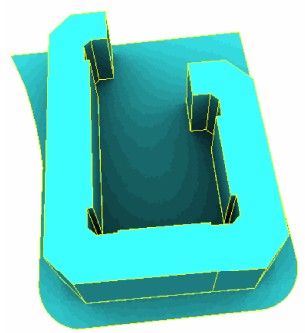
42,78%
A10



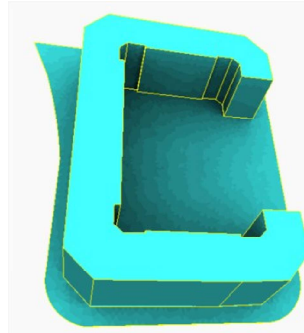
42,56%
A11



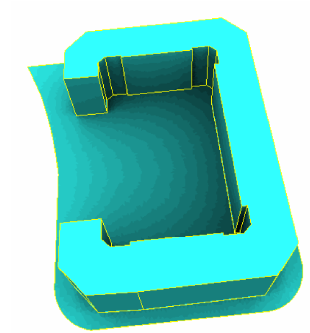
42,72%
A12



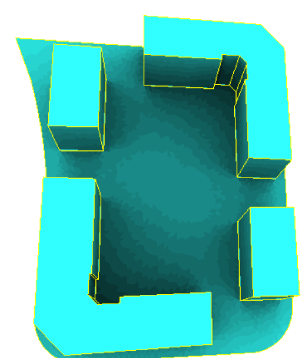
42,37%
A13



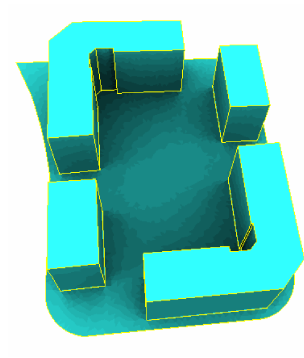
43,23%
A14



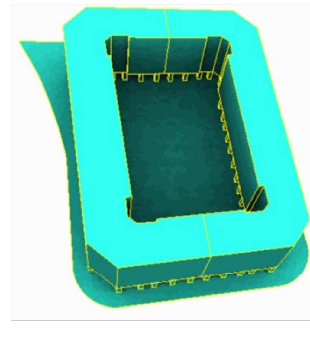
42,82%
A15



42,20%
A16

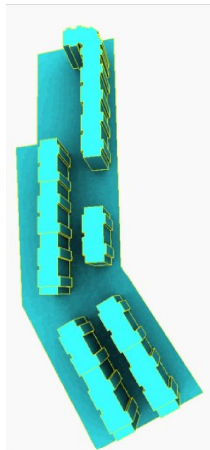


42,04%
A17

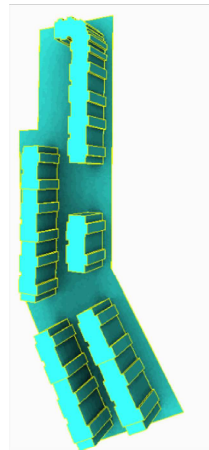


30,33%
A18

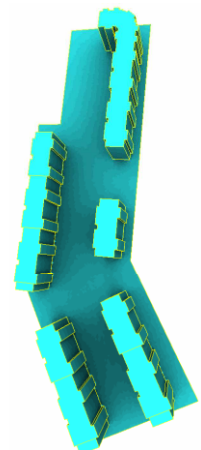
1.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DU POURCENTAGE DE CIEL VU POUR LES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT B.



