

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Architecture

Spécialité : Architecture

Par : GHAFFOUR Wafa ep. BELAID

Sujet

Etude de l'effèt de la morphologie urbaine sur le confort thermique des espaces extérieurs ».
Cas d'étude : La ville de Tlemcen

Soutenue publiquement, le 09 / 07 / 2020 , devant le jury composé de :

Mr. ALILI Abdessamad	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mr. OUISSI Mohammed Nabil	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Mr. VELAY-DABAT Marc André	Professeur	ENSA Marseille	Co- Directeur de thèse
Mr. DJEDID Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Mme. DJIAR Kahina	MCA	EPAU Alger	Examineur 2
Mr. BOUKARA Abdelaziz	MCA	ENSA Marseille	Invité 1

NB : les membres du jury doivent être classés conformément au P.V de l'autorisation de soutenance

REMERCIEMENTS

A l'issue de mon travail de thèse de doctorat, je tiens à remercier très sincèrement, et tout particulièrement :

- Mon directeur de thèse Prof Mohammed Nabil OUISSI pour avoir dirigé et suivi ce travail. Je tiens donc à lui exprimer ma sincère reconnaissance pour sa confiance, sa disponibilité et ses encouragements.
- Mon co-directeur de thèse Prof Marc André VELAY DABAT ainsi que Dr Abdelaziz BOUKARA pour m'avoir accueilli dans leur Laboratoire à l'Ecole Supérieure d'Architecture de Marseille et pour m'avoir éclairé de nombreuses pistes de recherches. Ils étaient disponibles à chaque fois que j'ai sollicité leur aide. Je tiens donc à les remercier pour avoir suivi mon travail.

Je tiens à remercier Monsieur Prof ALLILI Abdessamad d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je présente mes sincères remerciements aux Prof Abdelkader DJEDID et Dr Kahina DJJAR pour avoir accepté de rapporter et juger ce travail de thèse.

Enfin je tiens à remercier vivement tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de ce travail et grâce à qui cette thèse a été menée à bien.

Je dédie ce travail à :

- Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé pour aller de l'avant dans mes études.
- A mon mari pour son soutien moral et surtout sa patience durant l'élaboration de ce travail.
- A mes chers enfants et frères.

Résumé :

Les indicateurs morphologiques et géométriques du tissu urbain sont des paramètres clés dans la formation des microclimats externes. Ils ont un effet positif sur le confort thermique des piétons. Cette recherche s'articule autour de l'analyse des interactions entre les paramètres physiques du microclimat et les transformations urbaines. Elle vise également à étudier l'impact de la morphologie du site sur le microclimat extérieur et à comprendre la relation entre la perception subjective et la quantification objective de l'environnement thermique. La démarche mise en œuvre s'appuie sur deux investigations : une quantification des effets microclimatiques tout au long de l'histoire des transformations urbaines, et une analyse des ambiances thermiques basées sur la perception et la simulation du microclimat actuel. L'une et l'autre portent de manière privilégiée sur le quartier historique de Bab El Hadid.

Sur la base des sources historiques, trois états représentatifs ont été définis pour effectuer des simulations à l'aide du modèle ENVI-MET. Les résultats montrent que le faible l'albédo moyen des surfaces et le grand facteur de vue de ciel (FVC) augmentent la température de surface au fil du temps et permettent de distinguer des situations de vote moyen prévisible (PMV) différent dans les trois états. Les modèles de PMV examinés fournissent des informations sur les endroits les plus appropriés pour les piétons.

Notre étude a également porté sur l'analyse du microclimat actuel, en élaborant une enquête par questionnaire et une simulation numérique validée par des mesures physiques que nous avons effectuées sur place dans cinq canyons. Les résultats présentés en termes de vote moyen prévisible (PMV), d'accès solaire et de température de l'air, montrent que les conditions thermiques sont directement liées au facteur de vue du ciel (FVC), au rapport hauteur/largeur (H/L) des rues ainsi qu'à l'orientation des canyons urbains. Les points situés dans les rues orientées nord-sud, présentent une performance acceptable.

Les conclusions de cette recherche ont abouti à l'élaboration des orientations urbaines qui pourraient limiter les conditions défavorables dans les espaces extérieurs. Elles sont utiles aux architectes et aux urbanistes pour la conception et la réhabilitation des centres historiques.

Mots clés: microclimat, forme urbaine, confort thermique extérieur, PMV, Tlemcen.

Abstract :

The morphological and geometric indicators of the urban fabric are key parameters in the formation of external microclimates. They have a positive effect on the thermal comfort of pedestrians. This research focuses on the analysis of the interactions between the physical parameters of the microclimate and urban transformations. It also aims to study the impact of site morphology on the external microclimate and to understand and explain the relationship between subjective perception and objective quantification of the thermal environment. The approach implemented is based on two investigations: a quantification of microclimatic effects throughout the history of urban transformations, and an analysis of thermal atmospheres based on the perception and simulation of the current microclimate. Both concern the historic district of Bab El Hadid.

On the basis of historical sources, three representative states have been defined to perform simulations using the ENVI-MET model. The results show that the low mean surface albedo and the large sky view factor (SVF) increase the surface temperature over time and make it possible to distinguish different predictable mean voting situations (PMV) in the three states. The PMV models examined provide information on the most suitable locations for pedestrians.

Our study also focused on the analysis of the current microclimate by developing a questionnaire survey and a numerical simulation validated by physical measurements that we performed in situ in five canyons. The results presented in terms of PMV (Predicted Mean Vote), solar access and air temperature, show that thermal conditions are directly related to the SVF (Sky View Factor), the height/width ratio (H/L) of the streets and the orientation of the urban canyons. Points on north-south oriented streets show acceptable performance.

The conclusions of this research have led to the development of urban guidelines that could limit unfavourable conditions in outdoor spaces. They are useful for architects and urban planners in the design and rehabilitation of historic centres.

Keywords: microclimate, urban form, outdoor thermal comfort, PMV, Tlemcen.

ملخص

تعتبر المؤشرات المورفولوجية والهندسية للنسيج الحضري من المعايير الرئيسية في تشكيل المناخات المحلية. لها تأثير إيجابي على الراحة الحرارية للمارة. يركز هذا البحث على تحليل التفاعلات بين المعايير الفيزيائية للمناخ المحلي و التحولات الحضرية. كما يهدف إلى دراسة تأثير مورفولوجيا الموقع على المناخ الخارجي وفهم العلاقة بين التصور الذاتي و الموضوعي للبيئة الحرارية.

يعتمد النهج الذي تم تنفيذه على تحقيقين: تحديد التأثيرات المناخية الدقيقة من خلال دراسة تاريخ التحولات الحضرية، وتحليل البيانات الحرارية على أساس ادراك ومحاكاة المناخ المحلي الحالي. كلاهما يركز بطريقة مميزة على منطقة باب الحديد التاريخية.

بناءً على المصادر التاريخية، تم تحديد ثلاث حالات تمثيلية لأداء المحاكاة باستخدام نموذج انفي-مات. أظهرت النتائج أن متوسط انخفاض بياض السطح وعامل رؤية السماء الكبير يزيدان من درجة حرارة السطح بمرور الوقت ويجعل من الممكن التمييز بين حالات التصويت المتوسطة المتوقعة التي يمكن التنبؤ بها في الحالات الثلاث. وتناولت نماذج هذه الاخيرة تقديم معلومات عن معظم المواقع المناسبة للمارة.

ركزت دراستنا أيضاً على تحليل المناخ المحلي الحالي، من خلال دراسة استقصائية استنبائية ومحاكاة رقمية تم التحقق منها من خلال القياسات المادية التي أجريناها في خمسة مواقع لأحاديدي حضرية. أظهرت النتائج المقدمة من حيث متوسط التصويت المتوقع، الوصول الشمسي ودرجة حرارة الهواء أن الظروف الحرارية مرتبطة مباشرة بعامل رؤية السماء ونسبة الارتفاع / العرض للشوارع وكذلك اتجاه الأحاديدي الحضرية. تمثل النقاط الموجودة في الشوارع الموجهة نحو الشمال والجنوب أداءً مقبولاً.

أدت نتائج هذا البحث إلى تطوير المبادئ التوجيهية الحضرية التي يمكن أن تحد من الظروف غير المواتية في الأماكن الخارجية. فهي مفيدة للمهندسين المعماريين ومخططي المدن لتصميم وإعادة تأهيل المراكز التاريخية.

الكلمات المفتاحية: المناخ المحلي، الشكل الحضري، الراحة الحرارية الخارجية، التصويت المتوسط المتوقع، تلمسان.

Tables des matières

Introduction générale.....	XII
Introduction :	1
1. Problématique :	2
2. Hypothèses de la recherche :.....	4
3. Objectifs de la recherche :.....	4
4. Méthodologie de la recherche :.....	6
5. Structure de la thèse :.....	6
PREMIERE PARTIE:	1
Principes et éléments théoriques : de la crainte sur l'environnement climatique à son interaction avec la morphologie urbaine.	1
Introduction de la 1 ère partie:.....	8
CHAPITRE I :.....	1
Un état de l'art sur les travaux de recherche.	1
Introduction :	9
1. Quelques travaux de recherche :	9
Conclusion :.....	13
CHAPITRE II :.....	9
Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.	9
Introduction :	14
1. La morphologie urbaine :.....	14
1.1. Essai de définition de la forme urbaine et morphologie urbaine :.....	14
2. Ecoles d'analyse de la forme urbaine :.....	17
3. Indicateurs de la morphologie urbaine :.....	18
3.1. Les indicateurs morphologiques :.....	18
3.1.1. La compacité :.....	18
3.1.2. La densité :	19
3.1.3. La rugosité urbaine :.....	25
3.1.4. La porosité urbaine :.....	27
3.1.5. La minéralisation :.....	27
3.2. Les indicateurs géométriques :.....	28

3.2.1.	Le facteur de vue du ciel :	29
3.2.2.	Le ratio H/L :	31
3.3.	Les indicateurs physiques :	34
3.3.1.	L'albédo moyen des surfaces :	34
3.3.2.	La durée d'ensoleillement :	35
4.	Contexte historique des transformations urbaines modifiant le microclimat :	36
4.1.	Ajustement entre variations spatiales et air insalubre :	37
4.1.1.	Distribution spatiale face à l'air malsain :	38
4.1.2.	Vers une prise de conscience interventionniste :	38
4.2.	Intervention salubriste sur la morphologie urbaine :	39
4.3.	L'avènement de l'urbanisme moderne :	40
4.4.	Le microclimat et la ville contemporaine :	41
4.5.	Synthèse :	42
	Conclusion:	43
	CHAPITRE III :	44
	Climat et milieu construit.	44
	Introduction:	44
1.	Les paramètres climatiques :	44
1.1.	La température et le rayonnement solaire :	44
1.1.1.	La température sèche ou humide de l'air:	45
1.1.2.	La température de rayonnement :	45
1.1.3.	La température opérative :	45
1.2.	L'humidité de l'air :	45
1.3.	Le vent :	46
1.4.	La nébulosité du ciel :	48
2.	Définitions et concepts :	48
2.1.	L'atmosphère :	48
2.1.1.	Définitions :	48
2.1.2.	Couches constituant l'atmosphère :	48
2.2.	La surface urbaine :	50
2.3.	Les échelles de la climatologie :	51
2.3.1.	Les échelles spatiales du climat :	51
2.3.2.	Les couches verticales des échelles spatiales :	52

2.4.	Le canyon urbain :	55
3.	L'îlot de chaleur urbain :	56
3.1.	Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain :	58
3.1.1.	Caractéristiques temporelles de l'îlot de chaleur urbain :	58
3.1.2.	Caractéristiques spatiales de l'îlot de chaleur urbain :	59
3.1.3.	Echelles de l'îlot de chaleur urbain :	59
3.2.	Conditions du développement du phénomène :	61
3.3.	Causes du phénomène l'îlot de chaleur urbain :	61
3.3.1.	L'exposition aux rayonnements solaires :	62
3.3.2.	La géométrie urbaine :	62
3.3.3.	Les propriétés thermiques des matériaux :	63
3.3.4.	L'impact de la végétation et de l'eau :	64
3.3.5.	Les activités anthropiques :	65
3.4.	Impacts de l'îlot de chaleur urbain :	66
4.	Phénomènes microclimatiques en milieu urbain :	66
4.1.	Effets thermiques et radiatifs en milieu urbain :	66
4.1.1.	Les modes de transfert de chaleur en milieu urbain :	66
4.2.	Effets aérodynamiques en milieu urbain :	67
4.2.1.	Effets du vent en milieu urbain :	69
4.3.	Humidité en milieu urbain :	72
4.4.	Altération de l'air en milieu urbain :	72
	Conclusion :	73
	CHAPITRE IV :	43
	Caractérisation du confort thermique extérieur.	43
	Introduction :	74
1.	La notion d'ambiance :	74
1.1.	Les éléments constitutifs d'une ambiance :	75
1.2.	Les échelles d'une ambiance :	77
1.2.1.	L'échelle climatique :	77
1.2.2.	L'échelle spatiale :	77
1.2.3.	L'échelle temporelle :	77
1.3.	L'ambiance thermique :	77
1.3.1.	Notions sur les ambiances thermiques :	78

1.3.2.	Ambiance thermique acceptable pour le confort :.....	79
2.	La notion de confort :.....	79
2.1.	Le confort thermique :.....	82
2.1.1.	Les approches du confort thermique :.....	83
2.1.2.	Paramètres du confort thermique :.....	86
2.1.3.	La sensation thermique :.....	90
2.1.4.	Indices du confort thermique dans les espaces extérieurs :.....	91
3.	De la climatologie à la climatologie urbaine :.....	98
3.1.	Les méthodes descriptives et d'enquête « conceptualisation » :.....	98
3.2.	Les méthodes expérimentales « mesures in situ »:.....	98
3.3.	Les méthodes numériques « modélisations » :.....	99
3.1.1.	Le logiciel ENVI-MET :.....	100
	Conclusion :.....	105
	Conclusion de la 1 ère partie:.....	106
	DEUXIEME PARTIE:.....	107
	Quantification des effets microclimatiques et du confort thermique liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid à Tlemcen.....	107
	Introduction de la 2 ^{ème} partie :.....	107
	CHAPITRE I :.....	108
	Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.	108
	Introduction :.....	108
1.	Situation de la ville de Tlemcen :.....	108
2.	Bref historique sur l'occupation de Tlemcen :.....	108
2.1.	Période Romaine (201 à 670):.....	109
2.2.	Période Idrisside: entre 788 et 790 à 828 :.....	109
2.3.	Période Almoravide de 1069 à 1145 :.....	110
2.4.	Période Almohade: de 1145 à 1235 :.....	110
2.5.	Période Zianide: de 1235 à 1554 :.....	111
2.6.	Période mérinide de 1288 à 1348:.....	111
2.7.	Période Ottomane de 1552 à 1842 :.....	112
2.8.	Période coloniale:.....	112
2.8.1.	De 1842 à 1852 :.....	112
2.8.2.	De 1852 à 1860 :.....	113
2.8.3.	De 1860 à 1886 :.....	113

2.8.4.	De 1886 à 1900 :.....	114
2.8.5.	De 1900 à 1962 :.....	114
2.9.	Après l'indépendance (à partir de 1962):	114
3.	Evolution du fragment d'étude :.....	118
3.1.	La situation du fragment urbain :.....	118
3.2.	L'évolution du fragment urbain à travers l'histoire :.....	120
3.2.1.	La période Almoravide :.....	120
3.2.2.	La période Ottomane :.....	121
3.2.3.	L'occupation française (XIXème- XXème siècle) : Percements des rues et reconstruction du flanc sud :	121
3.2.4.	La période post indépendance :.....	126
4.	Synthèse des transformations urbaines du fragment d'étude de Bab El Hadid :.....	128
	Conclusion :.....	130
	CHAPITRE II :.....	131
	Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.	131
	Introduction :.....	131
1.	Site d'étude : canyons urbains représentatifs.	131
2.	Analyse typo-morphologique du secteur d'étude :	132
2.1.	Caractéristiques de la forme urbaine :	133
2.2.	Evaluation des indicateurs à l'échelle du tissu urbain :.....	140
2.2.1.	La densité du bâti :	141
2.2.2.	La rugosité urbaine :.....	141
2.2.3.	La densité végétale :.....	142
2.2.4.	La porosité urbaine :.....	142
2.3.	Evaluation des indicateurs à l'échelle de l'espace public :.....	142
2.3.1.	Le ratio H/L :.....	143
2.3.2.	Albédo moyen des surfaces :.....	143
2.4.	Synthèse :.....	144
3.	Modélisation et simulation avec le modèle ENVI-MET :.....	144
3.1.	Présentation :	144
3.2.	Les entrées de simulation :	146
3.3.	Les sorties de simulation :	147

4.	Simulation et analyse de l'environnement thermique des trois configurations urbaines :	147
4.1.	Choix des journées représentatives :	150
4.2.	Les données géographiques :	152
4.3.	Présentation de la géométrie et propriétés morphologiques des trois configurations urbaines :	152
4.3.1.	Configuration du premier état (période précoloniale, environ 1800):	152
4.3.2.	Configuration du deuxième état (période coloniale, environ 1900):	153
4.3.3.	Configuration du troisième état (période actuelle):	154
4.4.	Simulation et discussion :	154
4.4.1.	La géométrie (Input Spaces) :	154
4.4.2.	Indicateur géométrique :	156
4.4.3.	Indicateur physique :	158
4.4.4.	Evolution des paramètres microclimatiques des trois configurations urbaines :	160
4.4.5.	Caractérisation des indices de confort :	167
4.5.	Synthèse des résultats :	173
	Conclusion :	176
	CHAPITRE III :	177
	Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.....	177
	Introduction :	177
1.	La nécessité de la prise en compte du microclimat dans la conception des espaces urbains:	177
2.	Méthodes:	180
2.1.	Zone d'étude:	180
2.2.	Le climat:	182
2.3.	Méthodologie :	182
2.4.	Enquête sur la perception des ambiances climatiques de la zone d'étude :	185
2.4.1.	Présentation du questionnaire :	186
2.5.	Validation :	189
2.6.	Simulation :	192
2.7.	Indices de confort thermique:	193
3.	Résultats:	194

3.1. Variation de la température de l'air à l'intérieur des canyons urbains microclimatiques :	194
3.2. Variation de la vitesse du vent à l'intérieur des sites microclimatiques :	194
3.3. Analyse du confort thermique :	195
3.3.1. Impact de la géométrie urbaine sur la sensation thermique :	196
3.3.2. Comparaison des conditions thermiques dans différents canyons urbains :	198
3.3.3. Comparaison des résultats de la simulation et du questionnaire :	205
3.4. Exposition solaire :	206
3.5. Orientations urbaines:	207
4. Discussion:	209
Conclusion:	211
Conclusion de la 2 ^{ème} partie :	214
Conclusion générale.	215
Références bibliographiques.	215
Annexes.	219

Liste des figures

Figure 1 : Détail des éléments du système morphologique.	16
Figure 2: Le système morphologique.	16
Figure 3: La densité bâtie.	21
Figure 4: Assiette de calcul des densités brute et nette.	21
Figure 5: Différentes formes urbaines pour une même densité bâtie.	22
Figure 6: Simplification des formes urbaines au cours du temps.	23
Figure 7: Exemple de calcul de la rugosité urbaine. <i>Etabli par l'auteur.</i>	25
Figure 8: Variation du facteur de vue de ciel.	29
Figure 9: Représentation du facteur de vue du ciel dans une rue canyon asymétrique.	30
Figure 10: Procédé de photographie fish-eye, A droite) appareil photo numérique fish-eye. A gauche) photo prise par l'appareil photo d'un site en Italie.	30
Figure 11: Distribution schématique du rayonnement solaire incident dans différents scénarios de ratio H/L.	32
Figure 12: La lumière du soleil limitée pénètre dans les canyons des bâtiments sur la rue chiswell.	32
Figure 13: Exemple de ratio du centre urbain historique de Camagüey-Cuba.	33
Figure 14: Stratification verticale de l'atmosphère.	49
Figure 15: Les couches thématiques "radiation" et "vent" pour la Florentiner Platz, le centre d'Allemagne.	51
Figure 16: Les échelles de climatologie.	52
Figure 17: Représentation schématique des échelles climatiques et des couches verticales dans une surface urbaine.	53
Figure 18: Canyon urbain.	55
Figure 19: Différents échanges radiatifs à travers une surface.	55
Figure 20: L'îlot de chaleur urbain.	57
Figure 21: Évolution de la température en deux points de Toulouse, le 25 février 2005 58	58
Figure 22: Structure verticale de l'atmosphère urbaine des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s.	60
Figure 23: Illustration du piégeage radiatif. Illustré par l'auteur.	62
Figure 24: L'Albédo de l'environnement urbain. Illustré par l'auteur.	64
Figure 25: Relation entre les surfaces imperméables et le phénomène d'évapotranspiration. . 65	65
Figure 26: Comportement de l'écoulement du vent en rencontre de plusieurs obstacles (vue en coupe). Illustré par l'auteur.	67
Figure 27: Perturbation de l'écoulement du vent en zone rugueuse (canopée urbaine).	68
Figure 28: Comportement du vent en fonction de l'espacement entre les constructions.	69
Figure 29: Evolution de la couche limite du vent en fonction de la rugosité du sol.	69

Figure 30: Zones critiques de l'écoulement du vent.	71
Figure 31: Pollution atmosphérique au Caire, en Egypte.	72
Figure 32: Phénomène d'inversion thermique. Illustré par l'auteur.	73
Figure 33: Eléments constitutifs des ambiances. Elaboré par l'auteur.	76
Figure 34: Ambiance thermique : sensations et réactions.	78
Figure 35: Multiples dimensions de confort.	81
Figure 36: Echanges thermiques entre l'homme et son environnement.	84
Figure 37: Facteurs de sensation thermique. Illustré par l'auteur.	86
Figure 38: Production de chaleur en fonction de l'activité.	87
Figure 39: Polygone du confort.	89
Figure 40: Entrée des modèles géométriques pour un quartier de 300mx300 m.	100
Figure 41: Profil vertical de différence de température entre divers scénarios d'une zone d'étude à Modène en Italie.	102
Figure 42: La zone d'étude élaborée dans Envi-met pour la simulation des scénarios 3 et 4. Source : Marco NORO M et al.	102
Figure 43: Résultats de la simulation par ENVI-MET : Evolution des températures de l'air pour évaluation de l'ilot de chaleur urbain pour le cas initial avec les 4 scénarios d'étude. .	103
Figure 44: Les valeurs de PET calculées par ENVI-MET de 10h à 16h pour une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol.	104
Figure 45: Essai de restitution du plan du Castellum de Pomaria de l'an 47 avant J.C à 433 après JC.	109
Figure 46 : Restitution du tracé de Pomaria et d'Agadir par J.Canal.	109
Figure 47: Restitution de Tagrart à l'époque Almoravide.	110
Figure 48 : Plan de distribution, d'alignement et de nivellement de Tlemcen (Phase Projet).	115
Figure 49 : Terrains urbains disponibles après percement de rues à Tlemcen.	116
Figure 50 : Plan reconstituant l'évolution de la trame viaire.	117
Figure 51: Extension de la ville de Tlemcen au-delà des remparts, 1950.	118
Figure 52 : La localisation du fragment urbain dans la vieille ville de Tlemcen.	119
Figure 53 : Délimitation de la zone d'étude.	119
Figure 54: Relevé de la zone sud-ouest par le génie français avant leur intervention.	120
Figure 55: Evolution de la tour au moment de son annexion à l'enceinte française.	122
Figure 56: Porte des carrières avec El Bordj pendant l'époque coloniale.	123
Figure 57: Plan de superposition entre l'ancienne et la nouvelle configuration du quartier de Bab El Hadid.	123
Figure 58: Le programme d'aménagement du fragment urbain en 1877.	124
Figure 59: Plan et projet d'ouverture de la rue Impériale (rue de Paris) datant de 1868.	125
Figure 60: Relevés de la porte des Carrières et du Bordj de Bab El Hadid.	127
Figure 61: Vue actuelle sur l'emplacement de la porte des carrières.	127
Figure 62: Nouvelles constructions au sein de notre fragment urbain.	128
Figure 63: Secteur urbain choisi.	132
Figure 64: Secteur d'étude, périmètres de calcul et canyons urbains.	140
Figure 65: a. configuration de la zone du parc urbain. b. Interprétation par le modèle ENVI-MET. c. Sortie, température de l'air.	146

Figure 66: Structure du modèle sur ENVI-MET.	149
Figure 67: a. Evolution annuelle de la température de l'air pour la ville de Tlemcen sur la période (2008-2017). b. de la vitesse du vent. c. Valeurs moyennes annuelles pour chaque année, et écarts types.	151
Figure 68: La moyenne horaire journalière de la température de l'air pour les quatre années filtrées à Tlemcen.	151
Figure 69: Plan reconstituant la configuration urbaine de l'état 1.	152
Figure 70: Plan reconstituant la configuration urbaine de l'état 2.	153
Figure 71: La configuration urbaine de l'état 3.	154
Figure 72: Interprétation de l'état 1 par ENVI-MET.	155
Figure 73: Interprétation de l'état 2 par ENVI-MET.	155
Figure 74: Interprétation de l'état 3 par ENVI-MET.	156
Figure 75: Facteur de vue de ciel correspondant à l'état 1.	157
Figure 76: Facteur de vue de ciel correspondant à l'état 2.	157
Figure 77: Facteur de vue de ciel correspondant à l'état 3.	158
Figure 78: Albédo moyen correspondant à l'état 1.	159
Figure 79: Albédo moyen correspondant à l'état 2.	159
Figure 80: Albédo moyen correspondant à l'état 3.	160
Figure 81: Intensité du vent correspondant à l'état 1 à 12h00.	161
Figure 82: Intensité du vent correspondant à l'état 2 à 12h00.	161
Figure 83: Intensité du vent correspondant à l'état 3 à 12h00.	162
Figure 84: Evolution journalière de la température de surface correspondant à la configuration urbaine 1.	164
Figure 85: Evolution journalière de la température de surface correspondant à la configuration urbaine 2.	165
Figure 86: Evolution journalière de la température de surface correspondant à la configuration urbaine 3.	166
Figure 87: Distribution du PMV dans la configuration 1.	170
Figure 88: Distribution du PMV dans la configuration 2.	171
Figure 89: Distribution du PMV dans la configuration 3.	172
Figure 90: Variations des PMV à l'intérieur des différentes configurations.	173
Figure 91: Points de mesure dans le fragment urbain.	181
Figure 92: Coupes transversales de canyons de rue.	182
Figure 93: Instrument « Anémomètre CR2032 » pour mesurer les données microclimatiques locales dans le site urbain historique de Bad el Hadid.	183
Figure 94 : Température de l'air mesurée et simulée, en fonction de l'horaire pour l'hiver.	189
Figure 95: Température de l'air mesurée et simulée, en fonction de l'horaire pour l'été.	190
Figure 96: Le diagramme de dispersion de la température entre la mesure et la simulation en hiver.	191
Figure 97: Le diagramme de dispersion de la température entre la mesure et la simulation en été.	191
Figure 98: Modèle géométrique de l'étude.	192
Figure 99: Comparaison des données de la vitesse moyenne du vent entre microclimat et la référence (station météorologique) de 12 h à 15 h.	195

Figure 100: Répartition en pourcentage des votes sur les sensations thermiques dans le secteur d'étude.	197
Figure 101: Répartition de la satisfaction à l'égard de l'espace extérieur dans le site historique.	198
Figure 102: Comparaison du confort thermique entre les différents canyons urbains en été.	199
Figure 103: Comparaison du confort thermique entre les différents canyons urbains en hiver.	199
Figure 104 : Valeurs du PMV pour différents points de mesure à 12h00.	204
Figure 105: Valeurs du PMV pour différents points de mesure à 16h00.	204
Figure 106: Facteurs de vue du ciel calculés avec ENVI_MET.	207
Figure 107 : Classification thermique des rues par priorité d'intervention.	208

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification de la rugosité du terrain.	26
Tableau 2: Photos de l'environnement construit, fisheye dans quelques points de la ville de Bijing, Pékin.	31
Tableau 3: Valeurs d'albédo de différents matériaux urbains.	34
Tableau 4: Indice Humidex et degré d'inconfort perçu.	46
Tableau 5: L'échelle Beaufort.	47
Tableau 6: Facteurs et échelles influant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Illustré par l'auteur.	61
Tableau 7: Production de chaleur en fonction de l'activité.	86
Tableau 8: Isolement thermique dû aux vêtements.	87
Tableau 9: Echelles de sensation thermique.	90
Tableau 10: Les échelles de jugements subjectifs sur les conditions thermiques.	91
Tableau 11: Valeurs de vote moyen prévisible pour différent degrés de perception thermique.	93
Tableau 12: Gammes de la température équivalente physiologique (PET) pour différents degrés de perception thermique par les êtres humains et stress physiologique sur les êtres humains, chaleur interne Production: 80 W, résistance au transfert de chaleur du vêtement : 0,9 clo.	94
Tableau 13: Gamme de confort thermique de la PET dans différentes études. Etabli par l'auteur.	96
Tableau 14: Température équivalente UTCI catégorisée en termes de contrainte thermique.	97
Tableau 15: Caractéristiques recherchées de la forme urbaine.	133
Tableau 16: Présentation et lecture morphologique du canyon 1.	135
Tableau 17: Présentation et lecture morphologique du canyon 2.	136
Tableau 18: Présentation et lecture morphologique du canyon 3.	137
Tableau 19: Présentation et lecture morphologique du canyon 4.	138
Tableau 20: Présentation et lecture morphologique du canyon 5.	139
Tableau 21: Résultats des calculs des indicateurs à l'échelle du tissu urbain.	141
Tableau 22: Résultats des calculs des indicateurs à l'échelle de l'espace public.	143
Tableau 23: Correspondance entre PMV et perceptions thermiques.	168
Tableau 24: Croisement entre valeurs d'indicateurs physico-géométriques, paramètres microclimatiques et échelles de confort.	175
Tableau 25: Données météorologiques mesurées et précision de l'instrument de mesure. ...	183
Tableau 26: Comparaison des données sur le microclimat et les stations météorologiques entre 09h00 et 18h00.	184
Tableau 27: Description de la date des enquêtes sur le terrain dans chaque zone.	184
Tableau 28: Partie sélectionnée du questionnaire utilisé dans cette étude.	187
Tableau 29: Echelles de sensation de confort pour l'analyse des résultats de l'enquête.	188

Tableau 30 : Echelle de perception sur le degré de satisfaction pour l'analyse des résultats de l'enquête.	188
Tableau 31 : Echelle de préférence climatique pour l'analyse des résultats de l'enquête.	189
Tableau 32: Description du modèle de configuration des limites météorologiques.	193
Tableau 33 : Distribution du PMV en hiver dans la zone d'étude.	204
Tableau 34: Satisfaction thermique des piétons dans les canyons urbains pendant le mois le plus froid.....	206

Liste des annexes

Annexe 1 : Plan d’alignement – Projet- commission consultative du 22 Février 1851.	236
Annexe 2: Plan d’alignement de la ville de Tlemcen approuvé par arrêté du 9 Mai 1877. ...	237
Annexe 3: Plan de la ville de Tlemcen et des faubourgs 1950.	238
Annexe 4: Plan des égouts existants et à construire de la ville de Tlemcen en 1866.	239
Annexe 5: Plan des percements au niveau du quartier de Bab el Hadid.	240
Annexe 6: Relevé d’une partie de l’enceinte médiévale Sud de Tlemcen.	241
Annexe 7: Plan des travaux d’alignements en projet du côté ouest de la ville de Tlemcen. ..	242
Annexe 8: Procès-verbal des Immeubles à exproprier effectuées au niveau de la rue de Paris.	243
Annexe 9 : Descriptif de la nature des travaux exécutés au niveau de la zone d’étude.	244
Annexe 10: Plan du projet d’ouverture des rues à Bab El Hadid 1868.	245
Annexe 11 : Les données météorologiques d’entrée pour les simulations.	246
Annexe 12: Vitesse de l’air et température de surface pendant l’été 2017 de la configuration urbaine 1.	247
Annexe 13: Vitesse de l’air et température de surface pendant l’été 2017 de la configuration urbaine 2.	250

Liste des acronymes

C : la convection.

CES: le coefficient d'emprise au sol.

CLA: la couche limite atmosphérique.

CLU: la couche limite urbaine.

COS: le coefficient d'occupation du sol.

DTS: la sensation thermique dynamique.

E: l'évaporation.

ET : la température effective.

FVC : le facteur de vue de ciel.

H/L: le rapport hauteur/largeur.

HR : l'humidité relative de l'air.

ICU : l'ilot de chaleur urbain.

Mskdot: la production de sueur.

OUT_set : la température effective extérieure.

PET: la température physiologique équivalente.

PMV: le vote moyen prévisionnel (Predicted Mean Vote).

PPD : le pourcentage de personnes insatisfaites (Predicted Percentage of Dissatisfied).

Q': le bilan radiatif.

Q_E: le flux de chaleur latente.

Q_F: le flux de chaleur anthropique.

Q_H: le flux de chaleur sensible.

ΔQ_A : le transfert de chaleur par advection.

ΔQ_S : le stockage de la chaleur.

R : le rayonnement.

SET : la température standard équivalente.

Shiv: la chaleur générée par le frissonnement.

Ta: la température de l'air.

Tmrt: la température radiante moyenne.

Tp : la température des parois.

Tre: la température rectale.

Tskm: la température de la peau moyenne.

UTCI: l'indice universel thermique du climat.

VbSk: le flux sanguin de la peau.

wettA: l'humidité de la peau.

Zd: la hauteur de déplacement.

ZHUN: la zone d'habitat urbain nouvelle.

Introduction générale.

Introduction :

A l'heure actuelle, les villes contemporaines révèlent des problématiques environnementales dans un contexte de changement climatique. Cette question est prioritaire par les effets économiques et sociaux que ce phénomène entraîne. A l'échelle de la ville, ce fait se traduit par l'effet d'îlot de chaleur urbain : Une nouvelle dimension dans la lecture de la ville s'ajoute, en combinant diverses connaissances dans différents domaines, tels que la climatologie, la géographie, l'urbanisme, l'architecture et le génie énergétique.

Cette combinaison climat, ville, est devenue l'une des plus importantes, notamment dans les villes européennes, où de multiples efforts se sont mis en place pour assurer la qualité environnementale. Alors, que dans d'autres pays d'Afrique, la prise de conscience de ces effets reste toujours en retard.

La forme urbaine a un impact significatif sur les microclimats et sur les diverses conditions thermiques dans l'environnement des espaces extérieurs¹. Les espaces extérieurs en milieu urbain sont perturbés par de multiples facteurs, les activités anthropiques, le recours à la climatisation et le chauffage ont des effets négatifs sur le microclimat. D'autre part, la mise en relation entre forme urbaine, végétation et relief crée et influe sur le microclimat.

Le microclimat pourrait intervenir d'une manière positive ou négative sur la qualité sanitaire des espaces et le confort thermique des piétons. Il revêt une importance cruciale par son impact sur la santé, le bien-être et sur la consommation énergétique². La pollution et les maladies seront facilement étendues dans les régions urbaines avec un climat chaud humide et peu ventilé par exemple.

Les paramètres environnementaux jouent un rôle majeur sur le confort thermique dans les milieux urbains à une échelle locale et sont directement influencés par les altérations micro climatiques dûes à l'urbanisation. Les paramètres microclimatiques clefs comprennent la température (effet d'îlot de chaleur), l'ensoleillement, l'humidité relative et le mouvement du vent. Ils varient instantanément en fonction de l'espace et du temps. Ces variations, souvent influencées par la variation de la configuration des espaces publics urbains, peuvent être plus

¹ Liu, W., Zhang, Y., & Deng, Q. (2016). The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate. *Energy and Buildings*, 128, 190–197. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.086.

² Harlan, S. L., & Ruddell, D. M. (2011). Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), 126–134. doi:10.1016/j.cosust.2011.01.001.

ou moins appropriées au confort thermique des piétons. Par ailleurs, certaines répercussions comme l'utilisation d'une climatisation active et ainsi une augmentation de la consommation énergétique sont dûes à une mauvaise adaptation climatique des environnements urbains³.

Par ailleurs, La qualité des espaces extérieurs présente un intérêt majeur pour contribuer à la bonne qualité de vie en milieu urbain. Dans cette optique, plusieurs recherches démontrent que les paramètres microclimatiques sont de prime importance du point de vue des activités qui ont lieu sur le site et jusqu'à un certain point, déterminent l'usage que l'on en fait⁴⁻⁵. Le temps d'exposition des individus aux conditions microclimatiques du lieu, le genre et la qualité des activités procure un niveau de confort ou d'inconfort⁶.

D'autre part, le stockage de chaleur dans les zones urbaines sera plus élevé par rapport aux zones non bâties, causés par les matériaux de revêtement du bâti, des rues, par la morphologie, la densité et l'espace ouvert, ainsi que par les activités de transport et d'industrie⁷.

Cette recherche s'inscrit tout d'abord dans le domaine d'investigation portant sur la diversité environnementale en milieux urbains. Elle vise à étudier et analyser le rapport entre la morphologie urbaine, les microclimats et le confort thermique dans les espaces publics extérieurs.

1. Problématique :

Les espaces urbains extérieurs sont caractérisés par de grandes variations d'ambiances architecturales et urbaines sensibles, aux phénomènes météorologiques, aux changements climatiques et aux spécificités du tissu urbain contribuant ainsi à des modifications climatiques perceptibles à tous les niveaux. La conception de ces espaces devrait prévoir la problématique thermique découlant de la relation entre la forme urbaine et les conditions

³ Grundström, K., Johansson, E., Mraissi, M., & Ouahrani, D. (2003). Climat et Urbanisme - La Relation entre le Confort Thermique et la Forme du Cadre Bâti. (Report; Vol. 8). *Housing Development and management*.

⁴ Boussoualim, A. (2002). Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur- Etude de cas à Blagnac -, Architecture, espace management. Thèse de doctorat, Université de Nantes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01083203>.

⁵ Nikolopoulou, M. (Ed.) (2004). Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach. Athens: *Centre for Renewable Energy Sources, EESD*, FP5.

⁶ Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77–86. doi:10.1016/s0378-7788(02)00082-8.

⁷ Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9), 1262–1292. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<1262:apouad>2.0.co;2.

Introduction générale

climatiques locales. Pour cela, la qualité des ambiances microclimatiques extérieures doit être modifiée lors de la conception.

En particulier, le climat a toujours influencé la conception de la ville, citons l'architecture vernaculaire qui a prouvé son adaptation à l'environnement local.

En milieu urbain, le microclimat est issu d'une interaction complexe entre les paramètres physiques et la ville. La première grandeur : le climat, dépend de la température de l'air et du vent, ...et souvent caractérisé par une fluctuation temporelle et spatiale. Quant à la ville, elle comprend les formes morphologiques et géométriques des tissus urbains tels que la rugosité du site, la porosité, l'orientation et les dimensions des masses bâties. Elle compte aussi, les éléments naturels de la végétation et de l'eau, les aménagements urbains et l'activité humaine qui se développe en son sein.

La qualité des ambiances thermiques dans les espaces extérieurs est la base de toute conception bioclimatique. Or, la négligence de ce principe engendre le phénomène d'îlot de chaleur urbain qui a des conséquences bien réelles en terme de confort, de biodiversité, de santé et de consommation énergétique.

En outre, ces conséquences seront accentuées par le changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre et par une configuration mal adaptée du tissu urbain. En effet, la question de la qualité microclimatique est une problématique très complexe, d'autant qu'elle fait appel à un large spectre de disciplines qui se réunissent autour de la question de la ville, du climat et de l'énergie. En outre, plusieurs études se focalisent sur les configurations urbaines spécifiques telles que les cours, les rues ou blocs du bâti afin de discuter les résultats de l'analyse microclimatique et ce, pour différents climats.

Aujourd'hui, en Algérie, on assiste à une urbanisation accélérée et standardisée constituée de formes spatiales souvent mal adaptées aux exigences du confort urbain. Par ailleurs, les actions de modification des formes urbaines ont contribué à travers l'histoire des villes à modifier le microclimat.

La médina de Tlemcen a connu des transformations et des mutations urbaines qui se sont déroulées depuis la colonisation jusqu'à ces dernières années et ont été d'une ampleur considérable provoquant un bouleversement spatial dans l'organisation urbaine et une altération de la qualité des ambiances extérieures. Une analyse dynamique des

Introduction générale

transformations urbaines permettra de distinguer les références d'intervention qui ont contribué à réguler les paramètres microclimatiques et environnementaux.

La mise en relation des dimensions microclimatiques et morphologiques dans un contexte de mutations urbaines pour une perspective d'intervention, nous renvoient à un certain nombre de questionnements :

Quelles sont les transformations urbaines qui ont produit par le passé des variations microclimatiques ?

Quel est l'impact des transformations des formes urbaines de la médina de Tlemcen sur les ambiances thermiques extérieures et sur le confort des individus ?

Parmi ces différentes formes, lesquelles peut-on retenir ou adapter pour réguler le microclimat ?

2. Hypothèses de la recherche :

Les hypothèses suivantes traduisent les questionnements précédents :

- Les transformations urbaines de nature morphologique ont permis par le passé de modifier le microclimat urbain : l'urbanisme de la période coloniale dans un objectif hygiéniste a contribué à perturber les paramètres microclimatiques dans le but de faire pénétrer le soleil, la lumière et l'air dans les espaces extérieurs et intérieurs.
- Les différences de la forme urbaine affectent les ambiances thermiques extérieures : plus ces différences sont nombreuses, plus les interactions seront nombreuses. Ces ambiances deviennent non maîtrisables et peuvent compromettre le confort des individus.
- Pour définir les indicateurs qui contribuent à réguler le microclimat, nous devons observer le processus de transformation qui a donné naissance à différentes formes à travers le temps : les interventions pourraient être différentes mais elles convergeraient vers la même modification du microclimat. Ces indicateurs varient dans l'espace et dans le temps, le processus de modification continu du microclimat s'observe sur une durée importante, ou bien dans des phases d'intervention localisées à un moment donné de l'histoire.

3. Objectifs de la recherche :

En analysant les transformations urbaines sur le tissu du quartier de Bab El Hadid, nous cherchons à étudier l'impact de ces interventions sur le microclimat et à définir les indicateurs

Introduction générale

morphologiques afin de proposer des modalités d'intervention pouvant être applicables par les planificateurs urbains.

Dans le cadre de cet objectif, notre recherche est structurée selon trois objectifs spécifiques et complémentaires et font l'objet de ce qui suit :

a. Définition des différents paramètres qui ont contribué à la modification du microclimat urbain.

Cette recherche a pour premier objectif de définir les indicateurs de la forme urbaine et son développement historique qui interagissent avec les paramètres microclimatiques tels que la température et le vent, portant une modification de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

b. Etude de l'impact des transformations urbaines sur les ambiances thermiques.

L'objectif est de se référer au contexte historique pour constituer des références d'intervention afin de définir toutes les transformations des éléments de la forme urbaine pouvant influencer sur le microclimat.

Après, nous tenterons d'évaluer les variations que les différentes transformations ont pu induire sur les ambiances thermiques afin de quantifier les paramètres microclimatiques à partir des données morphologiques par des modèles de simulations numériques.

L'objectif devient envisageable, car ces modèles nous permettent de vérifier la pertinence des modes d'intervention sur le cadre bâti du point de vue de leur capacité à réguler le microclimat urbain.

c. Proposition d'un outil d'analyse régulateur du microclimat pour les interventions urbaines.

Ce que nous voulons apporter à travers cette recherche s'inscrit dans la mise en place d'un outil d'analyse et d'anticipation sous forme de règles d'intervention, qui serait, de traduire les modalités de régulation des paramètres microclimatiques et l'action sur la forme urbaine.

A partir de là, nous tenterons de définir les indicateurs morphologiques. Le rôle de ces derniers serait d'informer le concepteur des effets de ces actions sans pour autant lui imposer une forme précise. Entre autres, infléchir les planificateurs urbains vers une utilisation plus accrue d'indices morphologiques porteurs d'une information microclimatique.

4. Méthodologie de la recherche :

Pour mener à bien ce travail, nous avons utilisé ces méthodes :

Tout d'abord, un état de l'art sur les travaux précédents est nécessaire pour comprendre les concepts liés à notre recherche, à savoir, interactions entre microclimat et morphologie urbaine, confort thermique extérieur et perceptions microclimatiques des piétons.

Ensuite, l'identification des indicateurs morphologiques de notre zone d'étude consiste à sélectionner les variables affectant le microclimat dans différentes configurations urbaines.

L'outil ENVI-MET a été choisi pour la simulation numérique validée par des mesures microclimatiques à l'aide d'un anémomètre CR2032. La simulation permet de prédire de façon correcte la distribution des paramètres physiques à savoir la température de l'air, la vitesse du vent et l'indice de confort thermique PMV. Pour cela nous avons appliqué cette méthode pendant trois périodes différentes de l'histoire.

En effet, la relation entre la perception subjective et la quantification objective de l'environnement thermique a été recherchée. Pour cela, une enquête par questionnaire, a été mise en place afin de combiner la sensation thermique des piétons avec leur degré de satisfaction et de préférence.

5. Structure de la thèse :

Le présent travail est divisé en deux parties principales.

PREMIERE PARTIE: Principes et éléments théoriques : de la crainte sur l'environnement climatique à son interaction avec la morphologie urbaine.

Cette partie théorique entreprend un état de l'art décrivant plusieurs travaux qui ont abouti à des méthodes et résultats dans le domaine de la morphologie urbaine et son impact sur le microclimat.

Elle a pour objectif la compréhension des concepts pour mieux cerner nos objectifs. Elle développe des concepts sur la morphologie urbaine, le microclimat urbain et le confort thermique extérieur afin de comprendre les paramètres urbains en interaction.

Elle comporte quatre chapitres théoriques :

CHAPITRE I : Un état de l'art sur les travaux de recherche.

Introduction générale

CHAPITRE II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

CHAPITRE III : Climat et milieu construit.

CHAPITRE IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

DEUXIEME PARTIE: Quantification des effets microclimatiques et du confort thermique liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid à Tlemcen.

Cette partie retrace l'historique des transformations urbaines affectant le microclimat. Il sera question de présenter les principales transformations urbaines de notre cas d'étude pour quantifier et comparer les effets microclimatiques, complétée par une analyse de la perception du confort thermique dans la période actuelle.

Elle est répartie en trois chapitres :

CHAPITRE I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

CHAPITRE II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

CHAPITRE III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

.

PREMIERE PARTIE:

**Principes et éléments théoriques : de la crainte sur
l'environnement climatique à son interaction avec la
morphologie urbaine.**

Première partie: Principes et éléments théoriques : de la crainte sur l'environnement climatique à son interaction avec la morphologie urbaine.

Introduction de la 1 ère partie:

A travers l'histoire, la morphologie urbaine a toujours influencé d'une manière implicite ou explicite le microclimat et le confort thermique dans les espaces extérieurs.

De ce fait, nous allons à travers cette partie étaler notre recherche sur les connaissances scientifiques actuelles pour évaluer le rapport entre la morphologie urbaine et le confort thermique extérieur à l'échelle d'une zone urbaine. Cette partie est structurée autour de quatre chapitres. Nous exposons dans chacun un ensemble de connaissances qui nous permet de mieux cerner notre recherche. Parmi eux, des travaux qui ont abouti à des méthodes et résultats dans le domaine de la morphologie urbaine et son impact sur le microclimat, les éléments de connaissance liés à la morphologie urbaine et ses indicateurs, l'interaction entre le microclimat et le milieu construit et les différentes méthodes pour quantifier la régulation des paramètres physiques par les éléments de la forme urbaine. Nous évoquerons aussi, les éléments permettant d'évaluer le confort thermique extérieur de façon objective ou subjective.

Cette partie de recherche constituant une base pour l'ensemble des éléments qui y sont impliqués, nous aidera à l'accomplissement de la démarche propre de notre cas d'étude.

CHAPITRE I :

Un état de l'art sur les travaux de recherche.

Chapitre I : Un état de l'art sur les travaux de recherche.

Introduction :

Dans le cadre de la recherche, plusieurs travaux ont abouti à des méthodes et résultats dans le domaine de la morphologie urbaine et son impact sur le microclimat.

Les objectifs sont multiples : certains s'orientent vers l'étude de l'impact de la géométrie urbaine des rues canyons sur le confort thermique, d'autres, sur l'impact de la végétation sur le confort thermique. D'autres encore, font la comparaison entre la densité de deux tissus urbains et leur impact sur le microclimat. Et d'autres, vont jusqu'à l'étude du changement climatique des environnements urbains.

1. Quelques travaux de recherche :

Les proportions géométriques optimales des canyons de rue ont été analysées dans des villes sur la base de divers critères liés au climat⁸. Marialena NIKOLOPULOU et ses collaborateurs ont présenté une étude approfondie à travers l'Europe sur le microclimat et le confort extérieur dans de multiples espaces urbains ouverts afin d'examiner les méthodes d'évaluation et les principes de conception.

Un des indicateurs urbains qui influe sur l'environnement thermique est le rapport de surface verte. Dans ce contexte, des chercheurs ont analysé différentes configurations urbaines de densité variable en prenant en compte l'état de perméabilité ou d'imperméabilité de la surface. D'après leurs résultats, les indicateurs morphologiques et plus précisément l'indicateur de couverture végétale influe sur la variation de la température de surface et cette dernière varie selon la variation de la température moyenne journalière dans l'axe nord/ sud⁹.

Nous avons constaté à travers l'étude qui a été menée dans la ville de Lisbonne que deux variables ont été pris : le facteur de vue de ciel et la densité urbaine.

Par la méthode d'analyse de régression, ces chercheurs ont jugé que les résultats n'étaient pas satisfaisants en caractérisant la morphologie urbaine d'une ville entière et que la régression

⁸ Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6.

⁹ Zhao, C., Fu, G., Liu, X., & Fu, F. (2011). Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. *Building and Environment*, 46(5), 1174–1183. doi:10.1016/j.buildenv.2010.12.009.

Chapitre I : Un état de l'art sur les travaux de recherche.

avec la température de surface, le facteur de vue de ciel et la densité sont convenables pour des tissus de taille réduite¹⁰.

Dans des conditions proches à notre contexte d'étude, une analyse des effets microclimatiques et du confort thermique généré par la géométrie urbaine et notamment le prospect H/L dans la ville de Fez a été menée.

Le chercheur a comparé la température de surface et l'indice PET dans deux cas de canyons, le premier avec des rues étroites et le second se caractérise par de larges rues.

Les résultats ont montré que les rues canyons étaient plus fraîches que celles larges et cela est dû à leur grand rapport H/L. Mais, pendant la nuit, les conditions microclimatiques deviennent critiques¹¹.

Néanmoins, il conclue que les rues canyons étroites sont plus stables en matière de confort thermique et ne présente pas l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Le stress thermique a été évalué par la mesure de la température radiante moyenne T_{mrt} dans une étude en Suède. Les chercheurs ont analysé les effets probables de la densité et de la couverture végétale pour des scénarios climatiques actuels et futurs sur une zone de réaménagement à Göteborg¹².

Un des travaux fascinants est celui effectué en Brésil. Ils ont analysé l'influence de la morphologie urbaine sur le confort thermique et le microclimat dans les espaces extérieurs en prenant en compte le FVC et le rapport H/L dans la ville de Curitiba.

Les conclusions de l'enquête, des mesures et de la simulation ont prouvé que le FVC ne suffit pas, et qu'un certain nombre de variables sont nécessaires pour aboutir à des résultats fiables¹³.

Dans un grand parc urbain à Athènes, Mat SANTAMOURIS a mené un travail pour améliorer les conditions de confort thermique, réduire l'intensité de la chaleur et améliorer la qualité de

¹⁰ Vieira, H. et Vasconcelos, J. (2003). Urban morphology characterization to include in a GIS for climatic purposes in Lisbon. Discussion of two different methods. *Proceeding 5th Int Conf on Urban Climate*, 2, 417–420. <https://www.researchgate.net/publication/237255125>.

¹¹ Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.022.

¹² Lindberg, F., Thorsson, S., Rayner, D., & Lau, K. (2016). The impact of urban planning strategies on heat stress in a climate-change perspective. *Sustainable Cities and Society*, 25, 1–12. doi:10.1016/j.scs.2016.04.004.

¹³ Krüger, E. L., & Rossi, F. A. (2011). Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. *Building and Environment*, 46(3), 690–697. doi:10.1016/j.buildenv.2010.09.013.

Chapitre I : Un état de l'art sur les travaux de recherche.

l'environnement global dans la zone considérée. A l'aide de l'outil de la dynamique des fluides, il a conclu que l'utilisation de matériaux de pavage réfléchissants est une technique d'atténuation très efficace pour améliorer les conditions thermiques dans les zones urbaines¹⁴.

En Algérie, dans la ville de Ghardaia, une étude a été effectuée pour évaluer les conditions de confort thermique dans les canyons de la rue d'un climat aride en prenant comme variables le rapport d'aspect H/L et l'orientation. Par la suite, les auteurs ont donné des orientations importantes de conception des rues¹⁵.

Mohammed BENZERZOUR a proposé un indicateur « morpho-climatique » en étudiant les transformations urbaines et variations du microclimat dans le centre ancien de Nantes par l'outil de modélisation et simulation TEB¹⁶.

L'indicateur proposé « ouverture directionnelle » reprend la notion de gabarit liée au canyon, et l'étend à une analyse multidirectionnelle pour l'évaluation de l'ouverture du vide urbain. Il conclut que cet indicateur s'avère prometteur pour rendre compte des interactions entre la morphologie et le microclimat.

D'autres chercheurs ont porté leurs intérêts sur des méthodes de relevés dynamiques in situ. L'auteur a démontré l'effet de cette dynamique environnementale sur la perception des ambiances thermiques d'un piéton. En comparant entre trois tissus situés au Québec, il a croisé les données des enquêtes et de mesures pour analyser les conditions de confort thermique¹⁷.

Depuis les années 60, plusieurs chercheurs¹⁸⁻¹⁹⁻²⁰ ont étudié le confort thermique dans les espaces intérieurs.

¹⁴ Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., & Kardomatas, T. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53, 128–136. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.02.

¹⁵ Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). 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(2), 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013.

¹⁶ Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique". Histoire. Université de Nantes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00428536/>.

¹⁷ Ouamer, A. (2007) Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics. Étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec, université de Laval.

¹⁸ Olgyay, V. (1963). Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Issue 1. Princeton, NJ : Princeton University Press, 224 p.

¹⁹ Givoni B. (1969). Man, Climate, and Architecture. Philadelphia, PA : Elsevier Architectural Science Series.

²⁰ Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort. New York, Etats Unis : McGraw-Hill, 244 p.

Chapitre I : Un état de l'art sur les travaux de recherche.

Dernièrement, le rapport entre les espaces extérieurs et le confort a été entrepris par Andreas MATZARAKIS, Marialena NIKOLOPOULOU²¹⁻²². Un des travaux importants fut le projet RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces). À partir d'un travail sur le terrain, ils ont mis en place des questionnaires et des mesures microclimatiques dans sept villes européennes afin de déterminer un indice de confort ASV (votes de sensation effective) et l'utiliser comme un outil de conception.

Des scientifiques ont mis en place une étude portant sur l'évaluation du confort à partir d'enquête auprès des touristes dans la zone historique d'Isphahan en Iran. Le but de cette étude était de déterminer le meilleur moment de la journée d'été afin de visiter chaque site historique. 168 questionnaires ont été effectués. Les questions portaient dans un premier volet les informations personnelles sur les touristes, notamment, leur poids, et leur taille. Le deuxième volet concernait les questions sur la sensation thermique des touristes, préférence thermique, satisfaction thermique, durée du séjour dans la ville, type d'activité, et leur présence dans le site historique avant ce questionnaire.

Ensuite dans chaque site historique les résultats du questionnaire et simulation ont été comparés. Il a été démontré que trois sites historiques présentent un stress thermique élevé²³.

Malgré les connaissances acquises grâce à toutes ces études, la recherche dans ce domaine reste distante avec son application à l'aménagement urbain. Ce n'est que récemment que le microclimat a commencé à être pris en compte dans les projets d'urbanisme, et plus particulièrement aux projets de réhabilitation des espaces publics existants.

Par exemple, un projet de rénovation d'une zone urbaine en Crète dans une île grecque a été accompli selon des critères bioclimatiques pour discuter les paramètres de conception sur le microclimat et le confort²⁴.

Une autre étude à Athènes décrit la manière exemplaire du processus de réaménagement, de planification et conception des espaces extérieurs urbains du projet "One step beyond".²⁵. Les

²¹ Matzarakis, A., de Freitas, C. et Scott, D. (2004). Advances in tourism climatology. Dans *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität*.

²² Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227–235. doi:10.1016/S0038-092X(00)00093-1.

²³ Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*, 125, 356–372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.09.006.

²⁴ Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., & Kardomateas, T. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53, 128–136. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.022.

Chapitre I : Un état de l'art sur les travaux de recherche.

résultats ont démontré qu'au moyen d'une verdure respectueuse du climat, le confort a été atteint. L'approche multidisciplinaire des architectes, des architectes paysagistes, des scientifiques et des ingénieurs ainsi que les avantages de l'intégration des simulations est une bonne méthode d'approche de ce type de projet.

Au-delà des travaux réalisés il est important de prendre en compte les normes telles que l'ISO 7730 (2005)²⁶ et le Standard 55 d'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* [ASHRAE] (2004)²⁷. Elles donnent des indications sur les variables, les paramètres et les conditions envisageables pour les études sur le confort.

Conclusion :

A travers ces travaux de recherche, nous avons constaté une concordance entre les méthodes et les outils d'analyse. La plupart des chercheurs ont pris des variables communes comme la géométrie des rues, la couverture végétale, la densité bâtie, l'albédo....

La combinaison de deux variables ou plus et le choix de la méthode de recherche dépend essentiellement de l'échelle d'étude du tissu urbain, du contexte et des objectifs de la recherche.

²⁵ Altinisik, L., Klemm, W., Peretti, G., & Bruse, M. (2014). Integration of Microclimate- Responsive design in the planning of Urban outdoor spaces - a case study in Athens, Greece. *Third int. conf. on countermeasures to urban heat island*. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/324491>.

²⁶ Norme ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Switzerland: ISO.

²⁷ ASHRAE Standard 55. (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

CHAPITRE II :

**Compréhension de la morphologie urbaine et ses
indicateurs.**

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Introduction :

L'espace urbain sera l'objet de notre recherche. Il est caractérisé par sa morphologie, sa forme et par des variations de paramètres microclimatiques.

A cet effet, la compréhension des relations entre la morphologie urbaine et les paramètres physiques du microclimat local est primordiale. C'est pourquoi, nous mettons l'accent sur la définition de la morphologie et de la forme urbaine par l'œil des urbanistes, géographes, sociologues et climatologues.

Ce chapitre, traite en premier lieu un essai de définition de la morphologie urbaine. Les méthodes et écoles d'analyse de la forme urbaine sont aussi discutées dans cette première partie. Les indicateurs morphologiques, géométriques et physiques influençant les paramètres de confort seront identifiés afin de mieux asseoir notre recherche.

Enfin, nous tentons de présenter un contexte historique des transformations urbaines modifiant le microclimat.

1. La morphologie urbaine :

1.1. Essai de définition de la forme urbaine et morphologie urbaine :

La notion de forme urbaine nous semble assez large et complexe. Par la spécificité dynamique de la ville, la forme urbaine est l'expression des changements profonds qui interagissent à l'intérieur de la ville.

Pour définir ce concept, nous tentons d'éliminer toute confusion entre morphologie urbaine et forme urbaine que nous avons tendance à utiliser comme synonyme.

Selon, Philippe PANERAI et Julien LANGE, 2001, « La morphologie urbaine est l'étude des causes qui contribuent à la formation et à la modification de la structure physique de la ville »²⁸. La morphologie urbaine est l'étude de la forme urbaine dans son développement historique, à partir des éléments la constituant²⁹ (le site d'implantation, le plan de la ville, le tracé des voies...).

Albert LEVY a défini la morphologie urbaine comme : « L'analyse de la dynamique de la forme urbaine, sa formation/ transformation, son mode d'évolution, ont été l'objet principal

²⁸ Panerai, Ph. et Langé, J. (2001). Formes urbaines, Tissus urbains, Essai de bibliographie raisonnée 1940-2000. Paris, France : Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction - DGUHC, *Centre de documentation de l'urbanisme*, 92 p.

²⁹ Panerai, Ph. Jean-Charles Depaule et Marcelle Dmorgon (1999), *Analyse Urbaine, Ed Parenthèses*, 196 p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

d'études de la morphologie urbaine, ou morphogénèse »³⁰. Donc, l'objet principal de la morphologie est de permettre la lecture de la ville en comprenant l'évolution de la forme urbaine. Cette dernière constitue un objet d'étude construit à partir d'une hypothèse de définition, d'une représentation et, d'un point de vue sur la forme.

La morphologie est donc l'étude des formes d'un tissu urbain. Par contre, la forme urbaine a été étudiée dans plusieurs disciplines, par les géographes, sociologues, architectes et urbanistes.

En croisant les différents points de vue, Albert LEVY a distingué cinq approches ou registres de la forme urbaine présentés ci-dessous: le paysage urbain, la forme sociale, la forme bioclimatique, la forme des tissus et tracés urbains. L'ensemble constitue une forme unitaire. Il a donné une référence à chacun de ces volets. Le paysage urbain a été défini par Kevin LYNCH, le tissu urbain par Philippe PANERAI et Julien LANGE, les tracés par Pierre LAVEDAN³¹ et la forme bioclimatique et microclimatique par Gisèle ESCOURROU³². Tous ces volets constituent des éléments pour l'analyse des formes urbaines.

Toutefois, le tissu urbain a été clairement défini par Philippe PANERAI ; il est constitué par la juxtaposition de la voirie, le découpage parcellaire et les constructions³³.

En ce qui concerne le paysage urbain, Kevin LYNCH considère la perception des habitants envers leur ville comme l'élément phare des éléments structurants de la ville (quartier, voies, repères, etc...)³⁴. Aussi, Saverio MURATORI³⁵ a développé la notion de forme urbaine pour décrire et analyser la ville dans son ouvrage « Etudes pour une histoire urbaine opérante de Venise ».

³⁰ Lévy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine, *Espaces et sociétés*, 122, 25-48. DOI : 10.3917/esp.122.0025.

³¹ Lavedan, P. (1959). Géographie des villes. *L'Information Géographique*, 24-3, *Gallimard*, pp. 134-135.

³² Escourrou, G. (1991). *Le climat et la ville*, Paris : *Nathan*. 190 p.

³³ Panerai, Ph. et Langé, J. (2001). *Formes urbaines, Tissus urbains, Essai de bibliographie raisonnée 1940-2000*. Paris, France : Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction - DGUHC, *Centre de documentation de l'urbanisme*, 92 p.

³⁴ Lynch, K. (1999). *L'image de la cité*. M-F. Vénard et J-L. Vénard, (trad.). Paris, France : *Dunond*, 221 p. (Ouvrage original publié en 1960 sous le titre *The image of the city*. Massachusetts, MA : *MIT Press*).

³⁵ Muratori, S. (1960). *Studi per una operante storia urbana di venezia*. Roma, Istituto poligrafico dello Stato, Libreria dello Stato, 112 p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

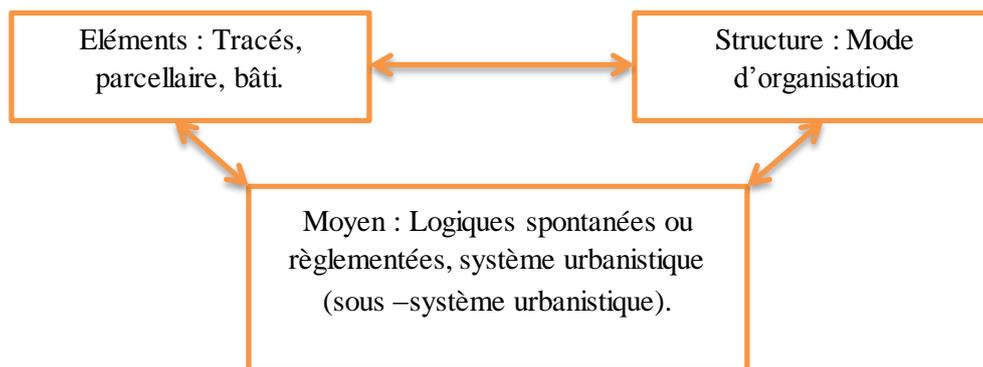


Figure 1 : Détail des éléments du système morphologique.

Source : Rémy ALLAIN³⁶, traité par l'auteur.

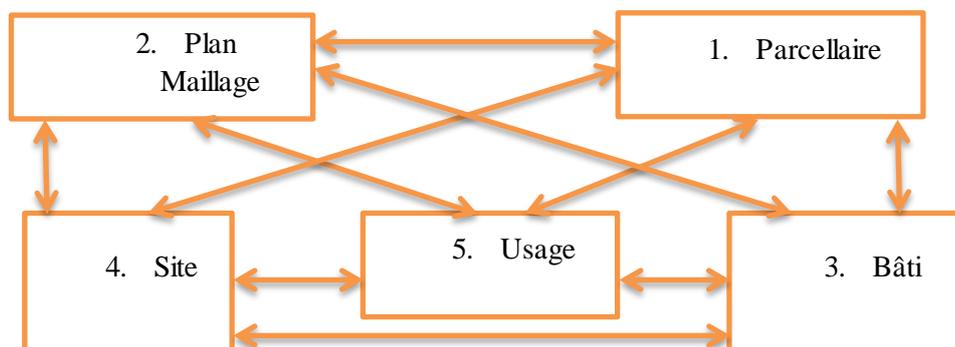


Figure 2: Le système morphologique.

Source : Ibid, traité par l'auteur.

Pour Luc ADOLPHE, la configuration urbaine de la ville est la résultante d'une interrelation très complexe entre plusieurs paramètres, tels que la situation géographique, la situation socio-économique, la géométrie, la typologie, la culture,...etc. Il affirme que la variation importante de la morphologie urbaine à l'échelle « microscopique » a un effet direct sur le climat extérieur et intérieur: la vitesse du vent, la température de l'air, l'échange du rayonnement solaire et la lumière naturelle. À l'échelle « macroscopique » cette variation influence les conditions du confort extérieur, modifie l'équilibre thermique et éclairage artificiel des bâtiments, amplifie l'effet d'îlot de chaleur urbain et le confinement de la pollution atmosphérique³⁷.

En parlant de 'morphologie urbaine', on signifie simplement la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que les espaces qu'ils créent. La raison principale de travailler avec cette façon de voir la forme urbaine est qu'elle permet aux concepteurs et planificateurs de comprendre les conséquences de choix stratégiques sans perdre les questions de détails

³⁶ Allain, R. (2004). Morphologie urbaine géographie, aménagement et architecture de la ville, *armano colin*, 257 p.

³⁷ Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183–200. doi:10.1068/b2631.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

architecturaux. La morphologie urbaine est d'importance primordiale pour le microclimat extérieur.

Pour décrire la morphologie urbaine, on utilisera une gamme de descripteurs de forme qui permettent de faire des liens avec les performances environnementales. Par exemple, on peut discuter de l'influence de la géométrie des bâtiments sur l'ensoleillement, le vent ou le bruit dans un espace ouvert. Le but n'est pas de décrire en détail la physique ou la complexité des phénomènes mais de définir des relations simplifiées.

Les formes urbaines sont toujours perçues de manière globale, indirecte et subjective par les habitants et les usagers de la ville. On ne peut pas opposer paysages et formes. L'analyse d'une rue relève des démarches morphologiques et paysagères. La dimension de la réalité perçue, où entre une bonne part de subjectivité, est essentielle au moment de la conception architecturale ou urbanistique de qualité.

D'après cet état de l'art, la forme urbaine se définirait pour nous, comme suit : « c'est l'évolution complexe et dynamique de la ville, déterminée par une société variable ».

Elle est la part physique et tridimensionnelle, déterminée par, le tracé et le tissu, le rapport entre le bâti et le vide et l'aspect avec lequel elle est perçue et pratiquée ».

2. Ecoles d'analyse de la forme urbaine :

La méthode d'analyse de la typo-morphologie a été fondée par Saverio MURATORI vers la fin des années 50, période de la reconstruction des villes européennes.

Face à la décadence du mouvement moderne, cette nouvelle vision trouve un écho, où le contexte urbain et historique prend place dans la composition urbaine.

Quelques années plus tard, un groupe se fonde sous le nom de La Tendenza soutenu par Carlo AYMONINO et Aldo ROSSI. Il défend la continuité, l'unité, la clarté, l'ordre et l'histoire du lieu par opposition à la ville moderne.

La méthode de la typo-morphologie se base donc sur le type caractérisé dans son tissu, où ce dernier est pris dans l'ensemble de la structure urbaine.

En ce qui concerne l'école française, l'approche typo morphologique a été initiée par Jean CASTEX et Philippe PANERAI. Le fonctionnalisme a été mis en examen par ces auteurs. Plusieurs villes ont été analysées ; Amsterdam, Venise et Rio de Janeiro.

Les courants typo-morphologiques italiens et français ont contribué à l'analyse de la forme urbaine. Ils ont donné de l'allure à l'urbanisme.

Nous allons nous situer dans un contexte spatio-temporel relatif à notre pays l'Algérie, où le modernisme a été importé vers les années 60, tout à fait exogène à notre territoire.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Avec le caractère pluridisciplinaire de la forme urbaine ; celle-ci a été étudiée dans la sociologie urbaine et la géographie urbaine aussi. Ces derniers ont renforcé son caractère cartographique, historique, contextuel et social.

3. Indicateurs de la morphologie urbaine :

Les problèmes liés au climat urbain sont complexes. Une modification des conditions microclimatiques est survenue ces dernières décennies à cause du développement urbain.

Les éléments révélateurs du milieu urbain, tels que sa géométrie et les activités humaines se déroulant au sein de l'espace interagissent avec les paramètres microclimatiques³⁸, causant des variations microclimatiques au sein de la canopée urbaine.

Il est nécessaire d'utiliser un certain nombre d'indicateurs de forme afin d'analyser la géométrie urbaine en fonction de ses performances environnementales, tels que l'effet du bâti dans les espaces extérieurs sur l'écoulement du vent, l'ensoleillement, l'éclairage et le bruit. Le calcul de ces descripteurs nous permettra d'expliquer la complexité des configurations spatiales à l'échelle microclimatique³⁹. Donc pour quantifier l'impact du microclimat de l'environnement bâti, une analyse des variables influençant le microclimat est nécessaire.

3.1. Les indicateurs morphologiques :

3.1.1. La compacité :

La ville durable préconise la compacité qui se porte en opposition à l'étalement urbain, pour une économie de ressources tel que le transport, le chauffage, la climatisation et l'économie d'espaces et de terres agricoles.

L'évaluation de l'indicateur de compacité dépend de la surface de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment qui est exposée aux effets climatiques extérieurs.

La caractérisation de cet indicateur nous renvoie à calculer la compacité nette et utile. Le premier se rapporte à la valeur de la surface de l'enveloppe constituée de façades verticales en contact avec l'extérieur rapportée au m² de plancher. Sa valeur est comprise entre 0,5 et 1,3.

$$C_{ut} = \sum_i^N \frac{A_{ext,i}}{S_{pl,i}}$$

– A_{ext} : la surface extérieure d'enveloppe non contiguë d'un bâtiment.

³⁸ Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76. doi:10.1016/s0378-7788(02)00081-6.

³⁹ Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465. doi:10.1016/1352-2310(95)00266-9.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

– N : le nombre des bâtiments du projet.

– S_{pl} : la surface de plancher.

Quant au coefficient de compacité nette⁴⁰, il est évalué par le rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contiguë du bâtiment, et son volume élevé à la puissance 2/3. Ce descripteur est compris entre 1 et 8.

$$C_f = \sum_i^N \frac{A_{ext,i}}{V_i^{\frac{2}{3}}}$$

– V : le volume du bâtiment.

Plus l'indicateur de compacité est faible plus le bâti est compact et les effets en contact avec l'extérieur seront moindres⁴¹.

3.1.2. La densité :

Le mode d'occupation des sites détermine le facteur de densité, allant des formes compactes jusqu'aux pavillonnaires. Cette variation fait ainsi émerger des espaces extérieurs qui s'organisent entre le bâti à dimension variable⁴².

La densité bâtie reste l'indicateur essentiel, lorsqu'elle est élevée, elle garantit un niveau de compacité et par induction elle permet de réduire significativement les consommations des villes.

- **La densité surfacique** : fait référence à l'implantation des bâtiments au sol en milieu urbain⁴³. Sa valeur correspond au rapport entre la surface totale du plancher et la surface totale du terrain, elle est bornée entre 0,1 et 0,8. Elle est calculée suivant la formule suivante :

$$D_s = \frac{\sum_i^N A_{p,i}}{A_s}$$

Avec :

– A_p : la surface de plancher du bâtiment i .

⁴⁰ J.P. Traisnel. (1986). Architecture, Climats, Energie. Outils et Démarches Pédagogiques. *Cahiers Scientifiques et Techniques COFEDES*, page 235.

⁴¹ Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183–200. doi:10.1068/b2631

⁴² Ait-ameur, K. (2002). Characterization of the microclimate in urban public spaces through the validation of a morpho-climatic indicator system, Design with the Environment, *Proceedings of PLEA (Passive Low Energy Architecture)*, p 129.

⁴³ M. Musy, N. Molines, T. Pham, D. Siret & D. Groleau. (2006). ADEQUA: aménagement durable d'un quartier, Elaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel. *Rapport final du CERMA*.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

– A_s : la surface totale du quartier étudié.

– N : le nombre des bâtiments au sol.

- **La densité volumique** : représente le volume construit rapporté au territoire. Elle est équivalente à une hauteur correspondant à la hauteur moyenne des constructions occupant tout le territoire. Elle s'écrit :

$$D_v = \frac{V_b}{A_s}$$

Avec :

– V_b : le volume cumulé des bâtiments (m^3)

– A_s : la surface totale du quartier étudié (m^2)

Ces deux indicateurs de densité prennent en considération l'occupation de constructions ainsi que de la volumétrie construite⁴⁴.

- **Définitions d'un indicateur controversé** :

La « densité » ne désigne qu'un rapport entre un indicateur statistique et une surface. Une infinité de variations est donc possible entre cet indicateur statistique (nombre de ménages, nombre d'actifs, nombre de logements, nombre de mètres carrés bâtis, nombre d'arbres, etc.) et cette surface (surface d'un pays, d'une ville, d'un quartier, d'un îlot urbain, d'un jardin, de l'emprise au sol d'un bâtiment, etc).

En urbanisme cependant, un nombre limité de densités est fréquemment utilisé, que l'on va désigner par densités urbaines. Il y a tout d'abord la densité de population, celle-ci désigne usuellement un nombre d'habitants par unité de surface au sol (généralement un quartier, une ville ou au-delà). Cela présente cependant l'inconvénient de ne pas rendre compte des portions de villes occupées par des bâtiments autres que résidentiels. Il arrive donc que l'on complète la densité de population avec la densité d'emplois ou d'entreprises⁴⁵. On peut alors calculer la densité d'activité humaine qui correspond à la somme de la densité de population et de la densité d'emploi.

Une grande partie de la littérature est également consacrée à la densité bâtie ou densité construite. Celle-ci désigne un rapport entre le coefficient d'emprise au sol (CES), c'est-à-dire le rapport entre l'emprise au sol totale des bâtiments et la surface de l'îlot sur lequel ils sont implantés, multiplié par le nombre moyen de niveaux.

⁴⁴ Ibid.

⁴⁵ Moulinié, C & Naudin-Adam, M. (2005). Appréhender la densité, *note rapide sur l'occupation du sol* n383.

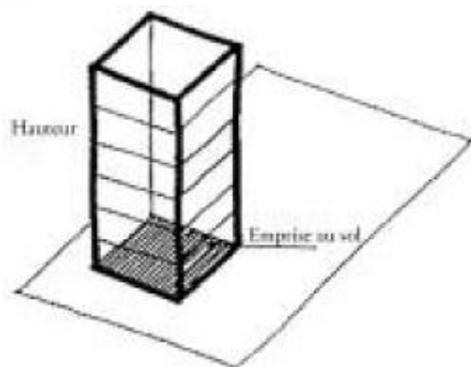


Figure 3: La densité bâtie.

Source : Claire MOULINIE & Muriel NAUDIN-ADAM⁴⁶.

Cette densité est très largement dépendante de l'échelle considérée⁴⁷ :

- A l'échelle du quartier, la densité permet de mesurer la relation entre espace privé et espace public. On parle alors de densité bâtie brute (voir Figure 4).
- A l'échelle de l'îlot, le périmètre est limité par l'espace public, la densité caractérise donc plus la morphologie urbaine. On parle alors de densité bâtie nette (voir Figure 4).
- A l'échelle de la parcelle, on parle de coefficient d'occupation du sol (COS). Cet indicateur est celui des règlements d'urbanismes. Il est notamment utilisé dans les plans d'occupation du sol d'urbanisme pour définir un «droit à bâtir» maximal sur une parcelle.

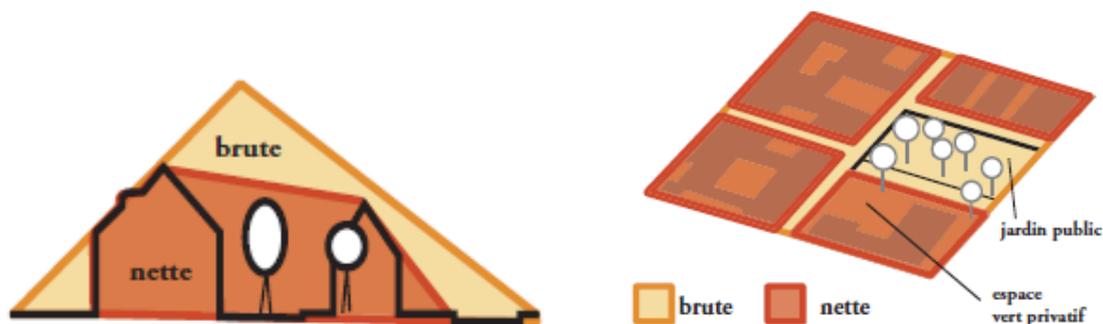


Figure 4: Assiette de calcul des densités brute et nette.

Source : Claire MOULINIE & Muriel NAUDIN-ADAM⁴⁸.

Cependant, les densités que nous venons de définir ne sont pas suffisantes pour décrire un tissu urbain. En effet, il est possible de rencontrer des formes urbaines très différentes avec des densités bâties ou de population identiques (voir Figure 5).

⁴⁶ Ibid.

⁴⁷ Ibid.

⁴⁸ Ibid.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

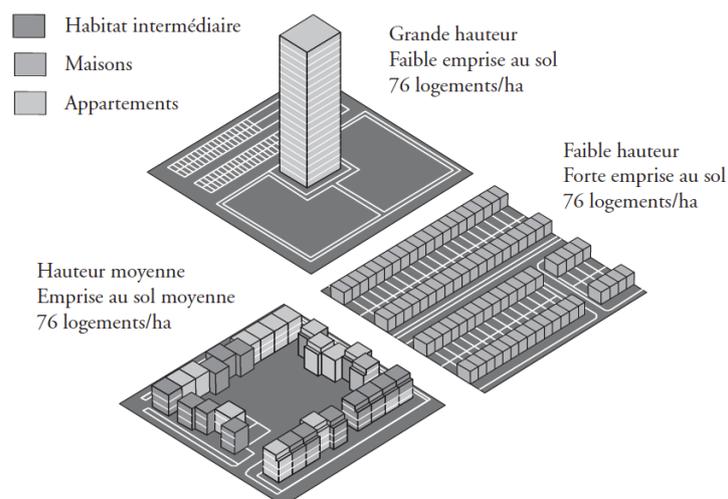


Figure 5: Différentes formes urbaines pour une même densité bâtie.

Source : Claire MOULINIE & Muriel NAUDIN-ADAM⁴⁹.

Il est donc nécessaire d'ajouter au moins un indicateur de densité : le coefficient d'emprise au sol (CES). Celui-ci se définit comme le rapport entre l'emprise au sol des bâtiments et une unité de surface au sol. Comme pour les mesures de densité, le CES n'exprime pas la même chose selon l'échelle considérée.

Bien évidemment, la combinaison de la densité bâtie et du coefficient d'emprise au sol pour une surface de référence permet d'estimer le nombre de niveaux d'un bâtiment (et éventuellement sa hauteur si on connaît la hauteur entre étages). C'est donc une description plus fine de la forme urbaine que la densité bâtie seule.

□ Évolutions des densités :

La structure de la ville et la manière dont les densités s'y répartissent vont avoir un impact sur l'énergétique urbaine. Cette structure urbaine s'explique principalement par l'histoire de la ville considérée.

D'après Serge SALAT, la majorité des villes du monde partagent une caractéristique commune qui est un centre ancien dense. Ce centre s'est constitué et densifié au fil du temps ; par conséquent, il est souvent adapté au climat et aux usages locaux⁵⁰. En effet, il est le résultat d'une architecture vernaculaire, l'aboutissement des expérimentations d'une population au fil des générations⁵¹. Notons que dans la perspective d'un changement climatique beaucoup plus rapide que les évolutions précédentes du climat terrestre, ces centres anciens ne seront plus forcément adaptés à leurs environnements climatiques.

⁴⁹ Ibid.

⁵⁰ Serge, S. (2011). La ville et les formes sur l'urbanisme durable, *ed Hermann & CSTB*, 543 p.

⁵¹ Hassan, F. (1986). Natural energy and vernacular architecture: principles and examples with reference to hot arid climates, *University of Chicago Press*, Chicago, IL, 172 p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Les centres anciens ont évolué sous l'influence des préoccupations coloniales, et sont apparus des tissus urbains plus réguliers avec des réajustements de la forme urbaine, tel que l'alignement des rues mais ils restent toujours denses.

Avec la crise du logement, l'économie s'est remis peu à peu à l'industrialisation du secteur de la construction qui a permis de produire de l'habitat en masse en préconisant la libération des sols. C'est le cas des ZHUN sous forme de barres d'immeuble d'habitation destinées à accueillir en périphérie une grande quantité de population. Elles sont également très critiquées au regard de leur piètres performances énergétiques, principalement dûes au manque d'isolation⁵².

Actuellement nos villes sont touchées par le phénomène de périurbanisation. Il s'agit avant tout d'une croissance de population organisée autour des villes en formes urbaines peu denses (petit collectif ou maisons individuelles). Cette périurbanisation n'a pas la même structure. Elle peut se faire de manière diffuse ou structurée en pôles (polycentrisme) ou le long des axes de transports (structure en doigt de gant). La structure que pourra prendre une ville aura un impact sur l'énergétique urbaine en particulier sur l'îlot de chaleur urbain et sur les consommations énergétiques liées aux transports.

En ce qui concerne le bâti et sa densité, on a assisté au fil du temps à une diminution des densités construites. Il est donc légitime de se demander si la tendance peut être inversée aujourd'hui pour des préoccupations d'énergétique urbaine. Serge SALAT s'est aperçu également que les tissus urbains ont perdu de leur complexité au fil du temps. D'après le chercheur, cette simplification morphologique s'accompagne d'une détérioration des performances énergétiques de la ville⁵³.

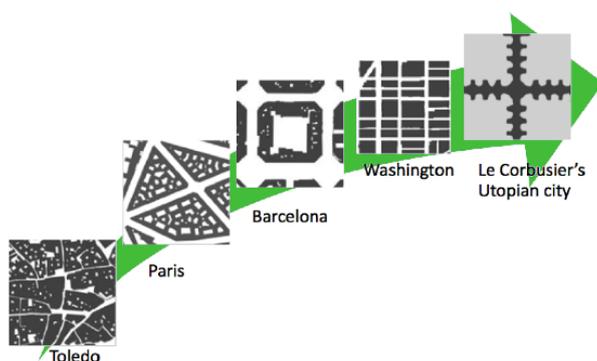


Figure 6: Simplification des formes urbaines au cours du temps.

Source : Serge SALAT.

⁵² Arantes, L, Rollet, P, Bavarel, O & Quenard, D. (2010), For A Rationalized Refurbishment Of The 1960s-70s Towers: The Core-Skin-Shell Concept, *WIT Transactions on Ecology and the Environment, Conference: The Sustainable World*.

⁵³ Salat, S. (2011). Les villes et les formes sur l'urbanisme durable, *ed Hermann & CSTB*, 543 p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

□ La densité perçue :

« La densité ressentie, notion toute relative qui, lorsqu'elle est à priori assimilée à l'idée de concentration ou de promiscuité, piège nombre des débats d'urbanisme actuels ».

L'acceptation de la densité tient en grande partie à la « densité perçue », qui ne découle pas d'une réalité physique ou mesurée mais se base sur la subjectivité des usagers.

Vincent FOUCHIER distingue la « densité perçue sociale », faisant référence à la présence d'un grand nombre de personnes dans un espace, et la « densité perçue non sociale » renvoyant à la perception du cadre de vie sans tenir compte de la présence humaine (la perception de la densité bâtie pouvant, par exemple, paraître forte si les bâtiments sont très rapprochés)⁵⁴.

Il est nécessaire de rappeler que la densité perçue est différente de la densité réelle. La densité perçue intègre des critères qualitatifs, notamment la présence d'espaces verts et les façades des bâtiments.

D'après des études précédentes, il apparaît que les quartiers traditionnels sont appréciés, tandis que les quartiers plus récents formés de tours sont jugés désagréables, alors que leur densité est plus faible. De même, les habitants des quartiers traditionnels ont une appréciation plus positive de la densité sociale, qui peut s'expliquer par une certaine animation de quartier liée à la présence de commerces et lieux de convivialité. On comprend donc que la sociabilité de quartier tient un rôle prédominant dans le ressenti de la densité.

Ainsi, il apparaît que la densité n'est qu'un élément de l'appréhension de l'espace urbain et que l'idée de « faible » ou « forte » densité est à relativiser.

□ La densité végétale :

La densité végétale relie la répartition horizontale des aménagements verts avec la surface totale d'un tissu urbain⁵⁵. Cet indicateur a une incidence sur le bilan des températures et sur celui des humidités relatives de l'air.

L'évaluation de cet indice peut être obtenue en combinant l'analyse d'images satellites à travers une sélection par plages de couleurs (la couleur verte dans le cas de la densité végétale) en résolvant l'équation suivante :

$$D_v = \frac{D_v}{A_e}$$

⁵⁴ Fouchier, V. (1997), Des fortes densités urbaines : les villes nouvelles dans l'espace métropolitain, thèse de doctorat en urbanisme, Paris, France.

⁵⁵ Ouamer, A. F. (2007). Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : Étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec, maîtrise en science de l'architecture, École d'architecture faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels, Université Laval, Québec, p 47.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

- A_v : surface totale de l'aménagement vert.
- A_e : surface totale du périmètre de calcul.

3.1.3. La rugosité urbaine :

La ville avec tous ses éléments offre une résistance au vent. La vitesse de celui-ci se voit altérée par les forces de frottement en contact avec les aires urbaines ; ce facteur est connu en tant que rugosité. La vitesse du vent, la hauteur et la densité du bâti déterminent la longueur (m) de rugosité (Z_0)⁵⁶.

La rugosité du tissu urbain est caractérisée par la hauteur moyenne de la canopée urbaine, constituée par les surfaces bâties, les surfaces végétales verticales et horizontales, et les surfaces non bâties⁵⁷. Elle peut être assimilée à une densité verticale car l'élément déterminant est la hauteur du bâti.

L'intensité des forces de friction due à l'exposition au vent est variable selon la rugosité du tissu⁵⁸. Plus la densité du bâti est importante, plus les forces le sont également. C'est-à-dire que les espaces très clos sont souvent privés du renouvellement d'air.

Par contre dans des tissus urbains à faible densité du bâti, les espaces libres sont fortement présents et une masse d'air plus importante parvient à y pénétrer.

L'évaluation de cet indicateur morphologique se base sur la variabilité de la hauteur de la canopée urbaine qui est relative à chaque typologie de tissu urbain.

A travers une coupe longitudinale d'un périmètre de calcul, la rugosité urbaine exprime le rapport entre la surface totale bâtie et la surface de la canopée urbaine.

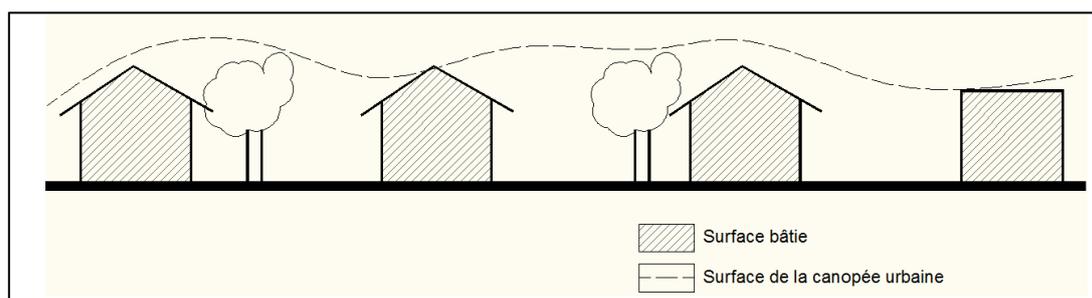


Figure 7: Exemple de calcul de la rugosité urbaine. *Etabli par l'auteur.*

⁵⁶ Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), 233–245. doi: 10.1007/bf00116120.

⁵⁷ Adolphe L. (2001). Modeling the link between built environment and urban climate: towards simplified indicators of the city environment, Building Simulation, *Proceedings of IBPSA (International Building Performance Simulation Association)*, pp. 679- 684.

⁵⁸ Ait-ameur, K (2002). Characterization of the microclimate in urban public spaces through the validation of a morpho-climatic indicator system, Design with the Environment, *Proceedings of PLEA (Passive Low Energy Architecture)*, pp. 305-311.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Le calcul de la rugosité urbaine est donné par la formule suivante⁵⁹ :

$$R_u = \frac{S_b}{S_{c.u}}$$

- R_u : Rugosité urbaine.
- S_b : Surface bâtie.
- $S_{c.u}$: Surface de la canopée urbaine.

Un système pour la classification des paysages selon la rugosité a été développé dans le tableau suivant⁶⁰ :

Catégorie	Z0 (m)	Description
1 : la mer	0,0002	Espaces ouverts, tel que la mer ou un lac sans prendre en compte la taille des vagues. Marée à plat ; plaine couverte de neige, monotone déserte, macadam et béton, avec plusieurs kilomètres libres.
2 : Lisse	0,005	Paysage monotone sans obstacle et végétation négligeable.
3 : ouvert	0,03	Région avec végétation basse type herbe et d'obstacles isolés avec un écart d'au moins la hauteur de 50 unités obstacles* comme les pistes des aéroports par exemple.
4 : à peu près rugueux	0,10	Zones de culture avec plantes basses ; région à peu près ouverte avec des obstacles occasionnels à distance horizontale relative d'au moins la hauteur de 20 unités obstacles.
5 : rugueux	0,25	Zones de culture avec plantes de hauteurs diverses et obstacles étalés à une distance relative entre 12 et 15 unités obstacles pour des objets poreux (barrières) ou 8 à 12 pour des objets solides (bâtiments)
6 : très rugueux	0,5	Paysage de culture intensive avec de grands obstacles séparés par des espaces ouverts d'environ 8 unités obstacles. Il peut s'agir de surface avec des bâtiments de basse hauteur à inter-espaces de 3 à 7 niveaux de hauteur sans arbres hauts.
7 : frôlement (skimming)	1,0	Paysage composé par de grands obstacles de taille similaire, avec des espaces ouverts du même ordre de grandeur que la hauteur des obstacles. Par exemple, les zones de haute densité bâtie sans beaucoup de variation de la hauteur des bâtiments.
8 : chaotique	≥ 2	Centre-ville avec bâtiments de basse hauteur et bâtiments de grande hauteur.

Tableau 1: Classification de la rugosité du terrain.

Source : A DAVENPORT et al.⁶¹.

⁵⁹ Adolphe L., Chatelet A., Maïzia M., Levy A., Casal A., Boussoualim A., & Ait-ameur K., (2002). SAGAcCités : Systèmes d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines, *Rapport final. MENRT*, Action Concertée Incitative Ville.

⁶⁰ Davenport, A., Grimmond, G., Oke, T. et Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Dans Preprints, 12th Conf. on Applied Climatology*, Asheville, NC, American Meteorology Society, 96–99.

⁶¹ Ibid.

3.1.4. La porosité urbaine :

La porosité urbaine fait référence au volume total d'air des creux urbains et leurs rapports avec le volume de la canopée urbaine. Elle est évaluée en pourcentage et peut varier selon la nature du tissu urbain. Ces creux peuvent être publics tels que les rues, les places, ou privés comme les cours, les jardins distribués à l'intérieur des parcelles du bâti.

Les centres historiques peuvent être caractérisés par une très faible porosité, inférieure à 10%, alors que les quartiers urbains coloniaux et ceux qui sont récents ont une porosité élevée, supérieure à 35%.

Il existe une interaction entre cet indicateur et le vent, car il conditionne sa pénétration dans le tissu. Il est caractérisé par une variation de sa trajectoire et de sa vitesse. Le vent peut s'accélérer dans le canyon urbain ou s'interrompre, par des mouvements tourbillonnaires en contact d'obstacles urbains. A travers ces creux, le captage du rayonnement solaire pénètre et varie selon le type de configurations.

D'après Luc ADOLPHE, la porosité est calculée avec l'équation :

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

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 .

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

$$r_{h,i} = \frac{h * l}{h + l}$$

- h : La hauteur de la canopée dans la rue considérée (hauteur moyenne des bâtiments qui la bordent).
- l : La largeur moyenne de la rue.

3.1.5. La minéralisation :

La minéralisation des milieux urbanisés est la principale source d'îlots de chaleur.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

L'indicateur de minéralisation fait allusion à l'aménagement des espaces minéraux et végétaux dans le tissu urbain. Il s'agit du rapport de la surface non affectée aux espaces d'eau ou aux espaces verts, à la surface totale.

Cet indice morphologique nous permet d'étudier l'impact de la végétation et de la minéralisation sur les conditions microclimatiques, combiné avec les autres indicateurs morphologiques, il donne les caractéristiques internes du tissu urbain⁶². La minéralisation est calculée selon la formule suivante :

$$M = \frac{S_t - (S_v + S_e)}{S_t}$$

Avec :

- S_t : La surface totale du quartier étudié
- S_v : La surface affectée aux espaces verts
- S_e : La surface affectée aux espaces d'eau

Son ordre de grandeur varie selon la nature des quartiers, ceux situés au centre-ville peuvent atteindre un indice de minéralisation de 100%, contrairement à ceux de la périphérie, qui ont un indice réduit de 30%.

3.2. Les indicateurs géométriques :

Le facteur de vue du ciel (FVC)⁶³ et le rapport d'aspect du canyon⁶⁴ sont également des facteurs géométriques importants affectant les microclimats urbains⁶⁵.

⁶² Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183–200. doi:10.1068/b2631.

⁶³ Yan, H., Fan, S., Guo, C., Wu, F., Zhang, N., & Dong, L. (2014). Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: The case of Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 44–53. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.007.

⁶⁴ Giannopoulou, K., Livada, I., Santamouris, M., Saliari, M., Assimakopoulos, M., & Caouris, Y. G. (2011). On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society*, 1(1), 16–28. doi:10.1016/j.scs.2010.08.003.

⁶⁵ Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L., & Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*, 101, 85–101. doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026.

3.2.1. Le facteur de vue du ciel :

Dans les zones urbaines, la couverture des surfaces joue un rôle important dans la restriction de la perte de chaleur radiative⁶⁶. Cela contribue à des variations de température au-dessous du toit.

Le FVC est le paramètre le plus approprié décrivant la géométrie urbaine.

En outre, le facteur de vue de ciel est défini comme le rapport du rayonnement reçu par une surface plane et le rayonnement émis. Par conséquent c'est une mesure sans dimension comprise entre 0 et 1. D'après Wei RUIHAN, Il y a une forte relation de régression de mesures de facteur de vue de ciel et d'îlot de chaleur urbain.

L'angle solide sous lequel le ciel est vu d'un certain point est exprimé par le facteur de vue de ciel⁶⁷. C'est une valeur sans dimensions, elle varie de 0 à 1, en fonction de dimensions urbaines (hauteur de constructions, distance entre les façades) et des obstructions (arbres).

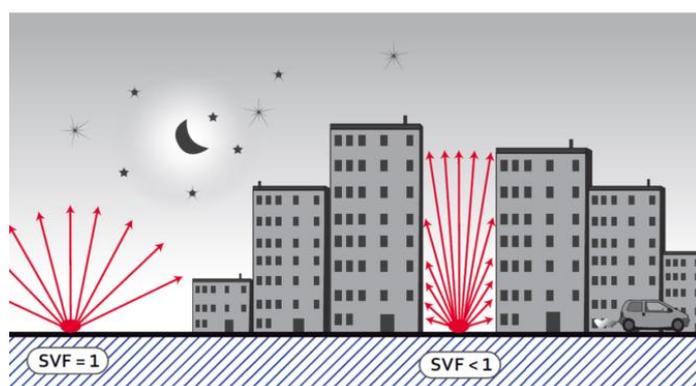


Figure 8: Variation du facteur de vue de ciel.

Source : Atelier parisien d'urbanisme⁶⁸.

Le Facteur de vue de vue de ciel est, dans ce sens, une mesure de l'ouverture du ciel, il détermine les échanges radiatifs entre le ciel et la structure physique de la ville. La valeur de 0 signifie que la vue du ciel est totalement obstruée et une valeur de 1 signifie que la vue du ciel est dépourvue de toute obstruction (bâtiment, arbre, mobilier urbain, ...etc.)⁶⁹.

⁶⁶ Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142–149. doi:10.1016/j.proeng.2016.10.017.

⁶⁷ Svensson, M. K. (2004). Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, 11(3), 201–211. doi: 10.1017/s1350482704001288.

⁶⁸ Atelier parisien d'urbanisme, APUR, Ateliers Parisien d'Urbanisme – Cahier 1 : Les îlots de chaleur urbain à Paris, Décembre 2012.

⁶⁹ Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6.

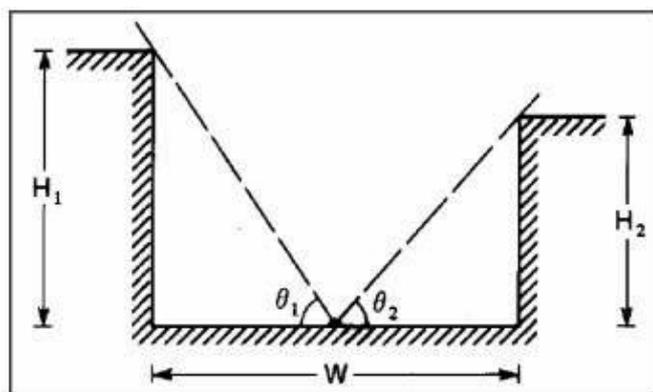


Figure 9: Représentation du facteur de vue du ciel dans une rue canyon asymétrique.

Source : Time OKE⁷⁰.

L'évaluation numérique de cet indicateur se fait par des prises de photos à l'axe zénithal avec projection sur terrain sphérique curviligne stéréoscopique⁷¹.

En utilisant un appareil photo numérique avec adaptateur fish-eye, les images peuvent être produites⁷². Ces données graphiques des aménagements urbains de l'espace sont obtenues par ce procédé, en fournissant une couverture de 180 degrés de la scène.



Figure 10: Procédé de photographie fish-eye, A droite) appareil photo numérique fish-eye. A gauche) photo prise par l'appareil photo d'un site en Italie.

Source : <https://www.ridble.com/obiettivo-macchina-fotografica/>

Pour calculer cet indice, le logiciel Adobe Photoshop nous permet de traiter les images en utilisant la technique de captage de pixels qui consiste à quantifier en pixels la surface d'une zone. D'où, on aura :

⁷⁰ Ibid.

⁷¹ Ouamer, A. F. (2007). Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics, étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec, mémoire de maîtrise de science en Architecture, université de Laval, p 55.

⁷² Grimmond, C. S. B., Potter, S. K., Zutter, H. N., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, 21(7), 903–913. doi:10.1002/joc.659.

$$\varphi_{ciel} = \frac{\text{Nombre}_{pixel \text{ du ciel}}}{\text{Nombre}_{pixel \text{ du disque}}}$$

FVC= 0.255	FVC= 0.307	FVC= 0.472	FVC= 0.572	FVC= 0.611

Tableau 2: Photos de l'environnement construit, fisheye dans quelques points de la ville de Bijing, Pékin.

Source: Xiaodong HE et al⁷³.

3.2.2. Le ratio H/L :

Un des éléments structurels d'une entité urbaine est le profil des rues. Ce dernier est décrit par le ratio H/L, c'est le rapport de la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue à sa largeur.

⁷³ He, X., Miao, S., Shen, S., Li, J., Zhang, B., Zhang, Z., & Chen, X. (2014). Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 59(3), 285–297. doi:10.1007/s00484-014-0841-5.

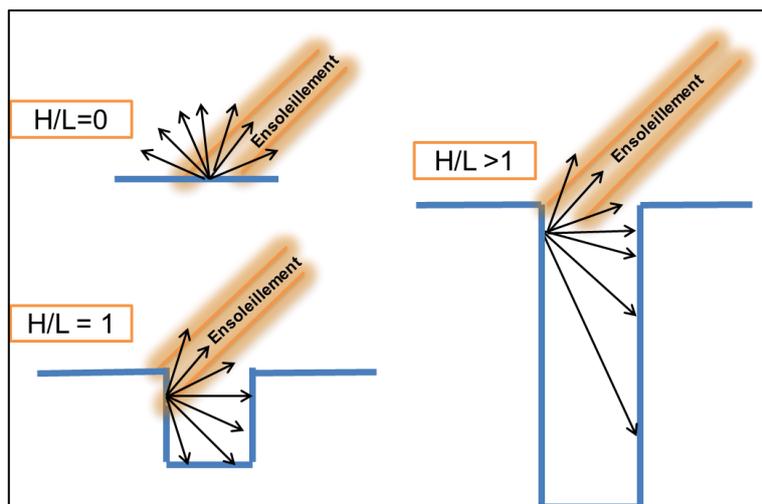


Figure 11: Distribution schématique du rayonnement solaire incident dans différents scénarios de ratio H/L.

Source : Baruch GIVONI⁷⁴, traité par l'auteur.

Dans le cas des espaces de forme polygonale, la plus petite largeur entre le bâti doit être considérée pour quantifier les surfaces susceptibles de recevoir des échanges énergétiques⁷⁵.

De ce fait, le ratio H/L conditionne l'effet d'ensoleillement, de lumière, d'ombrage et pouvant modifier l'écoulement du vent.

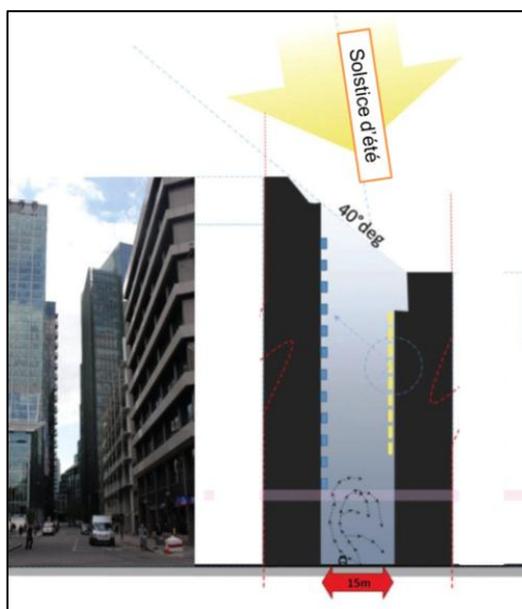


Figure 12: La lumière du soleil limitée pénètre dans les canyons des bâtiments sur la rue chiswell.

Source: Julie FUTCHER et al⁷⁶.

⁷⁴ Givoni, B (1998). Climate considerations in building and urban design, *John Wiley & Sons*, New York., p. 248.

⁷⁵ Futcher, J., Mills, G., Emmanuel, R., & Korolija, I. (2017). Creating sustainable cities one building at a time: Towards an integrated urban design framework. *Cities*, 66, 63–71. doi:10.1016/j.cities.2017.03.009.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Le ratio H/L peut ainsi être obtenu à partir de l'équation suivante :

$$\frac{H}{L} = \frac{H_m}{L_p}$$

– H = hauteur moyenne de l'espace ;

– $H_m = \sum \frac{H}{n}$, (n : nombre de bâtiments);

– L_p = la plus petite largeur de l'espace.

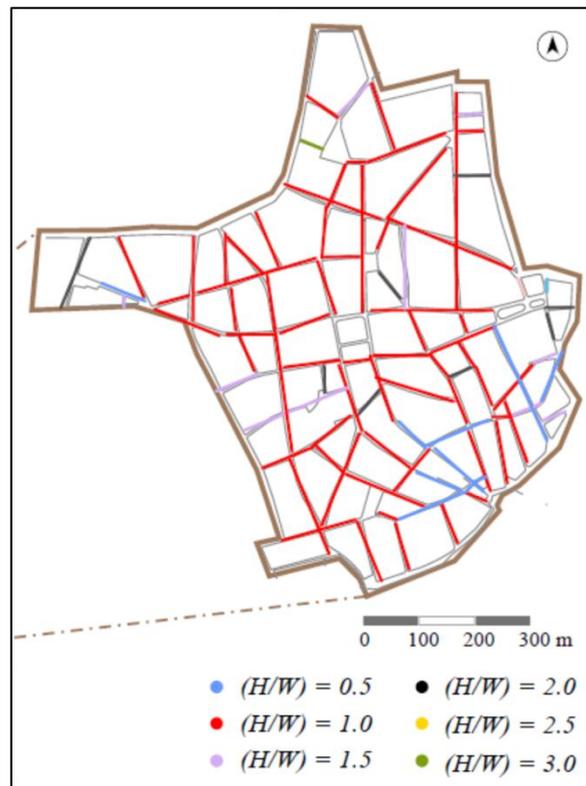


Figure 13: Exemple de ratio du centre urbain historique de Camagüey-Cuba.

Source: José Abel RODRIGUEZ ALGECIRAS⁷⁷.

⁷⁶ Ibid.

⁷⁷ Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L., & Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*, 101, 85–101. doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

3.3. Les indicateurs physiques :

3.3.1. L'albédo moyen des surfaces :

Parmi les paramètres physiques qui influencent sur l'apport de chaleur en milieu urbain figure l'albédo qui dépend des types de matériaux urbains. Ces derniers reçoivent, diffusent et émettent le rayonnement solaire vers le ciel.

Les différentes valeurs d'albédo sont présentées dans le tableau suivant :

Surface	Albédo	Surface	Albédo
Rue		Peintures	
Asphalte (frais- vieilli)	0.05-0.2	Blanc, blanchiment	0.50-0.90
Murs		Rouge, marron, vert	0.20-0.35
Béton	0.10-0.35	Noir	0.02-0.15
Brique/pierre	0.20-0.40	Zone urbaine	
Pierre blanchie à la chaux	0.80	Gamme	0.10-0.27
Marbre blanc	0.55	Moyenne	0.15
Brique de couleur claire	0.30-0.50	Autre	
Brique rouge	0.20-0.30	Sable coloré	0.40-0.60
Brique foncée et ardoise	0.20	Herbe sèche	0.30
Calcaire	0.30-0.45	Sol moyen	0.30
Les toits		Sable sec	0.20-0.30
Asphalte de surface lisse (résistant aux intempéries)	0.07	Plantes à feuilles caduques	0.20-0.30
Asphalte	0.10-0.15	Forêts à feuilles caduques	0.15-0.20
Goudron et gravier	0.08-0.18	Sol cultivé	0.20
Tuile	0.10-0.35	Sable humide	0.10-0.20
Ardoise	0.10	Forêts de conifères	0.10-0.15
Chaume	0.15-0.20	Bois de chêne	0.10
Tôle ondulée	0.10-0.16	Sol cultivé sombre	0.07-0.10
Toit hautement réfléchissant après intempéries	0.60-0.70	Gazon artificiel	0.05-0.10
		Herbe et paillis	0.05

Tableau 3: Valeurs d'albédo de différents matériaux urbains.

Source : Khaled Athamena⁷⁸.

⁷⁸ Athamena, K. (2012). Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers, thèse de doctorat, Architecture, Ecole Centrale de Nantes, p 104.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Afin d'évaluer la valeur d'Albédo moyen des surfaces à l'échelle des espaces extérieurs, une observation des relevés photographiques nous permet d'évaluer visuellement le pourcentage d'occupation des matériaux sur les façades et sur le sol.

La combinaison du pourcentage des valeurs d'albédo de chaque matériau nous donne la valeur moyenne des surfaces.

Elle est donnée par la relation suivante⁷⁹ :

$$\alpha = A_n \times P_n$$

– α la valeur d'Albédo moyen des surfaces

– A_n les albédos de chaque matériau

– P_n représente la fraction d'occupation de chaque matériau

3.3.2. La durée d'ensoleillement :

Cet indicateur est relatif à l'énergie solaire atteignant la surface du sol. Les surfaces verticales des bâtiments et le feuillage des arbres peuvent faire obstacle en empêchant que les rayons solaires arrivent, en créant de l'ombre.

« La durée d'ensoleillement désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe (bâtiment, quartier par exemple) est soumis à insolation au cours d'une période donnée. Elle dépend de la latitude du quartier, de son environnement masque et de la nébulosité du ciel. La durée d'ensoleillement d'un quartier 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 risques d'inconfort »⁸⁰.

La valeur de cet indicateur est exprimée en minutes pour une date et heure donnée d'un point fixe. Les points qui représentent une grande valeur d'exposition au soleil sont inconfortables pour l'implantation des espaces publics extérieurs⁸¹.

⁷⁹ Ibid.

⁸⁰ Athamena, K. (2012). Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers, thèse de doctorat, Architecture, Ecole Centrale de Nantes, p 208.

⁸¹ Musy, M, Molines, N, Pham, T, D, Siret, D & Groleau, D. (2006). Adequa: aménagement durable d'un quartier: élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel, rapport final du CERMA, Université de Nantes.