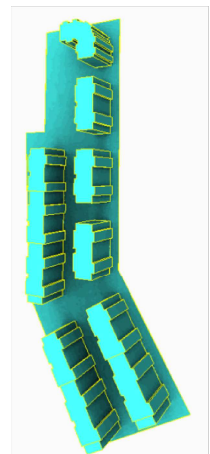
38,71%
B1



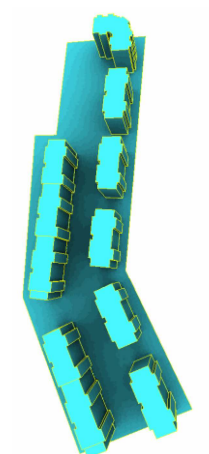
38,92%
B2



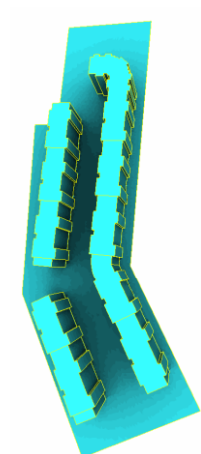
39,39%
B3



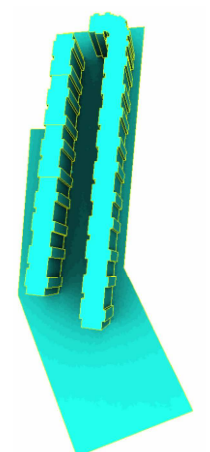
38,72%
B4



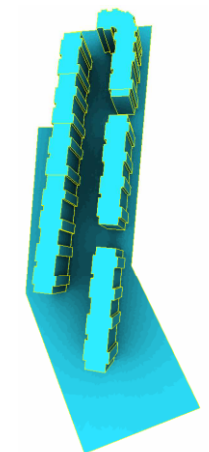
38,67%
B5



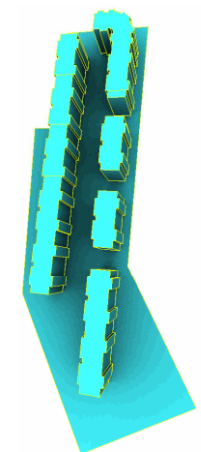
38,66%
B6



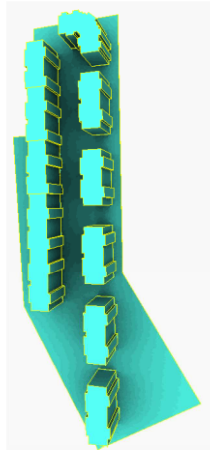
39,73%
B7



39,26%
B8

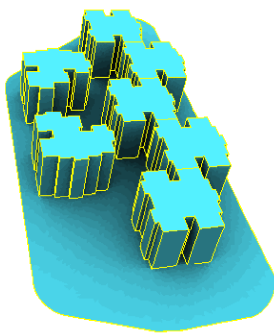


39,04%
B9

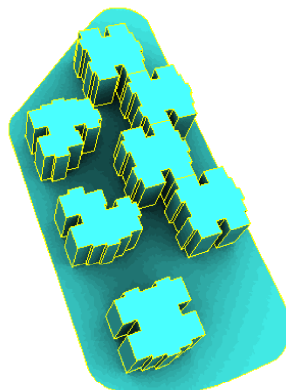


38,67%
B10

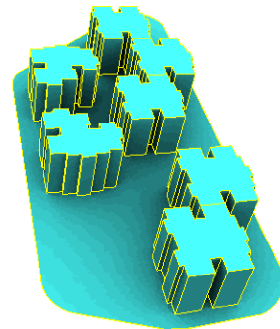
1.3 REPRESENTATION GRAPHIQUE DU POURCENTAGE DE CIEL VU POUR LES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT C.