4. Contexte historique des transformations urbaines modifiant le microclimat :

Nous proposons dans ce qui suit, de présenter les interventions sur des éléments spécifiques de la forme urbaine qui ont conduit lors de certaines périodes de l'histoire à réguler le microclimat urbain. Car cette intention de modification du microclimat ne se limite pas seulement à notre époque. Nous essayons de mettre en exergue les savoir-faire qui ont mis en relation, dans l'histoire des villes, l'intention microclimatique et l'intervention sur le cadre bâti.

Cette nouvelle discipline liée à la climatologie urbaine dont l'objectif était la régulation des éléments climatiques en général semble être désuet pour différents motifs. Le premier, le climat reste une donnée permanente dans tout acte de bâtir, et le second, à travers l'histoire, il y avait une intention explicite pour contrôler les propriétés physiques de l'atmosphère dans les espaces urbains dans les anciennes villes malsaines.

Nous essayons de reprendre l'essentiel des transformations urbaines salubristes dans le monde qui ont contribué à réguler l'air, l'humidité, le soleil, la lumière et la pollution dans les espaces urbains.

Dans le but de retracer l'histoire des interventions urbaines, à savoir, intervention sur le bâti, sur les vides urbains ou sur les matériaux de surface, nous allons présenter des savoir-faire liées à des contextes historiques différents.

Les éléments suivants vont être abordés:

- La prise de conscience salubriste face aux villes anciennes munies de remparts ou le rejet des matières diverses produisait un microclimat malsain à l'intérieur de ces villes. Ces problèmes n'ont vu une solution qu'avec la suite d'un contexte militaire scientifique, et économique nouveau qui va conduire à la prise de conscience d'une possibilité d'intervention sur le microclimat malsain des villes.
- L'action salubriste s'est faite ressentie graduellement grâce à des transformations, des ajustements de la forme urbaine existante. On peut aussi la dénommer par, acte interventionniste. Comme cela sera le cas pour Tlemcen, où ces ajustements ont répondu principalement à des fins militaires effectuées par le génie militaire français.
- L'époque moderne a été influencée par des utopies urbaines et a proposé une nouvelle forme urbaine opposée à celle de la ville ancienne, construites en dehors des villes pour des raisons d'hygiène.
- De nouveaux enjeux de développement durable ont influencé la croissance et la transformation urbaine afin de contrôler l'étalement des villes dans la période

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

contemporaine. En plus de la notion d'hygiène, la prise de conscience environnementale prend une grande ampleur dans les questions relatives aux structures urbaines existantes ou nouvelles.

Nous étayons notre recherche par des écrits d'historiens qui nous dévoilent des témoignages sur le microclimat urbain dans la ville à travers l'histoire. De ce fait, les interventions salubristes sur les villes anciennes étaient relatives aux percements, alignement, et pavage des rues.... Par l'avènement du mouvement moderne, de nouvelles réalisations ont été construites par le principe de zonage fonctionnel en béton armé. Enfin, l'aspect environnemental a mis en place plusieurs débats et questions que nous essayons de présenter.

En effet, ces transformations urbaines directes ou indirectes ont eu un impact sur la régulation du microclimat à des échelles d'intervention différentes.

4.1. Ajustement entre variations spatiales et air insalubre :

Des changements d'occupation de l'espace avaient lieu à l'intérieur des anciennes villes « intra-muros » pour différentes raisons. La recherche de la sécurité ou l'économie a conduit les anciennes villes à se replier sur elles-mêmes dans une atmosphère parfois morbide ou l'air stagne.

Donc, un passage de cette situation vers la recherche d'un microclimat sain a été opéré avec l'adaptation aux variations spatiales avant de modifier la forme urbaine.

Les anciennes villes entourées par de remparts pour une exigence militaire de protection en cas de guerre créaient un microclimat à forte humidité. L'économie de ces villes reposait sur des productions artisanales. A cet effet, ce microclimat humide et statique était bénéfique pour ces productions. Tlemcen, ville aux vergers, par la présence abondante d'eau et d'arbres pendant la période précoloniale est caractérisée par un site marécageux.

Cependant, la qualité sanitaire de l'air n'était pas recherchée jusqu'au 18^{ème} siècle dans le monde⁸². Les ruelles étroites emmagasinaient l'humidité excessive. Cela était un signe de sécurité « militaire » et richesse « économique »⁸³.

⁸² Guillaume, A. (1990). Les temps de l'eau : la cité, l'eau et les techniques, *coll. Milieux*, Champ vallon, Macon, 263p.

⁸³ Mohamed Benzerzour. Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique", thèse de doctorat. Histoire. Université de Nantes, 2004. Français. <tel-00428536>, p 32.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

4.1.1. Distribution spatiale face à l'air malsain :

Selon quelques témoignages, il existait tout de même des rues et quartiers salubres par rapport à d'autres. Par ailleurs, les répartitions des fonctions urbaines et sociales dans l'espace dépendaient de la qualité sanitaire de l'air. Les quartiers aisés et religieux occupaient les endroits les plus éloignés des sources malsaines (oued, topographie plus basse et ombragée...). Soit, le plus souvent, les étages éloignés du rez-de-chaussée et les zones de haute altitude des villes.

Alors l'attribution du foncier prévalu l'économique sur le sanitaire. Actuellement, ces rues polluées par la circulation automobile par exemple sont les moins cotées sur le marché immobilier.

Les villes arabo-musulmanes du 18^{ème} siècle se caractérisaient par une trame convergente radioconcentrique où l'espace religieux et commercial prend le noyau central et haut. Les quartiers sont agencés par des ruelles étroites et impasses sous une structure arborescente. L'intervention du génie militaire français sur ces quartiers a donné naissance à une nouvelle forme urbaine où on aperçoit une juxtaposition du tissu ancien percé par de rues larges, plantées d'arbres et de bâtiments hauts et de places.

Les européens occupaient ces zones aérées, éclairées et saines. Les tlemcénien habitaient les endroits denses, sombres ou l'activité artisanale régnait.

En absence d'outils permettant d'agir sur les paramètres microclimatiques, la seule solution était donc de s'y adapter passivement dans un contexte militaire et économique.

4.1.2. Vers une prise de conscience interventionniste :

Une nouvelle mentalité tend à se construire, basée sur la minéralisation des surfaces des villes et l'enterrement des réseaux d'évacuation des eaux⁸⁴. L'air devient peu à peu sain, propre et moins humide.

En effet, le rejet de divers matériaux et matières dans les rues causaient des maladies par le fait de leurs décompositions vers des matières organiques dans l'air. La nécessité du pavage des rues s'avère nécessaire pour des conditions sanitaires.

Au terme de cette partie, nous avons mis en évidence les changements importants qui ont conduit vers une prise de conscience interventionniste. Au départ, les habitants des villes intra-muros se confinaient dans une atmosphère, sombre, humide et malsaine ; face aux riches qui occupaient les espaces moins pollués.

Pour des causes militaires et économiques, la régulation du microclimat est devenue possible.

⁸⁴ Ibid, p 35.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

4.2. Intervention salubriste sur la morphologie urbaine :

Pour un intérêt de salubrité, une modification importante du microclimat urbain a été générée par des interventions sur la morphologie urbaine des villes médiévales⁸⁵.

Cependant, ces ajustements ont causé des améliorations sur le microclimat par la pénétration du soleil, de la lumière et des mouvements d'air dans les espaces extérieurs et intérieurs.

En outre, les transformations urbaines étaient souvent réalisées pour des buts esthétiques, d'embellissement des villes, politiques et militaires. Ces actions ont pris place à Tlemcen pendant la période coloniale.

On citera quelques objectifs des interventions salubristes :

- Canalisation des cours d'eau pour faciliter son évacuation.
- Elargissement et pavage des rues pour des raisons d'ensoleillement et d'humidité.
- Alignement des rues afin de créer des façades urbaines.
- Création de nouvelles percées menant à une place centrale.

De ce fait, les interventions salubristes avaient pour objectif la lutte contre l'insalubrité et l'amélioration de circulation de l'air, donc une modification du microclimat urbain. La lutte contre l'air malsain se traduisait par le pavage du sol, le renouvellement des crépis des murs, le comblement des fossés et la canalisation des cours d'eau.

Le pavage des rues remonte à l'époque romaine, il limite la propagation des substances malsaines vers les espaces publics. Vers le 20^{ème} siècle, cette transformation avait pour but la réduction des poussières.

Les villes anciennes ont vu la destruction de leurs remparts et remplacés par de larges rues plantées d'arbres avec l'enterrement du réseau d'assainissement.

Dans les rues étroites, l'air était immobile, alors l'intérêt de la ventilation et l'aération des espaces extérieurs s'avérait nécessaire.

A Tlemcen, dans le tissu ancien, l'alignement urbain a eu lieu avec les percées pendant l'époque coloniale. Il a permis l'accès de l'air, du soleil dans les espaces et a facilité la circulation automobile.

Les exemples les plus célèbres concernant les transformations urbaines hygiénistes sont ceux d'HAUSSMAN sur Paris et CERDA à Barcelone.

⁸⁵ Harouel, J.L. (1993). L'embellissement des villes l'urbanisme français au XVIIIe siècle, *Picard*, Paris, 333p.

4.3. L'avènement de l'urbanisme moderne :

Les urbanistes utopiques ont proposé d'aménager les espaces en dehors de la ville pour concrétiser leurs idéaux de ville saine proche de la nature par la notion des cités jardins d'Howard et Charles Fourier.

Par contre, les villes fonctionnelles d'Etienne CABET, Arturo Soria y MATA et Tony GARNIER avaient une forme qui répondait surtout aux exigences fonctionnelles de la circulation. Mais la verdure avait sa place dans cette typologie et était fortement présente.

Les solutions proposées jusqu'au 19ème siècle étaient opposées : la transformation des villes existantes ou la création de nouvelles villes. Vers le début du 20è siècle, c'est la deuxième proposition qui a été soutenue. Par contre, actuellement, c'est la première qui est recommandée.

Le premier courant de l'urbanisme moderne prône la ville organique à faible densité et un retour à la nature et au passé.

En second lieu, les rationalistes, à leur tête LE CORBUSIER, a résumé des principes urbanistiques et des questions relatives à l'hygiène et au microclimat dans la charte d'Athènes.

Nous récapitulons quelques propositions liées à la forme urbaine de la charte d'Athènes⁸⁶ :

- Les zones d'habitations doivent être implantées dans les meilleurs emplacements urbains, bâti en hauteur, tirant profit du climat et de la topographie.
- L'habitat doit disposer d'un ensoleillement favorable, éloigné des voies de communication et le sol doit être libéré en faveur de larges surfaces vertes.
- L'espace ouvert dans l'urbanisme moderne n'est pas perçu à l'échelle humaine. Il est conçu que par vue d'avion dans le plan de masse.

Les urbanistes rationalistes voulaient introduire de l'ordre dans la forme urbaine en introduisant le soleil, l'air et la lumière dans ces espaces.

En effet, la réalisation des grands ensembles dans le monde est vouée à l'échec car les idées générales inscrites dans la charte ont été réalisées et le vide urbain se limitait à une fonction de stationnement et circulation. En d'autres termes la perception de l'espace urbain à partir de la hauteur d'un piéton n'est presque jamais un argument des projets. En résumé l'espace urbain de la ville ancienne qui a été construit à partir du sol n'est conçu dans l'urbanisme moderne que vu d'avion par des plans masse⁸⁷.

⁸⁶ Le Corbusier, (1957). La Charte d'Athènes, *Minuit*, Paris, 189p.

⁸⁷ Thiberge, C. (2002). La ville en creux, *éditions du Linteau*, Paris, 335p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

- **La destruction et reconstruction des villes en Algérie pendant la période coloniale :**

Pendant la colonisation française, un grand nombre de médinas algériennes se retrouvent devant des fragments urbains détruits pour l'installation de l'armée et des premiers colons⁸⁸.

Cependant, cette politique d'aménagement a mené à des premières transformations des villes, des maisons traditionnelles transformées en établissement militaires, élargissement des voies et création de la place d'arme et consolidation des fortifications.

Dans cette période, la reconstruction n'était pas perçue par les officiers du génie comme une occasion de repenser l'environnement urbain. Elle restait liée à des fins de contrôle et de surveillance.

Durant la même époque, en Europe, la reconstruction après la deuxième guerre mondiale avait pour but de retrouver le patrimoine ancien perdu où la forme urbaine se base l'îlot et la rue. Le premier à avoir évoqué la notion « d'îlot ouvert » est Christian DE PANTZAMPRC⁸⁹ où il définit l'élément principal de la forme urbaine. Un autre ouvrage « Formes urbaines de l'îlot à la barre »⁹⁰, exprime aussi la relation entre ville ancienne et moderne à travers la rationalisation et l'ouverture de l'îlot.

En Algérie, le changement de la ville ancienne, s'est perçu dans la largeur des rues qui devient plus importante, la hauteur des bâtiments qui est limitée, la création des vides au centre des îlots et la trame devient orthogonale.

Ce qui nous intéresse dans notre recherche, ce sont les effets relatifs à l'environnement et au microclimat qui sont générés par la forme urbaine.

Présentons dans ce qui suit les nouvelles questions environnementales de la forme urbaine de la ville contemporaine.

4.4. Le microclimat et la ville contemporaine :

La ville actuelle est confrontée à de nombreux enjeux liés au développement durable où la prise de conscience environnementale est aujourd'hui présente.

Cependant, les problèmes de réchauffement climatique, de dégradation des milieux naturels et atmosphériques représentent la problématique de la ville contemporaine. L'émission de gaz à

⁸⁸ Picard, Aleth. (1994). « Architecture et urbanisme en Algérie. D'une rive à l'autre (1830-1962) ». *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée* 73, n° : 121-36. <https://doi.org/10.3406/remmm.1994.1671>.

⁸⁹ De Portzamparc, C. (1995). La ville du troisième âge, revue projet urbain, n°3, « la ville hors la ville », pp.4-9, *ministère de l'équipement des transports et du tourisme*, direction de l'architecture et de l'urbanisme.

⁹⁰ Panerai, Ph. Castex, J. Depaule, J-Ch, et al. (1997-2001). Formes urbaines : de l'îlot à la barre, *Parenthèses*, Marseille, 195p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

effet de serre par le rejet du CO₂ dans l'air par la climatisation, le chauffage, la circulation automobile et l'industrie polluante est directement liée à l'urbanisation.

De nombreux sommets ont proposé des directives pour les villes durables. Le premier, de Rio de Janeiro en 1992, le deuxième est celui de Kyoto en 1996, suivi par un autre en 2000 à Haye et en 2002 à Johannesburg. Des objectifs généraux ont été tirés concernant l'utilisation de l'énergie renouvelable, des matières premières et de matériaux recyclables.....

En effet, la recherche d'une qualité environnementale et microclimatique dans la forme urbaine nouvelle est préconisée par une conception de ville compacte, dense et avec la promotion des espaces verts aux sols et toitures⁹¹.

La question de trouver une forme urbaine située entre l'ancien et le moderne reste problématique. Des objectifs contradictoires nous intéressent, ceux qui sont hygiénistes, recommandent la densification en vertical et ceux relatifs à la question du développement durable préconisent la densification et le renouvellement des tissus existants par l'ouverture modérée des vides.

En outre, notre recherche s'articule autour de la question des transformations urbaines, entre densifier et compacter le tissu tout en préconisant l'ensoleillement, l'air et la lumière.

4.5. Synthèse :

Nous avons tenté à retracer l'histoire relative liée à la question de la régulation du microclimat urbain générée par les éléments de la forme urbaine.

Commençons par les adaptations spatiales sans aucune intervention, ensuite par des modifications de la forme urbaine et enfin par une importante intervention, celle du mouvement moderne.

Et actuellement, face au défi énergétique, plusieurs méthodes ont été développées afin de quantifier les variables microclimatiques du projet urbain.

En effet, les premières tentatives d'ajustement de la forme urbaine étaient mineures et elles touchaient la ville ancienne.

A l'opposé, l'urbanisme moderne a apporté une nouvelle forme urbaine où le vide urbain devient sans limites. La qualité microclimatique peut être obtenue par une modification du rapport entre le plein et le vide, par un élargissement des canyons urbains, un alignement urbain, une proportion optimale du prospect.

⁹¹ Gauzin-Muller, D. (2001). L'architecture écologique 29 exemples européens (urbanisme et développement durable, architecture et qualité de l'environnementale, démarche HQE), *Le Moniteur*, Paris, 290 p.

Chapitre II : Compréhension de la morphologie urbaine et ses indicateurs.

Mais les architectes et urbanistes n'étaient pas en mesure de quantifier la variabilité microclimatique qui dépend de plusieurs aspects géométriques de l'espace urbaine.

Actuellement, les chercheurs ont déjà développé plusieurs méthodes pour évaluer les effets microclimatiques générés par une intervention sur la forme urbaine.

Conclusion:

Dans ce chapitre de recherche bibliographique, nous avons développé le rôle et l'impact important de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort extérieur.

En premier lieu, nous avons essayé d'éliminer toute confusion entre la morphologie et la forme urbaine. Ensuite, nous avons présenté la diversité des indicateurs de forme qui affecte l'écoulement du vent et l'ensoleillement, tel que le facteur de vue de ciel, le rapport H/L des canyons urbains, la porosité des tissus et l'albédo des surfaces. Ceci nous a permis d'expliquer la complexité des configurations spatiales à l'échelle microclimatique. Nous concluons aussi, que les transformations urbaines ont toujours modifié le microclimat urbain à travers l'histoire, soit implicitement ou explicitement.

Dans la continuité de cette recherche, le chapitre suivant détaille des notions sur le climat et les éléments liés à la forme urbaine qui influent sur le microclimat et le confort thermique des espaces extérieurs.

CHAPITRE III :
Climat et milieu construit.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Introduction:

Ce chapitre traite l'état de l'art concernant le climat et le microclimat urbain. Il nous a paru important de comprendre ces éléments en raison des interactions réciproques entre les paramètres microclimatiques et le milieu bâti. L'un des problèmes majeurs dans la future forme des villes est certainement lié aux changements climatiques et de leurs impacts sur l'environnement bâti, et qui peuvent conduire à des conséquences critiques telles que la sensation d'inconfort extérieur.

Nous présentons, la variabilité des paramètres climatiques, qui sont, la température de l'air, le rayonnement solaire, le vent et l'humidité.

Nous faisons apparaître dans ce chapitre, les trois échelles climatiques, macro, méso et micro, ainsi que les facteurs essentiels qui caractérisent l'échelle microclimatique, notre échelle d'étude. Nous cherchons à mettre en évidence un phénomène microclimatique important dans la climatologie urbaine, il s'agit de l'îlot de chaleur urbain ; ses causes et ses impacts.

Enfin, la mise en relation entre la morphologie urbaine et le microclimat a été définie par le processus avec lequel l'énergie est transférée en milieu urbain.

Ceci nous permet de comprendre les éléments théoriques et fonder notre méthodologie de recherche.

1. Les paramètres climatiques :

Les urbanistes doivent appréhender les aspects spatiaux et temporels des données climatiques d'une ville⁹². Ces derniers ont un effet intégral sur l'être humain et doivent être quantifiés et évalués⁹³.

1.1. La température et le rayonnement solaire :

Un des paramètres qui conditionne la perception du confort thermique dans l'espace est la température. C'est un facteur important qui identifie nos attitudes comportementales et vestimentaires.

⁹² Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 78–88. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.11.003.

⁹³ Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2), 31–44. doi:10.1016/s0169-2046(00)00034-7

Chapitre III : Climat et milieu construit.

L'espace urbain est soumis aux projections du rayonnement solaire qui définissent une partition visuelle et sensible de l'espace.

- La sensation thermique : c'est le rayonnement perçu traduit par la température opérative.
- Le sens visuel : peut être traduit par l'intensité de la lumière émise ou réfléchie et du niveau d'éclairement.

La température a plusieurs origines, nous citons :

1.1.1. La température sèche ou humide de l'air:

La température sèche est mesurée par un thermomètre normal, dans le cas où le bulbe est enrobé d'un coton imbibé d'eau on obtient la température humide.

1.1.2. La température de rayonnement :

La température radiante moyenne est fonction des échanges par rayonnement de l'émissivité des températures de parois. Sa mesure se fait à l'aide d'un thermomètre globe.

1.1.3. La température opérative :

Détermine la somme des flux de chaleur par convection et par rayonnement.

1.2. L'humidité de l'air :

Dans les climats à forte température, l'humidité peut enrayer l'évapotranspiration. Elle peut aussi favoriser le phénomène de condensation sur les surfaces froides.

En espace interne, l'humidité relative doit être comprise entre 20 et 80%. Dans les limites des 20%, l'être humain peut être atteint d'allergies dues aux poussières sèches. Quant à une humidité relative supérieure à 80 %, elle peut causer des condensations avec une gêne respiratoire.

En espace extérieur, sous un climat chaud et sec, notre corps transpire et l'excédent d'eau sera absorbé par l'air. Contrairement à un climat chaud et humide la transpiration ne peut pas s'évaporer.

Ce tableau illustre l'indice d'humidité « Humidex » et le degré de confort pour évaluer la réaction des personnes :

Index humidex : Température perçue	Degré d'inconfort
Au-dessous de 29°	Peu de gens sont incommodés.
30° à 34°	Sensation de malaise plus ou moins grande.
35° à 39°	Sensation de malaise assez grande. Prudence. Ralentir certaines activités en plein air.
40° à 45°	Sensation de malaise généralisée. Danger. Eviter les efforts.
46° à 53°	Danger extrême. Arrêt de travail dans de nombreux domaines.
Au-dessus de 54°	Coup de chaleur imminent (danger de mort).

Tableau 4: Indice Humidex et degré d'inconfort perçu.

Source : J.M. MASTERSON et al.⁹⁴

1.3. Le vent :

Il fait partie des paramètres physio-psycho-sensoriel.

Le piéton doit vaincre le soufflement du vent dans son déplacement. Plus la vitesse est élevée, plus il lui faudra lutter et plus la gêne sera grande. Donc la vitesse moyenne V influe sur le confort du piéton.

La notion de variabilité du vent dépend du temps et de l'espace qui oblige le piéton à s'adapter contre la gêne dans les espaces extérieurs. Si sa fréquence est modérée, elle sera acceptée ou tolérée par l'utilisateur.

En effet, la notion d'acceptabilité ou non-acceptabilité d'un niveau de fréquence de nuisance donné sera dépendante notamment de l'activité dans l'espace extérieur considéré, du climat de la région considérée, du site d'implantation, du positionnement du point dans le plan de masse et des interventions prises pour réduire la nuisance notamment les brise-vents⁹⁵.

⁹⁴ Masterson, J. M et Richardson, F. A. (1979). Humidex ; a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity, Downsview, Ont. : *Environment Canada, Atmospheric Environment*, 45 p.

⁹⁵ Gandemer J. & Guyot A. (1976), Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Ministère de l'Équipement, *Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme*, 129 p.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Le tableau suivant présente l'un des plus anciens indices, « l'échelle de Beaufort », développé pour évaluer les effets de la vitesse du vent sur les activités et les pratiques des individus et ceci en fonction de la turbulence du vent :

Vitesse du vent (m/s)		Caractéristiques du vent
Force	Hauteur Z = 2 m	
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. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
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 petits arbres avec les 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 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 5: L'échelle Beaufort.

Source : Dennis WHEELER, D., & Clive WILKINSON⁹⁶.

⁹⁶ Wheeler, D., & Wilkinson, C. (2004). from calm to storm: the origins of the beaufort wind scale. *the mariner's mirror*, 90(2), 187–201. doi:10.1080/00253359.2004.10656896.

1.4. La nébulosité du ciel :

Elle est définie comme étant la proportion de la surface de la couverture nuageuse par rapport à la surface du ciel.

Par temps à ciel clair (degré de couverture du ciel = 0), la distribution de la température suit le rayonnement solaire. Par contre, par ciel couvert (degré de couverture du ciel = 8), l'éclairement énergétique est déterminé par les multi-réflexions. Donc c'est un paramètre qui conditionne la qualité de l'éclairement naturel.

2. Définitions et concepts :

2.1. L'atmosphère :

2.1.1. Définitions :

L'atmosphère est la couche gazeuse qui entoure la terre. Elle est maintenue en place par le champ gravitationnel. L'expansion des gaz atmosphériques dans l'espace est causée par la chaleur rayonnante du soleil et l'interaction entre cette force cinétique et la force d'attraction de la terre⁹⁷.

La profondeur de l'atmosphère varie de temps à autre. Elle est plus grande en été qu'en hiver, et elle varie également en fonction de la latitude.

L'atmosphère est un mélange de gaz divers, elle comprend pour l'essentiel, de l'azote (78.09%), de l'oxygène (20.95%), des gaz rares (Argon, Néon, Hélium...) et dans les basses couches, de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone⁹⁸.

2.1.2. Couches constituants l'atmosphère :

- La troposphère (ou la couche des changements): c'est la couche où nous vivons, elle est caractérisée par une température qui décroît régulièrement avec l'altitude. L'épaisseur de cette couche varie entre 13 et 16 km à l'équateur, mais entre 7 et 8 km aux pôles. Elle contient 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est la couche où se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies, etc.) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents).

⁹⁷ Guyot, G. (1999). Climatologie de l'environnement ; cours et exercices corrigés. Paris, *Dunod*, p167.

⁹⁸ Tabeaud, M. (2000). La climatologie. Paris, *armand colin*, p10.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

- La stratosphère : la température croît avec l'altitude jusqu'à 0 °C (de 8-15 km d'altitude à 50 km d'altitude) ; elle abrite une bonne partie de la couche d'ozone, elle ne comporte aucune variation climatique et, de ce fait, il n'y a pratiquement plus d'intempérie à partir de cette couche.
- La mésosphère : la température décroît avec l'altitude (de 50 km d'altitude à 80 km d'altitude) jusqu'à -80 °C.
- La thermosphère : la température croît avec l'altitude (de 80 km d'altitude à 350-800 km d'altitude).
- L'exosphère : de 350-800 km d'altitude à 50 000 km d'altitude.

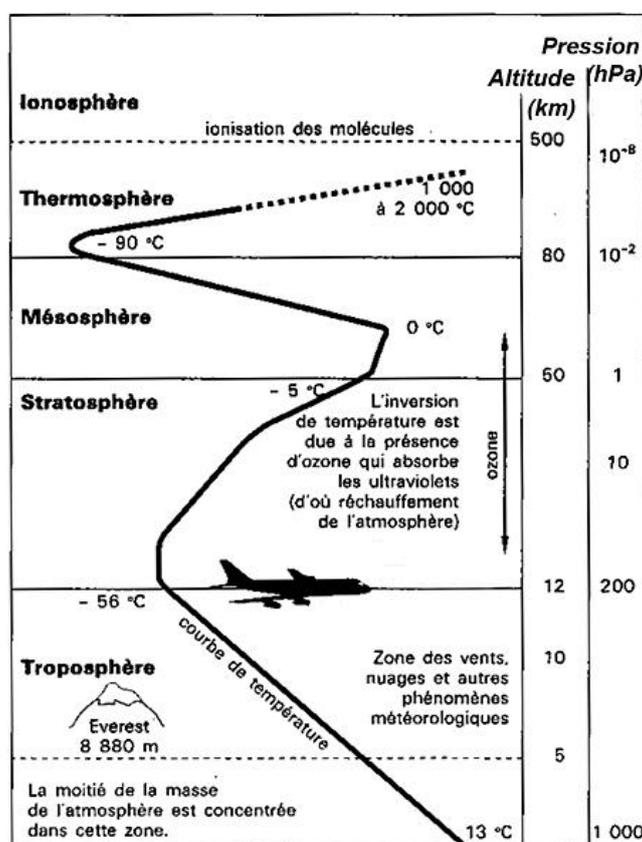


Figure 14: Stratification verticale de l'atmosphère.

Source : Pole DIDIER⁹⁹.

⁹⁹ Didier, P. (2000). L'atmosphère terrestre, consulté le 11 janvier 2017, disponible sous le lien : <http://www.fondation-lamap.org/fr/page/12039/latmosphere-terrestre>. Ed par : Fondation coopération scientifique pour l'éducation à la science.

2.2. La surface urbaine :

Les déformations de sol, arbres, bâtiments, objets divers, sont des éléments rugueux qui composent la surface du sol et altèrent son aspect planimétrique.

En climatologie urbaine le concept de surface s'applique à une couche d'une hauteur donnée qui sépare le sous-sol de l'atmosphère. Cette couche de surface ne contient ni masse ni énergie, mais elle est le lieu de très importants échanges et conversions de masses et d'énergie¹⁰⁰.

T.R. OKE a défini cette interface par le terme « surface active » : « *Dans le cadre d'objectifs climatiques, on définit la surface « active » comme le plan principal des activités climatiques dans un système* ».

La régulation des phénomènes physiques à travers cette surface induit quatre modifications majeures des paramètres climatiques¹⁰¹ :

- Absorption, réflexion et émission de la majorité des rayonnements solaires, thermiques et lumineux.
- Transformation de la plus grande part d'énergie et de masse.
- Interception des précipitations.
- Forte résistance au mouvement des flux d'air.

Les interactions entre le sol et l'atmosphère sont considérables (plus ou moins 10 m au-dessus du sol) et sont caractérisées par d'importantes turbulences dues à la rugosité du sol et au phénomène de convection.

Les limites de cette couche sont estimées à une hauteur de 50m pendant le jour, alors qu'en phase nocturne, du fait du phénomène de tassement de la couche atmosphérique, elles ne dépassent pas quelques mètres de hauteur.

L'importance et la hauteur de la surface urbaine dépendent fortement de la morphologie des différents éléments du sol urbain.

Les propriétés physiques de surface sont différentes selon plusieurs facteurs, tels que l'effet de la forme d'urbanisation et le type de matériaux. Cela constitue une interface d'échange spécifique avec l'atmosphère.

¹⁰⁰ Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), 233–245. doi:10.1007/bf00116120.

¹⁰¹ Ibid.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

A travers les images satellites, on peut constater que les spécificités morphologiques et anthropologiques de la surface urbaine modifient les caractéristiques radiatives, thermiques, aérauliques et d'humidité.

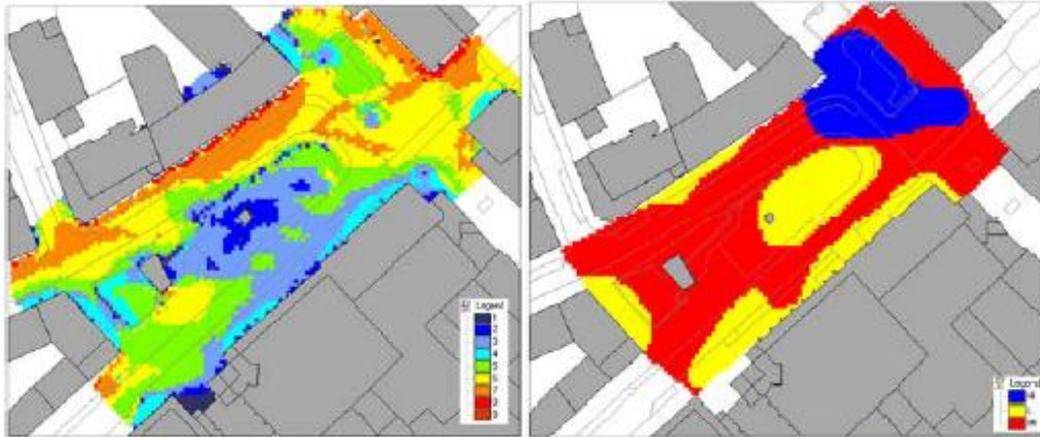


Figure 15: Les couches thématiques "radiation" et "vent" pour la Florentiner Platz, le centre d'Allemagne.

Source : Lutz Katzschner et al¹⁰².

2.3. Les échelles de la climatologie :

Le climat urbain qui résulte de l'interaction des données climatiques avec la surface urbaine est décomposé en quatre échelles dimensionnelles qui interagissent entre elles. Ces dernières sont associées à des champs d'influence verticaux sur l'atmosphère urbaine.

2.3.1. Les échelles spatiales du climat :

- **L'échelle globale ou l'échelle « macro »** : correspond aux phénomènes définitifs pour les principales variations climatiques et saisonnières et se situe à quelques 10^3 kilomètres loin de la surface terrestre.
- **L'échelle régionale ou l'échelle « méso »** : le relief et l'emplacement de la région par rapport aux déplacements d'air affecte le climat à ce niveau. A cette échelle les influences d'une ville sur les paramètres climatiques sont analysées. Elle se prolonge jusqu'à quelques centaines de kilomètres.

¹⁰² Katzschner, L, Bosch, U & Roettgen, M. (2003). A methodology for bioclimatic microscale mapping of open spaces, *Conférence on urban space*. Consulté le : 09 Avril 2018, disponible sous le lien : http://meteo.geo.uni.lodz.pl/icuc5/text/P_1_1.pdf.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

- **L'échelle locale** : C'est l'échelle des modifications de régime du vent et des brises thermiques. Elle englobe les champs d'influence résultant de la régulation des paramètres climatiques à l'échelle d'un ensemble urbain aux caractéristiques homogènes (matériaux de surface, taille et espacement entre bâtiments, activités, etc.). Elle se prolonge à quelques dizaines de kilomètres.
- **L'échelle microclimatique ou l'échelle « micro »** : c'est la plus petite échelle caractéristique de la variation des paramètres climatiques à la surface du sol ou des objets en contact avec l'air tels que : les bâtiments, arbres, rues, routes, cours intérieures, jardins, etc. Ces objets peuvent engendrer des variations des températures d'air et de surface qui se font à des distances très faibles et par conséquent vont perturber les flux d'air. La distance de cette échelle est limitée à quelques centaines de mètres.

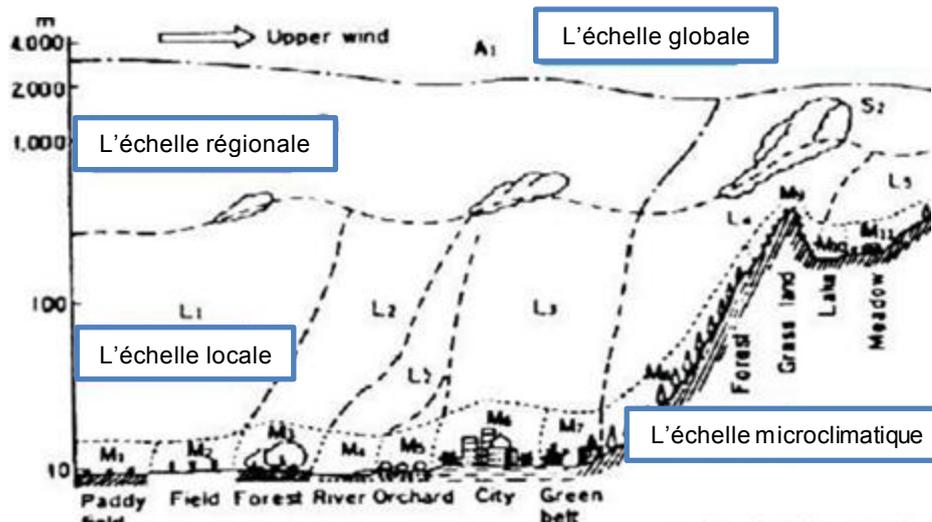


Figure 16: Les échelles de climatologie.

2.3.2. Les couches verticales des échelles spatiales :

La couche de la canopée urbaine est située entre le sol et le sommet des obstacles situés sur une surface. Sa hauteur est équivalente à la hauteur moyenne des éléments de rugosité tels que les bâtiments et les arbres. Les effets microclimatiques auront lieu à travers cette couche. La magnitude du microclimat urbain et de la vitesse du vent et sa stabilité conditionnent le passage d'effets microclimatiques à ceux de l'échelle locale.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Ces effets s'étendent verticalement, de la canopée urbaine vers une couche appelée la sous-couche rugueuse qui commence au niveau des toits et atteint une hauteur où la canopée n'a plus d'effet sur la couche de l'échelle méso.

La rugosité à l'échelle de la ville et la stabilité des conditions atmosphériques affectent une autre couche appelée la couche limite urbaine, située au-dessus des deux autres, et à son tour est influencée par la surface urbaine.

Au-delà de cette couche on se retrouve dans les mêmes conditions climatiques que celles d'un site rural non influencé par les conditions de rugosité¹⁰³, c'est à dire celles de la couche limite atmosphérique.

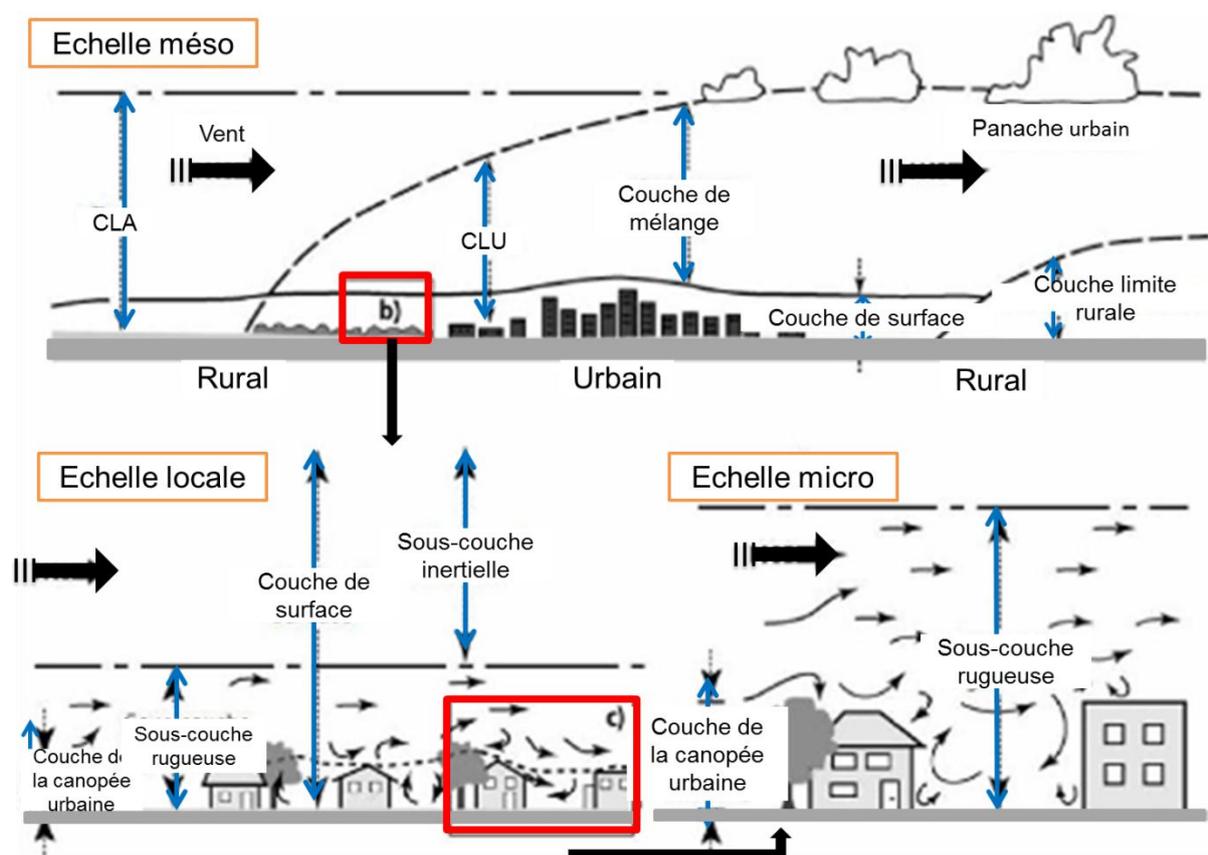


Figure 17: Représentation schématique des échelles climatiques et des couches verticales dans une surface urbaine.

Source : Time OKE¹⁰⁴, Elaboré par l'auteur.

¹⁰³ Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique", thèse de Doctorat, Université de Nantes, p83.

¹⁰⁴ Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), 233–245, <https://doi.org/10.1007/BF00116120>.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

- **La canopée urbaine** : c'est une couche qui correspond à la hauteur moyenne de bâtiments qui font obstacle à l'écoulement d'air dans le tissu urbain intégrant le sol urbain (rue, espaces verts), les structures bâties (bâtiments, îlot ou quartier) et les espaces ouverts (cours ou places publiques).

A travers cette couche, les mouvements d'air sont souvent très perturbés par l'interaction des paramètres microclimatiques avec les structures urbaines, elle est traitée à une échelle micro.

- **La couche de surface** : cette couche s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments et se décompose en deux sous-couches d'écoulement:

- La sous-couche inertielle qui se caractérise par l'homogénéité des flux turbulents verticaux et dépend essentiellement de la vitesse de frottement et de la hauteur des bâtiments¹⁰⁵.
- La sous-couche rugueuse se situe à proximité immédiate de la surface et son épaisseur varie entre 1,5 et 3,5 fois la hauteur des bâtiments environnants¹⁰⁶.

- **La couche limite urbaine (CLU)** : située au-dessus de la canopée urbaine, elle fait partie de la couche limite atmosphérique (CLA) et son épaisseur est très variable puisqu'elle dépend de la rugosité du site.

A travers cette couche, les transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère auront lieu et causent des modifications qui sont d'une échelle locale au niveau d'un ensemble urbain. Ces changements climatiques sont généralement identiques dans la zone étudiée et elles varient en fonction du changement de la typologie urbaine.

Sa valeur est nulle en zones rurales.

Elle se traite dans une échelle locale comme une échelle méso¹⁰⁷.

- **La couche limite atmosphérique (CLA)**: Cette couche est associée à l'échelle méso-climatique.

Pendant le cycle diurne, son épaisseur présente une forte variation, de 1 à 2 km, en fonction de la rugosité des sols, de l'ensoleillement et de la saison. Pendant le cycle nocturne, elle varie entre 100 et 300 m, en fonction du vent et du refroidissement en surface¹⁰⁸.

¹⁰⁵ Taha H, Bornstein, R. (1999). "Urbanization of meteorological models and implications on simulated heat islands and air quality". *Proc. Int. Conf. on Urban Climatology (ICB-ICUC '99)*, Sydney, Australia, Macquarie University, 431–435.

¹⁰⁶ Rotach, M. (2000). "Review of atmospheric turbulence over cities". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 941–990.

¹⁰⁷ Bourbia, F. Building cluster and shading in hot dry climate. Thèse de Doctorat. University of reading. 1999,p10.

¹⁰⁸ CNRM. Description de la couche limite atmosphérique, version numérique, 2010. *Centre National de Recherches météorologiques*. Disponible sous le lien <http://www.cnrm-game.fr> [Dernière visite le 11 janvier 2017].

2.4. Le canyon urbain :

La surface urbaine se caractérise par le vide entre les bâtiments qui produisent des effets physiques spécifiques et ont des répercussions considérables à l'échelle locale et microclimatique.

A travers ces vides, le phénomène de canyon urbain se manifeste par l'effet de piégeage radiatif et de stagnation de l'air qui concerne à la fois les rayonnements solaires et les rayonnements de grande longueur d'onde provenant du sol en direction de l'atmosphère.

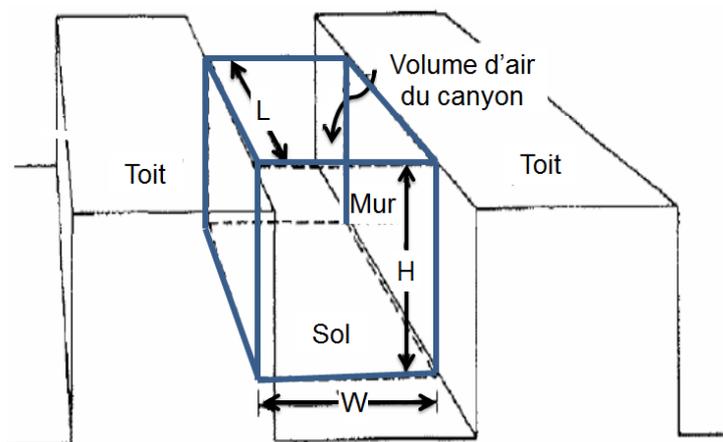


Figure 18: Canyon urbain.

Source : Manuel NUNEZ¹⁰⁹. Traité par l'auteur.

Le concept de piégeage radiatif consiste en la réflexion des rayonnements reçus par une surface vers d'autres surfaces voisines avant de se diriger vers l'atmosphère. (Figure 19. b)

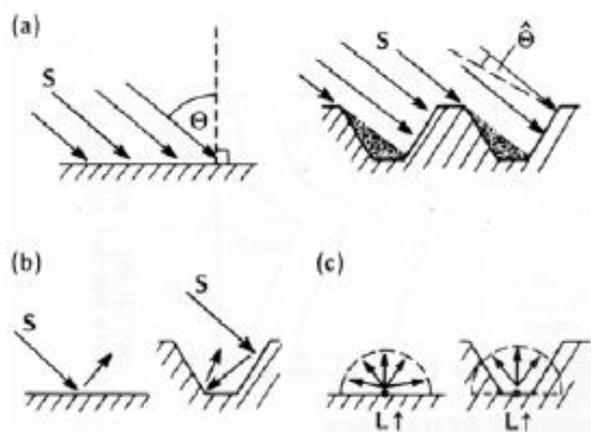


Figure 19: Différents échanges radiatifs à travers une surface.

Source : Time OKE¹¹⁰.

¹⁰⁹ Nunez. M, Oke T.R. (1977). The energy balance of an urban canyon, *journal of applied meteorology*, 16 :11-19. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016%3C0011:TEBOAU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016%3C0011:TEBOAU%3E2.0.CO;2).

Chapitre III : Climat et milieu construit.

De ce fait l'albédo des surfaces est réduit à cause de l'augmentation de l'absorption des rayonnements, et les émissions thermiques par le sol sont aussi réduites par la réduction du facteur de vue du ciel du fait que le ciel est obstrué par d'autres faces du canyon.

La température des espaces urbains limités par des constructions est augmentée par le piégeage des rayonnements solaires pendant le jour, et pendant la nuit les émissions thermiques par le sol réduisent le refroidissement des surfaces et du sol¹¹¹, voir l'espace par conséquent.

Quant à l'écoulement du vent à travers ces espaces, il apporte des modifications microclimatiques. La hauteur des bâtiments et la distance qui les sépare conditionnent la configuration des mouvements d'air.

En climatologie urbaine, la ville est le plus souvent assimilée à des profils types canyons, définis par le paramètre hauteur (H)/largeur (L) du canyon.

3. L'îlot de chaleur urbain :

L'effet d'îlot de chaleur urbain est un phénomène largement étudié dans le cadre de la climatologie urbaine. Il est l'élément principal du microclimat des villes.

Le climat dans la ville se différencie de celui de sa périphérie¹¹², en raison de la géométrie des villes, des matériaux utilisés et des sources de chaleur artificielles qui contribuent à créer un microclimat particulier¹¹³.

L'expression îlot de chaleur urbain caractérise un secteur urbanisé où les températures de l'air et des surfaces sont souvent supérieures à celles de la périphérie rurale¹¹⁴.

Donc ce phénomène va accentuer le réchauffement climatique et aggraver les épisodes de canicules.

Certaines recherches ont montré que le phénomène d'îlot de chaleur urbain se présente sous différentes formes dans les différentes saisons¹¹⁵. S. R. Gaffin et ses collaborateurs ont effectué une étude sur l'îlot de chaleur urbain de New York et ont conclu de la saison d'été et

¹¹⁰ Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), 233–245, <https://doi.org/10.1007/BF00116120>.

¹¹¹ Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique", thèse de Doctorat, Université de Nantes, p84.

¹¹² Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*, John Wiley & Sons, New York.

¹¹³ Santamoris M. (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, James & James, London.

¹¹⁴ Ait-ameur K. (2002). Characterization of the microclimate in urban public spaces through the validation of a morpho-climatic indicator system, *Design with the Environment, Proceedings of PLEA (Passive Low Energy Architecture)*, pp. 305-311.

¹¹⁵ Hart, M. A., & Sailor, D. J. (2008). Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3-4), 397–406. doi:10.1007/s00704-008-0017-5.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

d'automne étaient les plus fortes en terme d'îlot de chaleur urbain et qu'il se prononce différemment pendant la nuit et le jour¹¹⁶.

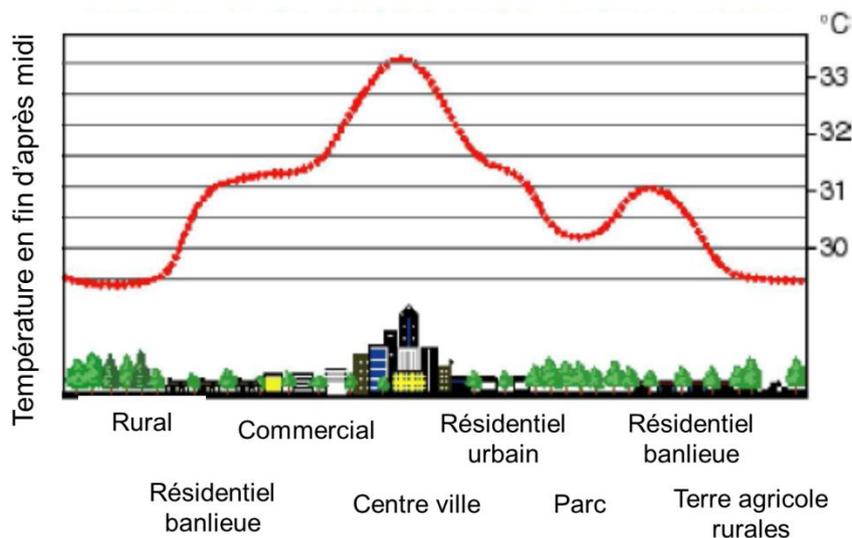


Figure 20: L'îlot de chaleur urbain.

Source : Emmanuel BOZONNET ¹¹⁷.

Ces écarts de température peuvent aller de 2°C à 12°C pour les grandes agglomérations. On mesure essentiellement ces écarts la nuit, ce qui signifie que les tissus urbains emmagasinent de la chaleur durant la journée mais ne la libèrent que très peu durant la nuit contrairement aux zones rurales¹¹⁸.

¹¹⁶ Gaffin, S., Rosenzweig, C., Khanbilvardi, R. et al. (2008). Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1-2), 1-11. doi:10.1007/s00704-007-0368-3

¹¹⁷ E. Bozonnet. (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments cas des rues canyons. Thèse de doctorat, Université de Rochelle.

¹¹⁸ Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., & Hidalgo, J. (2008). De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville. *La Météorologie*, 8(62), 39. doi:10.4267/2042/19174.

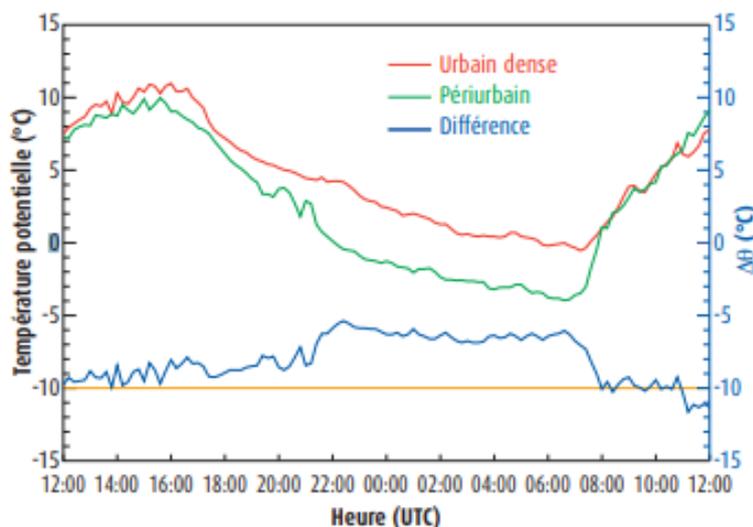


Figure 21: Évolution de la température en deux points de Toulouse, le 25 février 2005

Source : Grégoire PIGEON e al.¹¹⁹.

3.1. Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain :

3.1.1. Caractéristiques temporelles de l'îlot de chaleur urbain :

La taille et la forme de l'îlot de chaleur varient dans le temps, en fonction des conditions météorologiques. Au courant de la journée, l'effet d'îlot de chaleur n'a pas une intensité constante puisque son intensité est plus forte pendant la nuit.

Ce phénomène s'affaiblit avec le vent et disparaît pour des vitesses supérieures à 11 m/s et avec la couverture nuageuse puisque les nuages absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par les surfaces des villes et ils la réémettent vers la terre empêchant ainsi le refroidissement nocturne¹²⁰.

En hiver, l'effet d'îlot de chaleur peut avoir des effets positifs en ce qui concerne les dépenses pour chauffer l'intérieur des édifices. Par contre, une élévation de la demande énergétique et de la climatisation est observée dans les climats chauds, dûe à l'augmentation de la température extérieure¹²¹.

¹¹⁹ Ibid.

¹²⁰ Ibid.

¹²¹ Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., & Winnett, S. (1992). Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing.. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., page 217.

3.1.2. Caractéristiques spatiales de l'îlot de chaleur urbain :

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est variable selon l'espace. Elle dépend du climat, de la topographie, de la population, de la morphologie et de l'activité des villes¹²².

Ce phénomène est le plus marqué dans les parties les plus densément bâties, qui correspondent en général au centre-ville et il augmente avec la superficie et la population de la ville¹²³.

3.1.3. Echelles de l'îlot de chaleur urbain :

Les variations de l'îlot de chaleur urbain qui touche l'aire urbaine sont visibles selon différentes échelles spatiales.

Au niveau de la couche limite urbaine, les couches d'air situées au-dessus de la ville se caractérisent par une température plus élevée et une composition chimique caractérisée par de fortes concentrations en polluants atmosphériques d'où l'apparition d'un îlot unique, surplombant la ville.

Quand cette couche est poussée par le vent à l'extérieur de la ville, elle donne naissance à ce qui est appelé le panache urbain. Elle est alors séparée de la surface par une couche influencée par les caractéristiques de la campagne. En revanche, lorsque le vent est faible, une bulle d'air chaud se forme, entretenue par des cellules convectives d'air chaud ; il s'agit du dôme urbain.

¹²² Fan, H., & Sailor, D. (2005). Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 39(1), 73–84. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.031

¹²³ Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. doi:10.1002/joc.859

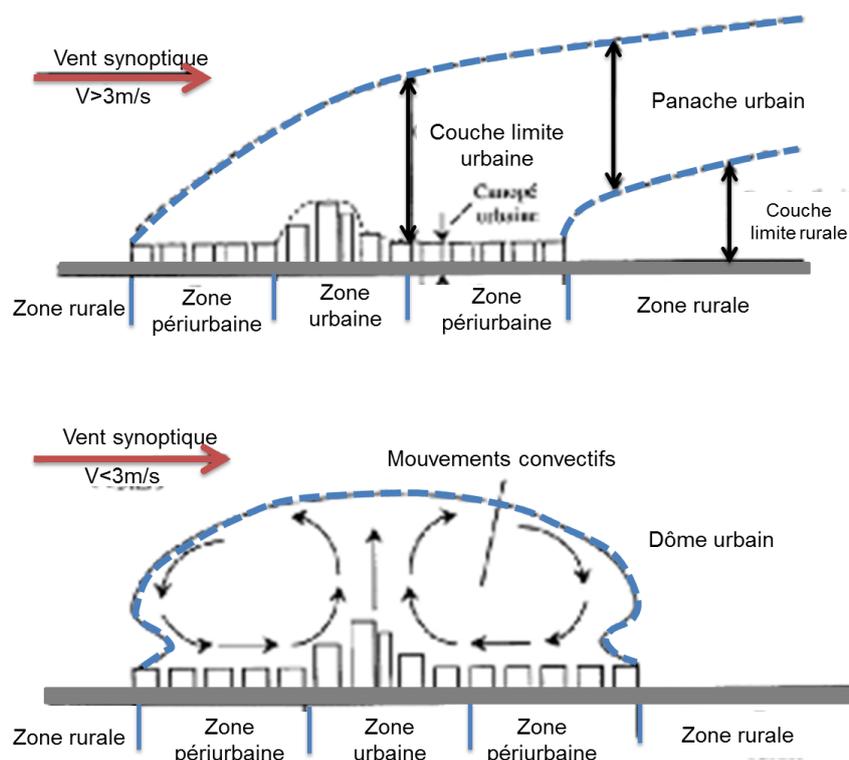


Figure 22: Structure verticale de l'atmosphère urbaine des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s.