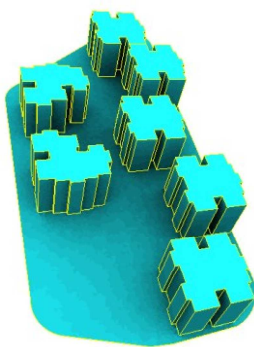
36,81%
C1



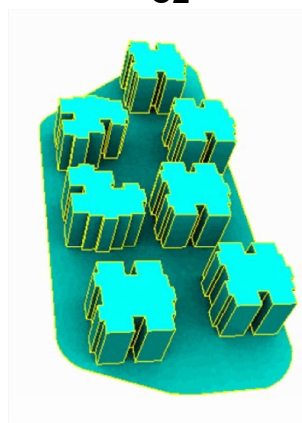
39,96%
C2



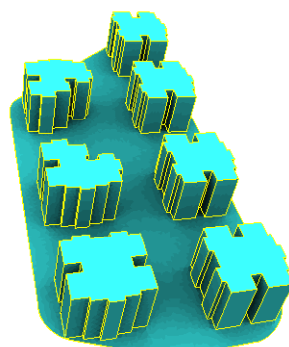
37,00%
C3



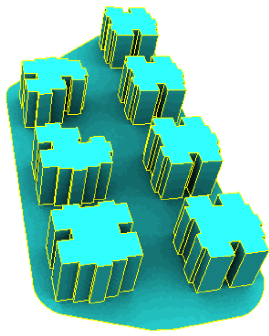
57,42%
C4



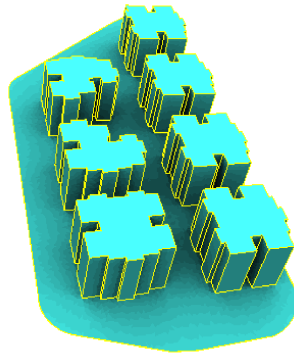
36,75%
C5



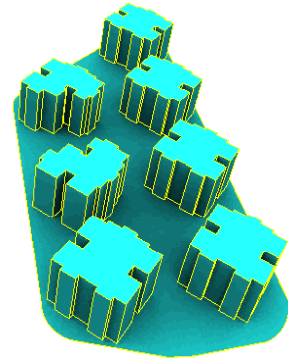
58,91%
C6



37,82%
C7



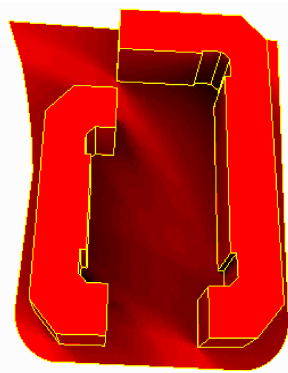
37,06%
C8



37,51%
C9

2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DUREE D'ENSOLEILLEMENT POUR L'ENSEMBLE DU CORPUS D'ETUDE

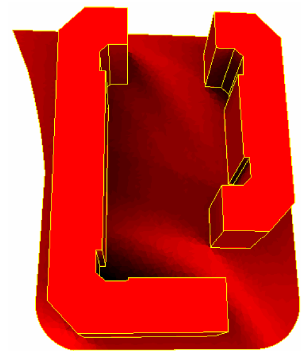
2.1 REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DUREE D'ENSOLEILLEMENT POUR LES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT A. JOURNEE DU 21/06.