Source : Patrice G MESTAYER et al. ¹²⁴

A travers la couche de canopée urbaine, l'îlot de chaleur urbain se manifeste dans les canyons urbains. Il est caractérisé par une variabilité spatiale importante durant la journée dûe aux échanges d'air du canyon urbain avec ses surfaces.

Au niveau de la couche de surface et plus précisément à travers la sous-couche rugueuse le phénomène d'îlot de chaleur présente de très grandes variabilités spatiales¹²⁵, les températures de surface et les températures de l'air peuvent varier sur des distances très courtes.

Le phénomène est gouverné par les propriétés radiatives et thermiques des matériaux et la géométrie des rues¹²⁶.

¹²⁴ Mestayer P.G., Anquetin S. (1995) Climatology of Cities. In: Gyr A., Rys FS. (eds) Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields. *ERCOFTAC Series*, vol 1. Springer, Dordrecht. Doi : <https://doi.org/10.1007/978-94-015->

¹²⁵ Chudnovsky, A., Ben-Dor, E., & Saaroni, H. (2004). Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings*, 36(11), 1063–1074. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.052.

¹²⁶ Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. doi:10.1002/joc.859.

3.2. Conditions du développement du phénomène :

L'îlot de chaleur urbain se développe dans une condition optimale caractérisée par un ciel dégagé et des vitesses de vents très faibles, inférieures à 3 m/s, pour cela le climat urbain tend à se différencier de celui des zones rurales voisines dans une configuration anticyclonique stable.

3.3. Causes du phénomène l'îlot de chaleur urbain :

La présence et l'évolution de l'îlot de chaleur urbain est complexe. Elle repose sur la contribution d'une série de facteurs d'origine météorologique ou géographique et d'autres facteurs dont l'architecture et l'aménagement urbain font partie.

Facteurs naturels	Situation géographique	<ul style="list-style-type: none"> -Climat. -Course solaire. -Exposition au vent Topographie. -Présence d'eau et de végétation. -Environnement naturel.
Facteurs humains	Tissu urbain	<ul style="list-style-type: none"> -Porosité du tissu. -Orientation des rues. -Hauteur de la canopée urbaine. -Propriétés thermiques et radiatives des revêtements de sol. -Rejet de la chaleur anthropique des véhicules.
	Bâtiment	<ul style="list-style-type: none"> -Propriétés thermiques et radiatives des matériaux. -Ombrage par les protections solaires -Compacité du bâti. - Rejet de la chaleur anthropique par le chauffage, la climatisation et l'industrie aussi.

Tableau 6: Facteurs et échelles influant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Illustré par l'auteur.

3.3.1. L'exposition aux rayonnements solaires :

L'intensité du phénomène de rétention de la chaleur est différente selon le milieu récepteur et est influencée par l'exposition des surfaces au rayonnement solaire incident direct.

Plus les surfaces seront exposées, plus la chaleur stockée ou piégée sera importante.

3.3.2. La géométrie urbaine :

La morphologie de la ville influence le bilan radiatif, plus spécifiquement l'intensité du phénomène est en relation avec la géométrie des rues et la hauteur des bâtiments.

Le premier paramètre influant le bilan radiatif concerne les ombres que font les bâtiments sur les espaces extérieurs et qui limitent la montée en température des matériaux¹²⁷. L'orientation de la rue face au rayonnement solaire et la diminution du prospect du tissu urbain va empêcher la projection des ombres.

Le deuxième facteur, également lié à la géométrie urbaine, concerne le piégeage radiatif qui participe au stockage de la chaleur dans les matériaux du canyon.

Dans une forme urbaine à fort prospect, les rayons solaires vont subir de multiples réflexions et vont réchauffer les surfaces qui composent la rue avant de ressortir partiellement vers l'atmosphère. Les rayons infrarouges émanant des matériaux urbains chauffés sont piégés de la même manière¹²⁸.

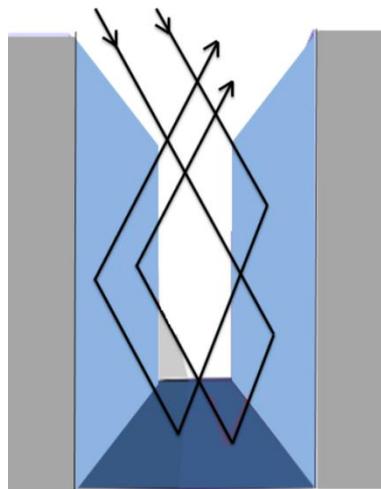


Figure 23: Illustration du piégeage radiatif. Illustré par l'auteur.

¹²⁷ Adolphe, L., Châtelet, A., Boussoualim, Barlet, C, Déboulbet, E. (2002). SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines - *rapport final (MENRT- Direction de la Technologie)*.

¹²⁸ Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00470536/>.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Donc plus le facteur de vue du ciel (FVC) défini par l'ouverture vers le ciel est faible, plus la chaleur s'échappera difficilement.

Le troisième facteur lié au tissu urbain, est celui de l'orientation des rues par rapport aux vents dominants. A l'intérieur de la rue canyon, la direction et la vitesse du vent seront modifiées par rapport à l'orientation et au prospect de la rue¹²⁹. Plus le tissu est dense, plus le vent sera ralenti et la chaleur s'échappera difficilement.

3.3.3. Les propriétés thermiques des matériaux :

Les propriétés relatives aux matériaux des façades, des toitures, des rues ou des trottoirs peuvent accentuer l'augmentation de la température dans les espaces urbains, leur permettant de stocker la chaleur durant la journée et de la restituer la nuit.

L'effet d'îlot de chaleur s'accroît face à cette restitution nocturne¹³⁰. La capacité des matériaux urbains à capter la chaleur et à la restituer pendant la nuit est caractérisée par deux grandeurs qui influent sur l'énergie emmagasinée ou réémise vers l'atmosphère : l'albédo et l'inertie.

- **L'albédo** : correspond au pouvoir d'absorption ou de réflexion d'une surface exposée à l'énergie solaire, sa valeur est comprise entre 0 et 1.

L'albédo des matériaux urbains est globalement plus faible que celui des matériaux que l'on trouve à la campagne¹³¹, une grande partie d'énergie solaire incidente est absorbée au lieu d'être réfléchie, augmentant ainsi la température des surfaces.

Pendant toute la nuit, les propriétés thermiques vont être responsables de l'émission de la chaleur stockée durant la journée vers l'atmosphère, sous forme de rayonnement infrarouge¹³².

¹²⁹ Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an eastwest oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* (1967), 22(12), 2691–2700.

¹³⁰ Bonhomme, M. (2013). Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine, thèse de doctorat, institut national de sciences appliquées de Toulouse, 11 décembre 2013.

¹³¹ Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300.

¹³² M. Santamouris, A. Synnefa & T. Karlessi. (2011). Using advanced cooling materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, vol. 85.

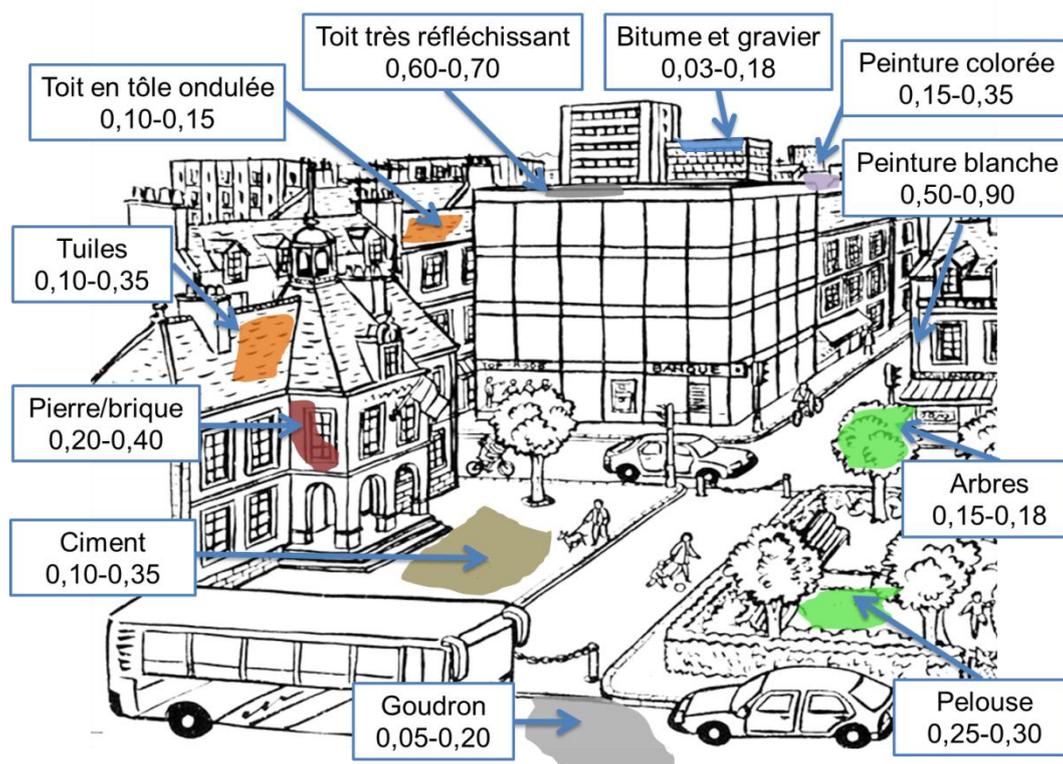


Figure 24: L'Albédo de l'environnement urbain. Illustré par l'auteur.

- **L'inertie thermique** : L'inertie thermique d'une construction est fonction de sa capacité à emmagasiner de la chaleur le jour, de la fraîcheur la nuit, puis de les restituer lentement afin d'amortir les variations jour nuit des températures intérieures.

En milieu urbain, pendant la nuit, les matériaux qui ont accumulé la chaleur diurne en relèguent une partie, limitant leur possibilité de se rafraîchir là où l'air circule peu, ce qui contribue à l'augmentation de la température de l'air ambiant extérieur et l'apparition de l'îlot de chaleur par conséquent.

3.3.4. L'impact de la végétation et de l'eau :

Le phénomène d'évapotranspiration est bouleversé par la diminution des surfaces végétales et par l'imperméabilisation du sol.

Les végétaux et la présence d'eau participent à humidifier l'air dans le milieu urbain accompagné d'une absorption de la chaleur.

La carence du végétal en milieu urbain et la présence d'arbres mal irrigués se présentant avec un stress hydrique, limitent le rafraîchissement de la ville¹³³.

¹³³ Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 115–133.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Un autre facteur réduisant l'humidité de l'air est celui de l'imperméabilisation de la ville. En effet la totalité de l'eau sera rejetée dans les réseaux et le sol ne contient plus d'eau ce qui réduit l'évaporation¹³⁴.

Or cette diminution d'humidité s'accompagne d'une augmentation des températures.

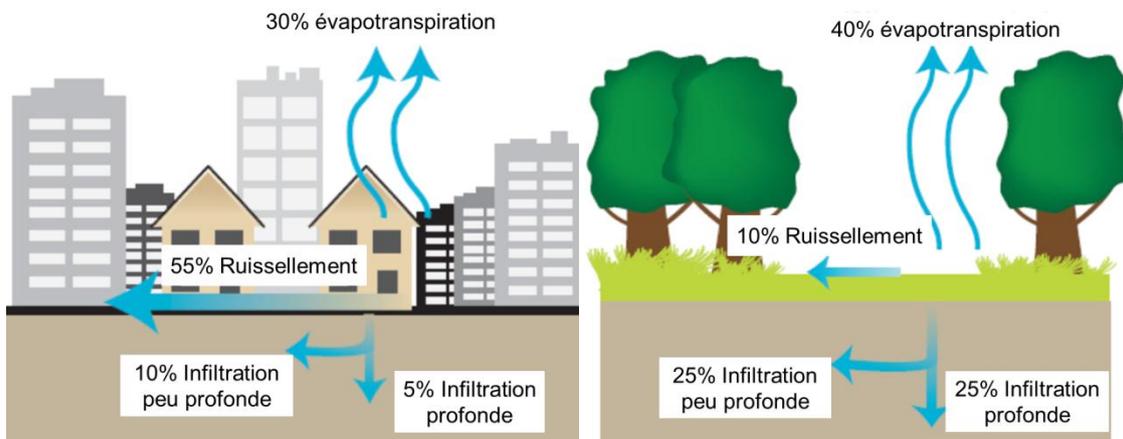


Figure 25: Relation entre les surfaces imperméables et le phénomène d'évapotranspiration.

Source : United States Environmental Protection Agency¹³⁵.

3.3.5. Les activités anthropiques :

Le rejet de la chaleur anthropique en milieu urbain issu des activités humaines est lié au besoin de chauffage, de climatisation, au transport et aux activités industrielles.

La quantité de ce rejet dépend de la densité bâtie et de la population.

De ce fait, le gaz à effet de serre sera émis et participera au réchauffement de l'atmosphère en bloquant ainsi le refroidissement de l'air ambiant¹³⁶.

En conclusion, plusieurs recherches ont démontré que dans les centres villes denses, par leur bâtiments, matériaux et activités et qui laissent moins d'espaces à la végétation et aux plans d'eau sont plus touchés par l'effet d'îlot de chaleur urbain.

¹³⁴ United States Environmental Protection Agency. (2008, octobre). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Consulté à l'adresse <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>, le 17/01/2017, p07.

¹³⁵ Ibid.

¹³⁶ D. Sailor & L. Lu. (2004). A top down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, no. 38, pages 2737–2748.

3.4. Impacts de l'îlot de chaleur urbain :

L'impact de l'îlot de chaleur sur la ville est variable selon le climat. Il peut être considéré comme bénéfique en hiver vu que les consommations de chauffage sont diminuées mais les besoins de climatisation augmentent en été en comparaison avec les zones rurales¹³⁷.

Des études menées sur l'ampleur de ce problème sur les villes américaines denses de population, démontrent que les citoyens consommaient de 1,5 à 2% de l'énergie pour chaque 1°C de température. Par contre, l'effet d'îlot de chaleur avait un impact positif en hiver, vu que la consommation pour chauffer diminue de 30% par rapport aux espaces ruraux¹³⁸.

Face au phénomène d'îlot de chaleur, des risques importants menacent la santé humaine. Les personnes âgées, défavorables et ayant des maladies chroniques deviennent vulnérables face à ce problème, ce qui amène à une élévation de taux de mortalité.

D'autres conséquences sont apparues, telles que la pollution atmosphérique, l'augmentation de l'inconfort des piétons et des menaces sur la biodiversité¹³⁹.

4. Phénomènes microclimatiques en milieu urbain :

4.1. Effets thermiques et radiatifs en milieu urbain :

L'équilibre thermique et radiatif d'un secteur urbain est d'une grande complexité à cause des volumes de bâtiments, de la diversité des matériaux utilisés ainsi que des activités qui s'y déroulent.

4.1.1. Les modes de transfert de chaleur en milieu urbain :

Le processus avec lequel l'énergie est transférée en milieu urbain nécessite sa compréhension pour toute étude de l'interaction du microclimat avec le système bâti, le bilan énergétique peut s'écrire en termes de flux (W/m^2) qui seront explicités dans ce qui suit :

$$Q' + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

¹³⁷ Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., & Desplat, J. (2011). Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique (Evolution of urban climate of Paris in the context of climate change). *In Proceedings of 2R2CV*. Université Paul Verlaine - Metz, France. Consulté à l'adresse <http://www.univmetz.fr/recherche/labs/cegum/2R2CV/Actes/Kounkou-Arnaud.pdf>.

¹³⁸ J. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang & S. Winnett. (1992). *Cooling Our Communities : A Guidebook on Tree Planting and Light- Colored Surfacing*. U.S. *Government Printing Office*, Washington D.C., p 217.

¹³⁹ Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (Contribution to the analysis of various means to take into account urban climate in urban planning). Thèse de doctorat, Université Paris-Est. Consulté à l'adresse <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00470536/>.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Où Q' exprime le bilan radiatif qui représente la somme des flux solaires (direct, diffus et réfléchi) et infrarouge du ciel et absorbé par la surface.

Q_F est le flux de chaleur anthropique qui est équivalent à la somme des productions de chaleur par les bâtiments, les véhicules et l'industrie, il dépend de la saison, de la densité de la ville et du mode de transport des individus.

Q_H se rapporte au flux de chaleur sensible, dû au transport de l'énergie thermique par convection, de la différence de température de surface et de la température de l'air. En outre, c'est un phénomène de convection naturel car la différence entre la masse volumique de l'air chaud et froid engendre un courant d'air.

Q_E relatif au flux de chaleur latente correspond au transfert de chaleur associé à une quantité d'eau introduite dans l'atmosphère. Ce phénomène apparaît nettement en été car l'air est souvent sec pendant le jour et humide la nuit. Le phénomène d'îlot d'humidité se crée donc dans les villes à forte densité végétale¹⁴⁰.

ΔQ_S correspond au stockage de la chaleur des surfaces urbaines. Ce flux est absorbé par des surfaces constituées de matériaux de revêtements variés tels que : l'asphalte, le béton, les briques, le bois, le verre, et de géométries hétérogènes qu'elles soient parois verticales ou horizontales, toits plats ou inclinés.

ΔQ_A est le transfert de chaleur par advection, sa valeur est relativement faible à l'échelle urbaine.

4.2. Effets aérodynamiques en milieu urbain :

Le vent est un paramètre principal du microclimat des villes. En milieu urbain, la capacité de ventilation par le vent est diminuée et perturbée à cause de la présence d'obstacles : bâtiments, arbres, qui font obstacle sous forme diverses.

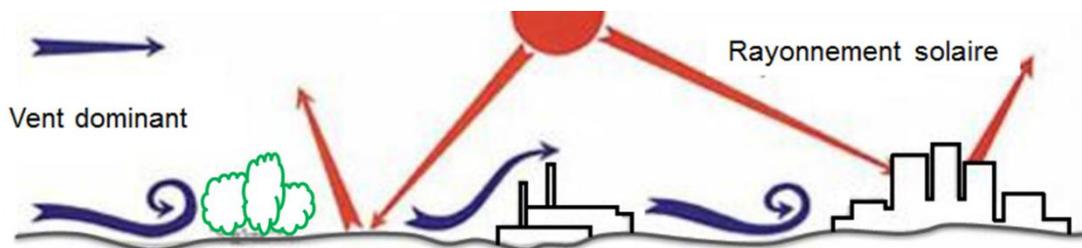


Figure 26: Comportement de l'écoulement du vent en rencontre de plusieurs obstacles (vue en coupe). Illustré par l'auteur.

¹⁴⁰ Robitu M. (2005). Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

L'écoulement du vent circule dans les vides urbains, les rues canyons et les espaces dégagés. En outre, la porosité urbaine modifie l'écoulement du vent. Il n'atteint pas la surface du sol plus la rugosité est grande puisqu'elle est liée à la hauteur du bâti.

Cette hauteur est appelée la hauteur de déplacement Z_d qui peut être égale à la hauteur de la canopée urbaine.

Au-dessus de la canopée urbaine, la vitesse du vent est accentuée pour des altitudes Z .

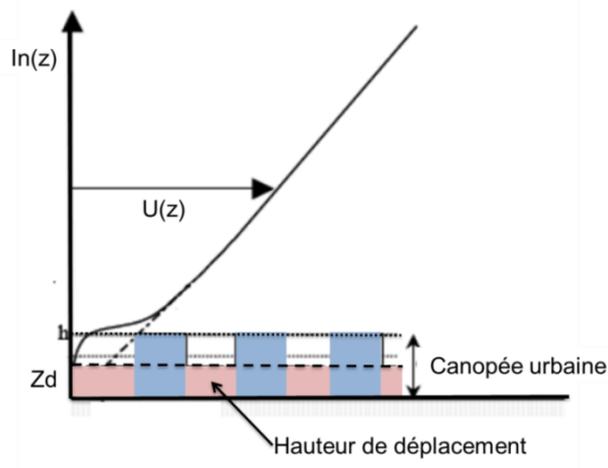


Figure 27: Perturbation de l'écoulement du vent en zone rugueuse (canopée urbaine).

Source : J COLIN¹⁴¹.

La rugosité du sol (végétation, construction...) réduit la vitesse moyenne du vent par les forces de frottement qui créent une agitation importante appelée la turbulence¹⁴².

Prenant le cas de l'écoulement du vent à travers la zone de déplacement dans deux sites de densité différente. Le premier constitué d'une surface sur laquelle les obstacles sont très rapprochés, l'écoulement se produit au-dessus de la hauteur de rugosité avec un déplacement rectiligne, appelé écoulement laminaire.

Dans le deuxième cas, qui présente des obstacles très espacés, l'écoulement est freiné face à un obstacle ensuite il regagne la surface ; il se crée donc un écoulement turbulent engendré par les obstacles.

¹⁴¹ Colin, J. (2001). Définition d'une approche de la modélisation de la rugosité aérodynamique en milieu urbain. Thèse de maîtrise de Géographie. Université Louis Pasteur de Strasbourg.

¹⁴² Gandemer, J. (1981). The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(1), 15–36. doi:10.1016/0167-6105(81)90065-9.

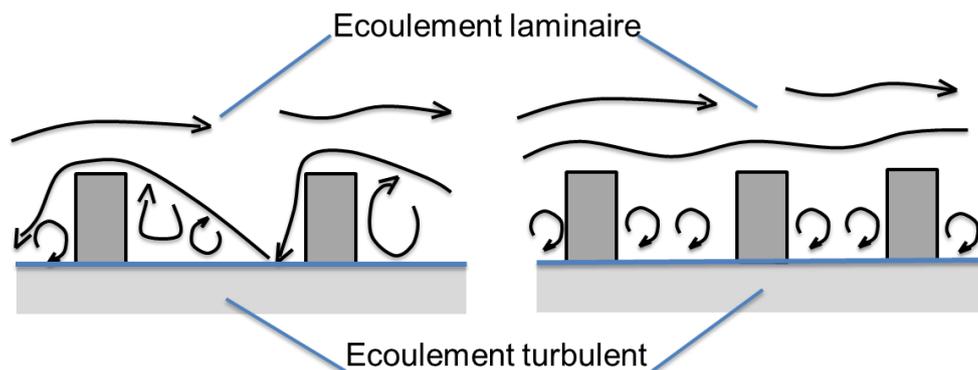


Figure 28: Comportement du vent en fonction de l'espacement entre les constructions.

Source : Emmanuel BOZONNET et al.¹⁴³

4.2.1. Effets du vent en milieu urbain :

La localisation, la rugosité du site, la topographie et l'aménagement urbain (bâtiments, arbres, places publiques,...) sont des facteurs qui influencent l'écoulement du vent à l'échelle microclimatique.

Nos villes actuelles présentent des constructions très élevées avec des rafales de vent qui nuisent au confort des piétons contrairement aux villes traditionnelles à tissu dense et à hauteur homogène relativement faible qui assure un bon confort au vent¹⁴⁴.

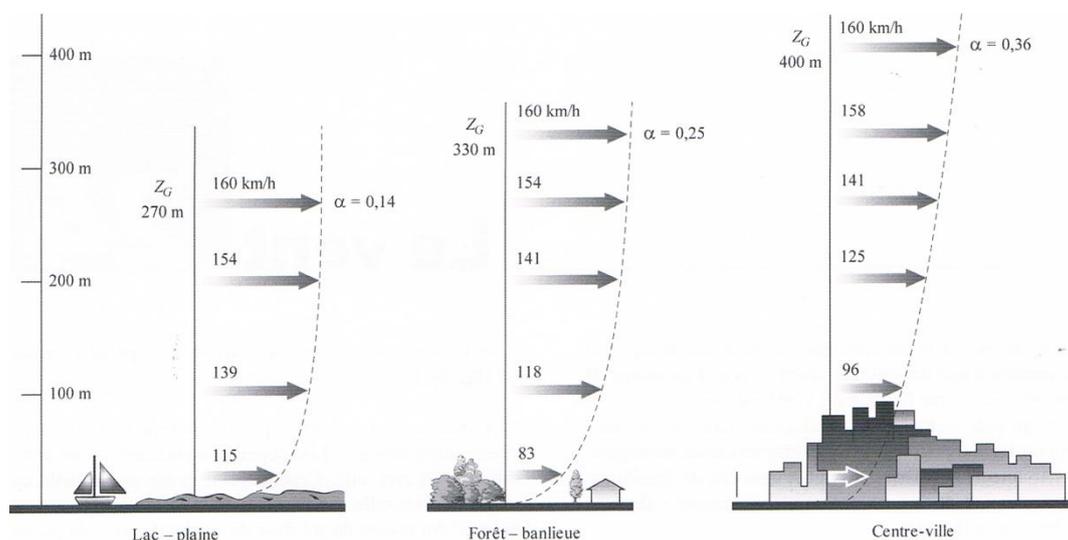


Figure 29: Evolution de la couche limite du vent en fonction de la rugosité du sol.

Source : Pierre FERNANDEZ et al.¹⁴⁵

¹⁴³ Bozonnet, E. et al. (2002). Simulation thermo-aéraulique du microclimat urbain à l'échelle d'une rue de type canyon. *Congrès IBPSA France*, France. pp.n.a. (hal-00312390).

¹⁴⁴ Liébard, A & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, Ed Le moniteur, p 359 a.

¹⁴⁵ Fernandez, P & Lavigne, P. (2009). *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes*, Ed Le moniteur, Paris. p 294.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

Afin de bénéficier des impacts positifs du vent et se protéger de ses effets négatifs, il faut profiter de la capacité du vent à disperser les polluants au niveau du sol et des toits à une vitesse moyenne qui ne dépasse pas 2m/s pour éviter la gêne pour le piéton¹⁴⁶.

Un autre aspect à favoriser est celui de protéger les espaces publics des vents froids et dominants tout en favorisant la ventilation naturelle grâce aux brises d'été.

Nous allons présenter l'impact du vent au niveau du sol pour certaines configurations géométriques :

- Effet de coin : Il s'agit d'un phénomène d'écoulement localisé aux angles des bâtiments.

L'élévation de la différence de gradient de pression entre la façade face au vent et celle qui est en dépression augmente la vitesse du vent. Cela peut être évité par la création d'une ceinture d'arbres de protection au niveau de coins.

- Effet de barre : C'est l'écoulement du vent qui arrive à un bâtiment sous forme de barre caractérisé par une déviation en virile pour une incidence de 45°C. Le phénomène s'accroît si la longueur de la barre est supérieure à 8 fois la hauteur (8×h) avec une hauteur inférieure à 25 m.

- Effet Venturi : C'est l'effet d'entonnoir provoqué par le rétrécissement d'un passage au niveau d'un coin amenant vers une ou plusieurs rues.

La vitesse du vent est augmentée au niveau de l'étranglement et est empiré par la présence d'angles arrondis.

- Effet de canalisation : Cet effet apparaît le long d'une rue rectiligne et peut augmenter la vitesse du vent à travers ce couloir.

Une source de gêne plus importante peut être ressentie tout au long de la rue avec l'association des phénomènes de canalisation et de venturi.

- Effet Wise : relatif à la création d'un rouleau tourbillonnaire lorsque deux bâtiments sont disposés parallèlement et que l'un est très élevé par rapport à l'autre. Une gêne sera ressentie par le piéton dû à la forte composante verticale du vent.

- Effet de sillage : concerne la circulation du vent en aval d'une construction. Plus la densité du bâti est importante plus cet effet sera moins important.

- Effet de tourbillon amont : il est provoqué par l'impact direct du vent sur la façade du côté amont.

¹⁴⁶ Ibid.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

- Effet de passage sous immeuble : il apparaît lorsque l'écoulement du vent traverse le dessous des bâtiments soit dans le cas de pilotis ou de vide traversant le bâtiment de part en part. L'effet s'accroît lorsque le vent est parallèle à l'axe du trou.
- Effet de désaxement : Cet effet apparaît entre deux zones de pressions différentes, il est créé par le décrochement des bâtiments implantés parallèlement et désaxés l'un par rapport à l'autre.
- Effet de pyramide : ce phénomène provient d'un tissu à caractère pyramidal avec une hauteur décroissante de bâtiments.
- Effet de maille : cet effet est créé par la juxtaposition des bâtiments qui forment une poche.

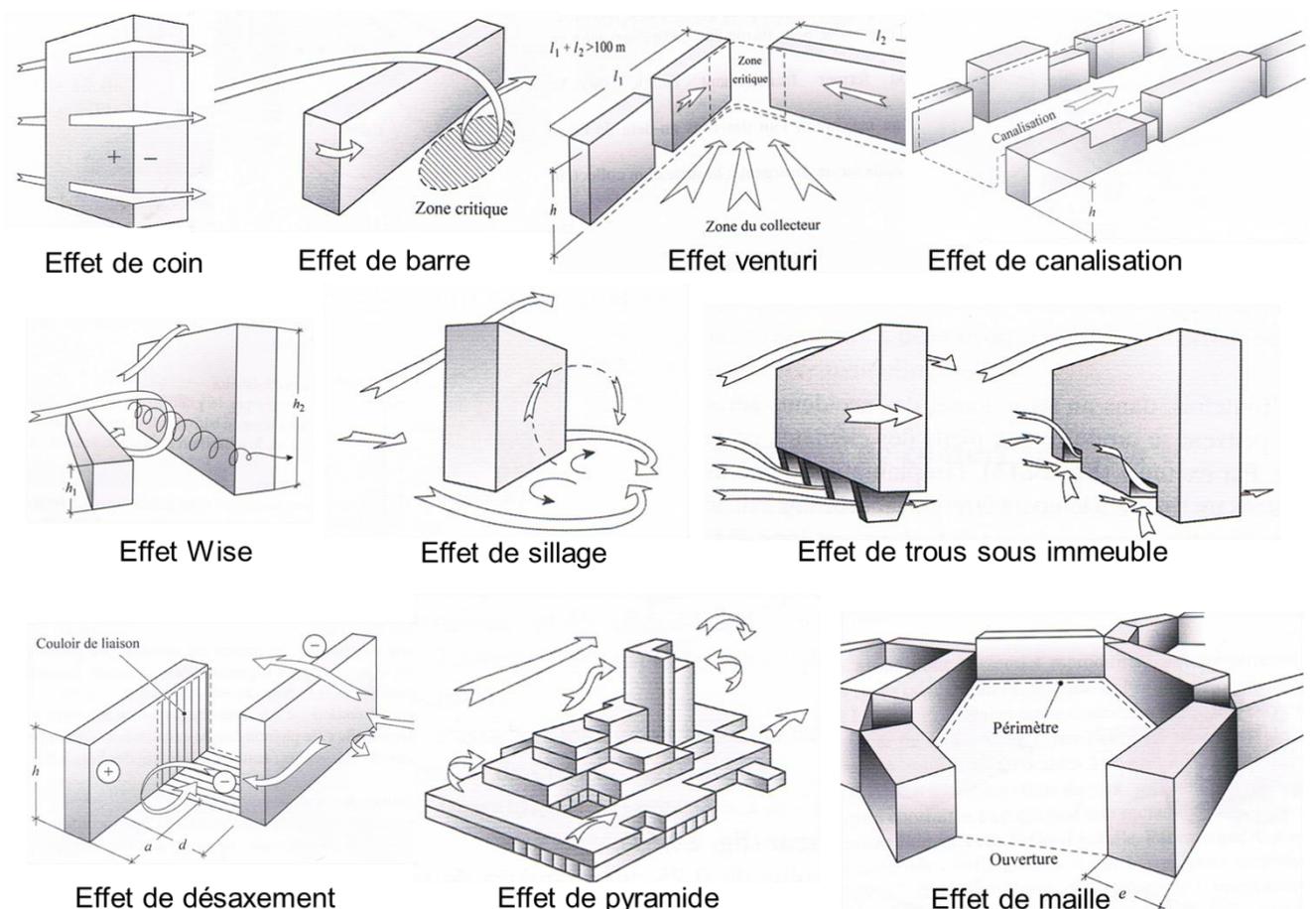


Figure 30: Zones critiques de l'écoulement du vent.

Source : Alain LIEBARD et al.¹⁴⁷

¹⁴⁷ Liébard, A & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, Ed Le moniteur, p 359.

Chapitre III : Climat et milieu construit.

4.3. Humidité en milieu urbain :

Le taux d'humidité dans les espaces extérieurs dépend de la quantité d'eau contenue dans l'air.

Pendant les journées d'été, le taux d'humidité relative contenu dans les villes est inférieur à celui des régions environnantes, contrairement à la nuit où on assiste à une atmosphère plus humide dans le centre des agglomérations et cela est dû à la stagnation de la vapeur anthropique de l'air dans les canyons et aussi à l'irrigation des parcs et des jardins.

En hiver, très peu de différence d'humidité relative est constaté par l'augmentation de la teneur en eau de l'air due à l'utilisation des combustibles dans nos villes.

4.4. Altération de l'air en milieu urbain :

Le climat urbain est caractérisé par une dégradation de la qualité de l'air générée par le rejet de gaz à effet de serre (industrie, véhicules, ...). La pollution peut causer une altération des matériaux, de la végétation et des anomalies sur la santé publique.



Figure 31: Pollution atmosphérique au Caire, en Egypte.

Source : La pollution urbaine en hausse, surtout dans les villes pauvres, selon l'OMS, centre d'actualités de l'ONU, Photo Banque mondiale/Kim Eun Yeul.

En règle générale, la température décroît avec l'altitude.

Dans le cas d'une inversion thermique, les polluants se trouvent bloqués sous une couche d'inversion, la brume s'étale à la base de cette couche en absence du vent qui pourrait

Chapitre III : Climat et milieu construit.

dispenser les polluants¹⁴⁸, et si cette couche est exposée aux ultra-violets solaires, les polluants stagnent à travers cette couche.

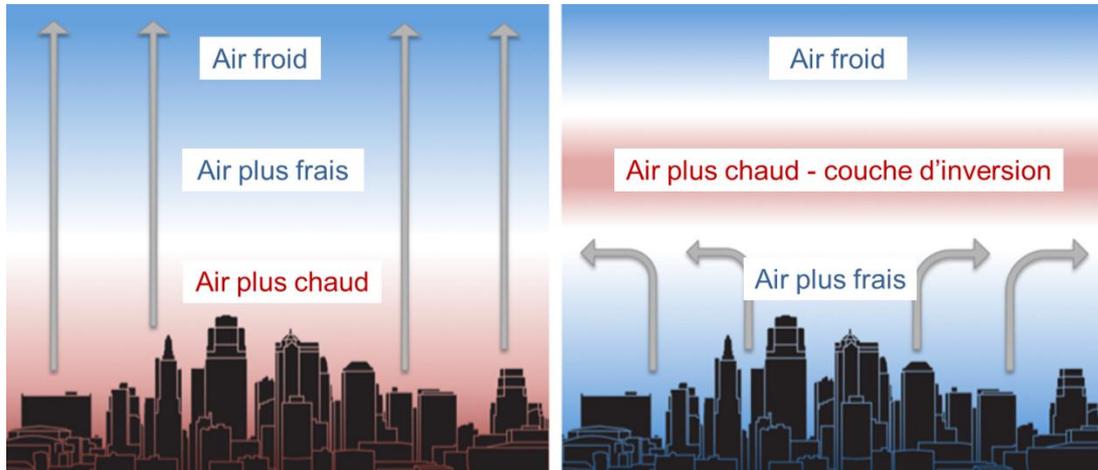


Figure 32: Phénomène d'inversion thermique. Illustré par l'auteur.

Conclusion :

Cette recherche sur le microclimat a permis de souligner l'essentiel des connaissances en la matière. Elle a aussi permis de dresser un panel des différents paramètres climatiques qui interagissent sur les bilans. Les transferts de chaleur et de masse sont la base de la compréhension du microclimat urbain par leur les effets radiatifs et aérauliques.

Nous avons aussi souligné l'interaction entre les paramètres physiques du climat et le milieu construit.

Par ailleurs, la morphologie urbaine affecte les flux de transfert thermiques, radiatifs et aérodynamiques. Dans la continuité de cette recherche bibliographique, le chapitre IV détaille les notions d'ambiance et de confort dans les espaces extérieurs. Cette analyse permet de sélectionner les indices permettant de quantifier d'une façon objective le confort thermique des piétons en milieu extérieur.

¹⁴⁸ Glockner, S. (2000). Contribution à modélisation de la pollution atmosphérique dans les villes. Thèse de doctorat Université Bordeaux 1, p8.

CHAPITRE IV :

Caractérisation du confort thermique extérieur.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Introduction :

L'étude du confort relève une importance par la qualité des ambiances intérieures et extérieures qui interagissent entre l'homme et son environnement.

Toutefois, il faut souligner que le confort est une notion globale : chaleur et froid, lumière, bruit, odeur, paysage, eau, verdure et autres. Les définitions relevées dans la littérature se rapportant au confort s'accordent sur l'importance du confort thermique. Le confort est une sensation qui dépend des paramètres d'ordre individuels et d'autres liés à l'environnement, il fait intervenir des facteurs physiques, physiologiques et psychologiques.

L'analyse de la complexité de cette interrelation dépend de l'aspect subjectif des usagers.

Nous tentons à travers ce chapitre à examiner la notion d'ambiance et de confort dans les espaces extérieurs. En second lieu, les paramètres du confort thermique et les échelles de sensation thermique ont été étudiés pour en faire usage dans l'enquête sur la perception subjective du confort dans les espaces extérieurs.

Pour finir nous distinguons les indices tels que : PMV, PET et UTCI permettant de quantifier la part objective du confort thermique en extérieur afin de les exploiter dans les simulations des espaces urbains.

1. La notion d'ambiance :

Etymologiquement le terme ambiance est dérivé du latin *ambiens*, participe présent du verbe *ambire* (latin) : entourer, environner.

La maîtrise des ambiances inclut la prise en compte des différents phénomènes physiques et sensibles particuliers d'un lieu qui se révèlent par la nature des liens qui structurent l'ensemble de phénomènes¹⁴⁹. On outre son expérimentation ne peut pas se faire sans usager. Elle implique les modalités sensorielles, séparément ou simultanément, et la sensibilité générale de la personne, d'aise ou de malaise résultant d'un ensemble de sensations internes.

Il est crucial de mettre en évidence la nuance entre la notion « d'ambiance » avec celle « des ambiances ».

Il est important de souligner aussi la différence entre la notion « d'ambiance » au singulier avec celle « des ambiances » au pluriel.

« L'ambiance » fait appel à nos sens et dépend de la perception et de l'appréciation de chacun. Elle est définie comme « *la synthèse, pour un individu à un moment donné, des*

¹⁴⁹ Lescop, L. (1999). La représentation des ambiances architecturales et urbaines : Introduction à une pédagogie des ambiances. Thèse de doctorat. Nantes : Université de Nantes, Institut des Sciences de l'Ingénieur en Thermique Énergétique et Matériaux, 475 p.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

*perceptions multiples que lui suggère le milieu qui l'entoure. En ce sens, cette ambiance est unique. »*¹⁵⁰

Quant aux « ambiances », elles retiennent l'interaction des différents phénomènes physiques, l'approche sensible liée à l'expérience de l'utilisateur qui implique la perception et les sensations ressenties par l'homme dans son environnement, et enfin la dimension esthétique.

Un ensemble d'attributs donnent une définition formelle du concept ambiance, ils sont d'ordre physique, psychosociologique et architectural :

- Physique : Plusieurs signaux physiques d'une situation peuvent être repérables tels que : la lumière, l'ombre, la chaleur, le bruit, l'odeur, la couleur,etc.
- Psychosociologique : se rapportant à l'interaction des signaux avec la perception et les représentations sociale et culturelle.
- Architectural : Le signal peut se composer avec l'organisation spatiale donnant naissance à une construction perçue.

Concernant la méthodologie de recherche sur les ambiances architecturales et urbaines nous pouvons citer : les mesures et les simulations afin de quantifier l'interaction des différents phénomènes physiques d'un lieu, des enquêtes sociologiques, psychosociologiques et des observations directes afin d'étudier l'approche sensible liée à l'expérience de l'humain dans l'espace.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'expérience esthétique de la ville, une étude à partir d'une approche littéraire a été faite et qui prend en compte l'expérience de l'espace et sa plurisensorialité¹⁵¹.

La notion d'ambiances se réfère à des échelles spatiales et temporelles statiques ou en mouvement utilisées pour l'habitat, l'espace public, les espaces de travail ou de commerce et les espaces de la mobilité.

Son étude dépasse les notions de confort et de nuisance uniquement mais nécessite une approche pluridisciplinaire à travers ses dimensions physiques, climatiques, sensibles, sociales et culturelles.

1.1. Les éléments constitutifs d'une ambiance :

Une ambiance est née dans un environnement construit, chez les usagers sous des conditions physiques. Selon GERARD Hégron : « la mise en relation des descripteurs morphologiques

¹⁵⁰ Adolphe, L. (1998). La recherche sur les ambiances architecturales et urbaines. In *Les Cahiers de la Recherche Architecturale et urbaine*, n°42/43 ('Ambiances architecturales et urbaines'), pp.7-11.

¹⁵¹ Peneau, J-P. (2000). Les ambiances urbaines. In *données urbaines*. Paris : *Anthropos*, 2000, p.380.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

et physiques d'un environnement architectural ou urbain avec les représentations cognitives des usagers explicite les spécificités d'ambiance d'un lieu »¹⁵².

Il est en effet nécessaire d'éviter la séparation entre la perception d'un lieu par les usagers et l'objet perçu. Dans cette optique, l'étude des ambiances articule les données des phénomènes physiques et leurs interactions avec l'aspect de la forme architecturale et urbaine construite d'un contexte donné, les usagers de ces espaces et leurs perceptions.

« Les ambiances conjuguent objectif et subjectif ; elles permettent de questionner les relations entre conception des espaces (formes construites, objets matériels mesurés...) et expérience sensorielle des individus (perceptions, représentations, usages...) »¹⁵³.

Ainsi, il est donc possible de définir l'ambiance au moyen d'un modèle conceptuel général et basique :

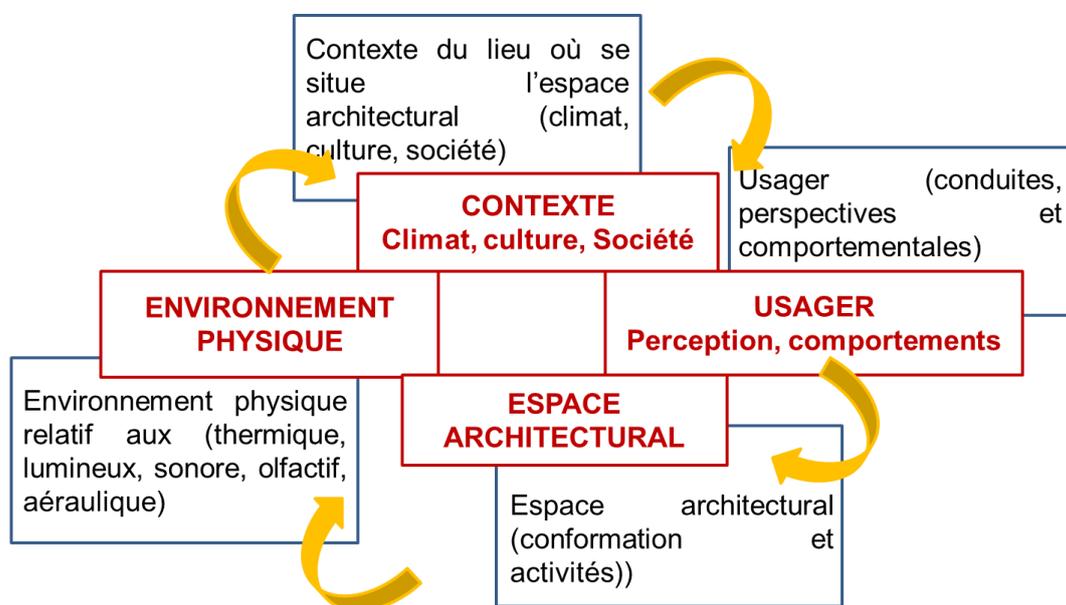


Figure 33: Eléments constitutifs des ambiances. Elaboré par l'auteur.

D'autres travaux menés sur les ambiances ont approuvé qu'il existe trois composantes caractéristiques sur le thème en question¹⁵⁴ :

- Les sujets : ce sont les usagers qui fréquentent l'espace, ils perçoivent leur environnement physique qui est l'objet à travers des représentations cognitives.

¹⁵² Gérard, H, Henry, T, (2007). Ambiances architecturales et urbaines. De l'environnement urbain à la ville sensible. Coutard, O and Lévy, J-P. Ecologies urbaines : Etat des savoirs et perspectives, *Economica - Anthropos*, pp.184-198, 2010. hal-00995472f.

¹⁵³ Arnaud, P, (2013). « Contexte spatial des ambiances urbaines et usage des lieux », *Ambiances* [En ligne], Environnement - Modélisation - Caractérisation, p 03, mis en ligne le 07 février 2013, consulté le 02 mai 2017. URL : <http://ambiances.revues.org/261> ; DOI : 10.4000/ambiances.261.

¹⁵⁴ Gérard, H, Henry, T, (2007). Ambiances architecturales et urbaines. De l'environnement urbain à la ville sensible. Coutard, O and Lévy, J-P. Ecologies urbaines : Etat des savoirs et perspectives, *Economica - Anthropos*, pp.184-198, 2010. hal-00995472f.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

- Les objets : c'est les phénomènes physiques, anthropiques qui interagissent avec l'environnement construit et naturel.
- L'interface : représente l'ensemble des réactions de l'homme dans une ambiance bien déterminée. Elles peuvent être physiologiques, psychologiques, émotionnelles et esthétiques.

1.2. Les échelles d'une ambiance :

1.2.1. L'échelle climatique :

Les facteurs climatiques conditionnent le contexte de l'ambiance. Le comportement des usagers varie d'une manière consciente ou inconsciente. Sous une ambiance thermique extérieure très chaude, la personne cherche plutôt de l'ombre pour avoir plus froid.

Un occupant se trouvant dans une ambiance froide, va chercher le soleil. Il existe des conditions de neutralité qui dépendent de plusieurs paramètres comme l'âge, la santé,etc.

1.2.2. L'échelle spatiale :

D'un point de vu spatial, l'ambiance se produit dans l'aménagement de l'espace urbain et l'environnement construit, constitué de volumes, surfaces, dispositifs et matériaux qui l'entourent.

« Même si les ambiances sont compréhensibles dans l'instant, dans l'immédiateté de la relation homme-espace, elles doivent être lues à plusieurs niveaux. La notion de milieu, désigne ce qui est autour du lieu, mais dans quoi il est plongé. Par extension, on retiendra que le milieu peut se définir comme le contexte signifiant, autant du point de vue du cadre de vie que de l'action humaine »¹⁵⁵.

1.2.3. L'échelle temporelle :

Les oscillations quotidiennes et saisonnières dépendent du facteur temps et conditionnent l'état des ambiances. Selon plusieurs échelles temporelles, l'ambiance qu'elle soit thermique ou autres subit des variations au courant de l'année, du mois, de la semaine, du jour ou des heures.

1.3. L'ambiance thermique :

Elle dépend de l'exposition de l'homme au froid ou à la chaleur et fait appel à plusieurs facteurs : le mouvement de l'air, les précipitations, la lumière et le rayonnement solaire.

¹⁵⁵ Arnaud, P. (2013). « Contexte spatial des ambiances urbaines et usage des lieux », *Ambiances*. [En ligne], Environnement - Modélisation - Caractérisation, p 03, mis en ligne le 07 février 2013, consulté le 02 mai 2017. URL : <http://ambiances.revues.org/261> ; doi : 10.4000/ambiances.261.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Quelque soit l'ambiance thermique, la température de l'homme doit demeurer constante, en état d'homéothermie.

1.3.1. Notions sur les ambiances thermiques :

Trois cas d'ambiances thermiques figurent : les ambiances thermiques froide, chaude ou neutre.

- **Ambiance thermique froide** : Pour évaluer la contrainte physiologique de ce cas, on doit évaluer la température des surfaces cutanées ($T_{\text{froid}} \geq 17^{\circ}\text{C}$).
Les flux convectifs et radiatifs permettent d'évacuer la chaleur produite par le métabolisme énergétique de l'homme, ce qui contribue à une lutte contre le froid.
- **Ambiance thermique chaude** : Ce cas aura lieu lorsque les flux énergétiques et radiatifs sont suffisants pour évacuer le métabolisme énergétique, où l'organisme émet l'évaporation de la sueur.
- **Ambiance thermique neutre** : Les valeurs d'ambiances thermiques neutres sont : dans le cas d'un travail sédentaire, la vitesse de l'air est estimée de 0.1 à 0.25 m/s, l'humidité de 50 à 60 % et la température sèche de 20°C . Dans le cas d'un travail modéré la température s'évalue à 17°C et 15°C pour le travail intense.
- En ce qui concerne l'ambiance thermique chaude et froide, nous pouvons qualifier l'ambiance comme tolérable lorsque les mécanismes de lutte sont suffisants pour assurer l'équilibre.

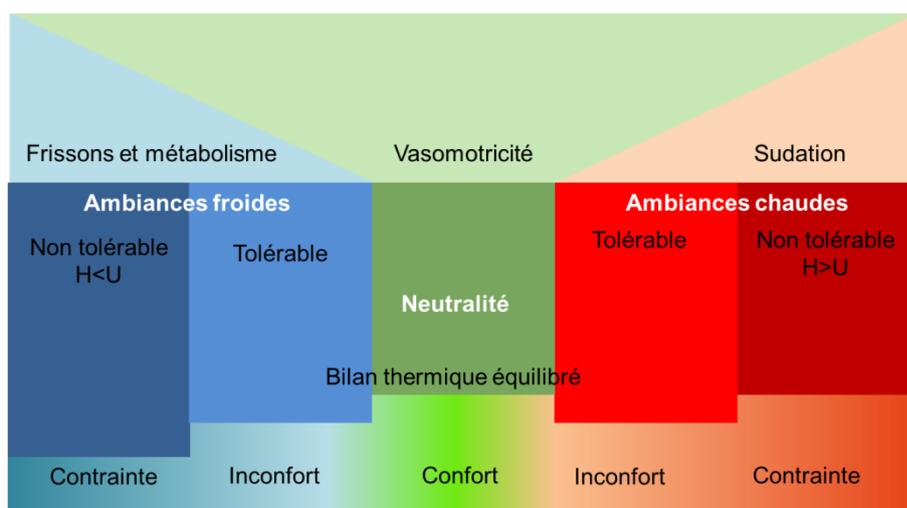


Figure 34: Ambiance thermique : sensations et réactions.

Source : www.ergonomie.chups.jussieu.fr

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

1.3.2. Ambiance thermique acceptable pour le confort :

Il est difficile de définir une ambiance satisfaisante à chacun d'entre nous du fait des différences entre les individus. En outre, il est essentiel de prévoir des ambiances acceptables pour tous malgré la variabilité des conditions environnementales.

L'ambiance thermique acceptable pour le confort est définie par la satisfaction via l'environnement thermique.

Une ambiance confortable est assurée quand l'organisme humain maintient, constante, la température corporelle. Cet état de neutralité thermique ne fait pas appel d'une manière perceptible les mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le froid et le chaud.

L'inconfort est ressenti par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps ou par l'effet tiède ou frais dans l'ensemble du corps exprimé par des indices de PMV et PPD.

2. La notion de confort :

Introduisons avec plus de détail les définitions du confort, pour pouvoir étudier le confort thermique, objet de notre recherche.

Le confort est une notion étroitement liée à la sensation de bien-être et qui ne possède pas de définition absolue. A l'époque médiévale, le terme latin *Confortare* signifiait le renforcement et la fortification ; au XVIII^e siècle, le terme confort signifiait un bien-être matériel ; le terme ne fut introduit en France qu'au XIX^e et était très lié aux classes sociales de l'époque (noblesse, bourgeoisie, ouvrière).

SLATER Keith indique que le confort est un terme si nébuleux à définir, et si subjectif, qu'un consensus universel sur son sens est presque impossible à obtenir¹⁵⁶. Toutefois, il en précise les dimensions en le définissant comme étant un état agréable d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et l'environnement. Cet état agréable d'harmonie, comme le précise la définition du dictionnaire pour le terme confort, est l'état d'une personne qui exprime un sentiment de bien-être que l'on pourrait aussi 'partiellement' interpréter comme absence de gêne.

La satisfaction vis-à-vis de l'environnement fait appel à toutes les dimensions physiques des ambiances, mais également à des aspects comportementaux et psychologiques¹⁵⁷.

¹⁵⁶ Slater, k, (1986). Discussion paper the assessment of comfort, *the journal of the textile institute*, 77:3, 157-171, doi: 10.1080/00405008608658406.

¹⁵⁷ <https://www.energieplus-lesite.be>.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Au niveau physique, ou physiologique, on distingue les confort respiratoires, thermiques, acoustiques et visuels. Ces aspects sont généralement assez bien connus et de nombreuses normes définissent des seuils minimums et/ou maximums pour les grandeurs physiques concernées (éclairage, température, puissance acoustique, etc.). Ces grandeurs ne sont pas nécessairement absolues : elles peuvent varier dans le temps. Ainsi, les plages de confort thermiques ne sont pas les mêmes en été et en hiver, du fait notamment d'adaptation physiologique (modification du rythme cardiaque et de la capacité de sudation).

Au niveau comportemental, c'est la capacité d'action de l'occupant dans le bâtiment qui est mise en évidence. Car les conditions intérieures et les attentes sont variables dans le temps : on accueillera plus favorablement un courant d'air en été qu'en mi-saison. Il est donc important que l'occupant ait une capacité d'action sur les organes de contrôle des systèmes du bâtiment, sur son activité et sur son habillement.

Au niveau psychologique, c'est surtout l'implication de l'occupant qui est mise en avant lorsque l'on parle d'énergie. Il ne suffit pas qu'il ait la capacité de contrôler son environnement si ces besoins physiologiques le demandent, il faut qu'il ait conscience de cette capacité. L'implication fait donc intervenir la compréhension du fonctionnement du bâtiment, la capacité d'anticiper les conséquences de ses actions sur l'ambiance et une compréhension du lien entre ses actions et leur impact énergétique. Par exemple, une personne avec une conscience environnementale élevée acceptera plus facilement une température relativement basse, si elle sait qu'elle contribue par-là à des économies d'énergie fossile.

Ces trois dimensions, physiologiques, comportementales et psychologiques sont fortement liées, comme le montre l'organigramme ci-dessous.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

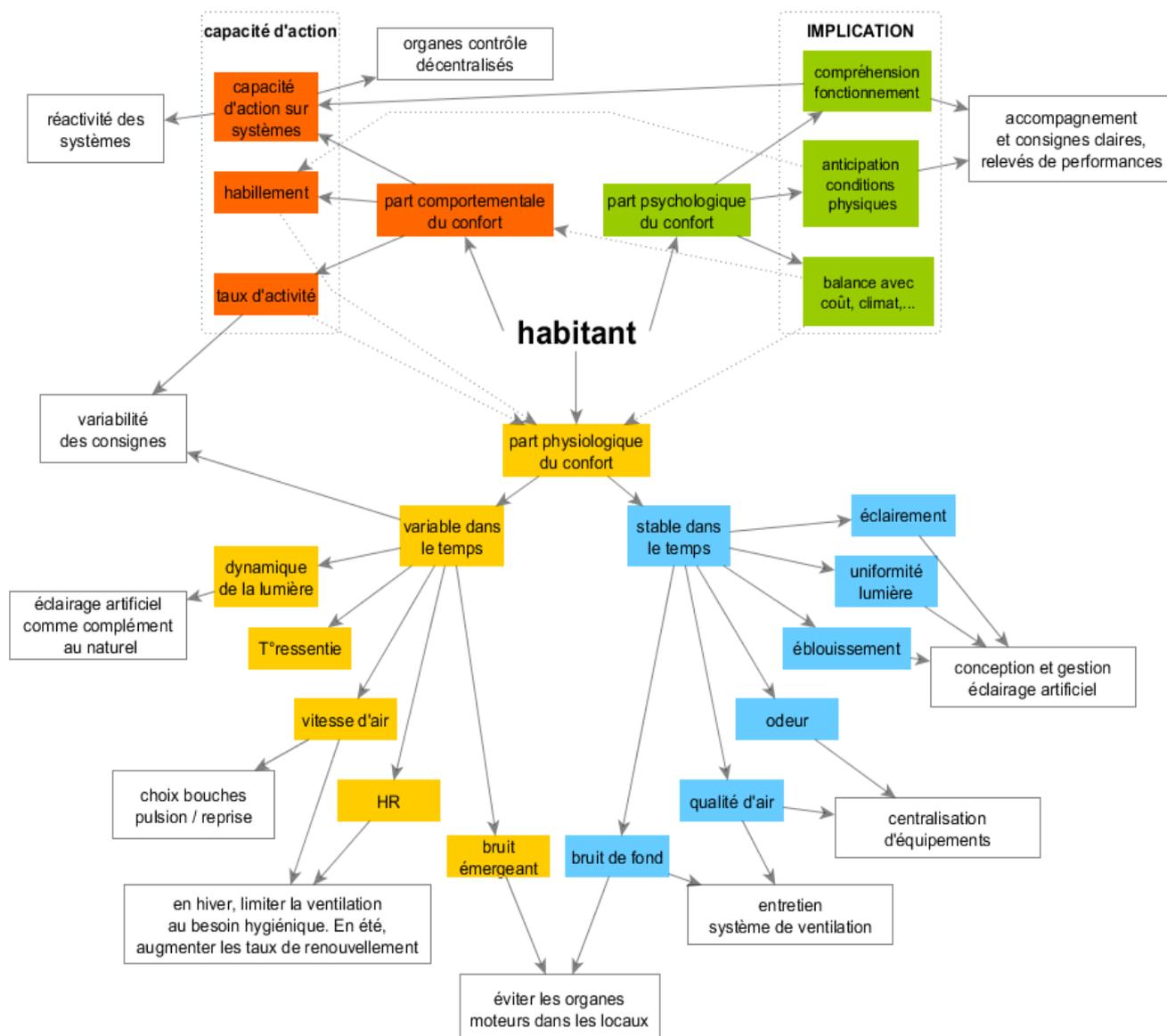


Figure 35: Multiples dimensions de confort.

Source : <https://www.energieplus-lesite.be>

Les situations de confort dépendent des relations entre l'individu et son environnement extérieur.

Afin de caractériser le confort extérieur, quatre paramètres microclimatiques nécessitent d'être évalués : la température radiante moyenne, la température de l'air, l'humidité de l'air et la vitesse du vent¹⁵⁸.

¹⁵⁸ Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Thermal comfort in an east–west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1-4), 223–237. doi:10.1007/s00704-005-0194-4.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Le corps humain perçoit ces variantes et son organisme répond et se modifie en fonction de la température interne du corps, de la température cutanée, de la transpiration et de la circulation sanguine.

D'autres paramètres interviennent et modifient le confort urbain, tels que : les facteurs morphologiques, spatio-temporels et les propriétés des matériaux de revêtements,....etc.

Le confort des usagers est en général défini par la négative, absence d'inconfort.

Les ambiances intérieures font référence aux normes pour assurer le confort. Mais en ce qui concerne les ambiances extérieures, l'aménagement urbain doit atténuer la gêne et le risque sur la qualité de l'air, l'éclairage naturel, l'ensoleillement et l'ombrage.

2.1. Le confort thermique :

A partir d'un processus cognitif impliquant plusieurs phénomènes, nous pouvons obtenir les conditions de confort.

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique, et ne dépend pas seulement de la température mais aussi de l'hygrométrie de l'air ambiant « *confort thermo hygrométrique* »¹⁵⁹. Il est déterminé par « *l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement* »¹⁶⁰. Il est atteint grâce à quatre mécanismes : la conduction, la convection, l'évaporation et le rayonnement. Il est donné par l'ensemble des interactions entre l'occupant et l'enveloppe bâtie. « *Complexe, il peut être décrit avec de nombreux paramètres physiologiques, psychologiques, physiques, quantitatifs ou qualitatifs, plus au moins incertains et imprécis. Pluridisciplinaire, il est tout ce qui contribue au bien-être, et s'exprime par une sensation agréable procurée par la satisfaction de besoins physiologiques et l'absence de tensions psychologiques* »¹⁶¹.

Une autre définition attribuée au présent sujet : « *A été défini comme étant la condition dans laquelle aucune contrainte significative n'est imposée aux mécanismes thermorégulateurs du corps humain. Il permet l'obtention de conditions optimales pour tous les systèmes fonctionnels de l'organisme ainsi qu'un haut niveau de capacité de travail* »¹⁶².

¹⁵⁹ Fernandez, P, Lavigne, P, (2009). Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes, *Ed Le Moniteur*, Paris, p93.

¹⁶⁰ Liebard, A, De Herde, A, (2005). Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatique : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, *Ed Le Moniteur*, Paris, p 27.

¹⁶¹ Cartin R, Moujalled B et Guarracino G, (2005), complexité du confort thermique dans les bâtiments, *6ème congrès Européen de Science des Systèmes*, Paris, 19-20.

¹⁶² Liebard, A, De Herde A, (2005). Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatique : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, *Ed Le Moniteur*, Paris, p 27.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

2.1.1. Les approches du confort thermique :

Il existe trois approches qui traitent le confort thermique à savoir :

- **L'approche physique** : Dans ce cas, c'est le corps qui est considéré comme un système thermique permettant d'évaluer les échanges entre ce dernier et l'environnement. Ces transferts de chaleur s'effectuent à travers la peau et les vêtements¹⁶³.

« L'homme produit et échange de la chaleur. Sa production de chaleur interne se répartit dans sa masse corporelle tandis que ces échanges thermiques externes se font à la surface cutanée »¹⁶⁴.

La diffusion de la chaleur entre l'homme et l'ambiance environnante s'effectue par :

La convection (C) : c'est l'échange de chaleur entre l'organisme et le fluide qui l'entoure (généralement gazeux), qui représente plus de 35 % des pertes de chaleur. Elle dépend de la vitesse du fluide et de la tenue vestimentaire.

La conduction : dans le cas où l'individu se trouve en contact direct avec un solide, le corps humain échange la chaleur avec celui-ci par un mode de transfert qui est la conduction.

Mais dans la majorité des cas on peut le négliger, car il représente 1% de l'ensemble des échanges. En fait, l'impact de la conduction sur le confort thermique est très faible, même si le contact d'un carrelage frais peut apporter une sensation agréable en été, ou à l'inverse, le sable d'une plage ayant une sensation de brûlure.

Le rayonnement (R) : les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan.

Selon Givoni, il existe un autre élément intervenant sur l'échange thermique entre l'opérateur et l'ambiance, qui est la texture des vêtements, il dit : *« Le régime de ces relations sera aussi affecté par d'autres facteurs tels que les propriétés des matériaux qui constituent les vêtements et la forme de ces vêtements, qui peuvent varier dans une très grande mesure »¹⁶⁵.*

L'évaporation (E) : l'évaporation est le moyen le plus efficace pour éliminer la chaleur produite par le corps humain. Plusieurs formes existent : au niveau des voies respiratoires, au niveau de la peau ou par sudation.

¹⁶³ Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., & Konishi, M. (2002). Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637–646. doi:10.1016/s0378-7788(02)00014-2.

¹⁶⁴ DuBois cité par Candas, V. (2003), "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : *"Habitat, confort et énergie"*. Actes de la 13e Journée du CUEPE, P : 5.

¹⁶⁵ Givoni, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Editions Le Moniteur; Paris, P : 40.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

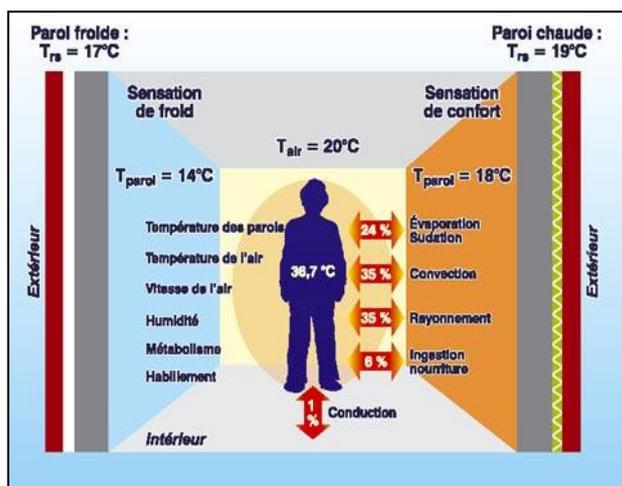


Figure 36: Echanges thermiques entre l'homme et son environnement.

Source : Allain LIEBARD. Op.cit., p28.

En effet, dans le modèle physique, l'être humain consomme de l'énergie et produit de la chaleur qu'il doit évacuer pour entretenir l'équilibre avec son environnement. Différentes situations peuvent figurer :

Bilan > 0 :

L'individu est en hyperthermie

L'organisme emmagasine la chaleur. Les mécanismes de thermolyse ne sont pas suffisamment efficaces et risquent d'engendrer des pathologies.

Bilan < 0 :

L'individu est en hypothermie

Dans ce cas l'organisme perd plus de chaleur qu'il en gagne ou qu'il en produit.

Cette situation engendre elle aussi des pathologies.

Bilan = 0 :

Zone de neutralité thermique

Quand la température corporelle est stable, les échanges thermiques avec le milieu extérieur égalent à zéro (c'est la situation la plus favorable). L'opérateur se situe dans une zone de neutralité thermique.

- **L'approche physiologique :** Des actions instinctives se produisent dans des cas comme le frisson et la transpiration. Celle-ci s'effectuent en dehors de l'état de neutralité et seront formulées par des réponses subjectives.

Il s'agit d'un équilibre entre la thermogénèse qui est une production de chaleur et la thermolyse qui est une perte de chaleur.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Cet équilibre est assuré par la thermorégulation : « un système complexe de réponses automatiques et volontaires qui gouvernent le taux de perte de chaleur du corps, et dans certains cas, également la production de la chaleur. Bien que dépendant de facteurs physiques tels que des différences de tension de vapeur d'eau et de température entre la peau et l'environnement, l'échange de chaleur superficielle du corps peut être contrôlé par une régulation dynamique des divers systèmes physiologiques et des régimes vestimentaires »¹⁶⁶.

- **L'approche psychologique** : dans ce modèle, l'être humain interprète le confort par une évaluation du climat.

L'évaluation sensorielle du niveau de confort ou d'inconfort est reportée par des réponses verbales. Donc c'est une notion subjective et personnelle à chaque individu.

Une nouvelle notion de confort adaptatif prend en considération ces variations d'ordre sociales, psychologiques, physiologiques et culturelles¹⁶⁷.

Le modèle physique et physiologique prend en considération la température de la peau qui est obtenue par des modèles de régression ou de bilan. En outre, le premier cas est confiné à certaines zones climatiques. Quant au deuxième, il est applicable pour toute situation¹⁶⁸.

L'être humain doit maintenir une température du corps constante à 37°C.

Il doit assurer son équilibre avec l'environnement par différents mécanismes de thermorégulation physiologiques ou comportementaux pouvant modifier le bilan thermique.

Une modification involontaire, s'il s'agit d'une régulation physiologique provoquant un ajustement de la résistance thermique externe par une perte de chaleur. Elle s'effectue par l'évaporation de l'eau par transpiration, évaporation transpiratoire ou par sécrétion.

Une autre forme de perte de chaleur interne se produit par vasodilatation ou frissonnement.

Une régulation volontaire se rapporte aux gestes comportementaux actifs et un ajustement des vêtements.

Nous allons voir sur la figure suivante (Figure 37) les facteurs de sensation thermique.

¹⁶⁶ Givoni, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. *Editions Le Moniteur*; Paris. p : 52.

¹⁶⁷ De Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *UC Berkeley: Center for the Built Environment*. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>.

¹⁶⁸ Hoppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *energy and building*.

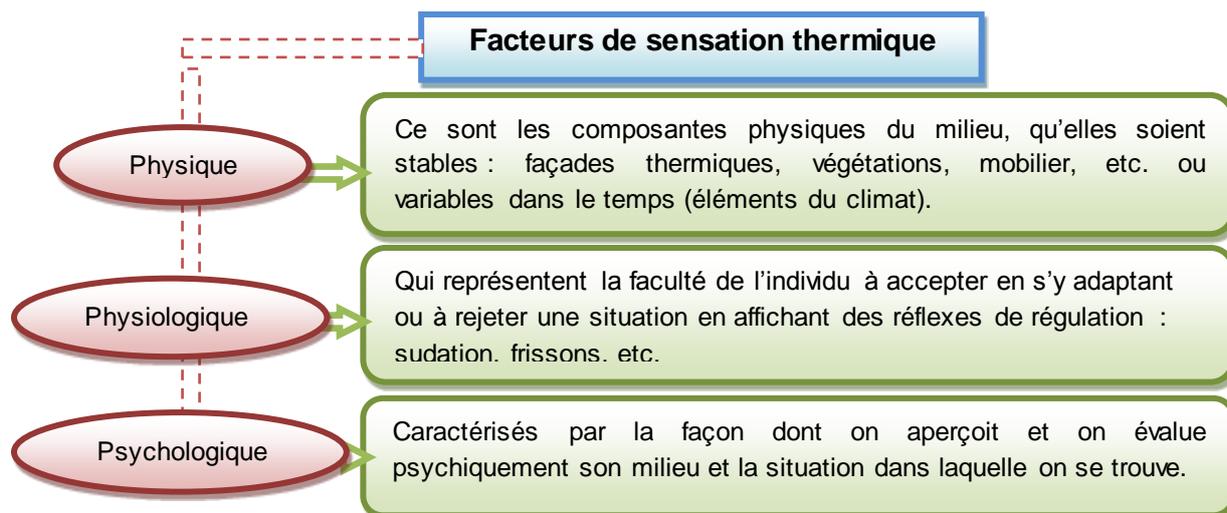


Figure 37: Facteurs de sensation thermique. Illustré par l'auteur.

2.1.2. Paramètres du confort thermique :

Suite aux variations climatiques extérieures, le corps humain doit maintenir sa température interne stable, autour de 37°C.

L'état de confort est assuré par l'équilibre entre la production de chaleur, celle de la thermogénèse et la perte de chaleur quand il s'agit de la thermolyse.

Par ailleurs, le confort thermique est influencé par des paramètres relatifs à :

- **L'ambiance intérieure** : 6 paramètres environnementaux relatifs à l'homme interviennent :

Le métabolisme : C'est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.

Le niveau d'activité se mesure en "met", les valeurs caractéristiques de l'activité métabolique des individus sont fournies dans le tableau suivant :

Activité	Production de chaleur	
	MET	W/m ²
Repos	0.8	46
Assis inactif	1	58
Debout, décontracté	1.2	70
Assis en activité travaux de bureau	1.2	70
Activité légère debout	1.6	93
Activité moyenne debout	2	116
Activité importante, travaux lourds	3	174

Tableau 7: Production de chaleur en fonction de l'activité

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

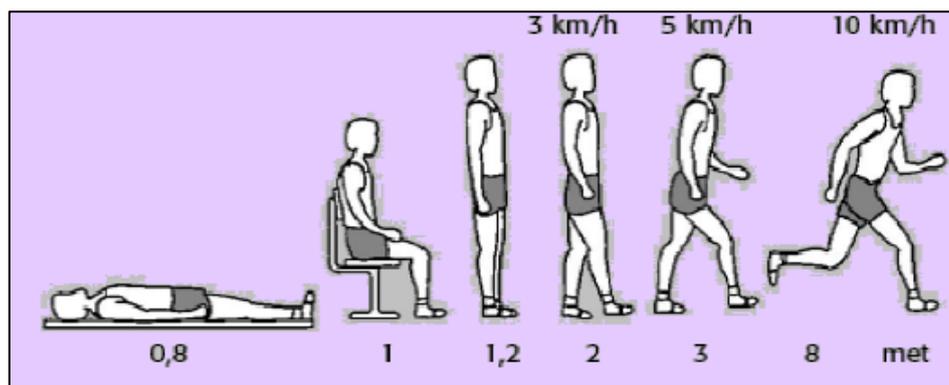


Figure 38: Production de chaleur en fonction de l'activité.

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006.

L'habillement : Il représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

"A des températures de l'air inférieures à 35°C, l'effet est toujours de réduire la perte de chaleur « sèche » du corps et ainsi de produire un effet d'échauffement. A des températures de l'air supérieures à 35°C, les effets des vêtements sont plus complexes. D'un côté ils réduisent le gain de chaleur « sèche » en provenance de l'ambiance mais d'un autre côté, ils augmentent l'humidité et réduisent la vitesse de l'air en contact avec la peau, ce qui se traduit par une diminution du refroidissement résultant de l'évaporation de la sueur "¹⁶⁹.

Donc 'est une deuxième barrière après la peau, son effet est lié aux :

Paramètres internes (liés aux vêtements) : la couleur et la perméabilité à l'air des vêtements.

Paramètres externes : l'humidité, vitesse de l'air, métabolisme

L'unité de la résistance thermique est le "clo", en terme physique le clo est équivalent à 0,18°C.h.m²/kcal.

Habillement	Isolement thermique	
	clo	m ² K/W
Aucun	0	0
Shorts	0.1	0.015
Habits légers d'été	0.5	0.08
Habits léger de travail	0.7	0.11
Habits d'intérieur pour hiver	1	0.155

Tableau 8: Isolement thermique dû aux vêtements.

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006

La température ambiante de l'air Ta : C'est le premier paramètre à contrôler, il ne peut donner une idée précise du confort prévalant dans une ambiance quelconque.

¹⁶⁹ Givoni, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Editions Le Moniteur; Paris. p : 84.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Son évaluation doit être couplée à d'autres paramètres tels que la vitesse de l'air et l'humidité. La sensation de chaleur est liée à l'augmentation de la température ambiante. Lors de l'élévation du taux d'humidité et de la diminution de la vitesse de l'air la température et l'humidité de la peau augmente. Dans le cas contraire, la peau reste sèche.

La mesure de la température de l'air (T_a) se fait à l'aide d'un thermomètre au bulbe protégé du rayonnement solaire et du rayonnement des parois du local¹⁷⁰. L'intervalle du confort va généralement de 18° à 25°C.

La température des parois T_p : Elle donne une idée sur l'inertie thermique d'une paroi. Une différence de 4°C entre celle-ci et l'air ambiant.

Elle se fait à l'aide d'une sonde de contact ou sonde à rayonnement infrarouge. Pour l'architecte, il suffit de choisir des matériaux de construction et de les agencer de façon à obtenir une paroi présentant un coefficient de conductibilité thermique valable (égale ou inférieure à 1,2) et à toujours veiller à ce que la différence de température entre la paroi et l'air ambiant ne dépasse pas les cinq degrés Celsius¹⁷¹.

La température du confort ressentie T_{rs} est dite encore température opérative ou température résultante sèche : $T_{rs} = (T_a + T_p) / 2$ ¹⁷².

L'humidité relative de l'air (HR) (hygrométrie) : C'est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.

L'humidité conditionne l'effet d'évaporation dans l'air, qui a un impact sur le refroidissement de la sueur. Cet état est relatif à la différence de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air et celle de la peau.

L'intervalle de confort, bien que dépendant d'autres paramètres dont la température et la vitesse de l'air, peut aller de 20 à 80%, au-dessous de 20% l'air devient trop sec au point de provoquer des irritations aux lèvres et aux yeux. Au-dessus de 80%, l'air devient trop humide¹⁷³.

La vitesse de l'air : Elle détermine les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Elle influence le confort dès qu'elle est supérieure à 0,2m/s.

¹⁷⁰ Cabriol, T, Faure, D, Roux Daniel. (1982). Chauffage de l'habitat et énergie solaire, tome1: Confort thermique et techniques de chauffage, *Ed Edisud*, p60.

¹⁷¹ Noha, S. (2010). La notion de confort thermique : entre modernisme et contemporain, cours en ligne, Grenoble : *ENSA, publication ENSAG*, Cours, p60, disponible sur : <http://www.grenoble.archi.fr>.

¹⁷² Liebard, A, De Herde André. *Op cit.*, p 28.

¹⁷³ Cabriol, T, Faure, D, Roux, D. *Op cit.*, p33.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

C'est en effet à partir de cette vitesse qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu de taille moyenne. Les courants d'air peuvent agir positivement sur le confort dans une ambiance chaude et humide¹⁷⁴.

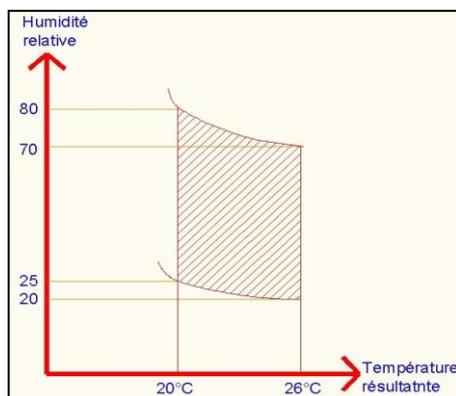


Figure 39: Polygone du confort.

Source : Thierry CABIROL. *Op.cit.*, p62. Traité par l'auteur.

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.

- **L'ambiance extérieure :** d'autres paramètres sont à prendre en considération additionnés à ceux cités précédemment.

Les apports solaires : directs, indirects et diffus.

La température de la voûte céleste.

Les phénomènes naturels : la pluie, le vent, la grêle, la neige, etc.

L'appréciation du confort thermique dans les espaces extérieurs est particulièrement liée aux rayonnements solaires reçus par les individus. Le vent peut paraître comme élément gênant dans l'espace public. Par contre, en période chaude, il favorise l'évacuation de la chaleur.

En effet, les transferts de chaleur sont très complexes, et cela est dû à plusieurs facteurs liés à l'environnement construit comme les matériaux, les couleurs et la végétation.

Le confort extérieur est un phénomène d'étude spécifique lié directement à l'effet d'îlot de chaleur urbain avec une augmentation de la température extérieure. Une étude portée sur le confort thermique extérieur d'une zone urbaine située à Bologne sur des blocs urbains organisés autour des cours intérieures a été faite. En effet, des simulations ont été comparées (avant et après la rénovation) afin de comprendre les variables pouvant influencer le microclimat¹⁷⁵.

¹⁷⁴ Ibid, p30.

¹⁷⁵ Jacopo, G, Kristian, F. (2017). Une étude sur l'utilisation de la carte de microclimat extérieur pour aborder les solutions de conception pour la régénération urbaine, *journal Energy Procedia* 111 - 502.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

2.1.3. La sensation thermique :

L'ambiance thermique d'un contexte précis est définie par des réponses subjectives personnelles à chaque individu. L'aspect quantitatif et qualitatif de l'état de cette situation correspond à la sensation thermique : « Afin de percevoir son environnement et de pouvoir réagir en conséquence, de manière autonome ou volontaire, l'être humain est équipé de capteurs sensoriels. Ils constituent une interface entre le sujet et le monde extérieur. Les mécanismes sensoriels sont les mêmes, quelle que soit la stimulation »¹⁷⁶.

En outre, la chaleur et le froid sont perçus par les thermorécepteurs dont la fréquence de l'information est proportionnelle à la température. « Les thermorécepteurs sont capables d'adaptation, c'est-à-dire que leur activité s'estompe avec le temps alors que le stimulus perdure. Ceci a pour conséquence que la même exposition à un stimulus donné engendrera des activités (donc des sensations) différentes selon la température d'adaptation initiale »¹⁷⁷.

- Echelles de sensation thermique :

Différentes échelles de variation de la sensation thermique ont été développées, allant du chaud au froid, où la température diminue de 3°C d'une étape à l'autre.

Le tableau suivant nous indique deux échelles, les plus utilisées, celle de Bedford et d'Ashrae.

Echelle de Bedford	Echelle d'Ashrae	Indice numérique
Beaucoup trop chaud	Chaud	7
Trop chaud	Tiède	6
Confortablement tiède	Légèrement tiède	5
Confortable	Neutre	4
Confortablement frais	Légèrement frais	3
Trop frais	Frais	2
Beaucoup trop frais	Froid	1

Tableau 9: Echelles de sensation thermique.

Source : Bassam MOUJALLED¹⁷⁸

¹⁷⁶ Narçon, S. (2001). Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort, thèse de doctorat, l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, p : 9.

¹⁷⁷ Candas, V. (2003). "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : "Habitat, confort et énergie". Actes de la 13e Journée du CUEPE, p : 12.

¹⁷⁸ Moudjalled, B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, Thèse de doctorat en Génie civil, INSA, Lyon.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Des études précédentes ont défini d'autres échelles pour une meilleure évaluation : la sensation, l'agrément et la préférence.

Echelle de jugements perceptifs (sensation)	Echelle de jugements d'évaluatifs	Echelle de préférence thermique
+3 Très chaud	4 Acceptable	+3 Beaucoup plus chaud
+2 Chaud	3 Légèrement inacceptable	+2 Plus chaud
+1 Légèrement Chaud	2 Inacceptable	+1 Un peu plus chaud
0 Neutre	1 Très inacceptable	0 Ni plus chaud ni plus froid
-1 Légèrement froid		-1 Un peu plus froid
-2 Froid		-2 Plus froid
-3 Très froid		-3 Beaucoup plus froid

Tableau 10: Les échelles de jugements subjectifs sur les conditions thermiques

Source : Bassam MOUJALLED¹⁷⁹.

2.1.4. Indices du confort thermique dans les espaces extérieurs :

Dans la situation du changement climatique, l'évaluation du stress thermique et sa réduction est un grand défi. Les indices thermiques s'avèrent pertinents pour évaluer l'îlot de chaleur urbain.

L'application des indices thermiques se base sur le bilan énergétique de l'homme.

Le corps humain n'a aucun capteur sélectif pour la perception des paramètres climatiques individuels. Donc, ces indices sont en relation étroite avec la thermorégulation humaine¹⁸⁰.

Différents indices caractérisant le confort thermique d'un individu ont été proposés par des chercheurs. On peut citer : le vote moyen prévisionnel PMV¹⁸¹, la température physiologique équivalente PET¹⁸², la température effective ET*, la température standard équivalente SET*¹⁸³,

¹⁷⁹ Ibid.

¹⁸⁰ Musco, F. (2016). Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario. *Cham: Springer International Publishing*, p 96. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6>.

¹⁸¹ Fanger P O. Thermal comfort, (1972). in. Berkovic S, Yezioro A, Bitan A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate, *Solar Energy*, 86: 1173-1186.

¹⁸² Höppe, P. (1999) "The Physiological equivalent Temperature – A Universal Index for Biometeorological Assessment of the Thermal Environment?". *International Journal of biometeorology*, vol. 43, p. 71-75.

¹⁸³ Gagge AP, Fobelets AP, Berglund LG (1986). "A standard predictive index of human response to the thermal environment". *ASHRAE Transactions*;92:709e31.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

la température effective extérieure OUT_{set}^{*184} , la température physiologiquement Équivalente et l'indice universel thermique du climat UTCI¹⁸⁵.

Les paramètres météorologiques d'entrée ont une variabilité temporelle et spatiale, ils sont la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement des courtes et longues ondes.

Dans les zones urbaines complexes, les obstacles modifient la vitesse du vent et la température radiante moyenne.

Nous allons présenter les indices les plus utilisés dans les recherches.

- **PMV :**

Le PMV est le vote moyen prévisible (Predicted Mean Vote), il a été défini par Fanger en 1972¹⁸⁶.

L'indice de vote moyen prévisible est généralement adopté comme un indicateur qui sert à évaluer le confort intérieur où l'échange thermique s'effectue entre les six faces de l'espace. Tandis que dans le cas du confort extérieur, l'échange sera avec le dôme du ciel, incluant une autre variable liée à la présence des personnes qui entraînent des changements métaboliques¹⁸⁷.

FANGER est arrivé à l'évaluation moyenne de l'environnement thermique par le PMV pour un grand échantillon d'individus en se basant sur les sept échelles de confort définies par ASHRAE, en s'étalant de -3 (très froid) à +3 (très chaud).

Plus tard en 1997, MATZARAKIS et MAYER ont évalué le stress thermique de 12 stations météorologiques en Allemagne basé sur l'indice du vote moyen (PMV) de 1980 à 1989 et ont converti la valeur PMV de chaque carte climatologique¹⁸⁸.

Cependant, il a été récemment appliqué pour les conditions extérieures aussi. Cet indice pourra aussi atteindre des valeurs plus élevées ou plus basses¹⁸⁹.

Il donne l'avis moyen d'un groupe important de personnes qui exprimeraient un vote de sensation de confort thermique en se référant à l'échelle suivante :

- Une valeur de PMV de zéro exprime une sensation de confort thermique optimale.

¹⁸⁴ Spagnolo .J, De Dear .R (2003). "A field study of thermal comfort in outdoor and semioutdoor environments in subtropical Sydney Australia". *Building and Environment* 38, 721 – 738.

¹⁸⁵ Jendritzky, G., De Dear, R. and Havenith, G. (2012). UTCI - why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56 (3), pp. 421 – 428.

¹⁸⁶ Fanger, P O. (1972). Thermal comfort, in: Berkovic S, Yezioro A, Bitan A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate, *Solar Energy*, 86: 1173-1186.

¹⁸⁷ Jacopo, G, Kristian, F. (2017). Une étude sur l'utilisation de la carte de microclimat extérieur pour aborder les solutions de conception pour la régénération urbaine, *journal Energy Procedia* 111, p 504.

¹⁸⁸ Matzarakis, A., Mayer, H. (1997). Heat stress in Greece. *Int J Biometeorol* 41, 34–39. <https://doi.org/10.1007/s004840050051>.

¹⁸⁹ Mansouri, O., F. Bourbia, et R. Belarbi. Effect of urban albedo surfaces on thermal comfort. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9, n° 2 (2017): 878–896. P889.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

- Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale.
- Réciproquement, une valeur positive signale qu'elle est plus élevée.

Michael BRUSE dans ses travaux effectués lors de l'actualisation de son programme de simulation (ENVI-MET) a adopté neuf échelles de confort propres aux espaces extérieurs de -4 (extrêmement froid) à +4 (extrêmement chaud). On considère que la zone de confort thermique s'étale de la sensation de légère fraîcheur (-1) à la sensation de légère chaleur (+1), soit de -1 à +1.

Valeurs PMV	Perception thermique
+4	extrêmement chaud
+3	chaud
+2	tiède
+1	légèrement tiède
0	neutre
-1	légèrement frais
-2	frais
-3	froid
-4	extrêmement froid

Tableau 11: Valeurs de vote moyen prévisible pour différents degrés de perception thermique.

Source : <https://www.energieplus-lesite.be>.

Une simulation a été effectuée dans une zone urbaine rénovée à Bologne (Italie), pendant l'été, lorsque les activités en plein air sont plus fréquentes et lorsque les vagues de chaleur peuvent affecter les usagers.

Les résultats de la comparaison avant et après la rénovation ont montré qu'il n'y a pas de variation significative sur les valeurs de la température de l'air¹⁹⁰. Quant à la ventilation, la rénovation a permis de réduire l'effet venturi avec une augmentation de la vitesse de l'air de 0,8 à 1,4 m/s.

Alors que la rénovation s'avère efficace à l'aide de l'évaluation du PMV qui a démontré que la solution adoptée contribue à diminuer l'indice de très chaud (+3,50, +4,00) et très chaud (+4,50) à chaud (+1,50, +2,00)¹⁹¹.

Donc un nombre limité d'actions sur les surfaces des cours et l'introduction d'un certain pourcentage de végétation peuvent réduire l'effet de chaleur urbain et contribuer à un confort extérieur.

¹⁹⁰ Fabbri, K., Di Nunzio, A., Gaspari, J., Antonini, E., & Boeri, A. (2017). Outdoor Comfort: The ENVI-BUG tool to Evaluate PMV Values Output Comfort Point by Point. *Energy Procedia*, 111, 510–519. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.213.

¹⁹¹ Ibid.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

- La Température physiologiquement équivalente (PET) :

La température physiologiquement équivalente (PET) est la température équivalente à un endroit donné (à l'extérieur ou à l'intérieur) à la température de l'air avec des températures de noyau et de peau égales à celles dans les conditions évaluées.

Cet indice permet à l'utilisateur de prédire des valeurs réelles des quantités thermiques du corps, c'est-à-dire la température de la peau, la température du corps et le taux de sueur.

Il est évalué en degrés Celsius. Les conditions de référence sont : la température moyenne rayonnante est équivalente à la température de l'air, la vitesse de l'air est fixée à 0,1 m/s à une hauteur de 1,1 m, la pression de vapeur d'eau à 12hPa et l'humidité relative à 50%.

Le tableau suivant illustre les classes d'évaluation (avec une production interne de 80W) et une résistance de vêtements de 0,9 clo¹⁹².

PET	Perception thermique	Grade du stress physiologique
>4	Très froid	Stress froid extrême
4.8	Froid	Stress froid fort
8.13	Frais	Stress froid modéré
13-18	Légèrement frais	Léger stress froid
18-23	Confortable	Pas de stress thermique
23-29	Légèrement chaud	Léger stress thermique
29-35	Chaud	Contrainte thermique modérée
35-41	Chaud	Forte contrainte thermique
<41	Très chaud	Stress thermique extrême

Tableau 12: Gammes de la température équivalente physiologique (PET) pour différents degrés de perception thermique par les êtres humains et stress physiologique sur les êtres humains, chaleur interne Production: 80 W, résistance au transfert de chaleur du vêtement : 0,9 clo

Source: Andrea MATZARAKIS et al.¹⁹³

Le PET est connu comme étant la température de l'air qui rend les conditions thermiques du corps humain dans l'environnement intérieur en équilibre avec la peau et aussi la température du corps dans les environnements extérieurs complexes¹⁹⁴.

Le PET peut être calculé par Envi-met ou RayMan¹⁹⁵.

¹⁹² Matzarakis, A., & Mayer, H. (1997). Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology*, 41(1), 34–39. doi:10.1007/s004840050051.

¹⁹³ Ibid.

¹⁹⁴ Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. doi:10.1007/s004840050118.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Les paramètres requis pour calculer l'indice de confort thermique du PET dans ces modèles comprennent la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, la température radiante moyenne, les vêtements de l'homme et l'activité.

L'indice PET a été approuvé par la norme allemande VDI et est utilisé comme indice de confort thermique extérieur¹⁹⁶. Il a également été utilisé dans de nombreuses études¹⁹⁷ pour évaluer les environnements extérieurs sous différents climats¹⁹⁸

Des recherches ont montré que les valeurs de PET sont équivalentes à la température de l'air pendant le jour, et le contraire pendant la nuit. Quant à l'hiver, la température de l'air est supérieure à l'indice PET en raison de l'effet du vent, de la faible irradiation et de l'humidité de l'air¹⁹⁹.

Matzarakis indique aussi que les études basées uniquement sur la température de l'air produisent des résultats différents par rapport à ceux des indices thermiques. A titre d'exemple, une augmentation de la valeur d'albédo des surfaces urbaines pourrait diminuer la température de l'air mais augmentera les valeurs PET, en raison de la forte réflexion des ondes courtes.

Les différents climats ont des plages de confort différentes²⁰⁰. De plus, les différentes saisons ont une gamme de confort thermique différente en raison des différentes attentes. En d'autres termes, les saisons froides ont une plage de confort inférieure à celle des saisons chaudes²⁰¹.

La figure suivante présente les plages de confort thermique de la PET dans des études antérieures sur différents climats.

¹⁹⁵ Lin, T.-P., Matzarakis, A., & Hwang, R.-L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213–221. doi:10.1016/j.buildenv.2009.06.002.

¹⁹⁶ VDI (Verein Deutscher Ingenieure), (2008) VDI 3787-2, Environmental Meteorology—Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning at Regional Level. Part 1: *Climate*. Beuth, Berlin.

¹⁹⁷ Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy. *Building and Environment*, 96, 46–61. doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.023.

¹⁹⁸ Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). 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(2), 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013.

¹⁹⁹ Matzarakis A., Martinelli L., Ketterer C. (2016) Relevance of Thermal Indices for the Assessment of the Urban Heat Island. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_4.

²⁰⁰ Ruiz, M. A., & Correa, E. N. (2015). Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1-2), 69–83. doi:10.1007/s00704-014-1279-8.

²⁰¹ Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227–235. doi:10.1016/s0038-092x(00)00093-1.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Source	Climat	Plage de confort thermique		
		Saison chaude et froide	Saison chaude	Saison froide
Nasrollahi, Nazanin et al. 2017	Chaud et sec			
Lin TP., 2009	Chaud et humide			
Mahmoud AH, 2011	Chaud et sec			
Lin TP et al., 2008	Tropical			
Lin TP et al., 2013	Subtropical			
Cheng V et al., 2012	Subtropical			
Villadiego K et al., 2014	Méditerranéen			
Andrade H, et al., 2011	Méditerranéen			
Krüger E et al., 2013	océanique tempéré			
Lai D, et al., 2014	Froid			

Tableau 13: Gamme de confort thermique de la PET dans différentes études. Etabli par l'auteur.

- L'indice Indice climatique thermique universel (UTCI):

L'indice thermique universel du climat est défini par la température de l'air de la condition de référence provoquant la même réponse du modèle de la condition actuelle²⁰². Les conditions de référence ont été définies comme suit: la vitesse du vent à 0,5 m/s à une hauteur de 10m, l'humidité relative à 50%, la pression de vapeur d'eau à 20hPa ; la température moyenne rayonnante est équivalente à la température de l'air et le taux métabolique de 2,3 met (135W/m²).

La catégorisation d'ITUC est basée sur la réponse physiologique d'un organisme dans des conditions environnementales réelle. Elle varie d'un stress thermique extrême à un stress de chaleur très forte. La zone de confort thermique est comprise entre 18 et 26°C et a été définie dans le glossaire des termes relatifs à la physiologie thermique comme : « *La gamme des températures ambiantes, associées à la température radiante moyenne, à l'humidité et au mouvement d'air dans lequel un humain avec des vêtements spécifiques exprime l'indifférence à l'environnement thermique pour une durée indéterminée* »²⁰³.

²⁰² Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428. doi:10.1007/s00484-011-0513-7.

²⁰³ The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (IUPS Thermal Commission). (2001). Glossary of terms for thermal physiology. *The Japanese Journal of Physiology* Vol. 51, No. 2. Consulté le: 08/04/2019. <http://www.or.org/pdf/ThermalPhysiologyGlossary.pdf>.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Gamme des indices climatiques thermiques universels	Catégorie de stress	Réponses physiologiques
Au-dessus de +46	Stress thermique extrême	Augmentation du gradient temporel de T_{re}
		Diminution abrupte de la perte de chaleur nette totale
		Taux moyen de sueur > 650 g / h, forte augmentation
+38 à +46	Stress de chaleur très fort	Niveaux de température de base à la peau < 1 K (à 30 min)
		Augmentation de T_{re} à 30 min
+32 à +38	Fort stress thermique	Sensation thermique dynamique (DTS) à 120 min > +2
		Taux moyen de sueur > 200 g / h
		Augmentation de T_{re} à 120 min
		Perte de chaleur latente > 40 W à 30 min
		Changement instantané de la température de la peau > 0 K / min
+26 à +32	Contrainte thermique modérée	Changement de gradients au taux de sueur, T_{re} et peau
		Température: moyenne (T_{skm}), face (T_{skfc}), main (T_{skhn})
		Présence de transpiration à 30 min
		Augmentation escarpée de l'humidité de la peau
+9 à +26	Pas de stress thermique	Taux moyen de sueur > 100 g / h
		DTS à 120 min < 1
		DTS entre -0,5 et +5,5 (valeur moyenne)
		Perte de chaleur latente > 40 W, en moyenne au fil du temps
		Plateau dans le gradient temporel T_{re}
0 à +9	Léger stress dû au froid	DTS à 120 min < -1
		Minimum local de T_{skhn} (utiliser des gants)
-13 à 0	Stress modéré au froid	DTS à 120 min < -2
		Flux sanguin cutané à 120 min < à 30 min (Vasoconstriction)
		T_{skfc} moyenne < 15 ° C (douleur)
		Diminution de T_{skhn}
		T_{re} gradient de temps < 0 K / h
		30 min température de la peau du visage < 15 ° C (douleur)
		Gradient temporel T_{msk} < -1 K / h (pour référence)
-27 à -13	fort stress dû au froid	T_{skfc} moyenne < 7 ° C (engourdissement)
		T_{re} gradient de temps < -0.1 K / h
		T_{re} diminue de 30 à 120 min
		Augmentation du gradient de température du cœur et de la peau
-40 à -27	Très fort stress au froid	120 min T_{skfc} < 0 ° C (gelure)
		Une baisse plus forte de T_{re}
		30 min T_{skfc} < 7 ° C (engourdissement)
		L'apparition de frissons
		T_{re} gradient de temps < -0,2 K / h
		T_{skfc} moyenne < 0 ° C (gelure)
Au-dessous de 40	Stress extrême au froid	120 n T_{skfc} < -5 ° C (risque élevé de gelure)
		T_{re} gradient de temps < -0,3 K / h
		30 min T_{skfc} < 0 ° C (gelure)

Tableau 14: Température équivalente UTCI catégorisée en termes de contrainte thermique.

Source : Krzysztof BLAZEJCZYK²⁰⁴.

²⁰⁴ Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, H., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Kunert, A. (2018). Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Les abréviations suivantes sont utilisées: la température de la peau moyenne T_{skm} (°C), la température rectale T_{re} (C°), la production de sueur M_{skdot} (g/min), la chaleur générée par le frissonnement $Shiv$ (W), l'humidité de la peau w_{etA} (%), le flux sanguin de la peau V_{bISk} (%) et la sensation Thermique dynamique DTS.

3. De la climatologie à la climatologie urbaine :

Les techniques permettant l'évaluation du rapport entre les transformations urbaines et les paramètres physiques du climat urbain à l'échelle d'un ensemble bâti ont considérablement évolué depuis les années 70 dans le cadre de la climatologie urbaine. Les mesures in situ, les questionnaires, les observations satellites et les performances des modèles de simulation ont contribué à constituer un ensemble de connaissances qui nous permettent d'envisager une mise en relation quantitative des variations de la forme et de celles des paramètres physiques du microclimat. Ces méthodes servent aussi comme outils d'identification des îlots de chaleur urbains.

La régulation des paramètres physiques par les éléments de la forme urbaine est appréhendée par trois approches complémentaires :

3.1. Les méthodes descriptives et d'enquête « conceptualisation » :

En climatologie urbaine, la conceptualisation est en rapport avec les échelles spatiales et temporelles des phénomènes physiques étudiés²⁰⁵. Nous aborderons les définitions de différents concepts liés aux paramètres climatiques : les concepts de surface, d'échelle, celui de canyon et d'îlot de chaleur et d'humidité, ainsi que la paramètres climatiques. Nous présenterons aussi un modèle de questionnaire se basant sur la perception, et sensation thermique des piétons qui s'applique dans un ensemble urbain.

3.2. Les méthodes expérimentales « mesures in situ » :

Cette méthode est la principale méthode d'observation et de validation des phénomènes physiques liés à la régulation des paramètres climatiques par le cadre bâti.

Ces mesures in situ ont permis la quantification des effets liés à des éléments de la forme urbaine. Cela permettra une évaluation de l'importance des effets physiques pouvant être provoqués par les transformations historiques.

in European scale. *Miscellanea Geographica. Regional Studies on Development, Sciendo*, vol. 14(1), pages 91-102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>.

²⁰⁵ Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique", thèse de Doctorat, Université de Nantes, p79.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

De nombreuses études ont été effectuées pour mesurer l'influence de la morphologie sur le microclimat, et d'étudier l'effet d'îlot de chaleur urbain. Une étude a été faite sur deux rues de la ville de Goteborg (Suède), se présentant avec un facteur de vue de ciel des rues canyons compris entre 0,25 -0,45 et 0,5-0,9.

Les résultats montrent que le facteur de vue du ciel affecte la température nocturne. Car étant petit, le phénomène de l'îlot de chaleur apparaît avec un différentiel de température de 4°C²⁰⁶. Une autre étude menée sur une rue canyon au Japon orientée est-ouest pour mesurer la température à l'intérieur du canyon et au-dessus des toits, a montré une légère différence de température de l'ordre de 1°C²⁰⁷. Cependant l'air au niveau du toit est plus froid le jour et plus chaud la nuit que l'air au sein de la rue.

Quant à la différence de température de l'air et de la surface, elle est plus importante surtout pour les parois orientées sud, où le différentiel de température pourra alors atteindre les 12°C pendant le jour.

Une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain et la géométrie du canyon urbain a été faite par OKE²⁰⁸, exprimée en fonction de la hauteur des bâtiments (H) et la distance entre les bâtiments (W) par le ratio H/W :

$$\Delta T_{max} = 7.54 + 3.97 \ln\left(\frac{H}{W}\right) (\text{°C})$$

Le facteur de vue du ciel a été également utilisé pour caractériser cette géométrie et suggérer ainsi la formule suivante :

$$\Delta T_{max} = 15.27 - 13.88 * SVF (\text{°C})$$

3.3. Les méthodes numériques « modélisations » :

Ces modèles constituent une « reproduction » de la réalité selon un certain nombre de paramètres jugés représentatifs des mécanismes de propagation des phénomènes physiques en milieu urbain.

La modélisation de l'interaction de la morphologie urbaine et du climat reste complexe car il existe une interrelation entre plusieurs variables : la situation géographique, la géométrie, la typologie, la densité et les matériaux qui déterminent la configuration de la ville.

²⁰⁶ Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3), 379–392. doi:10.1016/1352-2310(95)00033-x.

²⁰⁷ Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* (1967), 22(12), 2691–2700. doi:10.1016/0004-6981(88)90437-4.

²⁰⁸ Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254. doi:10.1002/joc.3370010304.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

En effet, la variation morphologique affecte le climat intérieur et extérieur aussi²⁰⁹, à travers la modification de la température de l'air, la vitesse et la direction du vent et la lumière naturelle avec une amplification de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

3.1.1. Le logiciel ENVI-MET :

ENVI-MET est un modèle de microclimat tridimensionnel conçu pour simuler les interactions surface-plante-air en milieu urbain avec une résolution typique de 0,5- 10 m dans l'espace et 10 s dans le temps²¹⁰. Il est applicable pour les domaines de la climatologie urbaine, l'architecture, la conception de bâtiments et la planification environnementale²¹¹. ENVI-MET peut comparer l'impact des différents scénarios. Ce modèle est capable de simuler le champ tridimensionnel des variables météorologiques habituelles en prenant en compte l'interaction entre l'atmosphère, les surfaces urbaines et la végétation caractérisant le tissu urbain.

Ce logiciel permet de simuler les changements microclimatiques en fonction des changements physiques proposés de la zone sélectionnée. Il peut donc vérifier et indiquer les stratégies d'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain en montrant les résultats des interventions et de réhabilitation bioclimatique des tissus urbains. Il nous indique donc l'efficacité de ces interventions et leur emplacement optimal²¹². Par exemple : les avantages seraient par l'ajout des arbres ou par la modification de l'albédo de certaines surfaces.

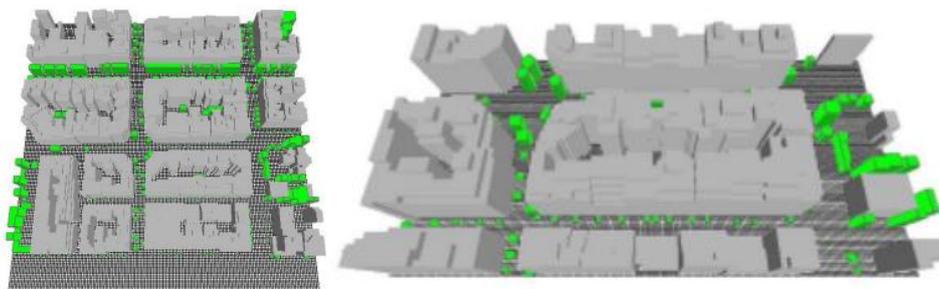


Figure 40: Entrée des modèles géométriques pour un quartier de 300mx300 m.

Source : Angeliki Chatzidimitriou et al.²¹³

²⁰⁹ Adolphe L. (2001). Modelling the link between built environment and urban climate: towards simplified indicators of the city environment, Building Simulation, *Proceedings of IBPSA (International Building Performance Simulation Association)*, pp. 679-684.

²¹⁰ Noro, M., & Lazzarin, R. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, 14, 187–196. doi:10.1016/j.uclim.2015.04.004.

²¹¹ Gaspari, J., & Fabbri, K. (2017). A Study on the Use of Outdoor Microclimate Map to Address Design Solutions for Urban Regeneration. *Energy Procedia*, 111, 500–509. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.212

²¹² Musco F. et al. (2016) Mitigation of and Adaptation to UHI Phenomena: The Padua Case Study. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_8.

²¹³ Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 33, 85–101. doi:10.1016/j.scs.2017.05.019.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Ce modèle offre diverses possibilités d'application dans les domaines de la recherche intégrant des données climatiques ou météorologiques facilement disponibles, comme la température de l'air, l'humidité de l'air et les flux de rayonnement de la vitesse du vent des environnements simples et complexes. Ceci, afin d'évaluer le degré de satisfaction des piétons vis-à-vis de l'environnement thermique et dans les conditions extrêmes de vagues de chaleur.

Le modèle peut quantifier les conditions bioclimatiques pour les scénarios d'avenir aussi, en proposant des directives en matière de revêtements extérieurs, du rapport des canyons urbains, de l'orientation²¹⁴, etc....

De plus, il peut être utilisé pour la comparaison entre les études expérimentales et les études de modélisation dans l'enseignement et la recherche.

De nombreuses études²¹⁵ ont montré qu'ENVI-MET est capable de simuler les environnements thermiques extérieurs dans différents modèles climatiques avec une précision acceptable²¹⁶.

Une simulation par ENVI-MET a été menée²¹⁷ dans les conditions d'été de la ville de Modène, divers scénarios d'atténuation ont été pris tels que : l'insertion des espaces verts, changement de l'albédo des murs, des toits, des trottoirs, et insertion des surfaces perméables. D'après les résultats illustrés dans la figure suivante, la végétation et les arbres sont la mesure d'atténuation la plus efficace à une hauteur de 10 m. Par contre, le pic de refroidissement au niveau du sol était perçu dans les surfaces perméables.

²¹⁴ Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L., & Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*, 101, 85–101. doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026.

²¹⁵ Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*, 125, 356–372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.09.006.

²¹⁶ Taleb, D., & Abu-Hijleh, B. (2013). Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. *Renewable Energy*, 50, 747–762. doi:10.1016/j.renene.2012.07.030.

²¹⁷ Zauli Sajani S. et al. (2016). UHI in the Metropolitan Cluster of Bologna-Modena: Mitigation and Adaptation Strategies. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_6.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

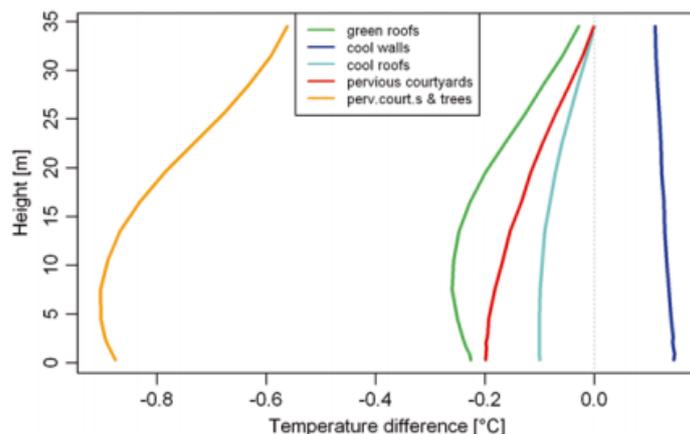


Figure 41: Profil vertical de différence de température entre divers scénarios d'une zone d'étude à Modène en Italie.

Source : S Zauli SAJANI et al.²¹⁸

En outre, par l'utilisation d'ENVI-MET, une simulation a été menée dans un site de la ville de Pradoue. A cet effet, quatre scénarios étaient proposés pendant les 4 saisons²¹⁹ [15]:

- Un sol vert qui permettra d'augmenter les surfaces perméables de 18 à 23% par la plantation d'herbes et d'arbres de 10 m de hauteur et diminuera le facteur de vue de ciel.
- Des pavements frais, en utilisant des matériaux avec un albédo élevé.
- Des toits frais, en augmentant la valeur des albédos des surfaces imperméables.
- Un sol vert et trottoirs frais.

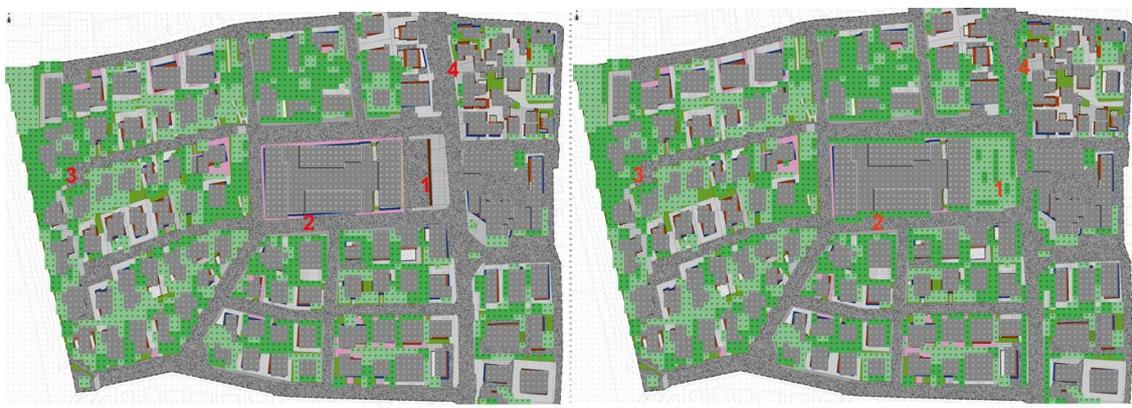


Figure 42: La zone d'étude élaborée dans Envi-met pour la simulation des scénarios 3 et 4.