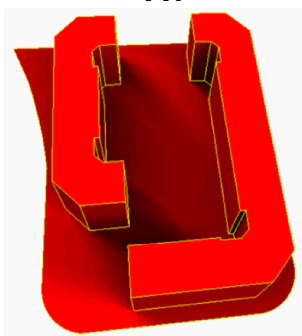
6H05 (43,49%)
A1



6H06 (43,55%)
A2



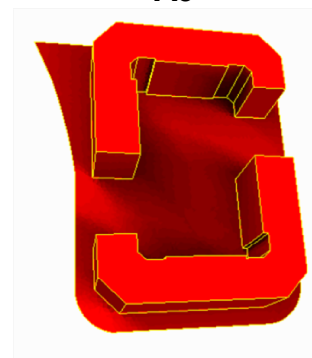
6H10 (44,08%)
A3



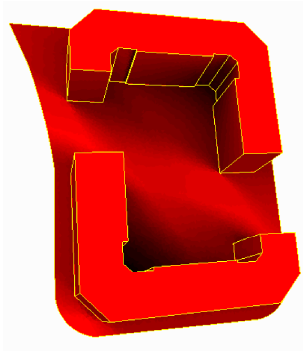
6H06 (43,69%)
A4



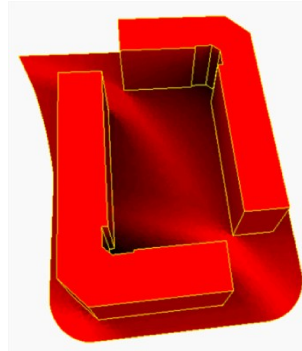
6H10 (44,05%)
A5



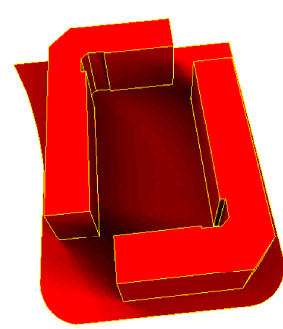
6H15 (44,67%)
A6



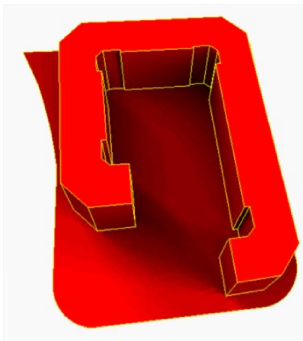
6H10 (44,06%)
A7



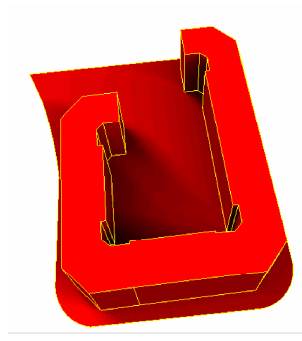
6H13 (44,46%)
A8



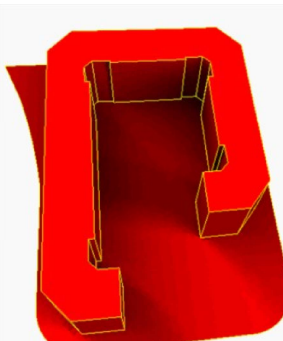
6H01 (43,02%)
A9



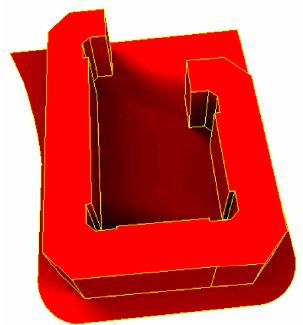
6H08 (43,91%)
A10



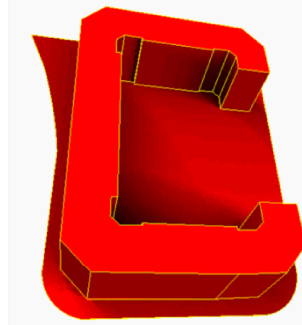
6H16 (44,82%)
A11



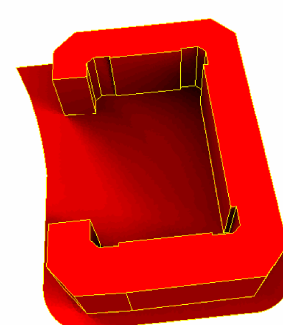
6H10 (44,1%)
A12



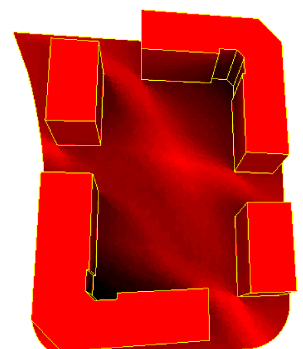
6H13 (44,43%)
A13



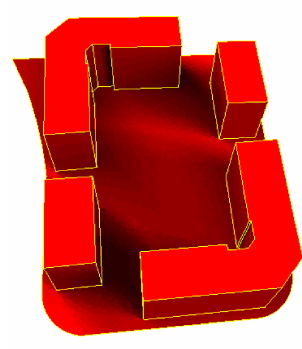
6H21 (45,42%)
A14



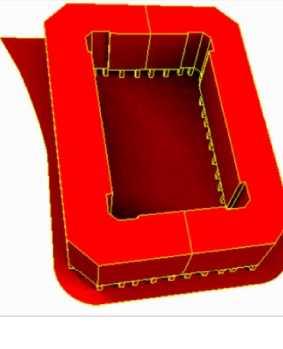
6H11 (44,12%)
A15



6H15 (44,62%)
A16

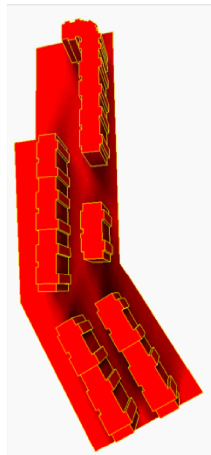


4H25 (31,50%)
A17

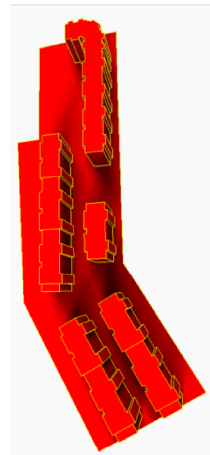


4H20 (30,98%)
A18

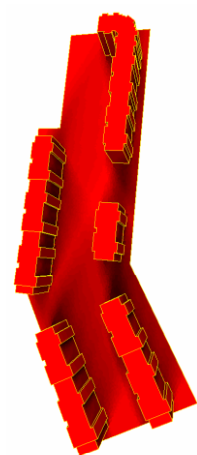
2.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DUREE D'ENSOLEILLEMENT POUR LES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT B. JOURNEE DU 21/06.