Source : Marco NORO M et al.²²⁰

²¹⁸ Ibid.

²¹⁹ Noro M., Lazzarin R., Busato F. (2016). The Urban Corridor of Venice and The Case of Padua. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_7.

²²⁰ Ibid.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

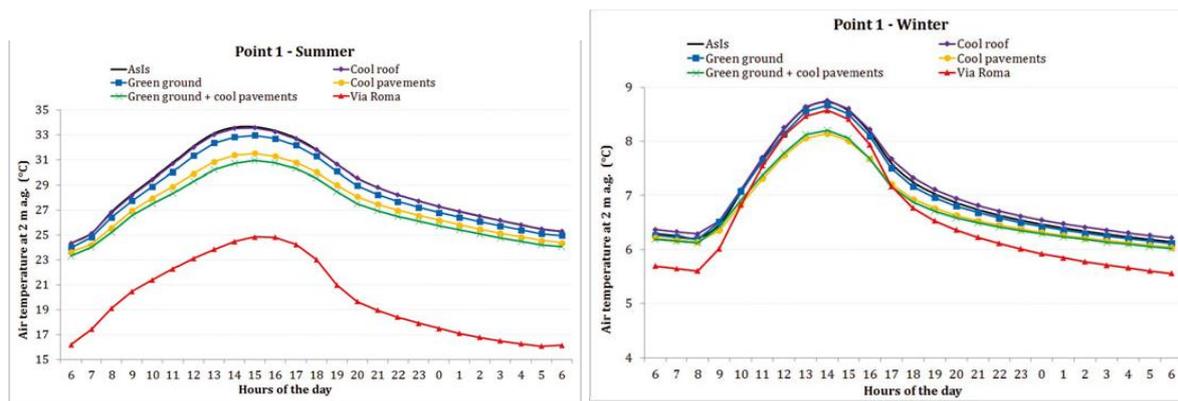


Figure 43: Résultats de la simulation par ENVI-MET : Evolution des températures de l'air pour évaluation de l'îlot de chaleur urbain pour le cas initial avec les 4 scénarios d'étude.

Source : Marco NORO et al²²¹.

Les résultats de la simulation ont montré que le dernier scénario est le plus efficace pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain pendant les quatre saisons.

Quant à l'hiver, les actions d'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur jusqu'à ce qu'il devienne négatif sont celles de la terre verte et trottoirs frais jumelée aux pavements frais.

Une simulation a été menée sur la ville de Stuttgart sur la base d'études de cas et dont l'objectif est de trouver les options réalisables pour améliorer la situation climatique locale²²².

En outre, en ce qui concerne les types de surfaces, le PET calculé par ENVI-MET augmente à 58°C au-dessus des surfaces pavées avec un faible albédo. Mais, au-dessus des espaces verts, il ne dépasse pas 35°C dans les zones non ombragées, et 25°C dans les zones ombragées.

Quant à l'effet des arbres, et pendant les jours d'été, ils peuvent réduire la température de l'air de 3,0 °C. Le PET mesuré à 1,5m de hauteur est de 10 °C plus bas sous les arbres, par rapport aux zones vertes et de 25 °C plus bas que sur l'asphalte.

²²¹ Ibid.

²²² Rinke R. et al. (2016). Pilot Actions in European Cities – Stuttgart. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_10.

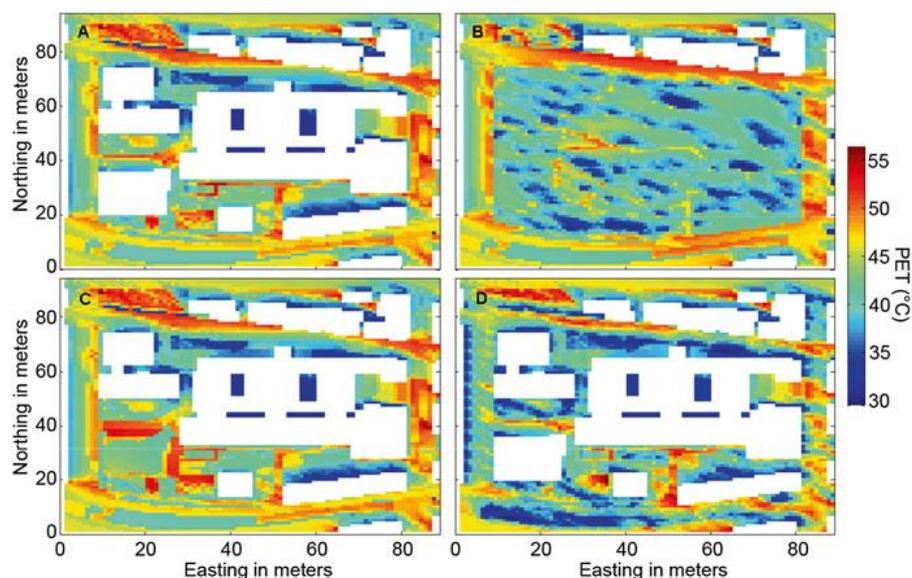


Figure 44: Les valeurs de PET calculées par ENVI-MET de 10h à 16h pour une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol.

Source : Rayk RINKE et al.²²³

La morphologie des rues canyons influe aussi sur l'accès des rayons solaires, un canyon orienté nord sud est accessible par le soleil de midi tout au long de l'année²²⁴.

La valeur maximale quotidienne du PET peut être réduite de 10K en raison d'une évolution d'H/W de 0,5 à 3,5 et une orientation de 120° lors d'une journée d'été chaude.

Enfin les résultats ont montré que dans les cours, le PET est supérieur à 29,1°C, tandis que le confort thermique est compris entre 45,5 % et 51,6% de Mai à Septembre. Le petit facteur de vue de ciel permet d'avoir un PET plus élevé pour la nuit que pour le jour. Une autre simulation a montré que le PET monte jusqu'à 25K dans une cour en pavé comparée à une cour couverte de plantes et d'herbes.

En outre, ce modèle peut être utilisé pour la comparaison entre les études expérimentales et les études de modélisation dans l'enseignement et la recherche.

Il offre des résultats en termes d'indices thermiques pour les environnements simples et complexes, en utilisant des données météorologiques disponibles, telles que la température de l'air, l'humidité de l'air et les flux de rayonnement de la vitesse du vent.

Ces informations seront utiles afin de créer des espaces urbains adaptés au climat local, à fournir les conditions thermiques confortables pour les personnes fréquentant ces lieux.

²²³ Ibid.

²²⁴ Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography – The case of Stuttgart, Germany. *Urban Climate*, 10, 573–584. doi:10.1016/j.uclim.2014.01.003.

Chapitre IV : Caractérisation du confort thermique extérieur.

Conclusion :

Ce chapitre comprend des notions très importantes pour notre recherche. La première, est la notion des ambiances thermiques et ses échelles qui varient selon le facteur spatio-temporel et climatique.

La deuxième notion est la sensation de confort thermique et ses échelles où le confort est défini du point de vue des éléments sensoriels. En troisième partie, nous avons introduit les indices thermiques qui ont été expliqués pour calculer à priori les sensations thermiques d'un individu en fonction des variables microclimatiques.

En effet, d'un point de vue humain-biométéorologique, les indices thermiques présentés peuvent décrire et quantifier non seulement les conditions moyennes, mais aussi des phénomènes extrêmes comme les vagues de chaleur. Et nous avons introduit l'outil numérique ENVI-MET qui va nous permettre d'élaborer la simulation pour notre propre travail.

Nous avons aussi présenté de nombreuses études scientifiques qui ont été menées dans ce domaine et ont révélé différentes méthodes pour caractériser le microclimat urbain par l'observation, la simulation et l'expérimentation.

Le chapitre I de la deuxième partie sera réservé à une lecture historique du quartier de Bab El Hadid.

Première partie: Principes et éléments théoriques ; de la crainte sur l'environnement climatique à son interaction avec la morphologie urbaine.

Conclusion de la 1 ère partie:

La présentation des principaux concepts dans cette partie nous a conduits à émettre un certain nombre de concepts pour le développement de la deuxième partie. Cette analyse bibliographique a permis de souligner le rôle important que joue la morphologie urbaine sur la basse atmosphère, le microclimat et les éléments du confort extérieur. Elle a aussi permis de dresser un panel de certains indicateurs, d'indices thermiques et techniques permettant l'évaluation du confort thermique.

Nous avons mis en évidence les notions liées au climat et microclimat qui est notre échelle d'étude. Cette lecture nous a dévoilé l'élément principal qui caractérise nos villes, il s'agit de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Une présentation des différentes méthodes pour caractériser le microclimat urbain a été réalisée. Nous avons conclu que le choix de la méthode de recherche dépend essentiellement du contexte d'étude et des objectifs fixés. En effet, l'interaction entre le microclimat et le milieu construit est complexe par la variété des éléments physiques et éléments qui constituent la forme urbaine dans l'espace et dans le temps. Notre contribution revient à concevoir une méthode à travers la partie suivante pour analyser l'effet des transformations urbaine sur le microclimat, d'évaluer les indicateurs physiques, morphologiques, géométriques et d'évaluer la perception des usagers du confort thermique extérieur.

Première partie: Principes et éléments théoriques ; de la crainte sur l'environnement climatique à son interaction avec la morphologie urbaine.

DEUXIEME PARTIE:

Quantification des effets microclimatiques et du confort thermique liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid à Tlemcen.

Deuxième partie: Quantification des effets microclimatiques et du confort thermique liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid à Tlemcen.

Introduction de la 2^{ème} partie :

Nous entamons dans cette partie une appréciation des effets microclimatiques attachés aux transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid. Une étude en premier lieu de l'histoire de la zone choisie nous a montré la complexité spatiale et temporelle des mutations urbaines et de leurs effets. L'analyse de l'état de fait du quartier nous a amené à choisir en effet cinq canyons urbains de l'état actuel pour identifier et quantifier les indicateurs géométriques et morphologiques.

D'un autre côté, des ajustements sur le vide urbain et modifications de la surface urbaine ont été évoqués afin de reconstituer les différentes configurations de trois périodes distinctes. Nous avons émis quelques hypothèses complémentaires pour combler les lacunes des sources, notamment en ce qui concerne l'évolution des hauteurs des bâtiments.

Nous abordons ensuite la quantification proprement dite des paramètres physiques du microclimat des trois formes urbaines par simulation numérique en faisant recours au logiciel ENVI-MET. Cette simulation sera suivie d'une discussion des résultats en termes de perception de confort thermique extérieur.

Enfin, en dernier, nous avons pris l'état actuel et nous avons analysé le microclimat. Nous effectuons par une enquête par questionnaire et une simulation numérique validée par des mesures du microclimat une mise en relation entre la perception subjective et la quantification objective de l'environnement thermique. Cette partie se terminera par une proposition des lignes directrices de conception et de réhabilitation du site historique et une ouverture critique sur la pertinence de la démarche de modélisation et simulation numérique.

CHAPITRE I :

**Evolution historique des transformations urbaines
du quartier historique de Bab El Hadid.**

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

Introduction :

Ce chapitre constituera une brève lecture historique sur la ville de Tlemcen. Il sera donc question de retracer les différentes périodes par lesquelles est passée la ville. L'objectif est de comprendre le processus de formation du quartier de Bab el Hadid, l'origine de la création et les transformations urbaines liées à ce fragment d'étude. Cette lecture nous offrira l'aperçu global et le contexte général dans lesquels notre fragment a évolué. L'étude mettra aussi en lumière la complexité spatiale et temporelle des interventions sur la forme urbaine et les interactions entre leurs effets.

1. Situation de la ville de Tlemcen :

La ville de Tlemcen, chef-lieu de Wilaya, se situe à 830 mètres d'altitude, au Nord-ouest de l'Algérie, elle est distante de 63 kilomètres de la frontière marocaine, de 140km de la ville d'Oran et de 40 km de la mer Méditerranée. Elle est à 3°38 de longitude Ouest et 34°53 de latitude Nord.

Son site naturel s'étale en forme d'escalier géant sur trois marches, dominant vers le nord la plaine de Hennaya où serpentent les rivières de la Tafna et du Saf Saf, et dominée au sud par le plateau de Lalla Setti (1200 m d'altitude).

2. Bref historique sur l'occupation de Tlemcen :

La naissance de la ville de Tlemcen remonte à l'ère préhistorique en raison de l'habitat troglodyte découvert à Mouillah, Ouzidane et d'autres endroits de la région.

Cependant, c'est à partir de l'époque romaine que Tlemcen esquissera l'image d'une « cité » avec le nom de POMARIA (ville aux vergers), ensuite AGADIR (lieu élevé) des Idrissides, TAGRART (campement) des Almoravides, et enfin TLEMCEN des Zianides²²⁵. Tilmisân est un mot berbère qui signifie "poche d'eau ou source" pour l'origine de nombreuses sources d'eau dans le site.

²²⁵ Ghomari, F. (2007). La médina de Tlemcen: l'héritage de l'histoire, *web journal*, disponible sur : <http://www.webjournal.unior.it/Dati/19/70/Web%20Journal%20vol.%203,%20Tlemcen.pdf>. Consulté le : 20/01/2019.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

2.1. Période Romaine (201 à 670):

C'est au IV^e siècle, sous la présence romaine que la ville était devenue un réel camp militaire, connue alors sous le nom de Pomaria (les vergers). Une cité qui a laissé ses traces physiques et qui ont été restituées par J.CANAL et L.PIESSSE.

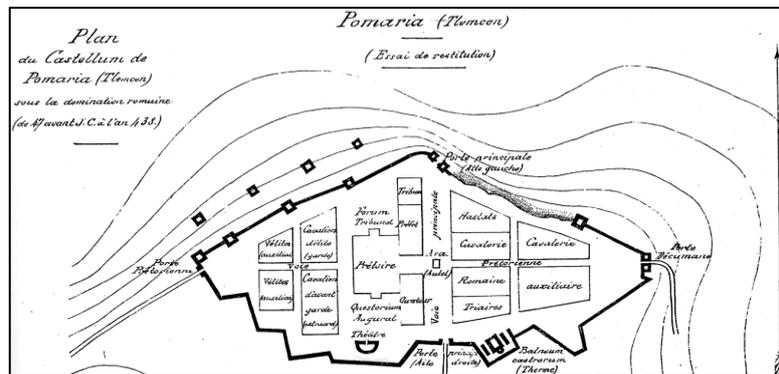


Figure 45: Essai de restitution du plan du Castellum de Pomaria de l'an 47 avant J.C à 433 après JC.

Source : Louis ABADIE²²⁶.

2.2. Période Idrisside: entre 788 et 790 à 828 :

A partir du VII^e siècle, sous la domination des arabes, la ville commença à s'agrandir vers le sud-ouest, elle recevra le nom d'Agadir (rempart de la citadelle)²²⁷. Sous IDRIS I la civilisation Idrisside a été fondée en 970. Ce dernier a commencé par l'édification de remparts jalonnés de portes pour protéger la ville. Ensuite il s'est appliqué à faire bâtir une grande mosquée dont ne persiste à nos jours que le minaret portant des inscriptions latines romaines.

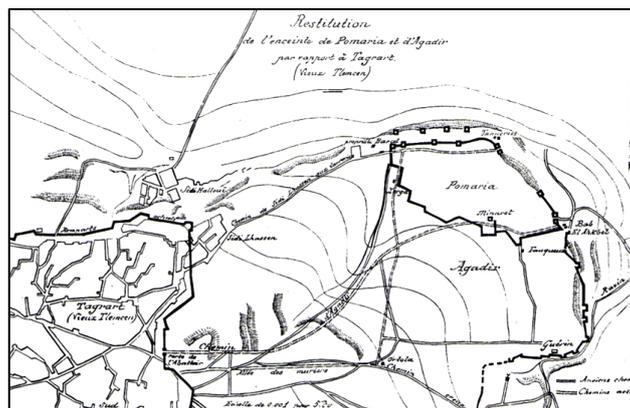


Figure 46 : Restitution du tracé de Pomaria et d'Agadir par J.Canal.

Source : Louis ABADIE²²⁸.

²²⁶ Abbadie, L. (2005). Tlemcen de ma jeunesse. Nice : Edition Jacques Gandini, p 06.

²²⁷ Abbadie, L. (1994). Tlemcen au passé retrouvé, Ed Jaques Candini, Nice, p 09.

²²⁸ Abbadie, L. (2005). *Op. cit*, p 06.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

2.3. Période Almoravide de 1069 à 1145 :

En 1069 Tlemcen fut conquise par les Almoravides, c'est à cette époque que s'érigea Tagrart (la station) ; noyau de la ville nouvelle, elle ne fût au début qu'un simple camp militaire. Youcef Ibn Tachfin a été le premier « gouverneur » de cette dynastie, sous son égide naquirent de nombreuses mosquées et palais, il s'agit de la grande mosquée de Tlemcen 1136 et Qsar El Bali qui n'existe plus de nos jours²²⁹.

La protection du camp était l'une des premières préoccupations avec la construction des murailles dont Bab Al Qarmadine fût la première.

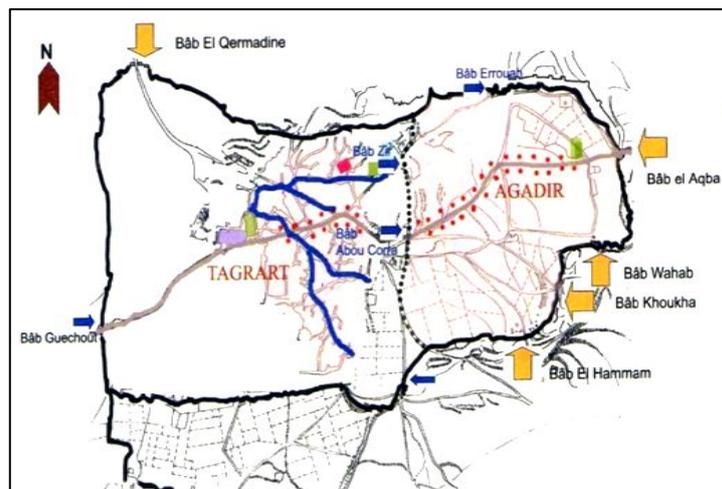


Figure 47: Restitution de Tagrart à l'époque Almoravide.

Source : Touria KASSAB²³⁰.

2.4. Période Almohade: de 1145 à 1235 :

Le maître ABDAL MOUMEN entra en 1145 à TAGRART en conquérant, après avoir détruit ses remparts. Cependant ce chef glorieux voulant édifier un empire, dut réviser sa position et reconstruire les ruines qu'il a occasionnées. Les almohades firent édifier des châteaux, de grandes maisons, des palais et de solides remparts²³¹. Au moment du règne de la dynastie des almohades, une nouvelle puissance grandissait avec l'embellissement de la grande mosquée de Tlemcen.

²²⁹ Kassab, T. (2007). Antagonisme entre espace historiques et développement urbain, cas de Tlemcen. Thèse de doctorat d'État en Architecture et Urbanisme, option: préservation des sites et monuments historiques, École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, p191.

²³⁰ Ibid.

²³¹ Ghomari, F. (2007). La médina de Tlemcen: l'héritage de l'histoire, *web journal*, disponible sur : <http://www.webjournal.unior.it/Dati/19/70/Web%20Journal%20vol.%203,%20Tlemcen.pdf>. Consulté le : 20/01/2019.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

2.5. Période Zianide: de 1235 à 1554 :

Au début du XIII^e siècle, le déclin des Almohades fournit aux ABD EL-WADIDES, sous la conduite de YAGHMORASAN, du clan Zaiyanide, l'occasion d'installer une dynastie indépendante²³². Il donna à Tlemcen la prospérité économique et un rayonnement intellectuel et religieux. YAGHMORACEN BEN ZIEYAN fut le premier précurseur de la ville. Il unifia les deux parties Tagrart et Agadir et les dota du nom « tilimsane » signifiant « sources ». Elle devient en cette période capitale du Maghreb Central.

YAGHMORACEN et ses successeurs procédèrent à l'embellissement et à la construction de plusieurs édifices: palais ornés de jardins, de fontaines et de jets d'eau, caravansérails (fondouks), mosquées (mosquée Sidi Bel Hassen, mosquée de Sidi Ibrahim, mosquée Oued Imam), medersa (médersa Tachfinia), une qayssaria, de nouveaux quartiers résidentiels et bien évidemment le renforcement des murailles pour repousser les ennemis surtout les mérinides. Tlemcen devint l'une des plus belles capitales de l'empire musulman et l'un des sièges les plus importants de l'autorité souveraine²³³. Ce règne sera interrompu par une brève domination des Mérinides qui ne dura que deux décennies²³⁴.

2.6. Période mérinide de 1288 à 1348:

Tlemcen connu plusieurs tentatives d'attaque des mérinides, où elle connu deux périodes de siège, la période de la prise de pouvoir était de 1335 à 1337²³⁵. Vu le dispositif très élaboré des fortifications de la ville Zianide, les mérinides ont dû édifier leur ville à l'extérieur des remparts.

Ils dotèrent Tlemcen de ses plus beaux monuments dont: El Mansourah, le complexe de Sidi Boumediène et la mosquée Sidi El Haloui.

²³² Lawless, R. (1975). « Tlemcen capitale du Maghreb central, analyse des fonctions d'une ville islamique médiévale », in *revue de l'occident musulman et de la méditerranée*, n° 1, p 49.

²³³ Barges, J-L. (Abbé). (1859).Tlemcen, ancienne capitale du royaume de ce nom, sa topographie, son histoire, description de ses principaux monuments, anecdotes, légendes et récits divers, souvenirs d'un voyage. Paris: *Edition Barges B.Duprat*. p 191.

²³⁴ Lawless, R, Gerald, B. (1976). Tlemcen, continuity and change in an Algerian Islamic town, London, p298.

²³⁵ Marçais, W. et Marçais, G. (1903). "Les monuments arabes de Tlemcen", *Ed. Albert Fontemoing*, p11.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

2.7. Période Ottomane de 1552 à 1842 :

L'incapacité de la dynastie régnante à faire face à l'expansion espagnole a forcé quelques villes du royaume à faire appel à l'empire ottoman. Seulement la pression militaire turque s'est fait sentir d'une manière continue du côté de la dynastie des Zianides jusqu'à son effondrement définitif en 1556. Cette date a marqué une longue période de décadence jusqu'à sa prise par l'occupant français.

Durant cette période, les quartiers se dépeuplèrent. Quelques murailles qui la protégeaient tombèrent en ruine. Les turcs n'ont pas laissé d'authentiques monuments. Ils se sont installés dans la région sud-ouest et fondèrent le quartier résidentiel de Bab El Hadid²³⁶. Nous nous sommes intéressés à cette zone d'étude vue les transformations architecturales et urbaines qui ont lieu sur ce site.

2.8. Période coloniale:

En juillet 1833, craignant une éventuelle offensive, le maréchal Clauzel, envisagea l'installation d'une garnison française²³⁷. Le colonialisme français a pu accéder à la ville en 1842 sous le commandement du général Bugeaud. Mais l'Emir Abdelkader n'avait pas été désarmé et constituait toujours une menace très sérieuse pour la domination française. C'est pour cette raison même que Tlemcen resta jusqu'en 1952 sous l'administration militaire²³⁸.

2.8.1. De 1842 à 1852 :

En 1845, les premiers travaux qui interpellent l'attention de la Commission Administrative et des généraux commandant à Tlemcen, furent ceux des voiries et d'aération du tissu urbain. En premier lieu, le but était de faciliter les relations urbaines entre la Porte d'Oran et le Méchouar, centre militaire, administratif et économique de la ville. A cet effet, ils ont pratiqué des saignées importantes dans les quartiers résidentiels compacts²³⁹, (figures 59 et 60).

²³⁶ Louis, A. (2005). Tlemcen de ma jeunesse. 1ère édition : *éditions Jacques Gandini*, p 21.

²³⁷ Lecocq, A. (1940). Histoire de Tlemcen, ville française, tome I : l'administration militaire, 1842-1852, *Ed internationales S.S*, Tanger, p 06.

²³⁸ Lecocq, A. (1940). *Op.cit.*, p 03.

²³⁹ Benguella, S. (2012). Le processus d'appropriation des places Emir Abdelkader et Mohamed Khemisti de la ville de Tlemcen, thèse de Magister, université de Tlemcen, p 113.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

Parmi ces percements, on compte la création de la rue Ximène qui aboutissait à la caserne Gourmala pas encore construite à cette époque, l'élargissement de la rue Saint Michel, créée seulement dans sa partie sud jusqu'à la place des Caravanes, enfin l'élargissement de la rue Clauzel aboutissant jusqu'au Méchouar. On compte aussi parmi les travaux le nivellement complet de l'esplanade du Méchouar, des places du Fondouk et des Caravanes, ainsi que les trois rues qui les environnaient et dans lesquelles on fit des empierrements considérables²⁴⁰.

2.8.2. De 1852 à 1860 :

Durant cette période, les français étaient préoccupés par la réalisation de nouveaux remparts. La substitution de la trame organique avec la nouvelle trame orthogonale a donné naissance à de nouveaux quartiers. Le côté nord-ouest, jamais occupé a été intégré au périmètre de la ville. Les anciennes fortifications reconstruites, de nouvelles portes y ont été aménagées : au nord la porte d'Oran et la porte du Nord, au sud la porte des carrières (Bab El Hadid) et la porte du Sud (attenante au Méchouar), à l'ouest la porte de Fez (ancienne porte Guechoute) et à l'est Bab Sidi Boumediène (Bab El Jiad) et la porte de l'Abattoir (Bab Sidi Boumediène)²⁴¹.

2.8.3. De 1860 à 1886 :

Tlemcen commença à prendre l'image d'une ville européenne, plusieurs maisons ont été expropriées pour réaliser les percements de rues et boulevards. La stratégie fut offensive, plusieurs propriétés et même monuments tombèrent en ruine tel qu'El Medersa Tachfinia. Un projet d'assainissement a été mis en place en 1866 englobant le réseau d'égouts existants et à construire (voir annexe 4).

La zone nord-ouest recouvre le boulevard majeur celui du boulevard National actuellement et a abrité les équipements administratifs importants comme le tribunal, la préfecture ainsi que l'église Saint Michel.

²⁴⁰ Lecocq, A. (1940). *Op.cit.*, p 238.

²⁴¹ Ibid.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

2.8.4. De 1886 à 1900 :

Les percements des rues restantes se poursuivirent aux limites de l'actuelle porte de Sidi Boudjemaï à savoir : les parties sud de la rue de Paris et la rue Ximène ainsi que l'extrémité ouest de la rue Eugène Étienne.

2.8.5. De 1900 à 1962 :

Les anciennes maisons traditionnelles furent occupées par la population autochtone. De nouvelles extensions au-delà des remparts ont vu le jour vers le sud, le sud/est et l'ouest. Plusieurs lotissements d'habitat pavillonnaire, sont implantés sur les anciennes campagnes de Tlemcen comme El Hartoun, Bel Air, Bel Horizon, les Cerisiers...etc. (Figure 61).

2.9. Après l'indépendance (à partir de 1962):

L'extension de la ville de Tlemcen s'est rapidement opérée du côté est, ensuite au nord où une nouvelle urbanisation en formation a vu le jour avec l'urbanisation péri-urbaine de terres agricoles, ensuite l'ouest vers Mansourah. Par contre le sud constitue une barrière physique celle du plateau de Lalla Setti.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

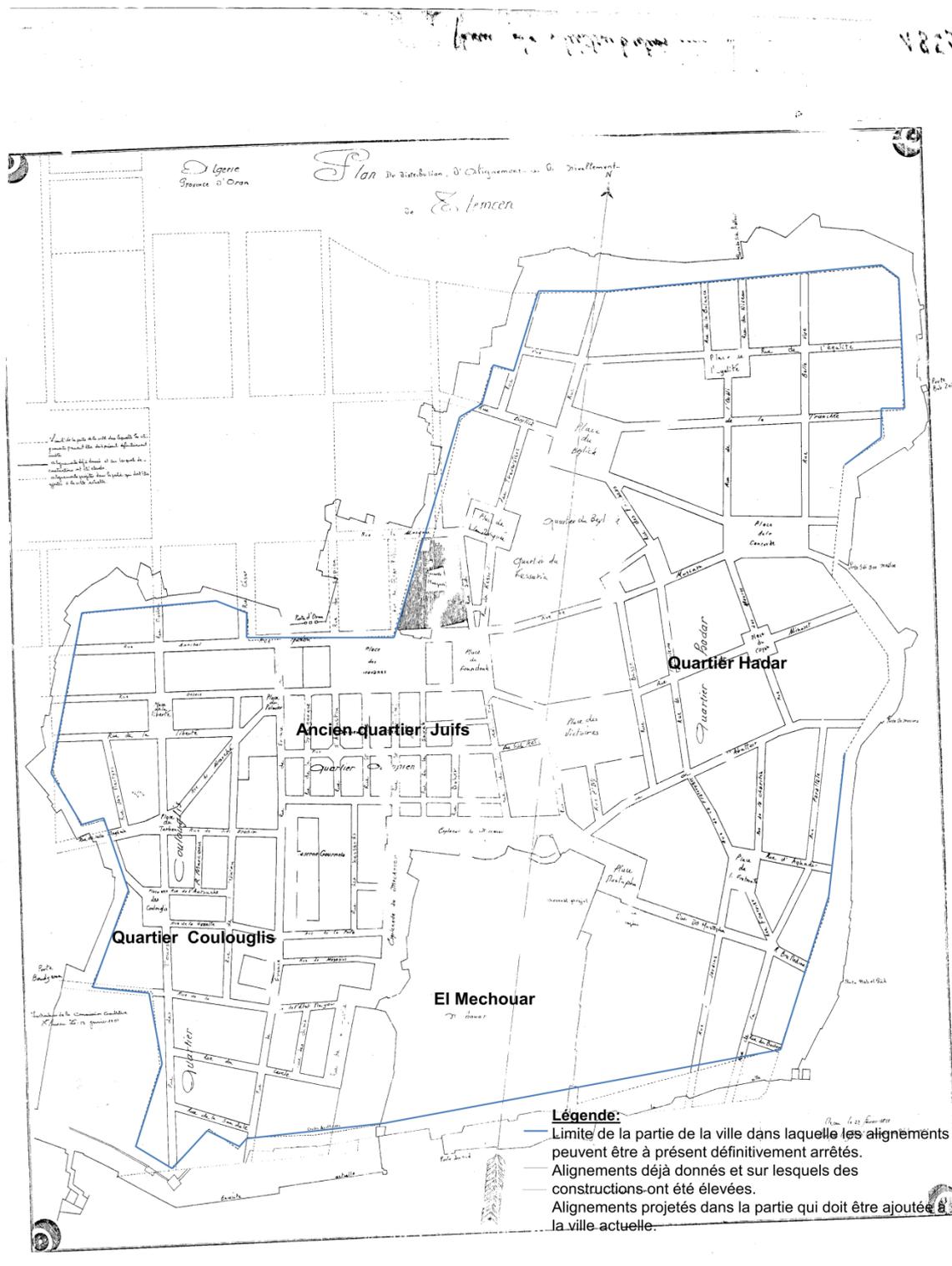


Figure 48 : Plan de distribution, d'alignement et de nivellement de Tlemcen (Phase Projet).

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen²⁴², traité par l'auteur.

²⁴² Les archives de l'APC de Tlemcen (Commission consultative du 22 Février 1851), traité par l'auteur.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

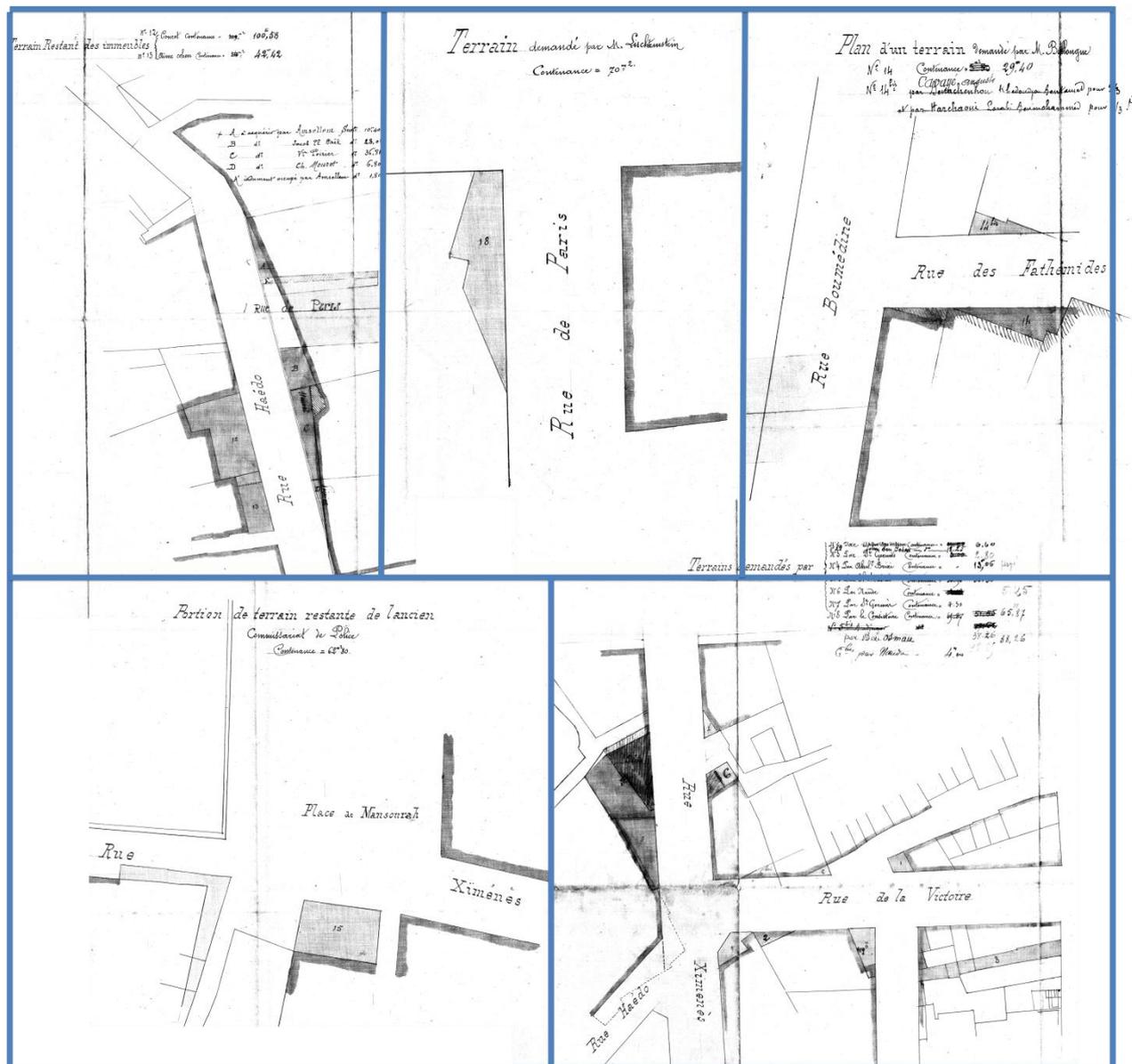


Figure 49 : Terrains urbains disponibles après percement de rues à Tlemcen.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen²⁴³.

²⁴³ Les archives de l'APC de Tlemcen (1877).

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

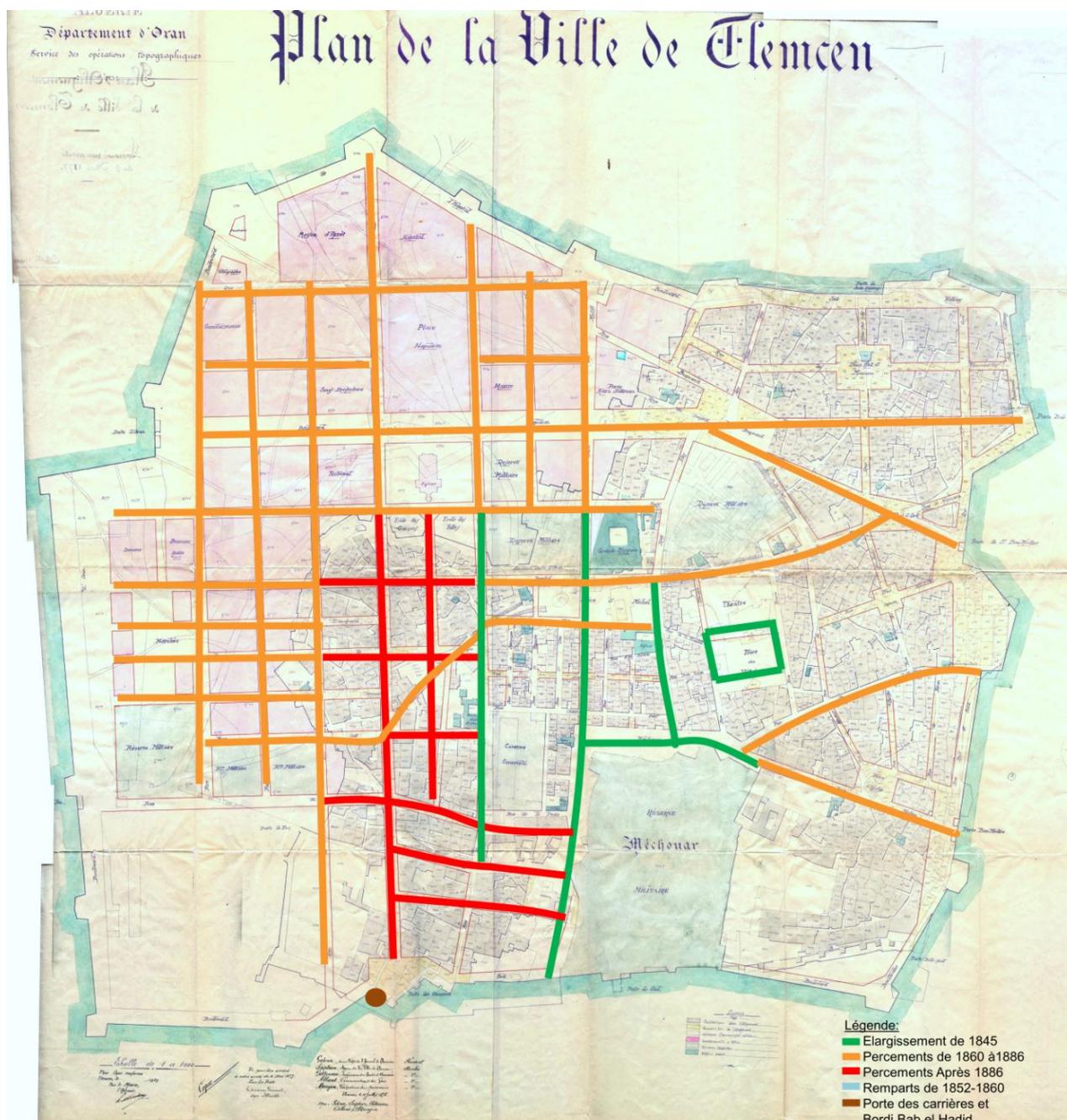


Figure 50 : Plan reconstituant l'évolution de la trame viaire.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen, traité par l'auteur²⁴⁴.

²⁴⁴ Les archives de l'APC de Tlemcen (plan d'alignement de la ville de Tlemcen approuvé par arrêté du 9 Mai 1877).

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

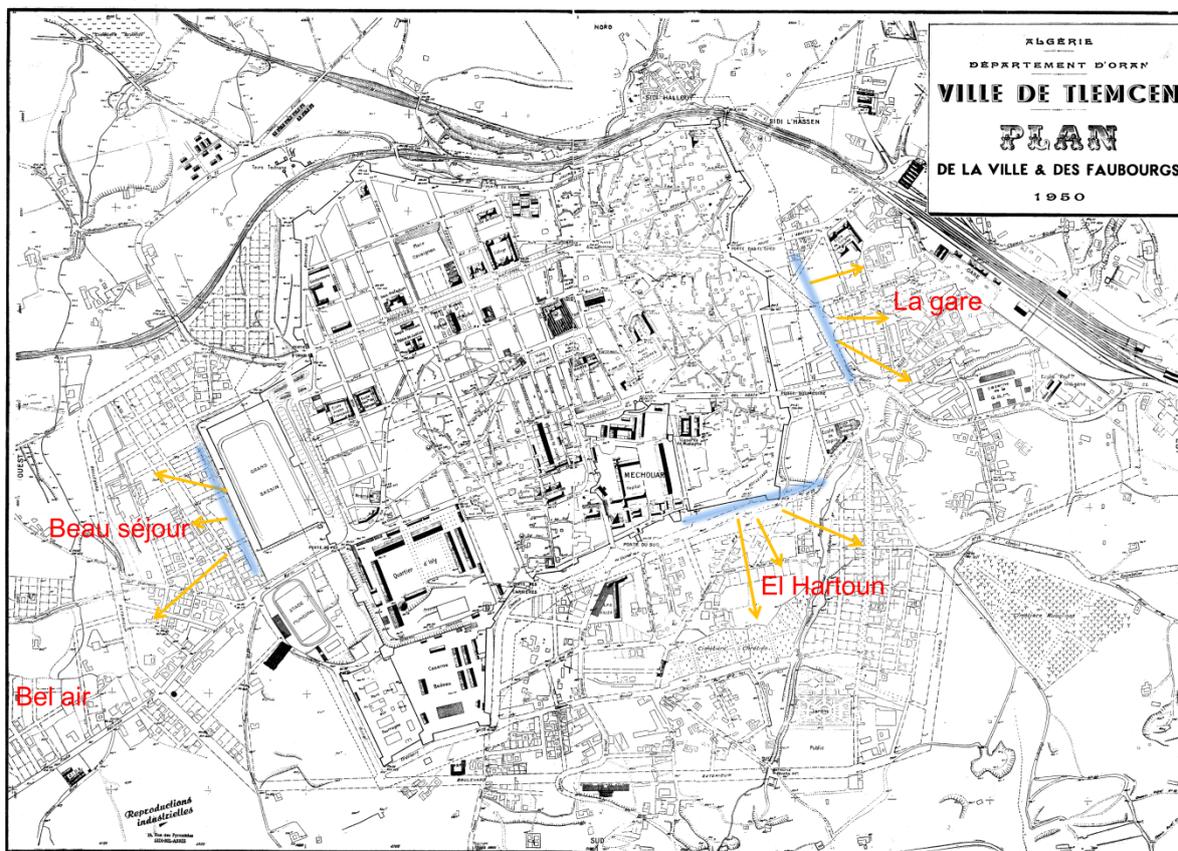


Figure 51: Extension de la ville de Tlemcen au-delà des remparts, 1950.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen, traité par l'auteur²⁴⁵.

3. Evolution du fragment d'étude :

3.1.La situation du fragment urbain :

Le fragment urbain est situé dans le quartier « Bab El Hadid », situé au sud-ouest de la médina de Tlemcen. Cette zone est délimitée par les rues suivantes :

- Au nord, la rue Hamzaoui Mounir ex rue de Fez,
- au sud, la rue Hamsali Sayeh,
- à l'est, la rue commandant Ferradj,
- et à l'ouest, la rue Docteur Tidjani Dmamardji ex rue de Paris.

²⁴⁵ Les archives de l'APC de Tlemcen (Plan de la ville de Tlemcen et des faubourgs 1950), traité par l'auteur.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

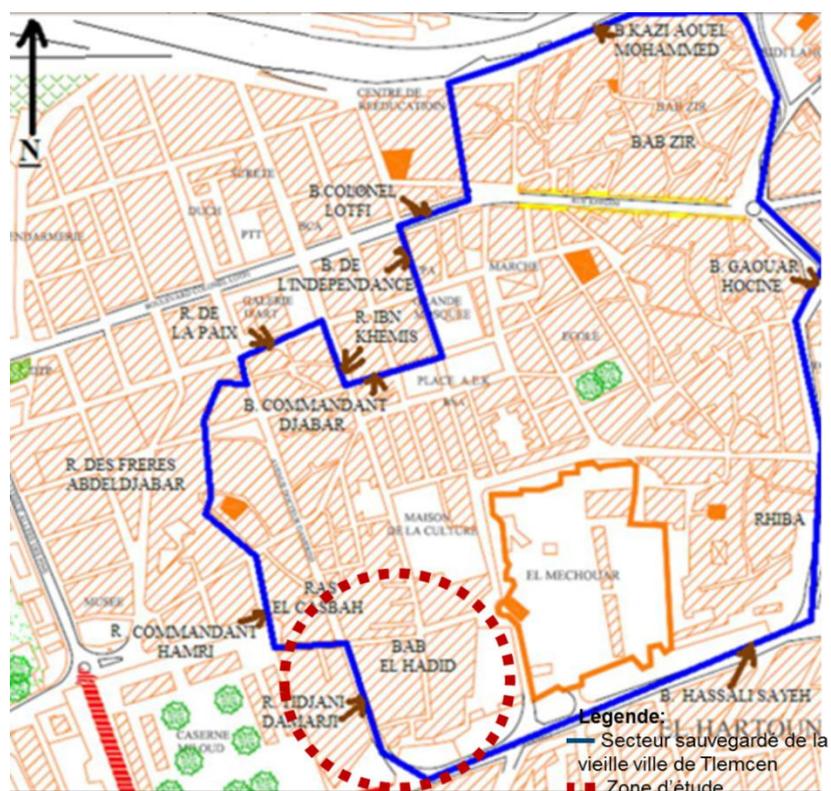


Figure 52 : La localisation du fragment urbain dans la vieille ville de Tlemcen.

Source : Direction de la Culture²⁴⁶.



Figure 53 : Délimitation de la zone d'étude.

Source : Google earth, traité par l'auteur.

²⁴⁶ Direction de la Culture – Tlemcen, Plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur du secteur sauvegardé de la vieille ville de Tlemcen.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

3.2.L'évolution du fragment urbain à travers l'histoire :

Nous allons présenter l'ensemble des transformations urbaines dans notre fragment d'étude, qui auraient pu conduire à la modification du microclimat urbain.

Pour reconstituer ces transformations, nous allons les présenter à travers les étapes suivantes:

- Le contexte de naissance du quartier de Bab El Hadid.
- Et l'évolution du fragment dans le temps selon des données qui traduisent la forme urbaine, à savoir : interventions sur le sol, sur la morphologie et modification des matériaux de construction.

3.2.1. La période Almoravide :

Au moment du règne de la dynastie des Almohades, les remparts ont été démolis et reconstruits sous cet empire. Ceci confirme l'hypothèse que l'enceinte du côté sud-ouest englobant la porte de Bab El Hadid et ses tours furent reconstruits dans cette période.

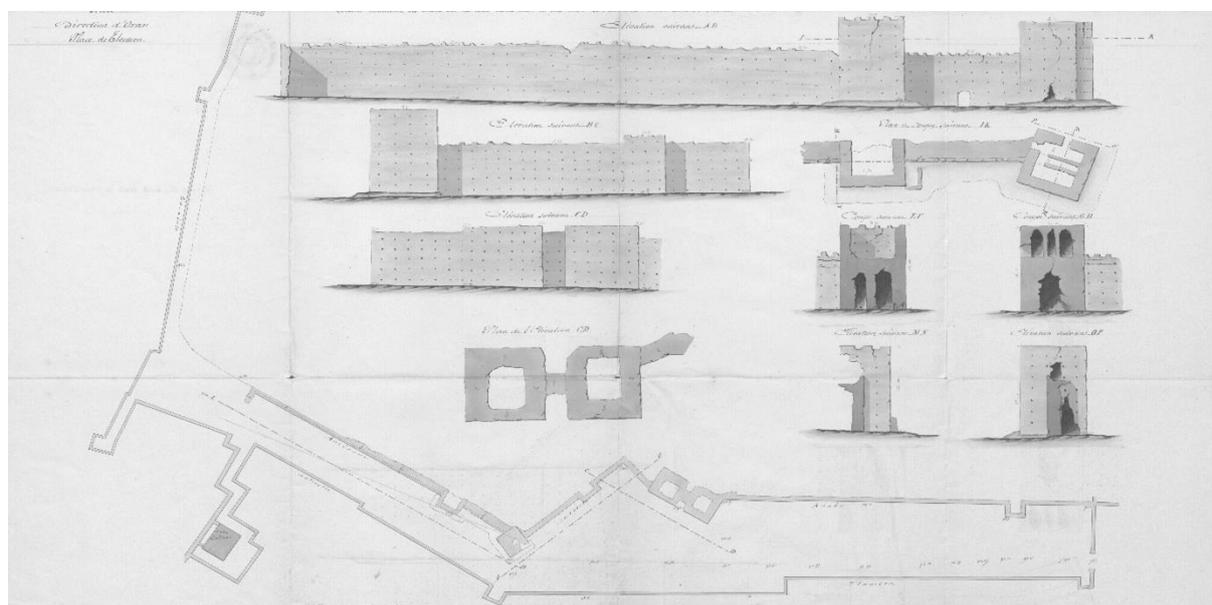


Figure 54: Relevé de la zone sud-ouest par le génie français avant leur intervention.

Source : Archives militaires de Vincennes²⁴⁷.

²⁴⁷ Archives militaires de Vincennes 189, Carton 3, dossier 4. Feuille 1, cité par Selka, C. (2019).

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

L'enceinte du côté sud-ouest comportait deux tours carrées très rapprochées l'une de l'autre formant le premier saillant est, alors qu'une troisième vient se placer au niveau de l'autre saillant. Cette dernière faisait partie vraisemblablement de la porte appelée Bab El Hadid, qui était percée entre cette tour carrée, et une autre barlongue sur l'enceinte, aujourd'hui disparue. Cette tour carrée, vu sa disposition et son envergure, est sans aucun doute la tour de Bab El Hadid²⁴⁸.

Selon les relevés français, les deux tours jumelles étaient creuses à l'intérieur, comprenant une grande épaisseur de parois, par contre la tour de Bab El Hadid, contenait deux niveaux.

3.2.2. La période Ottomane :

Le quartier de Bab El Hadid est le fait marquant de la mutation du tissu urbain pendant le règne de la dynastie ottomane. Les turcs, s'installèrent dans la zone sud-ouest, restée libre à ce moment-là. Ils tissèrent des liens de mariage donnant naissance à une nouvelle population (Kouloughlis : père turc et mère indigène)²⁴⁹.

Cette zone conserve des monuments célèbres tels que les deux mosquées: Sid'Ahmed Benzekri et un peu plus loin la mosquée Sidi Bouabdallah Cherif Tlemçani ainsi que le joyeux monument de la mosquée de Sidi Brahim El Mesmoudi. Des maisons traditionnelles, des fours, des hammams des brodeurs, des ébénistes et plusieurs échoppes d'artisans étaient organisés et structurés par rapport à un vécu, signifiant une logique d'appropriation de l'espace.

3.2.3. L'occupation française (XIXème- XXème siècle) : Percements des rues et reconstruction du flanc sud :

Dès 1842, la colonisation française s'appropriera la ville en détruisant les parties les plus significatives de l'espace urbain existant dans l'ancienne ville. La ville européenne s'installa au centre la ville et aux abords du Méchouar.

²⁴⁸ Selka, C. (2019). Evolution de l'architecture défensive de Tlemcen à l'époque médiévale : techniques, matériaux et critères d'intervention, thèse de Doctorat, Université de Tlemcen.

²⁴⁹ Ghomari, F. (2007). La médina de Tlemcen: l'héritage de l'histoire, *web journal*, disponible sur : <http://www.webjournal.unior.it/Dati/19/70/Web%20Journal%20vol.%203,%20Tlemcen.pdf>. Consulté le : 20/01/2019.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

En conséquence, notre fragment urbain été lui aussi touché par les travaux de percements des rues, à savoir la rue de Paris et la rue de Fez.

Dans le but de moderniser la ville, ce quartier a été percé par la rue Impériale, nommée la rue de Paris et la porte de Bab El Hadid a été démolie. En outre, la morphologie urbaine de la zone avait une structure arborescente constituée de ruelles, d'impasses et d'une grille orthogonale.

Ainsi, le flanc sud a été renforcé par le génie militaire français en réalisant un dédoublement de l'enceinte pour sécuriser la zone. Les deux ceintures sont régulièrement flanquées de tours barlongues, alors que la première contient en plus trois tours très particulières. (Figure 65).

Une tour carrée de grande envergure faisait partie du flanc sud de l'enceinte de la ville et qui après l'intervention française forma un flanquement de la nouvelle enceinte, et participa à la protection de la porte des carrières avant sa destruction quelques années plus tard²⁵⁰.

La tour se trouvait à l'est par rapport à la porte de Bab El Hadid et était très imposante. Après démolition et reconstruction par les français, la tour fût annexée à la nouvelle enceinte et faisait partie de protection du côté ouest par rapport à la nouvelle porte des carrières (figure 66).



Figure 55: Evolution de la tour au moment de son annexion à l'enceinte française.

Source : archives militaires de Vincennes, cité par Selka, C. (2019).

²⁵⁰ Selka, C. (2019). *Op.cit.*

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

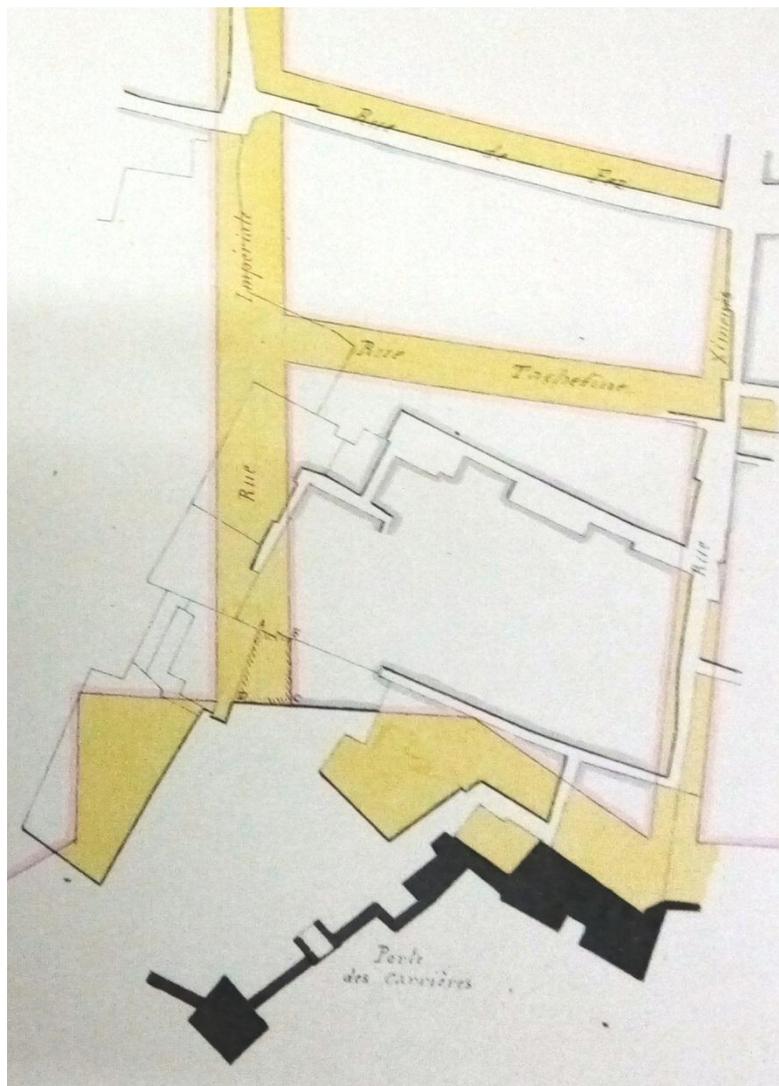


Figure 59: Plan et projet d'ouverture de la rue Impériale (rue de Paris) datant de 1868.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen²⁵³.

En plus des interventions sur la morphologie urbaine, des interventions souterraines, sur le sol et les matériaux y ont été effectuées. Les travaux se résument à la création d'un réseau d'assainissement au niveau de la rue de Paris et la rue de Fez (annexe 4), la mise en place de caniveaux en calcaire dur, la démolition de la porte de Bab El Hadid, la démolition de la maçonnerie de moellons, la reconstruction de la porte des carrières du Bordj et de l'enceinte en pierre, la mise en place de bordure de trottoir en calcaire dur, sous forme de sable ou sous

²⁵³ Les archives de l'APC de Tlemcen (Acquisition des immeubles du plan Cadastral, extrait du plan et projet d'ouverture, 1868).

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

forme de béton hydraulique, ainsi que l'exécution des enrobés bitumineux (annexe 9). Ils édifièrent des maisons en R+1 en pierre et brique pleine avec des façades extraverties, ceci a donné naissance à une typologie hybride contenant un patio quelques fois et des ouvertures vers l'extérieur.

En conclusion, notre fragment urbain avait une morphologie spécifique ; une densité du bâti élevé, des prospects de rue très élevés, des rues non ou mal pavées, hauteur du bâti réduite, constructions en pierre, pisé ou brique pleine. Les transformations urbaines ont dû changer l'aspect de cette zone. Le pavage du sol des rues a modifié les matériaux de surface des voiries. L'introduction d'un réseau d'assainissement a permis de combler les fossés. La percée de la nouvelle rue de Paris a dû modifier la densité du bâti, augmenter le prospect de la rue et modifier la nature des matériaux des parois ainsi que la hauteur des maisons qui longent cette rue. Cet alignement a donc produit une dé-densification du fragment urbain. Ce fait important va contribuer à augmenter ce que l'on pourrait appeler « la perméabilité » du tissu urbain aux différents paramètres climatiques, permettant à l'air de mieux circuler et à la lumière de pénétrer davantage dans les rues.

3.2.4. La période post indépendance :

Après l'indépendance, la rue de Paris et la rue de Fez ont changé de nom pour devenir respectivement la rue Tidjani Damardji et la rue Hamzaoui Mounir. D'autres mutations architecturales et urbaines ont eu lieu sur ce site.

Des travaux d'entretien touchèrent la tour en 2003 et en 2010, où une reprise intégrale d'enduits, une installation d'une grille et d'une porte en métal pour sécuriser l'accès, un renouvellement de quelques briques cassées, et le rejointoiement de celles-ci ont été mis en place.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

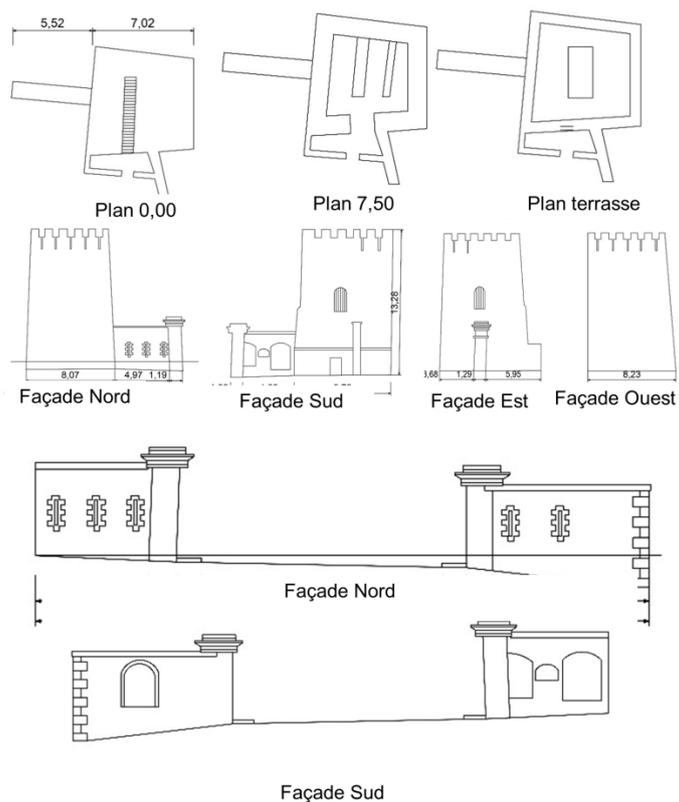


Figure 60: Relevés de la porte des Carrières et du Bordj de Bab El Hadid.

Source : Bureau d'études Arcades (2010).



Figure 61: Vue actuelle sur l'emplacement de la porte des carrières.

Source : Auteur du mémoire (2018).

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

A l'heure actuelle, La porte des carrières et une partie de l'enceinte attenante au deux piliers ont été démolies. Plusieurs remaniements, récemment effectués au niveau des façades, de la hauteur du bâti et des matériaux ont eu lieu aussi.

D'autres travaux ont touché le sol urbain où l'intervention consiste au pavage des rues, cours et jardins. On assiste à un goudronnage des rues, le pavé a été remplacé peu à peu dans les principales rues de circulation automobiles, des carreaux de terre cuite ont été déposés au niveau des trottoirs. Par conséquent l'imperméabilité de la surface du sol a fait l'objet d'une modification. Un grand jardin près de la porte des Carrières a disparu, à sa place un grand bâtiment clôturé a été édifiée. Après démolition et reconstruction de quelques maisons, la typologie des maisons avec patio tend à disparaître peu à peu et est remplacée par des bâtiments de hauteur de R+2 à R+3 en béton armé et brique creuse extravertis avec de grandes baies vitrées à usage commercial au rez-de chaussée et habitations à l'étage. De ce fait, la densité du bâti, la densité végétale, le prospect du canyon et l'albédo des surfaces du bâti, des toitures et du sol ont changé.



Figure 62: Nouvelles constructions au sein de notre fragment urbain.

Source : Auteur, (2017).

4. Synthèse des transformations urbaines du fragment d'étude de Bab El Hadid :

Tlemcen connaît, au même titre que les autres villes algériennes, une transformation urbaine, pendant l'époque coloniale, salubriste, sur des éléments de la forme urbaine. Au centre-ville, comme ailleurs, le génie militaire est intervenu avec les transformations que nous avons cités

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

plus haut pour assurer le contrôle, la circulation des véhicules et assainir l'air des villes et l'environnement climatique urbain. Après l'indépendance, les mutations deviennent plutôt architecturales, elles sont plutôt ponctuelles et à caractère privé.

Les transformations urbaines que nous venons d'exposer sont sans aucun doute des modifications potentielles agissant sur l'environnement climatique. Par la suite d'autres considérations s'ajouteront, parmi lesquelles le changement des propriétaires vu la vente des biens par les héritiers et l'adjonction de la nouvelle vocation commerciale des rez de chaussées des bâtisses. Nous savons aujourd'hui, au vu des travaux de la climatologie urbaine, que ce sont là des interventions pouvant avoir un effet sur l'environnement climatique.

La lecture de l'évolution des transformations urbaines touchant notre zone d'étude nous a permis de classer deux catégories d'intervention sur les éléments de la forme urbaine :

- Des interventions sur le vide urbain : l'élargissement des rues, la percée d'une nouvelle rue, l'élargissement de ces derniers, la limitation du prospect de canyon ; la réduction de la densité du bâti, l'augmentation de la densité végétale permettent d'assurer et d'améliorer l'accessibilité de l'air, de la lumière et du soleil dans les espaces urbains et les habitations et la dissipation de la pollution urbaine. L'action majeure des transformations au sein de notre zone est celle de la percée de la rue de Paris, un indicateur d'ouverture du vide urbain. Après l'instauration du secteur sauvegardé, cette zone sera comprise dans ce dernier, le vide urbain reste dans son état, mais cela n'a pas empêché d'avoir quelques changements au niveau du prospect des rues.
- Des interventions sur la minéralisation des surfaces du sol et des enveloppes bâties : les multiples changements des matériaux des enveloppes bâties et du sol urbain ont répondu à divers objectifs ; la disponibilité des matériaux et la sécurité. Ces transformations ont modifié la minéralisation de la surface urbaine du fragment étudié. Elles se résument principalement comme suit : le pavage du sol des rues, remplacé par la suite par du bitume dans les voies de circulation et des carreaux de terre cuite dans les trottoirs, l'introduction d'un réseau d'assainissement et la modification des matériaux des parois. Vu que l'interaction entre la surface urbaine et l'air entraîne des échanges thermiques, la modification des éléments de la surface urbaine peut entraîner un important changement du microclimat urbain.

Chapitre I : Evolution historique des transformations urbaines du quartier historique de Bab El Hadid.

Les transformations urbaines qu'a subit le quartier de Bab El Hadid ont été faites à diverses fins. La première intention était militaire, la seconde pour un but de salubrité. Alors que pour ces dernières années, les changements ponctuels ont dû changer la grandeur du vide urbain.

En ce qui concerne l'échelle temporelle, les travaux liés à l'augmentation ou la réduction des surfaces bâties sont lents, contrairement à la modification de la surface du sol urbain. De ce fait, l'échelle temporelle des transformations urbaines sera variable.

Rappelons que les pionniers des transformations urbaines à travers l'histoire ne savaient pas sur quoi agir, au regard des interactions de ces mutations architecturales et urbaines sur le microclimat. Sans quoi, ils pouvaient prévoir les effets de leurs interventions dans l'espace urbain.

Conclusion :

Dans ce chapitre de présentation du fragment d'étude, nous avons présenté les principales transformations urbaines qui ont touché la zone étudiée à travers l'histoire.

En premier lieu, nous avons essayé de retracer l'histoire et l'évolution de la ville de Tlemcen. En second lieu, une présentation et analyse historique du fragment choisi a eu lieu annexée d'une interprétation de la complexité spatiale et temporelle des interventions sur la forme urbaine et les interactions entre leurs effets.

Nous allons dans le prochain chapitre quantifier ces effets par le calcul des indicateurs de la morphologie urbaine, effectuer une modélisation des transformations urbaines et des simulations numériques afin de quantifier et évaluer la pertinence des transformations de la zone d'étude à réguler le microclimat.

CHAPITRE II :

**Caractérisation des indicateurs morphologiques et
simulation des effets microclimatiques liés aux
transformations urbaines dans le quartier de Bab El
Hadid.**

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Introduction :

Ce chapitre vise à étudier l'incidence des éléments de la forme urbaine du quartier historique de Bab El Hadid sur les ambiances microclimatiques et à examiner l'influence des mutations urbaines coloniales et postcoloniales sur la variation de l'environnement thermique.

Nous présentons dans ce chapitre les différentes techniques mises en œuvre dans cette recherche pour arriver à comprendre l'influence des mutations urbaines sur les variations microclimatiques, mais avant cela, nous présentons les cinq canyons urbains choisis dans notre secteur urbain.

A cet effet nous avons pris un secteur urbain faisant partie de Bab El Hadid. Nous avons procédé à identifier les indicateurs morphologiques actuels du secteur en se basant sur la technique de mesure sur carte, ensuite nous analyserons les effets microclimatiques générés par les transformations urbaines par simulation numérique. Notre méthode revient à modéliser les transformations urbaines de trois périodes distinctes et simuler l'environnement thermique afin d'analyser la variabilité des ambiances microclimatiques. L'outil informatique utilisé est le logiciel ENVI-MET. Beaucoup plus d'explication pour son application seront données dans la suite du chapitre.

1. Site d'étude : canyons urbains représentatifs.

Comme site d'étude, nous avons choisi cinq canyons urbains situés dans le quartier de Bab El Hadid faisant partie du centre historique de la ville de Tlemcen. Cette zone est constituée de plusieurs tissus morphologiques distincts reflétant des périodes de réalisation différentes. Elle manifeste une bonne diversité typologique dans son aménagement urbain. Elle comprend un ancien tissu ottoman constitué de maisons traditionnelles, deux mosquées et des ruelles étroites, un autre colonial constitué du Bordj Bab El Hadid, la porte des carrières, et la percée de la rue de Paris, ainsi que quelques maisons. Des modifications postcoloniales au niveau des façades et hauteurs des bâtiments ont eu lieu dans notre secteur d'étude.

Le choix du quartier de Bab El Hadid comme site d'étude a été guidé également par des raisons pratiques telles que la connaissance des lieux et la succession des interventions au sein de celui-ci. Cette zone est donc un bon site d'étude.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Dans ce quartier, les cinq canyons urbains ont été choisis afin d'identifier et de calculer les indicateurs morphologiques. Ces canyons sont localisés dans des tissus présentant des périodes de conception différentes et donc de densités urbaines différentes. Ce fragment urbain présente une variabilité de caractéristiques typo-morphologiques, ce qui nous a amené à supposer qu'elles puissent présenter des variations microclimatiques repérables.

La technique mise en œuvre dans cette partie est l'analyse typo-morphologique du secteur d'étude pour déterminer les indicateurs morphologiques déterminants.

Une carte avec repères a été représentée graphiquement sur les espaces extérieurs du fragment étudié (figure 73). Elle permet de mettre en liaison les différentes données morphologiques recueillies dans ces espaces. La méthode consiste à insérer tout élément qui caractérise la forme urbaine : la hauteur du bâtiment, le degré d'ouverture vers le ciel, la nature des matériaux de revêtements, l'orientation et la présence du végétal.



Figure 63: Secteur urbain choisi.

Source : Auteur, 2017.

2. Analyse typo-morphologique du secteur d'étude :

Le secteur d'étude se situe dans la partie sud est de la Médina. Le choix est motivé par :

- Les différentes périodes de construction des tissus urbains (traditionnel, colonial et postcolonial), ce qui permet de vérifier l'effet de la transformation diachronique de la morphologie urbaine sur la variation des microclimats.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

- Les caractéristiques distinctes de la structure physique du tissu urbain (densité bâtie, facteur de vue de ciel, albédo moyen des surfaces, ...etc.).

Un ensemble de points de mesure ont été choisis dans le tissu, chacun d'eux se caractérise par une structure morphologique distincte, tels que l'ouverture vers le ciel, la hauteur des bâtiments et la nature des matériaux définissant l'espace....etc.

Ce choix a pour objectif de démontrer l'effet de cette diversité sur le microclimat.

2.1. Caractéristiques de la forme urbaine :

Variables	Interprétation
Matériaux au sol, albédo (10).	Définir les matériaux au sol : béton, etc.
Matériaux des façades, albédo (9).	Définition les matériaux aux façades : par exemple brique, verre, béton, bois, etc.
Ratio H/L (8).	Le rapport entre la somme des hauteurs des bâtiments et la plus petite largeur de l'espace.
Orientation de la façade.	L'orientation de la normale de la façade : Nord, Est, Ouest, Sud.
Densité du bâti.	Le rapport de la surface de l'emprise des bâtis à la surface totale du périmètre.
Rugosité.	Le rapport entre la surface verticale bâtie et la surface de la canopée urbaine.
Densité végétale.	Le rapport entre la distribution horizontale de tous les aménagements urbains verts et la surface totale.
Porosité.	Le rapport entre le volume des vides et le volume total.
Minéralisation.	Définir si l'espace est minéral ou végétal.
Présence d'un dispositif architectural ou urbain.	Noter si oui (O) ou non (N) il y a un « dispositif » architectural ou urbain.
Définition du dispositif.	Définir le dispositif : tel que des pilotis, trous sous immeuble, balcon, etc.
Présence de végétal (11).	Noter si oui (O) ou non (N) il y a du végétal.
Type du végétal.	Définir s'il s'agit d'arbres d'alignement, de haies, de brousses, de pelouse, etc.
Présence d'un mobilier urbain.	Noter si oui (O) ou non (N) il y a un mobilier urbain.
Définition du mobilier.	Qualifier le mobilier présent dans la case : banc, poubelle, téléphone, fontaine, terrasse de café, un arrêt de bus, un lampadaire, ... etc.

Tableau 15: Caractéristiques recherchées de la forme urbaine.

Source : Auteur du mémoire.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Les tableaux suivants regroupent les différents points de mesure, en indiquant le nom de l'espace de mesure et sa position dans le tissu urbain, le relevé photographique et morphologique.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nom du canyon urbain	Abréviation
Rue Tidjani Demerdji (parcours piéton et voie mécanique).	Canyon 1
Lecture morphologique	<ul style="list-style-type: none"> -Orienté nord-est, d'une largeur de 9.00 m, à caractère commercial et résidentiel. -Alignement de bâtiments de hauteur de R+1 à R+2, caractérisé par des maisons hybrides constituées de patio, de façade extravertis. -Façade en béton, verre, brique et pierre. -Revêtement du sol de la voie en bitume et en terre cuite pour les trottoirs. - Trottoirs arborés de part et d'autre. -Les bâtiments attachés ou étroitement espacés de 3 à 9 m de hauteur. -Hauteur variable des bâtiments et dimensions des parcelles. -Le facteur de vue du ciel est important au niveau de la rue. -Fort débit de circulation.
Illustration	 <p>The illustration consists of two side-by-side images. The left image is an aerial photograph of a dense urban area, with a street labeled 'Rue de Paris (Dossier Tidjani Demerdji)' running through it. A north arrow is visible in the top right corner of this image. The right image is a street-level photograph showing a narrow street lined with parked cars on both sides, with trees and buildings visible in the background.</p>

Tableau 16: Présentation et lecture morphologique du canyon 1.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nom du canyon urbain	Abréviation
Tahtaha (Parking)	Canyon 2
Lecture morphologique	<ul style="list-style-type: none"> -Situé au niveau de la Tahtaha, à grand axe orienté est–ouest d’une longueur de 50m, d’une largeur de 8 à 17m et d’une surface de 620m². -Bâtiments à caractère résidentiel, sanitaire, et de stationnement pour automobiles caractérisé par un revêtement en bitume. -Agencement ouvert des bâtiments de 1 à 2 étages. -Matériaux de construction lourds (pierre, béton, brique). -Zone dépourvue d’arbres et de végétation. -Présence d’une enceinte datant de l’époque coloniale. -Facteur de vue de ciel important.
Illustration	

Tableau 17: Présentation et lecture morphologique du canyon 2.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nom du canyon urbain	Abréviation
Ruelle 3 (parcours piéton).	Canyon 3
Lecture morphologique	<ul style="list-style-type: none"> -Parcours piéton en bitume dégradé, orienté nord-est, ruelle d'une largeur de 1,60 m à 3,60 m à caractère résidentiel et sanitaire (présence d'un laboratoire d'analyse). - Absence de trottoirs. -Bâtiments de R+1 à R+2, maisons de type traditionnel introverties à patio. -Absence de végétation dans l'espace extérieur. - Matériaux de constructions : pierre, béton, brique crue et cuite. -Les bâtiments étroitement espacés de 3-6 m de haut. -Faible facteur de vue du ciel au niveau de la ruelle.
Illustration	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>

Tableau 18: Présentation et lecture morphologique du canyon 3.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nom du canyon urbain		Abréviation
Ruelle 2 (parcours piéton).		Canyon 4
Lecture morphologique	<ul style="list-style-type: none"> -Les bâtiments étroitement espacés et de 3 à 6 m de haut. -Les bâtiments sont séparés par une étroite ruelle piétonne (2 m). -Revêtement de surface du sol en bitume dégradé. -Absence de trottoirs et de végétation. -Matériaux de construction lourds (pierre, béton, brique). -Zone résidentielle. -Faible facteur de vue du ciel au niveau de la ruelle. 	
Illustration		

Tableau 19: Présentation et lecture morphologique du canyon 4.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nom du canyon urbain		Abréviation
Ruelle 1		Canyon 5
Lecture morphologique	<ul style="list-style-type: none"> -Les bâtiments étroitement espacés et de 3 à 9 m de haut, de R+1 à R+2. -Les bâtiments sont séparés par une étroite rue mécanique (3 m). -La rue est dépourvue de trottoirs. -Matériaux de construction lourds (béton, brique). -Flux de trafic moyen. -Revêtement de la surface du sol en bitume. -Le rapport d'aspect du canyon (H/L) moyen (2,00). -Fonction résidentielle et commerciale. -Absence d'arbres et de végétation. -Faible facteur de vue du ciel au niveau de la rue. 	
Illustration		

Tableau 20: Présentation et lecture morphologique du canyon 5.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

2.2. Evaluation des indicateurs à l'échelle du tissu urbain :

L'évaluation des indicateurs à l'échelle du tissu urbain a été calculée à partir des relevés urbains et des images satellites produites par Google Earth Pro.



Figure 64: Secteur d'étude, périmètres de calcul et canyons urbains.

Source : Google Earth, (2017).

L'évaluation des indicateurs s'est effectuée selon un périmètre de calcul choisi en fonction des canyons urbains et des points de mesures. Ce périmètre doit être suffisamment grand pour tenir compte de l'influence des portions urbaines avoisinantes. Il doit également délimiter un tissu urbain doté d'une homogénéité morphologique suffisante autour de l'espace pour être représentatif. À partir de ces critères, cinq périmètres de calcul ont été définis correspondant à chacun des tissus urbains à l'étude (figure 74). Le tableau suivant montre les résultats de calcul des indicateurs à l'échelle du tissu urbain.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Périmètre de calcul	Indicateurs à l'échelle du tissu urbain			
	La densité du bâti	La rugosité urbaine	Densité végétale	Porosité urbaine
Canyon 1	0,68	0,82	0,24	0,32
Canyon 2	0,56	0,57	0,02	0,44
Canyon 3	0,86	0,63	0,018	0,12
Canyon 4	0,82	0,68	0,01	0,13
Canyon 5	0,83	0,78	0,008	0,19

Tableau 21: Résultats des calculs des indicateurs à l'échelle du tissu urbain.

Source : Auteur du mémoire.

2.2.1. La densité du bâti :

Les résultats de calcul indiquent une variabilité importante des indicateurs morphologiques entre les cinq périmètres de calcul.

Le secteur des canyons 3, 4 et 5 démontrent les plus importantes valeurs de densité bâtie, elles représentent respectivement 86%, 82% et 83%. Ces valeurs peuvent s'expliquer par les fortes occupations spatiales horizontales et la rareté des espaces ouverts comparativement aux deux autres périmètres de calcul. En revanche, le canyon 2 présente une valeur de densité bâtie faible (56%). Cette valeur est due essentiellement à la faible occupation au sol. Quant au canyon 1, il présente une valeur faible de la densité bâtie (68%) due en partie à l'importance des aménagements verts mais également aux grandes dimensions horizontales.

2.2.2. La rugosité urbaine :

La zone du canyon urbain 1 démontre la plus importante valeur de rugosité urbaine. Il est caractérisé par des hauteurs de bâtiments importantes (hauteur moyenne 9 m). Des valeurs

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

moins importantes ont été relevées dans le canyon 2. Ces valeurs sont dûes essentiellement à l'importance de la superficie de la tahtaha et aux grandes dimensions horizontales des espaces non bâtis.

2.2.3. La densité végétale :

Le calcul de cet indicateur montre que la plus importante valeur (24%) a été relevée au canyon 1. Ceci s'explique par la présence d'aménagement d'arbres le long des trottoirs. Des valeurs nettement inférieures de 2%, 1,8%, 1% et 0,8% ont été relevées respectivement dans les canyons 2, 3, 4 et 5. Ces valeurs sont dûes principalement à la rareté des espaces d'aménagement vert (jardin, parcs, arbres, haies.. etc.).

2.2.4. La porosité urbaine :

Les résultats du calcul de cet indicateur présentent des valeurs variables entre les différents tissus urbains. Les canyons 2 et 1 présentent les valeurs les plus élevées. Ces valeurs sont dûes en partie à la présence plus fréquente des arbres et espaces libres. Par ailleurs, les trois autres canyons présentent une valeur de porosité urbaine relativement faible dûe principalement à l'étroitesse des ruelles.

2.3. Evaluation des indicateurs à l'échelle de l'espace public :

Le calcul des indicateurs morphologiques à l'échelle de l'espace public s'est effectué par espace dans les différents canyons urbains dans le cas de l'albédo moyen des surfaces et du ratio H/L. En ce qui concerne l'évaluation du facteur de vue de ciel, nous allons la développer dans les parties qui vont suivre dans le présent chapitre.

Les valeurs moyennes des indicateurs de distance, de proportion spatiale des espaces publics ont été calculées dans l'espace à partir de mesure de relevés architecturaux et urbains. Quant à l'autre indicateur, l'albédo moyen des surfaces, il est basé sur l'analyse visuelle d'un relevé photographique.

Le tableau suivant montre les résultats de calcul des indicateurs à l'échelle de l'espace urbain :

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Points de mesure	Indicateurs à l'échelle de l'espace public								
	Le ratio H/L	L'albédo moyen des surfaces							
		Béton	Brique	Pierre	Verre	Bitume	Arbres	Toit	Albédo moyen
		0,35	0,3	0,4	0,4	0,2	0,18	0,18	
Canyon 1	1,18 à 1,70	10%	35%	15%	20%	5%	5%	10%	0,25
Canyon 2	0,60 à 0,85	6%	43%	27%	8%	10%	1%	5%	0,28
Canyon 3	1,50 à 2,70	5%	40%	35%	8%	5%	0%	7%	0,30
Canyon 4	1,06 à 3	5%	40%	35%	8%	5%	0%	7%	0,30
Canyon 5	2	8%	42%	25%	10%	5%	0%	10%	0,32

Tableau 22: Résultats des calculs des indicateurs à l'échelle de l'espace public.

Source : Auteur du mémoire.

2.3.1. Le ratio H/L :

Les résultats du calcul de cet indicateur présentent une variabilité importante du ratio H/L. Les points de mesure 1, 3, 4 et 5 montrent des valeurs importantes du ratio H/L (>1). Par contre, le canyon 2 présente une faible valeur due particulièrement à l'éloignement des bâtiments aux alentours des points de mesure.

2.3.2. Albédo moyen des surfaces :

Le calcul de cet indicateur repose sur l'analyse visuelle des photographies sur des valeurs d'albédo proposées par Mat SANTAMOURIS²⁵⁴. Les résultats de calcul démontrent des valeurs variables entre les points de mesure. Les canyons 3, 4 et 5 révèlent des albédos importants. Ces valeurs sont dues particulièrement aux caractéristiques des matériaux de construction (béton, brique, pierre et bitume). Par ailleurs, le canyon 1 expose des albédos moins élevés, dus particulièrement au pourcentage de la végétation caractérisée par une valeur d'albédo très faible.

²⁵⁴ Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. doi:10.1016/j.solener.2010.12.023.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

2.4. Synthèse :

Le calcul des indicateurs morphologiques a pour objectif de caractériser les différents tissus urbains. Les résultats de calcul présentent une grande variabilité entre les canyons urbains en termes d'indicateurs morphologiques.

Suite à cette étude, nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes :

-A l'échelle du tissu urbain, les indicateurs morphologiques présentent une variabilité importante pour les cinq canyons urbains. Les zones 3, 4 et 5 présentent les plus importantes valeurs de densité bâtie. Par contre, elles montrent des valeurs plus faibles de porosité urbaine. En revanche, les canyons 1, 4 et 5 ont les plus grandes valeurs de rugosité urbaine. Le canyon 1 montre particulièrement la plus faible valeur de densité végétale.

-Quant à l'échelle de l'espace public, elle montre une variabilité importante entre les différents canyons du tissu urbain.

En ce qui concerne le ratio H/L, le canyon 2 possède une faible valeur comparé aux autres. Pour l'albédo moyen des surfaces, les valeurs les plus importantes se situent au niveau des canyons 3, 4 et 5. Par contre, le canyon 1 détient la plus faible valeur d'albédo moyen de surface, ceci est dû à la présence d'arbres.

3. Modélisation et simulation avec le modèle ENVI-MET :

3.1. Présentation :

Le logiciel ENVI-MET a été développé au sein du Groupe de Recherche en Climatologie (GRC) au département de géographie de l'université de Bochum en Allemagne par Michael BRUSE. La zone d'étude a été modélisée en utilisant ENVI-MET V 4.3.1. Il s'agit d'un modèle numérique de pronostic tridimensionnel à micro-échelle qui a plusieurs capacités.

Il calcule la distribution de la chaleur et de l'humidité dans l'environnement urbain en fonction de la dynamique des fluides et des équations de la thermodynamique. Il prend en compte l'effet du rayonnement solaire, de l'humidité et du stockage de la chaleur dans le sol, l'interaction des plantes avec l'environnement (sol, bâtiments et air) et la réflexion/absorption des bâtiments avec une résolution de grille de 0,5-10 m et un pas de temps de 10s durant un cycle journalier (24 ou 48 heures).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Ce modèle simule aussi les interactions entre différentes surfaces urbaines (sol, bâtiments et toiture), la végétation et l'atmosphère. Il permet ainsi d'analyser l'impact des modifications de l'environnement urbain sur le microclimat à petite échelle (arbres, toitures végétalisées, hauteur de bâtiments, ...etc.). Ce modèle tridimensionnel permet de calculer les flux radiatifs, les températures de surfaces, le champ de vitesse du vent, le taux d'humidité et la température de l'air dans une géométrie urbaine complexe et en présence de la végétation. Cette dernière est représentée par un milieu poreux au vent et semi-transparent par rapport au rayonnement solaire ; les processus d'évapotranspiration et de photosynthèse sont exprimés dans les bilans de masse et de chaleur.

ENVI-MET prend en compte le rayonnement direct et diffus de courte longueur d'onde et les flux de rayonnement de longue longueur d'onde provenant du sol, des surfaces des bâtiments et de l'atmosphère libre. Pour notre étude, nous avons analysé les conditions microclimatiques au niveau des rues où le rayonnement solaire du sol diminue avec la hauteur des bâtiments.

ENVI-MET a la capacité de traiter l'ensemble des aspects du microclimat urbain d'ordre thermodynamique et aéraulique, en tenant compte des effets de la végétation. Cette capacité constitue un atout car la majorité des logiciels actuellement utilisés dans la simulation du microclimat urbain, se focalisent sur l'analyse d'un seul aspect du microclimat et ainsi ne recouvrent pas l'ensemble des aspects. Un outil de visualisation (LEONARDO) permet ensuite de visualiser les résultats de la modélisation, en deux dimensions 2D comme en trois dimensions 3D.

De nombreuses études ont montré qu'ENVI-MET est capable de simuler des environnements thermiques extérieurs dans différents modèles climatiques avec une précision acceptable²⁵⁵⁻²⁵⁶.

Chaque structure urbaine et chaque élément végétal peuvent être explicitement simulés avec ENVI-MET, ce qui fait du logiciel « l'outil parfait » pour les urbanistes, les architectes et les climatologues urbains qui veulent simuler les composants météorologiques de l'environnement urbain.

²⁵⁵ Taleb, D., & Abu-Hijleh, B. (2013). Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. *Renewable Energy*, 50, 747–762. doi:10.1016/j.renene.2012.07.030.

²⁵⁶ Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*, 125, 356–372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.09.006.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

ENVI-MET est le seul logiciel où l'ensemble des facteurs influencent le confort thermique comme, la vitesse du vent, la direction et la température moyenne radiante (TMRT). Ils sont intégralement simulés afin de calculer les indices du confort thermique.

La figure suivante illustre l'outil de modélisation et simulation utilisé par Esther LAHME et Michael BRUSE pour analyser dans quelle mesure les espaces verts urbains peuvent améliorer la qualité de vie urbaine à l'échelle microclimatique dans un parc urbain (Stadtgarten) dans la ville d'Essen en Allemagne.

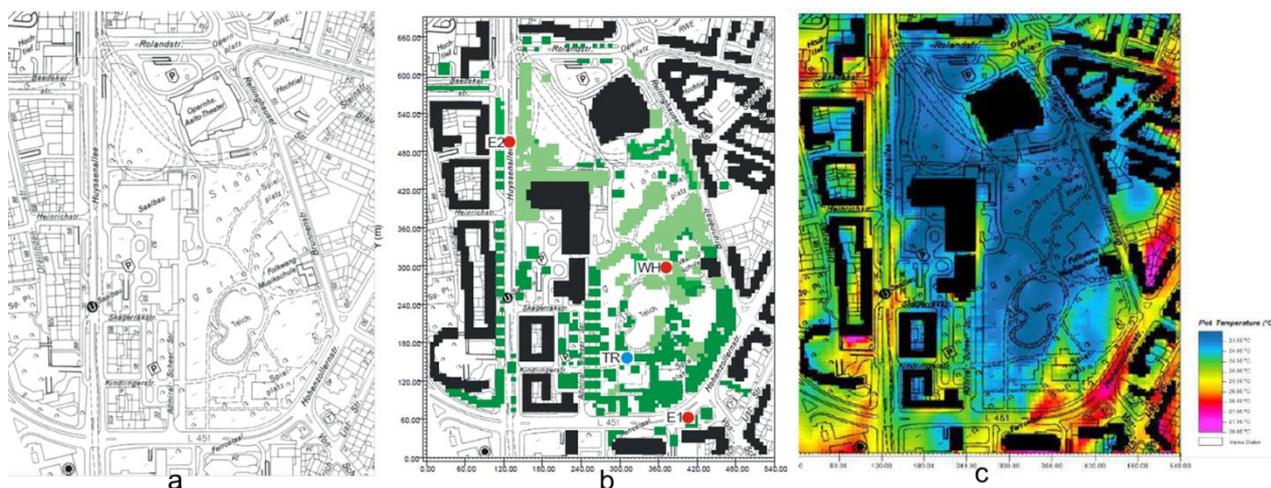


Figure 65: a. configuration de la zone du parc urbain. b. Interprétation par le modèle ENVI-MET. c. Sortie, température de l'air.

Source : Esther LAHME et al.²⁵⁷

3.2. Les entrées de simulation :

Après la description du modèle, les conditions d'entrée sont présentées dans cette section. Trois types de conditions sont nécessaires : les paramètres géographiques et temporels, les paramètres physiques de la géométrie modélisée, et enfin les conditions météorologiques.

Les paramètres géographiques et temporels à renseigner en entrée sont :

- La localisation du lieu, déterminée en précisant la latitude, la longitude et l'orientation du site par rapport au nord ;
- Le jour, le mois, l'année, l'heure du début et de la fin des simulations.

Les paramètres physiques utilisés en entrée sont :

²⁵⁷ Lahme, E., Bruse, M. (2003). microclimatic effects of a small urban park in a densely build up area: measurements and model simulations, *ICU5, Fifth international conference on urban climate*. Lodz : [s.n].

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

- La géométrie du modèle 3D avec les éléments de la morphologie (bâti, végétation et sol). Ces éléments sont représentés sous forme d'un ensemble de cellules d'une grille régulière.

- Le choix des matériaux de surface de sol, toiture et murs des façades.

Enfin, les conditions météorologiques sont nécessaires pour calculer la température de l'air et de surface, l'indice thermique.... Ces paramètres ont des valeurs constantes de température moyenne, vitesse de l'air et humidité relative.

3.3. Les sorties de simulation :

ENVI-MET peut générer des données de sortie sous une multitude de paramètres dans plusieurs types de répertoires. Parmi ces répertoires le « Fichier de sortie en 3D » contient les fichiers atmosphère, surface et sol. Ces résultats sont visualisés grâce à un autre logiciel, LEONARDO qui est couplé à ENVI-MET. Parmi les plus souvent utilisés, on distingue : l'écoulement du vent (les flux du vent et la dispersion des polluants), les turbulences, les flux de rayonnement (direct, diffus et le rayonnement réfléchi par les bâtiments), la température, le facteur de vue du ciel, l'humidité, le Vote Moyen Prévisible-PMV, et la Température Effective Physiologique (PET).

4. Simulation et analyse de l'environnement thermique des trois configurations urbaines :

Cette partie est consacrée à l'application du modèle ENVI-MET sur trois configurations liées aux transformations urbaine du secteur d'étude. Ces trois configurations correspondent à trois périodes distinctes, la première relative à la période précoloniale (avant les travaux du génie militaire français), la deuxième à celle de la période coloniale (plan d'alignement de Bab El Hadid en 1877) et la dernière qui représente l'état de fait actuel. Elles sont représentatives des trois sous-configurations de la forme urbaine de l'évolution du secteur d'étude.

Afin que la comparaison soit cohérente entre les trois différentes morphologies, nous proposons des mêmes données météorologiques issues du climat caractéristique de l'actuelle ville de Tlemcen. L'étude se portera sur des journées chaudes représentatives des dix

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

dernières années. Dans une première partie, nous présenterons les données météorologiques nécessaires à nos simulations et indiquées dans l'annexe 11.

En second lieu, on discutera des indicateurs physiques et géométriques en relation avec le confort et cela pour les trois configurations urbaines: la température de rayonnement solaire et le facteur de ciel vue. Les indicateurs morphologiques ont été calculés et analysés précédemment.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

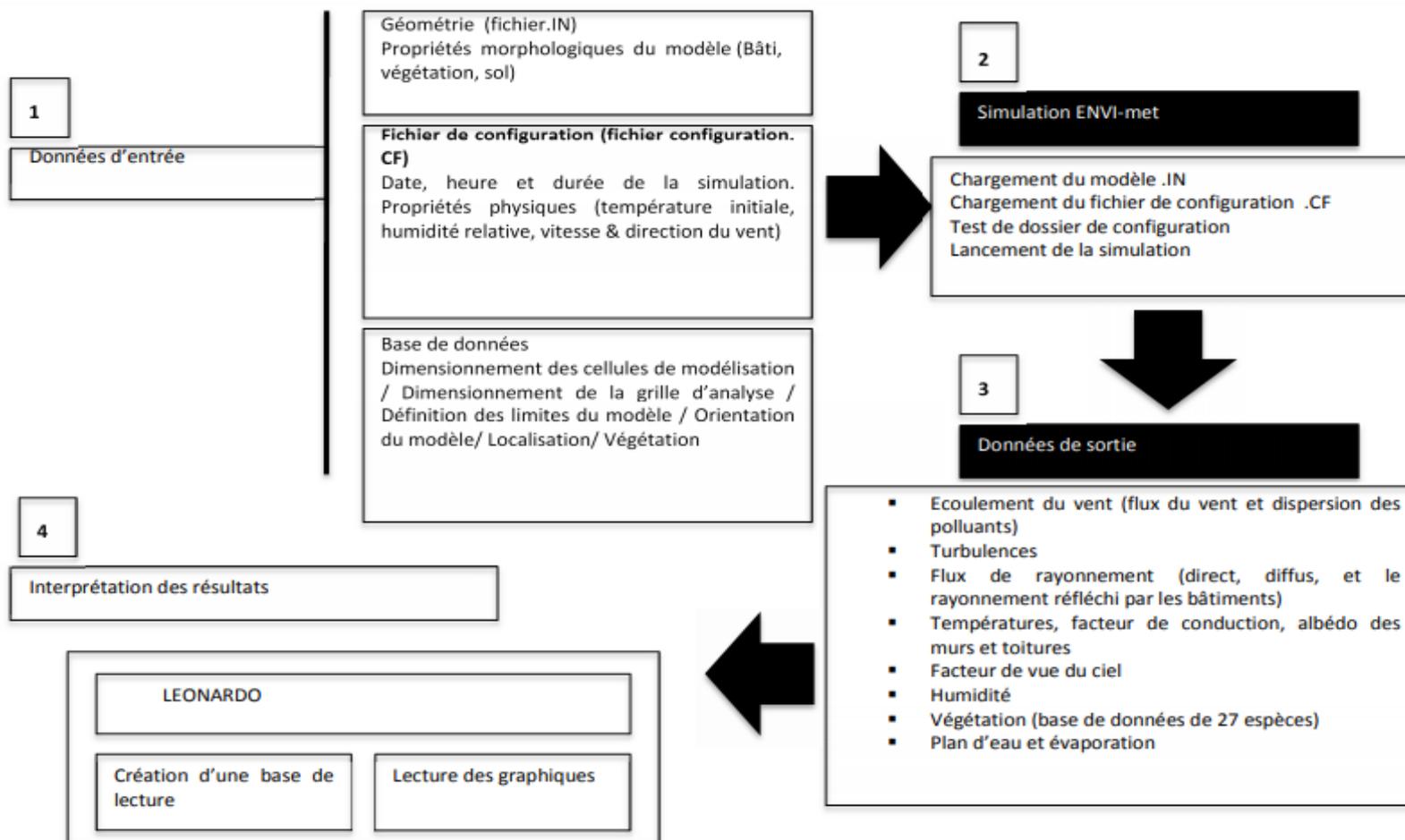


Figure 66: Structure du modèle sur ENVI-MET.

Source : Mayam Jojo²⁵⁸.

²⁵⁸ Jojo, M. Nassopoulos, H. Colombert, M. (2015). Projet ADAPTATIO : Simulations effectuées avec le logiciel ENVI-met sur le secteur de Tolbiac Chevaleret, avril 2015.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Dans une troisième partie, nous analyserons pour les trois cas représentatifs les paramètres physiques de confort thermique issus des simulations. Pour cela, nous utiliserons l'indice PMV (Vote Moyen Prévisible). Ces résultats traduisent les différentes perceptions thermiques ressenties par un individu durant la période chaude. Les variations des PMV pendant une journée type servira de critère d'analyse comparée des trois configurations urbaines.

Pour finir, nous croiserons les indicateurs physico-géométriques avec les résultats de confort issu de l'indice PMV. Ceci, nous permettra de mettre en évidence les indicateurs relatifs à chaque période influençant le confort extérieur, et de proposer la meilleure configuration urbaine limitant le stress thermique extérieur.

4.1. Choix des journées représentatives :

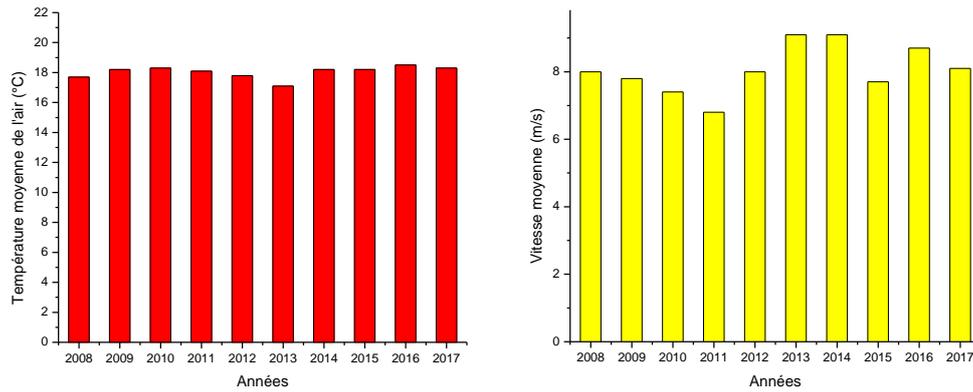
Le climat de Tlemcen est chaud et tempéré. En hiver, Il se caractérise par des précipitations bien plus importantes qu'en été. D'après Wladimir Peter KÖPPEN et Rudolf GEIGER, le climat y est classé Csa.

Le logiciel ENVI-MET ne comporte pas une base des données météorologiques, le seul moyen pour les intégrer est de les saisir manuellement. Nous avons opté de caractériser le climat de la ville de Tlemcen par une journée dite "représentative", construite par le traitement statistique de deux variables physiques en moyennes journalières, pour la période estivale sur les 10 années de la période de 2008 à 2017. Elles sont extraites des données météorologiques fournies par la station Météo-Zenata Tlemcen.

Le choix de la "journée représentative" a consisté à filtrer l'ensemble des moyennes journalières de la période estivale des années où l'écart type des deux paramètres physiques est inférieur à 0,2. Il s'agit de choisir des journées qui se sont reproduites pendant ces années.

En effet, nous avons retenu la journée du 15 Juillet où l'écart type est très faible. Le graphe de la figure 78 représente les moyennes horaires des quatre années de la journée du 15 Juillet.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.



(a)

(b)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2008-2017	Ecart type
T air moy	17,7	18,2	18,3	18,1	17,8	17,1	18,2	18,2	18,5	18,3	18,04	0,38
V moy	8	7,8	7,4	6,8	8	9,1	9,1	7,7	8,7	8,1	8,07	0,48

(c)

Figure 67: a. Evolution annuelle de la température de l'air pour la ville de Tlemcen sur la période (2008-2017). b. de la vitesse du vent. c. Valeurs moyennes annuelles pour chaque année, et écarts types.

Source : Archives météo Zenata, traité par l'auteur.

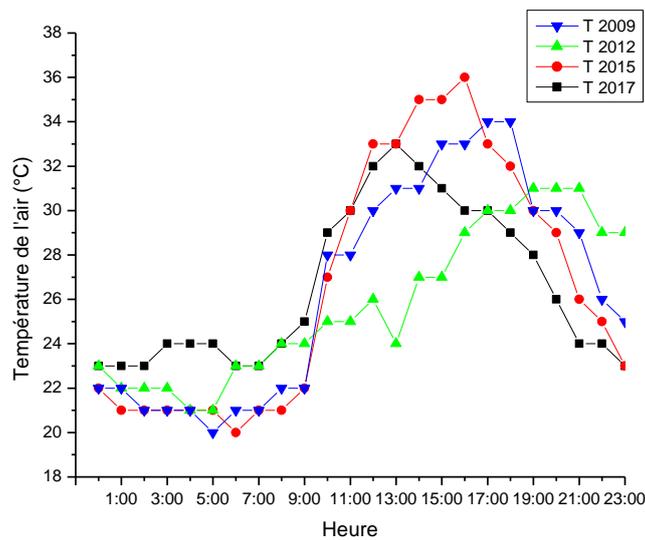


Figure 68: La moyenne horaire journalière de la température de l'air pour les quatre années filtrées à Tlemcen.

Source : Auteur du mémoire.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

4.2. Les données géographiques :

Les informations géographiques nécessaires aux simulations sont la latitude : 34°52'41" nord et la longitude : 1°18'53" ouest.

4.3. Présentation de la géométrie et propriétés morphologiques des trois configurations urbaines :

Nous exposons les principales actions citées dans le chapitre précédent contenues dans chaque état de configuration afin de procéder à la simulation. Notre fragment urbain a subi des transformations urbaines affectant deux volets majeurs, le premier celui de la modification de l'état de surface et le deuxième concerne l'ouverture du vide urbain. A travers l'histoire du quartier de Bab El Hadid, trois états représentatifs récapitulant ces interventions, vont être soumis aux simulations numériques et sont caractérisés par ce qui suit :

4.3.1. Configuration du premier état (période précoloniale, environ 1800):

Cet état représente le quartier de Bab El Hadid avant toute intervention architecturale ou urbaine. Les éléments caractéristiques sont la forte densité du bâti, le rapport d'aspect de canyon élevé, la faible hauteur du bâti, un sol aux rues non pavé, présence d'un grand vide urbain relatif à une tahtaha et façades de maisons en terre, brique et pierre.

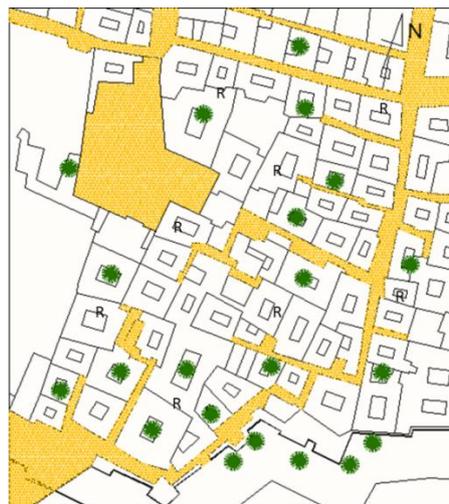


Figure 69: Plan reconstituant la configuration urbaine de l'état 1.

Source : Archive de l'APC, traité par l'auteur²⁵⁹.

²⁵⁹ Les archives de l'APC de Tlemcen (plan d'alignement de la ville de Tlemcen approuvé par arrêté du 9 Mai 1877).

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

4.3.2. Configuration du deuxième état (période coloniale, environ 1900):

Le deuxième état relatif au plan d'alignement de Tlemcen datant de 1877, connu des transformations majeures qui ont amplement modifié la surface et le vide urbain.

On assiste en effet à une démolition et reconstruction de l'enceinte sud, la porte des carrières et le Bordj de Bab El Hadid. Les propriétés physiques des matériaux de ces derniers ont changé et ont été remplacés par la pierre et la brique.

On assiste en effet, à une modification de la surface urbaine. Les rues sont pavées, les maisons reconstruites sont remplacées par du bâti en pierre et brique. Les surfaces végétales ont considérablement augmenté dans les espaces extérieurs, ce qui est couramment appelé (minéralisation du sol).

En ce qui concerne, les interventions sur le vide urbain, on assiste en effet à la réalisation d'une percée de rue orientée nord sud (Rue de Paris). On assiste aussi à l'introduction du chauffage à l'intérieur des maisons et la pose de couverture au-dessus de quelques patios.

En effet, les propriétés morphologiques et géométriques ont considérablement changé tels que la densité végétale et le rapport d'aspect de canyon.

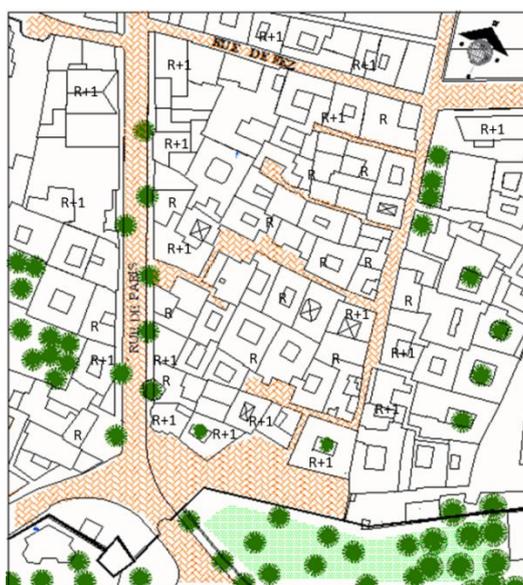


Figure 70: Plan reconstituant la configuration urbaine de l'état 2.

Source : Archive de l'APC, traité par l'auteur²⁶⁰.

²⁶⁰ Ibid.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

4.3.3. Configuration du troisième état (période actuelle):

Le troisième état correspond à l'état actuel de la zone d'étude. Cette période comprend des modifications mineures du sol et du vide urbain. Les propriétés morphologiques, géométriques et physiques ont changé. La densité végétale, le rapport d'aspect de canyon et l'albédo moyen des surfaces ont dû être modifiés respectivement. Du côté sud, une nouvelle construction a pris place au niveau du jardin, de nouveaux matériaux ont été introduits dans la construction : béton, brique creuse et verre ainsi que du bitume au niveau des rues. La hauteur du bâti a augmenté.

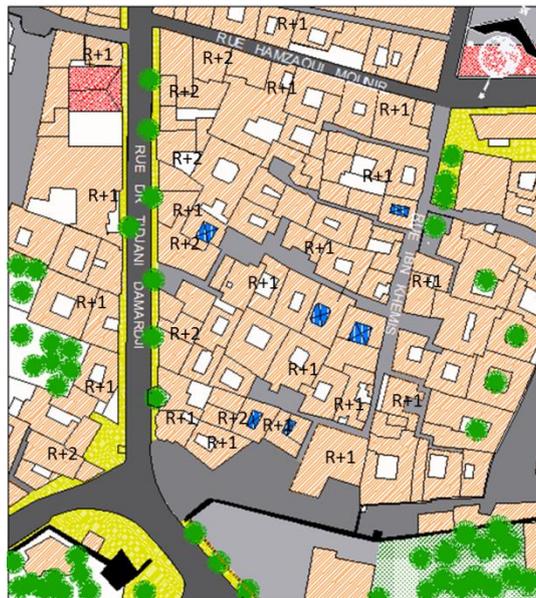


Figure 71: La configuration urbaine de l'état 3.

Source : PDAU(2007), actualisé et traité par l'auteur.

4.4. Simulation et discussion :

4.4.1. La géométrie (Input Spaces) :

Les données d'entrée concernant la date, l'heure, la durée de simulation et les propriétés physiques de température initiale, humidité relative, vitesse et direction du vent seront présentées en annexe 11. Les simulations ont été prédéfinies à une hauteur de 2 m de la hauteur du sol.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

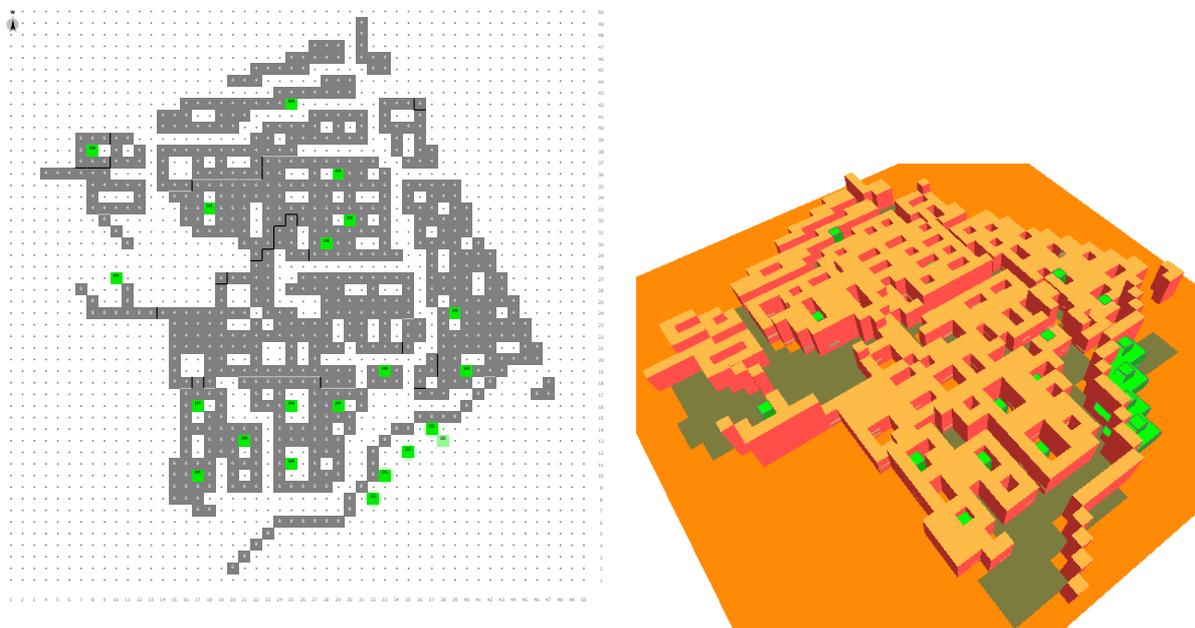


Figure 72: Interprétation de l'état 1 par ENVI-MET.