5H49 (41,56%)

B1

5H47 (41,38%)

B2

5H47 (41,40%)

B3

5H45 (41,16%)

B4

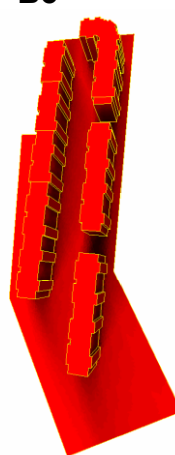
5H45 (41,14%)

B5

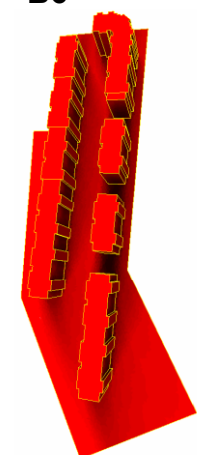
5H45 (41,15%)

B6

5H58 (42,66%)

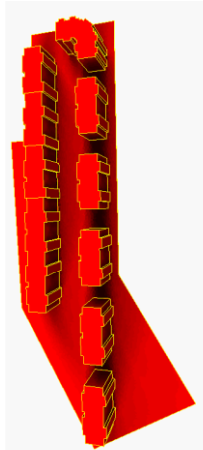
B7

5H53 (42,12%)

B8

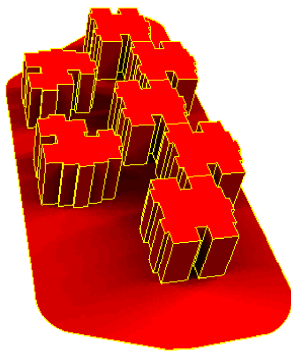
5H51 (41,87%)

B9

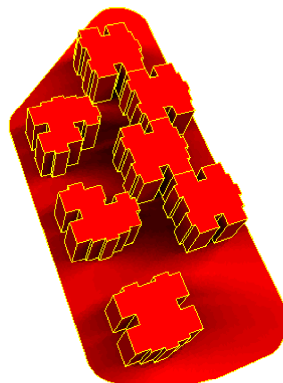


5H48 (41,41%)
B10

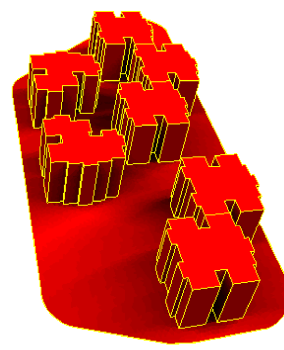
**2.3 REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DUREE
D'ENSOLEILLEMENT POUR LES VARIANTES ISSUES DE L'ILOT C.
JOURNEE DU 21/06.**



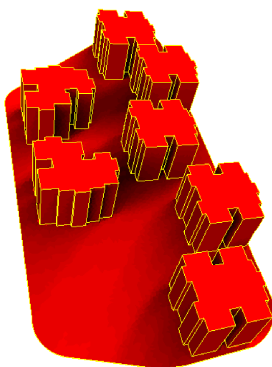
5H36 (40,05%)
C1



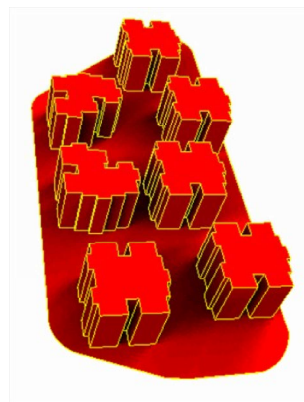
5H38 (40,33%)
C2



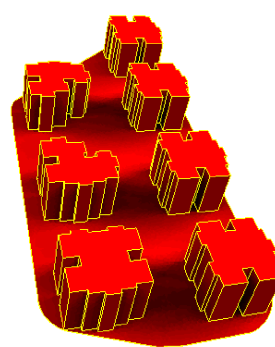
5H39 (40,38%)
C3



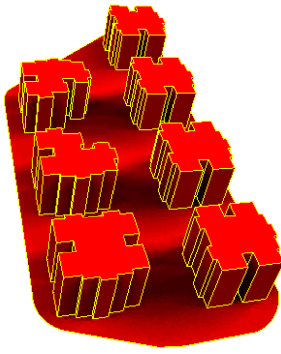
7H43 (55,13%)
C4



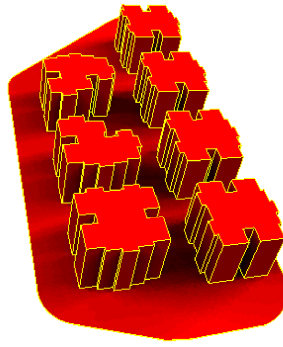
5H32 (39,55%)
C5



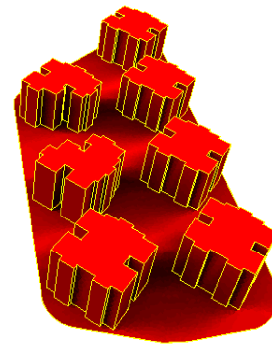
8H43 (62,36%)
C6



5H47 (41,41%)
C7



5H42 (40,74%)
C8



5H39 (40,47%)
C9