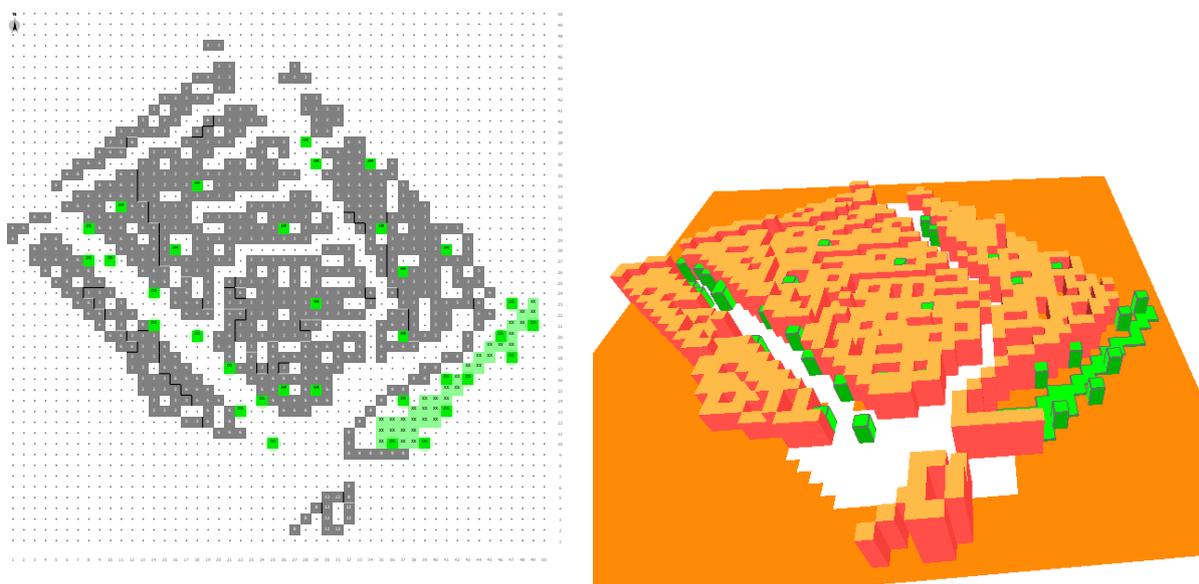


Figure 73: Interprétation de l'état 2 par ENVI-MET.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

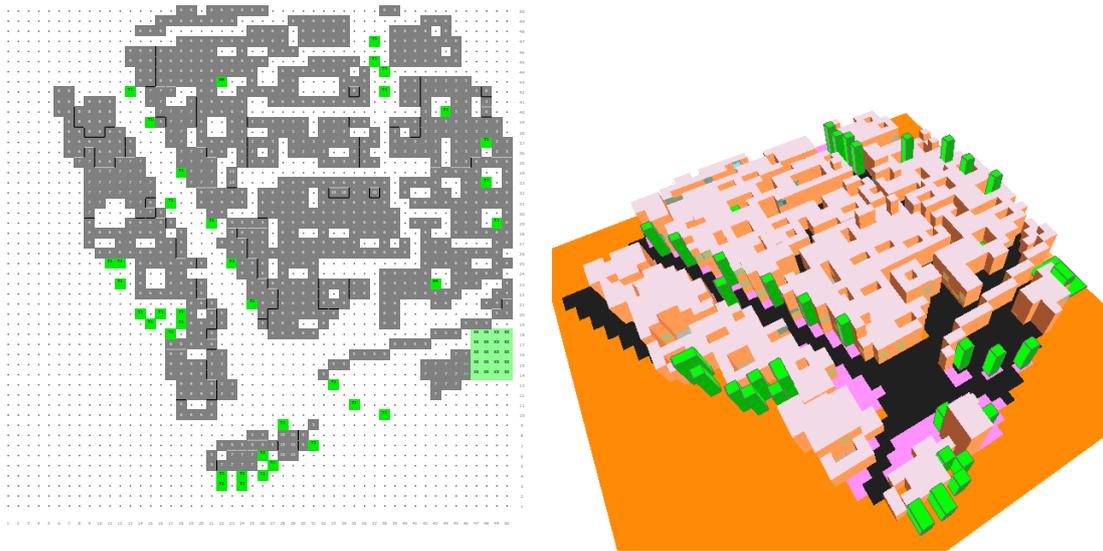


Figure 74: Interprétation de l'état 3 par ENVI-MET.

Les indicateurs physico-géométriques choisis pour le croisement avec les résultats de confort seront présentés dans ce qui suit :

4.4.2. Indicateur géométrique :

□ Le facteur de vue de ciel :

Des travaux de recherches ont prouvé que les configurations denses sont souvent favorables aux élévations de températures pendant la nuit. Grâce au piégeage radiatif. Cette élévation de température dans ces espaces confinés sera modérée par des îlots de fraîcheurs au niveau des zones ombragées²⁶¹⁻²⁶².

BIOMET, outil de post-traitement dans le modèle ENVI-MET permet de calculer le facteur de vue de ciel. Le calcul prend en compte les caractéristiques spatiales des tissus et de leur environnement immédiat.

Le facteur moyen de vue du ciel est relativement différent entre les trois configurations urbaines. Nous avons remarqué que sa valeur atteint son maximum au niveau de l'état 1 dans

²⁶¹ Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49–59. doi:10.1016/s0378-7788(02)00079-8.

²⁶² Athamena, K. (2012). Modélisation et simulation des microclimats urbains : _Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des _éco-quartiers. Architecture, espace management. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes (ECN). French. <NNT : 498-231>. <tel-00811583>.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

la tahtaha située au nord-ouest (0,5). Par contre, dans le reste du tissu, les formes étendues au sol avec des distances étroites entre le bâti minimisent l'ouverture vers le ciel (FVC= 0,12). Cependant, le FVC de l'état 2 ne diffère pas beaucoup de celui de l'état 3 et présentent tous les deux un plus grand pourcentage de FVC par rapport à l'état 1. Ceci revient à la percée de la rue de Paris où les espacements entre les bâtiments est grand et relativement constant sur une longue distance qui rend la géométrie ouverte vers le ciel. (Valeur moyenne du FVC= 0,22).

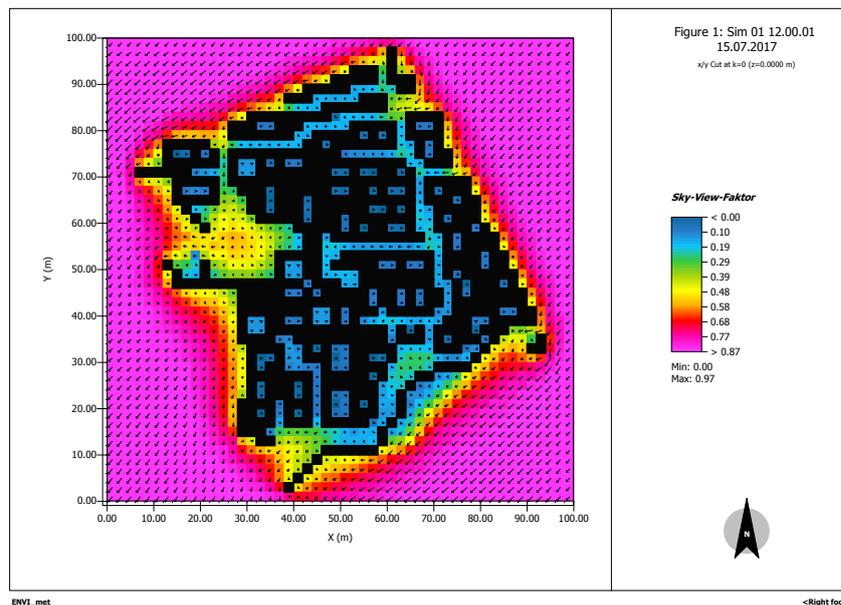


Figure 75: Facteur de vue de ciel correspondant à l'état 1.

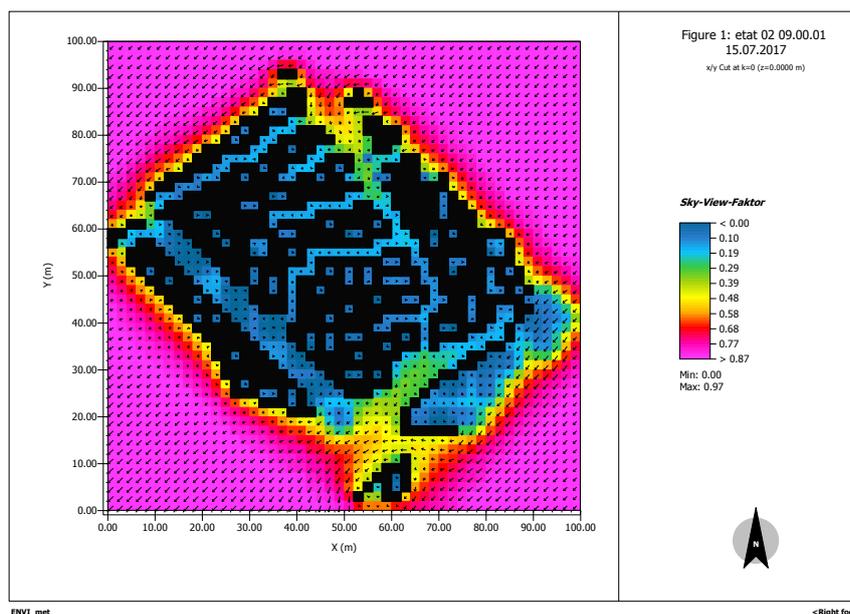


Figure 76: Facteur de vue de ciel correspondant à l'état 2.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

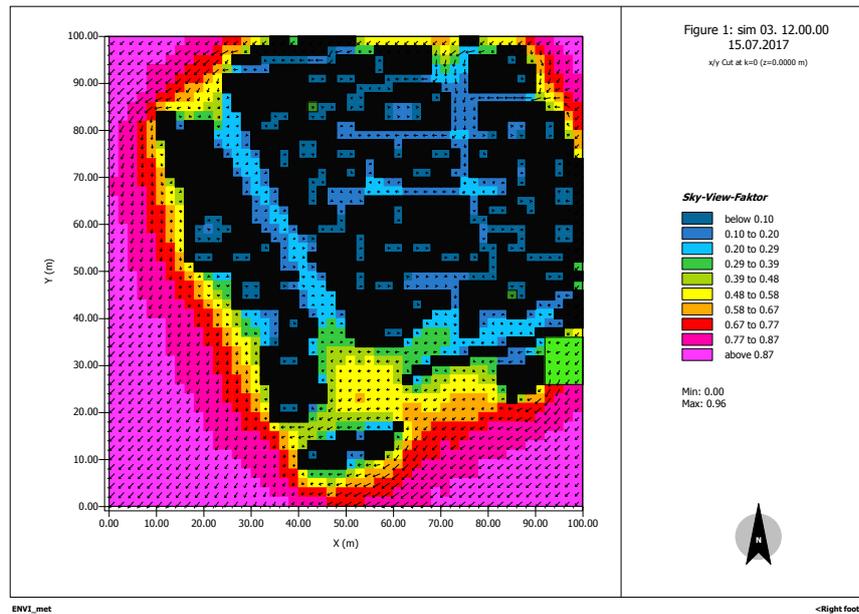


Figure 77: Facteur de vue de ciel correspondant à l'état 3.

4.4.3. Indicateur physique :

□ Albédo solaire moyen :

L'albédo moyen des surfaces urbaines dépend essentiellement de la nature et de la couleur des matériaux. Nous avons attribué des matériaux à chaque élément de la surface urbaine. Après simulation de l'énergie solaire incidente et absorbée, des valeurs d'albédo moyen ont été accordées aux surfaces urbaines.

Les résultats de simulation montrent que l'état 1 présente de faibles valeurs d'albédo moyen (0,20 à 0,28). En effet, les matériaux de cette configuration urbaine sont plutôt naturels et la variabilité des décrochements du bâti ne font que favoriser l'absorption de l'énergie solaire en réduisant la valeur d'albédo.

Par contre, l'état 2 présente une forte valeur d'albédo de 0,40, en raison de la forte énergie solaire absorbée par le pavé gris foncé au niveau du sol. Les états 1 et 2 présentent des valeurs d'albédo proches (0,30 et 0.40). Les vitrages et couleurs claires favorisent les réflexions solaires permettant ainsi d'augmenter les valeurs d'albédo.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

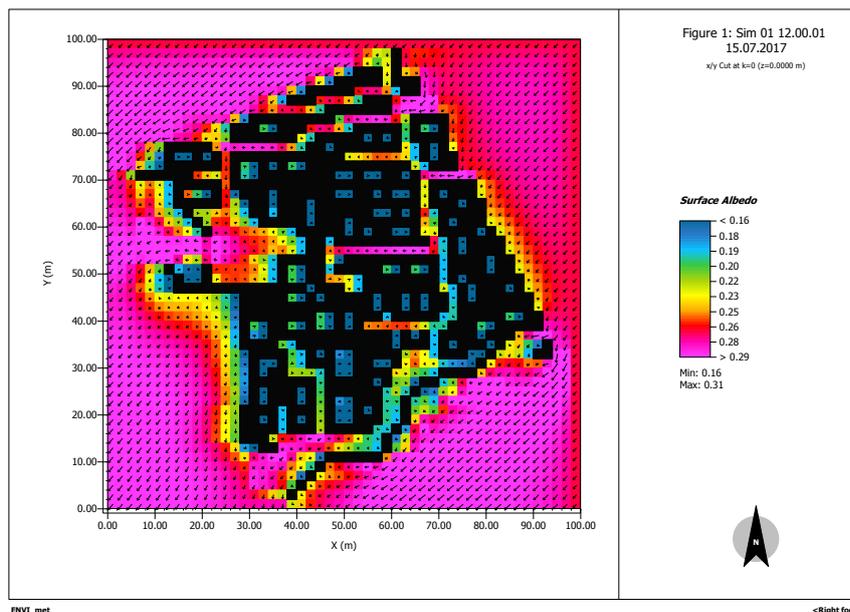


Figure 78: Albédo moyen correspondant à l'état 1.

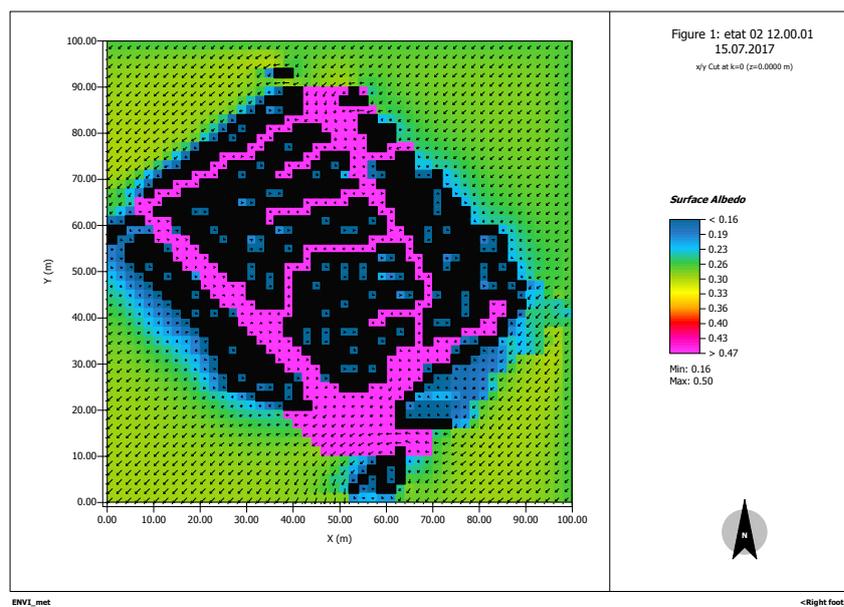


Figure 79: Albédo moyen correspondant à l'état 2.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

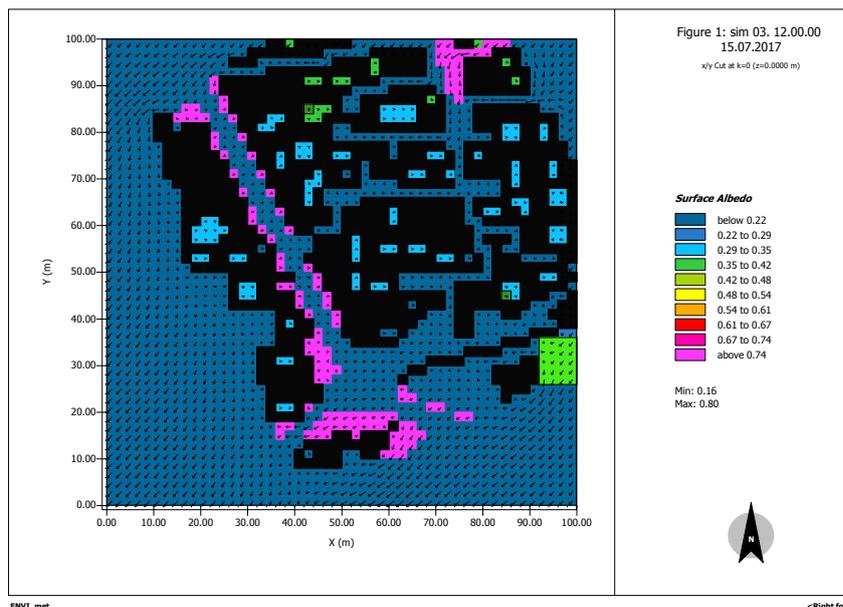


Figure 80: Albédo moyen correspondant à l'état 3.

4.4.4. Evolution des paramètres microclimatiques des trois configurations urbaines :

L'évolution des échanges entre les surfaces urbaines et l'air ont des répercussions sur le microclimat. Les simulations nous permettent de mesurer l'évolution des paramètres suivants : la température de surface et la vitesse du vent.

□ Vitesse du vent :

Les simulations ont été effectuées pour une direction de vent : nord-ouest pour la journée du 15/07. La distribution de l'écoulement d'air pour les trois configurations d'étude sera faite à 12h00. Les autres intervalles de temps durant lesquels les vitesses du vent sont cartographiées seront présentés en annexe.

Le modèle peut aussi appréhender l'écoulement de l'air du fait que l'orientation des rues et la direction des vents ont été prédéfinies dans le modèle. On peut observer qu'après transformations morphologiques, la vitesse du vent sera plus élevée par un effet de canalisation au niveau de la percée de la rue de Paris, contrairement aux ruelles dans tous les états représentatifs où elle se présente minimale à cause de leur étroitesse. Le vent incident induit une circulation d'air importante aux extrémités des trois configurations (3,20 m/s), où

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

on remarque un effet de tourbillon à l'entrée des rues mais les décrochements des façades et étroitesse des ruelles brisent le vent réduisant ainsi sa vitesse.

Cependant, le changement vers une augmentation du rapport H/L entre l'état 1 et 2 permet d'évaluer un taux de diminution de vitesse de l'air de 0,4 m/s. Ce phénomène est dû principalement à la hauteur du bâti et les arbres qui forment un écran.

Parallèlement, l'intérieur des trois configurations urbaines apparaît bien protégé avec une vitesse de vent de 0,5 à 2,4 m/s. Ceci est dû à la densité des masques environnants et à l'étroitesse des percées évitant ainsi au vent de pénétrer à l'intérieur.

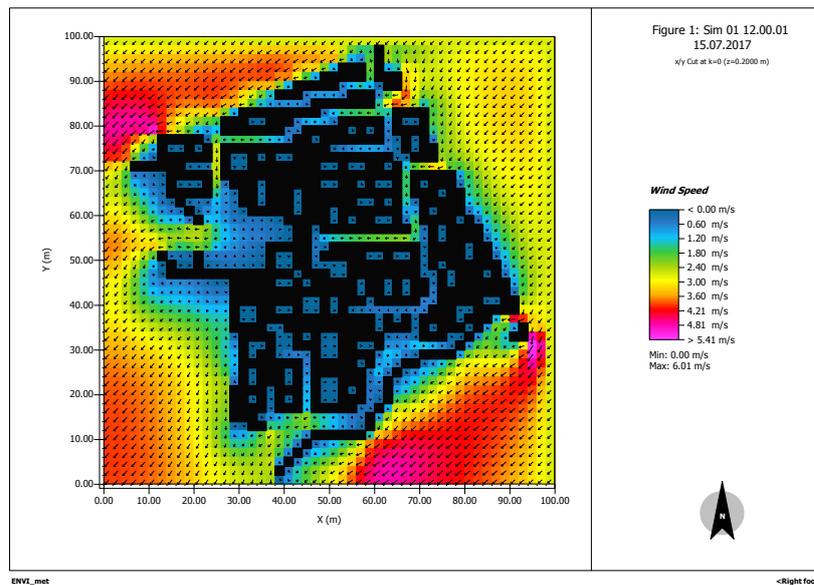


Figure 81: Intensité du vent correspondant à l'état 1 à 12h00.

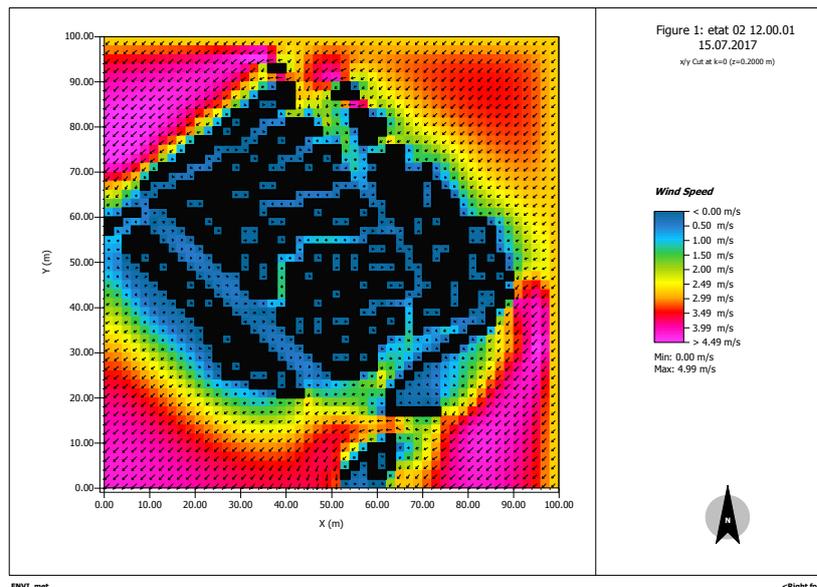


Figure 82: Intensité du vent correspondant à l'état 2 à 12h00.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

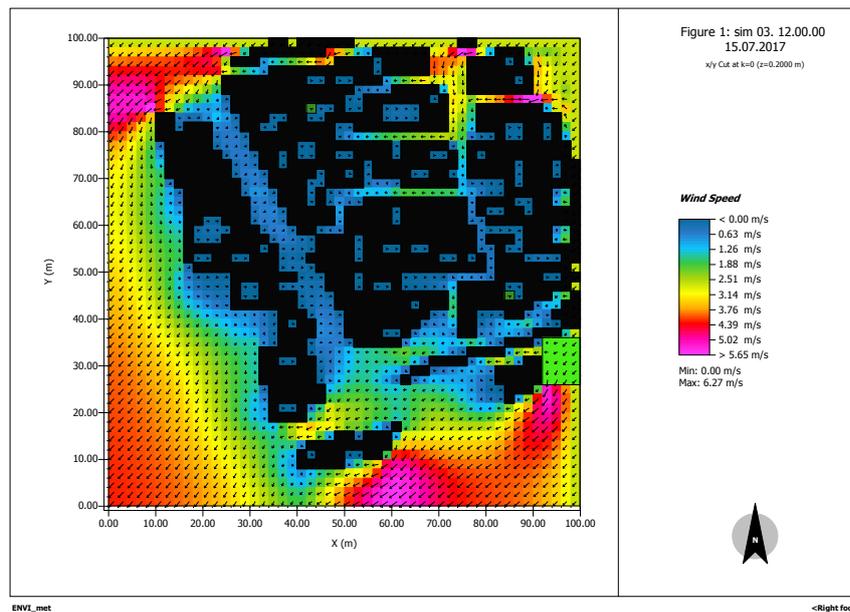


Figure 83: Intensité du vent correspondant à l'état 3 à 12h00.

□ Température de surface :

Rappelons que la température de l'air a été considérée comme étant constante pour les trois états de transformation. Les valeurs de température de surface à l'ombre et au soleil se présentent sous différents états selon l'orientation des rues.

Nous présentons ici l'évolution de la température de surface des sols dans les rues. Elle est influencée par le type et la texture des matériaux de revêtements de sol et du rapport d'aspect de canyon.

Les valeurs de température de surface des trois configurations aux moments différents de la journée sont relativement variables. On distingue une relation entre ce paramètre et l'albédo. En effet, les zones caractérisées par une forte valeur d'albédo (état 1) présentent une température de 26°C à 12h00. Cette valeur est inférieure de $4,2^{\circ}\text{C}$ dans les espaces à faible albédo (états 2 et 3).

On remarque aussi que les valeurs de température de surface relatives à l'état 2 et 3 sont relativement faibles (de $26,50^{\circ}\text{C}$ à $27,30^{\circ}\text{C}$) à l'intérieur de la rue canyon de Paris dans les zones ombragées, malgré leur faible valeur d'albédo.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nous pouvons noter que le pavage des rues a provoqué une augmentation de la température de surface. Ce pavé compacté au-dessus du sol naturel a généré une augmentation de températures. Par contre, la transformation due au surhaussement des bâtiments (de R à R+1) a contribué à augmenter le rapport H/L, ce qui a augmenté les surfaces à l'ombre et donc réduit la température des sols. Les arbres ont aussi procuré de l'ombre, ce qui a rafraîchi les surfaces du sol.

Le dernier état fait augmenter légèrement la température de surface de 1.2 °C par rapport à l'état 2 à 12h00 à cause de la nature de matériaux de revêtements (le bitume a remplacé le pavé). Par contre, la hauteur de bâti (de R+1 à R+2 et R+3) a stabilisé l'évolution de la température à la surface des sols.

Au niveau des ruelles, les transformations urbaines ont légèrement influencé les paramètres microclimatiques. L'albédo des matériaux de surface a causé cette différence de température.

La comparaison des résultats pour les trois états montre que, les valeurs les plus faibles ont été enregistrées au niveau de la configuration 1 à 10h00 avec un minimum de température de 23,00 °C. Cette valeur est inférieure de 1,20°C par rapport à l'état 2 et de 1,70°C par rapport à l'état 3. Par contre, le pic a été observé à l'état 3 dans l'actuel parking estimé à 43,85°C à 16h00.

Les températures de surfaces des trois configurations sont présentées respectivement sur les figures suivantes.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

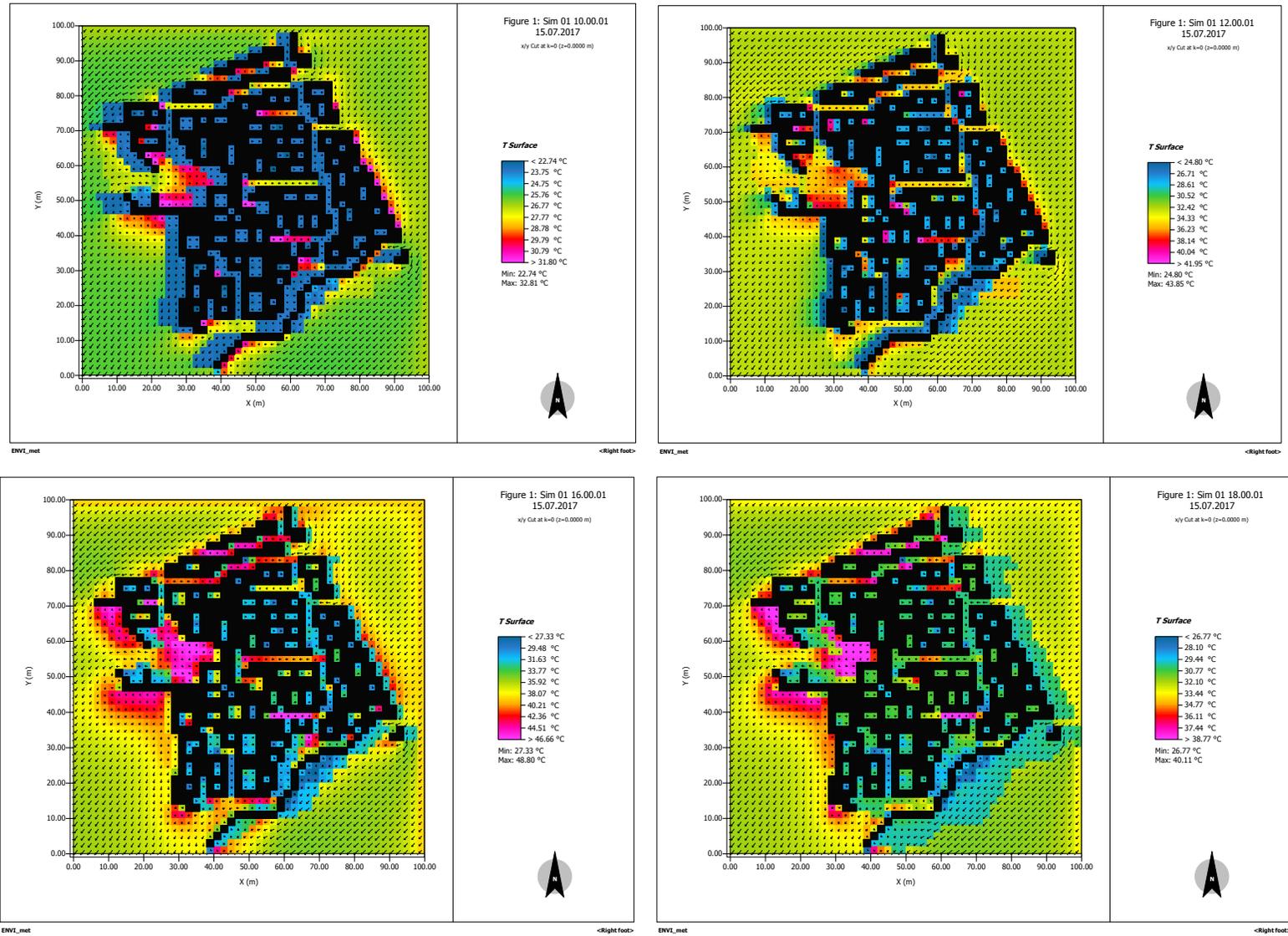


Figure 84: Evolution journalière de la température de surface correspondant à la configuration urbaine 1.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

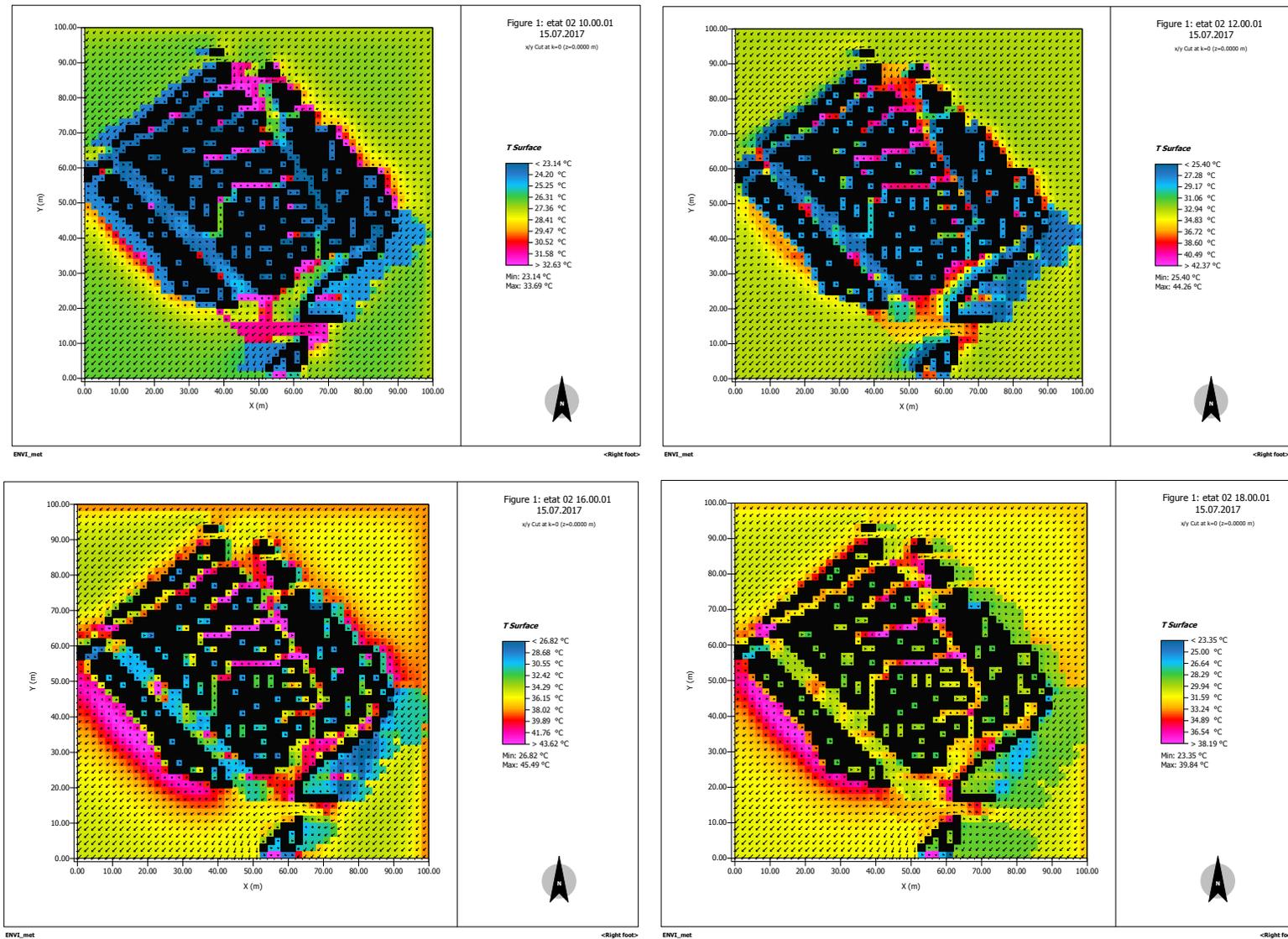


Figure 85: Evolution journalière de la température de surface correspondant à la configuration urbaine 2.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

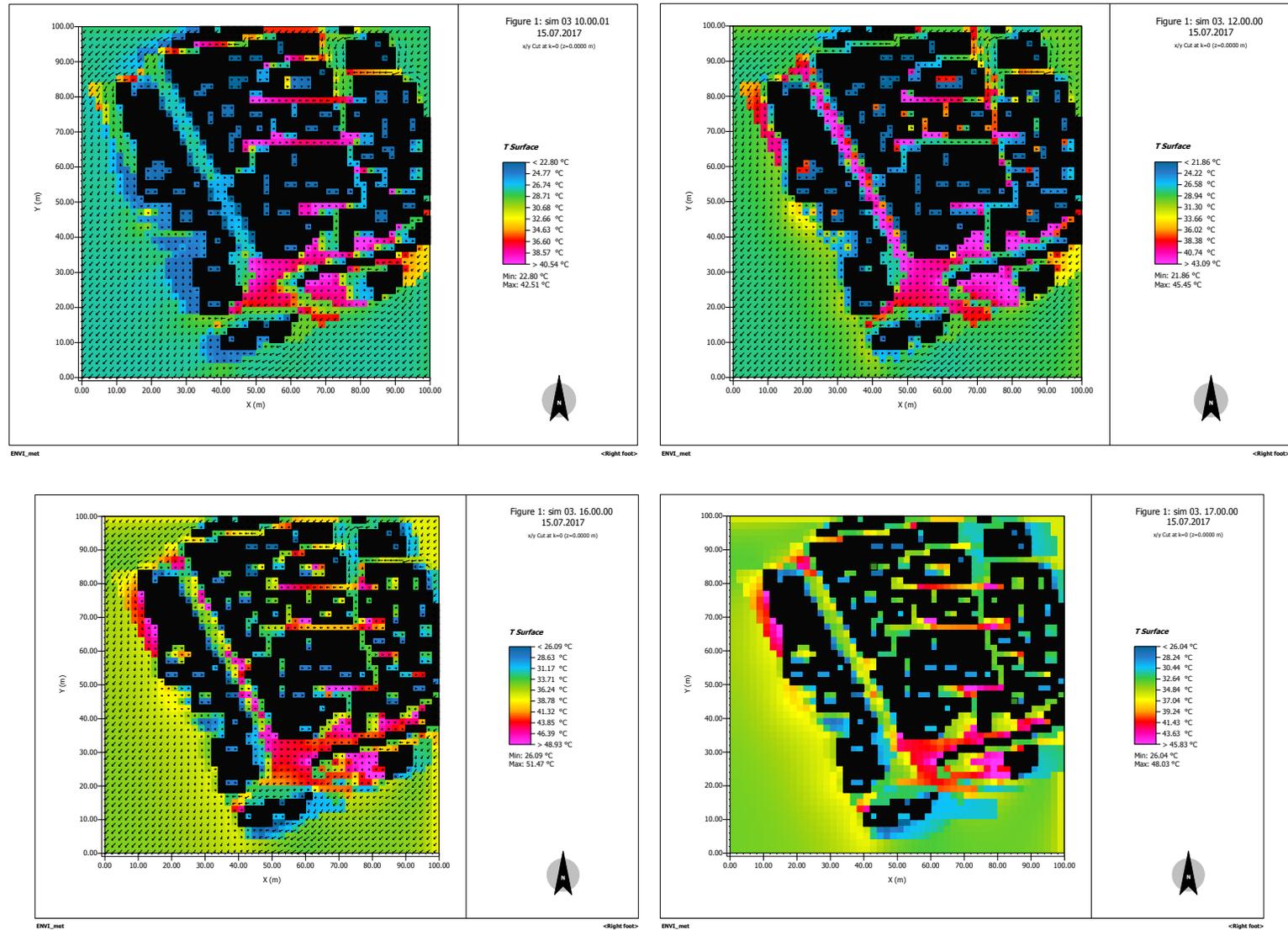


Figure 86: Evolution journalière de la température de surface correspondant à la configuration urbaine 3.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

4.4.5. Caractérisation des indices de confort :

□ Choix de l'indice de confort :

Nous avons utilisé les valeurs du Vote Moyen Prévisible (PMV), pour caractériser les conditions de confort extérieur des piétons. L'indice PMV a été créé à l'origine par FANGER pour simuler l'environnement intérieur²⁶³. Il a ensuite été étendu à l'environnement extérieur²⁶⁴. Cet indice a été appliqué par des chercheurs pour plusieurs espaces extérieurs²⁶⁵-²⁶⁶ où le PMV est défini par:

$$PMV = [0,303 \exp (- 0,036M) + 0,028] S$$

M est le taux métabolique ; S est le bilan énergétique.

Dans son travail de mise à jour de son programme de simulation (ENVI-MET), Michael BRUSE a adopté neuf échelles de confort spécifiques aux espaces extérieurs, de [-4] (extrêmement froid) à [+4] (extrêmement chaud). L'indice thermique PMV varie en fonction du climat local. Il peut atteindre des valeurs supérieures ou inférieures à [-4] et [+4].

Le tableau suivant nous donne la correspondance entre l'indice PMV qui est définie à 1,1 m du sol et la perception thermique d'un individu moyen en activité légère.

²⁶³ Fanger, P.O. (2012). Thermal comfort, 1972. in. Berkovic, S., Yezioro, A., & Bitan, A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate. *Solar Energy*, 86(5), 1173–1186. doi:10.1016/j.solener.2012.01.010.

²⁶⁴ Jendritzky, G., & Nübler, W. (1981). A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B*, 29(4), 313–326. Doi:10.1007/bf02263308

²⁶⁵ Honjo, T., 2009. Thermal comfort in outdoor environment. *Global Environmental Research* 13, 43–47. <https://www.researchgate.net/publication/228521038>, consulted the: 12/03/2019.

²⁶⁶ Berkovic, S., Yezioro, A., & Bitan, A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate. *Solar Energy*, 86(5), 1173–1186. doi:10.1016/j.solener.2012.01.010.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Valeurs PMV	Perception thermique ressentie par les individus
+4	extrêmement chaud
+3	chaud
+2	tiède
+1	légèrement tiède
0	neutre
-1	légèrement frais
-2	frais
-3	froid
-4	extrêmement froid

Tableau 23: Correspondance entre PMV et perceptions thermiques.

Source: <https://www.energieplus-lesite.be>, actualisé par l'auteur.

Les travaux de recherche effectués à ce jour, ont démontré que la gamme de confort thermique dans les climats chauds et tempérés²⁶⁷ est proche de celles des climats chauds et humides²⁶⁸, subtropicaux²⁶⁹ et tropicaux²⁷⁰.

□ **Analyse de confort:**

Une comparaison de l'évolution journalière des échelles de confort montre que les perceptions thermiques "neutre" et "légèrement tiède" sont dominantes à l'état 1 vers 08h00.

Entre 08h00 et 10h00, des sensations de "légèrement tiède" sont enregistrées au début de la journée dans les deux premiers états au moment où la température de l'air est encore faible. Par contre, la sensation est « tiède » dans la dernière configuration.

A ce moment, l'état 1 présente les meilleurs sensations "légèrement tiède", cela revient probablement au pourcentage d'ombre généré par le rétrécissement des espaces ouverts qui

²⁶⁷ Mahmoud, A. H. A. (2011). Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Building and Environment*, 46(12), 2641–2656. doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.025

²⁶⁸ Lin, T.-P. (2009). Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment*, 44(10), 2017–2026. doi:10.1016/j.buildenv.2009.02.004.

²⁶⁹ Ng, E., & Cheng, V. (2012). Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, 55, 51–65. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.025.

²⁷⁰ Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*, 52(4), 281–290. doi:10.1007/s00484-007-0122-7.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

favorisent le rafraîchissement d'air. En outre, le pic des zones confortables est atteint à 08h00 dans l'état 1.

Au milieu de la matinée, vers 12h00, l'échelle de confort bascule vers "chaud" par l'augmentation des températures de l'air et de surface dans les deux derniers états de configuration et « tiède » dans le premier.

Au milieu de la journée et jusqu'à 14h00, le soleil est au zénith. La surface au sol est exposée à ce dernier présentant un minimum de surfaces ombragées et conduisant à des sensations de chaud. En effet, le cas le plus défavorable a été observé au niveau de tous les états dans les canyons très ouverts (tahtaha). Les meilleurs résultats ont été obtenus au cœur du canyon "Rue de Paris" relatifs aux états 2 et 3, dûs essentiellement à la présence d'arbres. Les zones présentant un résultat modéré concernent les ruelles dans toutes les configurations étudiées.

Ensuite de 16h00 à 1800 h, les échelles de sensation « tiède » réapparaissent dans toutes configurations et « légèrement tiède » dans les espaces ombragés. Ces sensations seront dominantes vers 18h00 pour l'état 2 dû à l'ombre portée par la hauteur des bâtiments, arbres et étroitesse des ruelles. Par contre, quelques îlots de chaleurs ont été identifiés au niveau de la tahtaha de l'état 1, et celle de l'état 2 et 3 aussi.

Enfin, en ce qui concerne la zone qui représente les résultats les plus satisfaisants en termes de confort, nous avons remarqué que l'état 1 a présenté des échelles confortables sur une grande partie du fragment étudié et cela durant la matinée. Ces résultats s'expliquent en grande partie par la faible température de surface au cœur des ruelles. Contrairement pour l'après-midi, la surchauffe des surfaces engendrent quelques îlots de chaleur. Par contre, les états 2 et 3 ont présenté le cas le plus défavorable vers 12h00, cela est dû certainement au faible albédo des revêtements de surface. Par ailleurs pour le reste de la journée, les résultats se rapprochaient de la zone de confort, ceci par l'ombre de la plantation d'arbres qui a rafraîchi les espaces, ainsi que par l'ouverture vers le ciel favorisant la restitution de la chaleur diurne.

L'évolution des valeurs des indices de confort pendant la journée d'été sont illustrés dans les figures suivantes.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

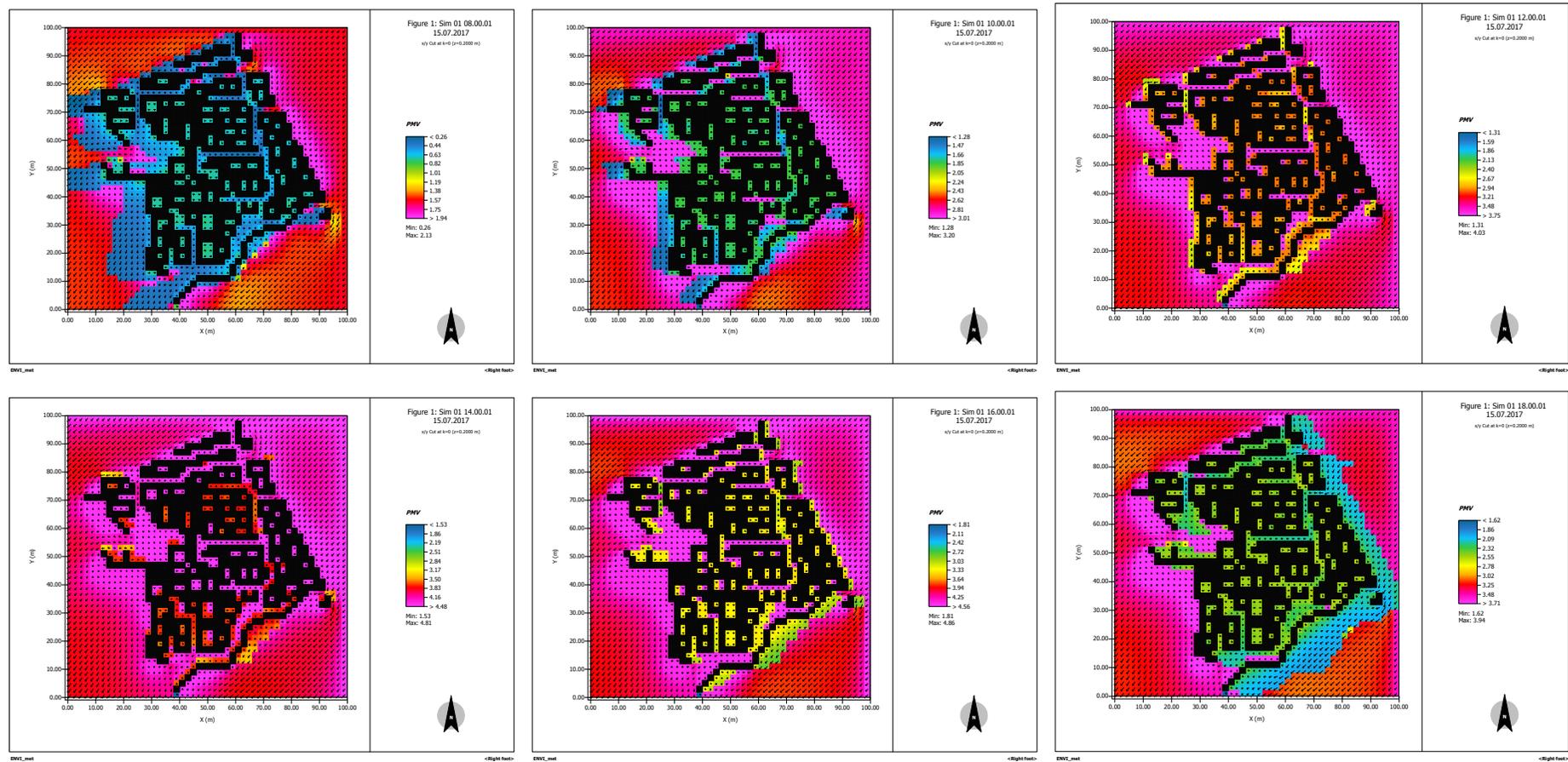


Figure 87: Distribution du PMV dans la configuration 1.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

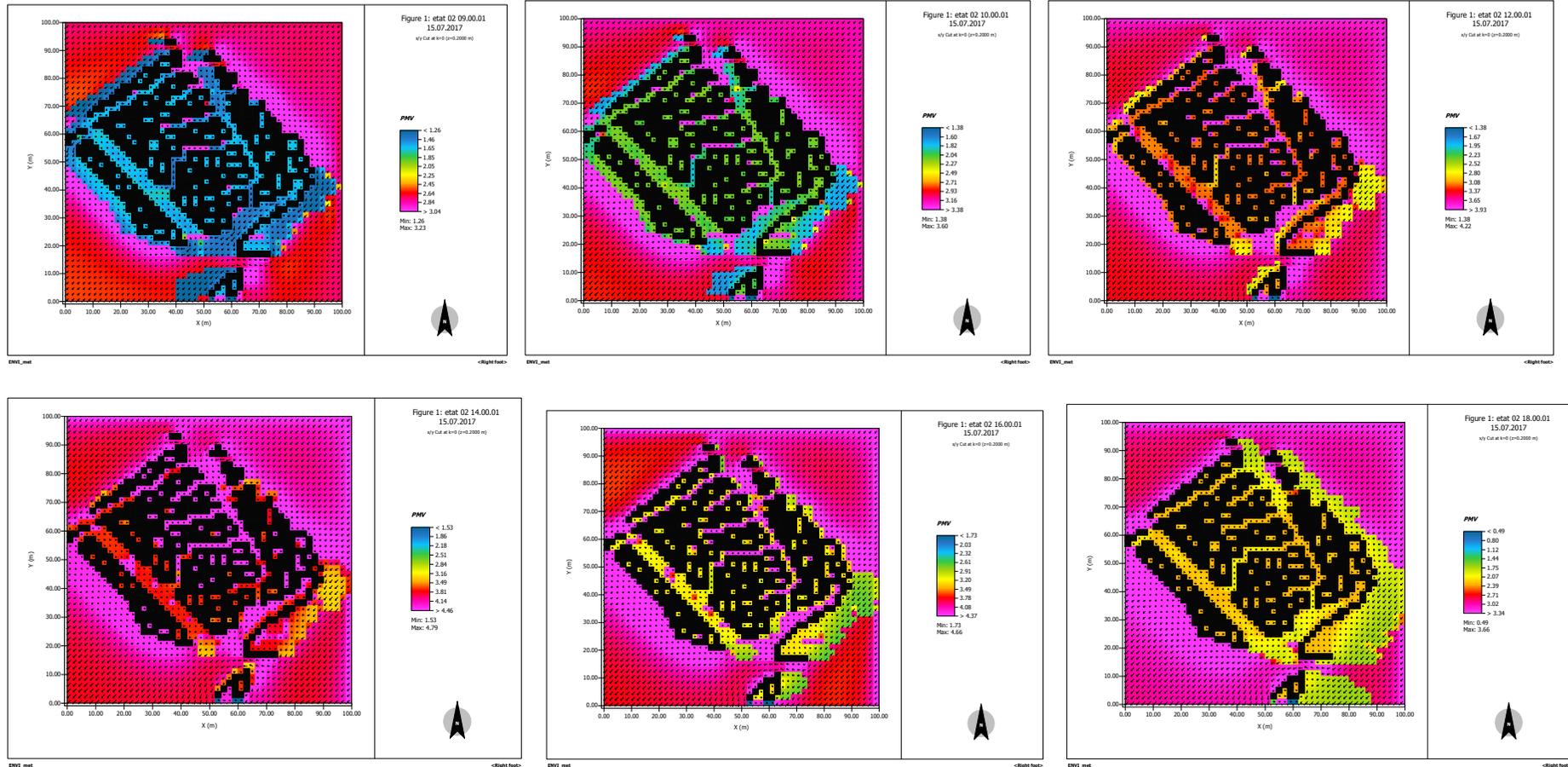


Figure 88: Distribution du PMV dans la configuration 2.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

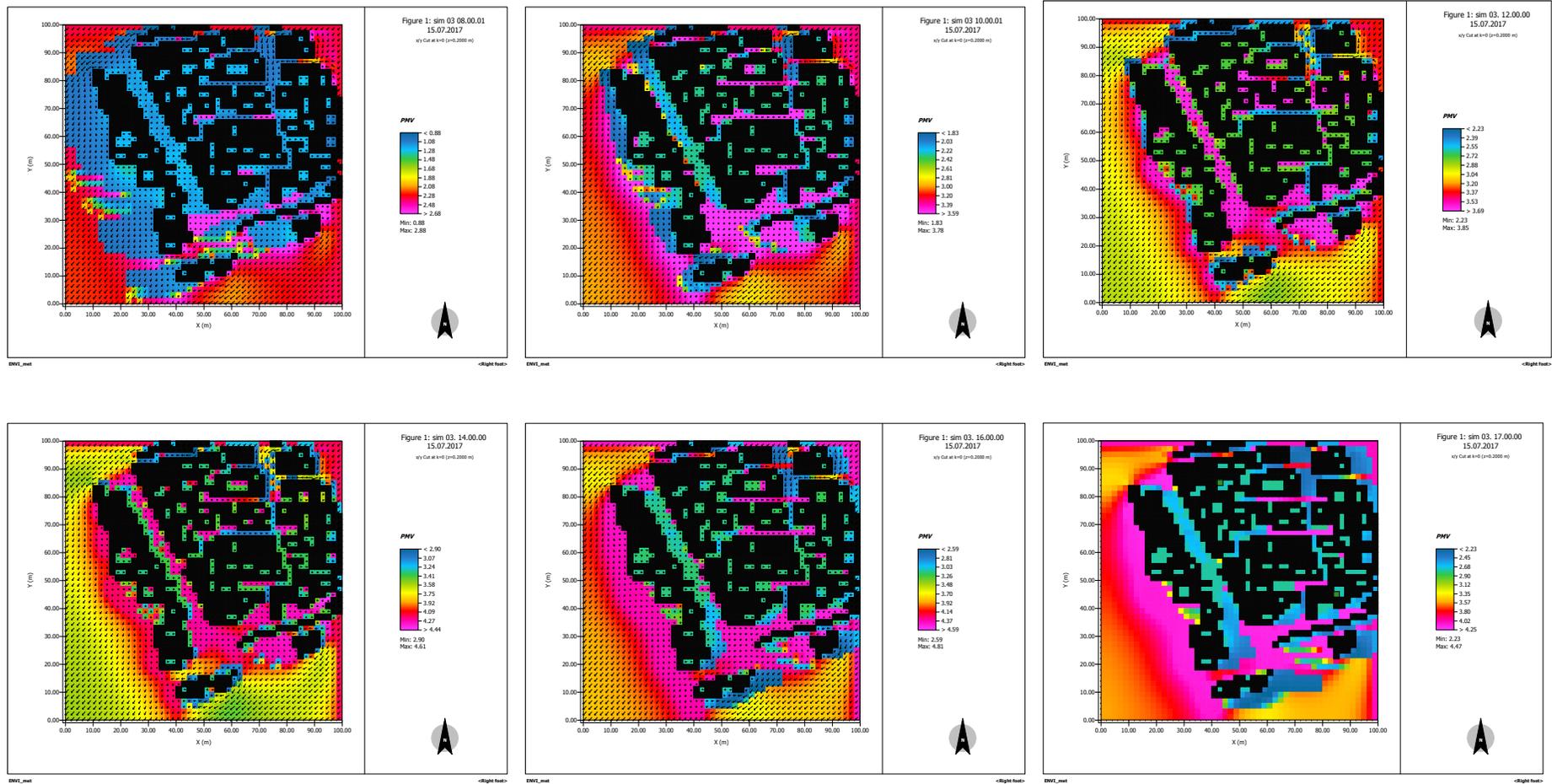


Figure 89: Distribution du PMV dans la configuration 3.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

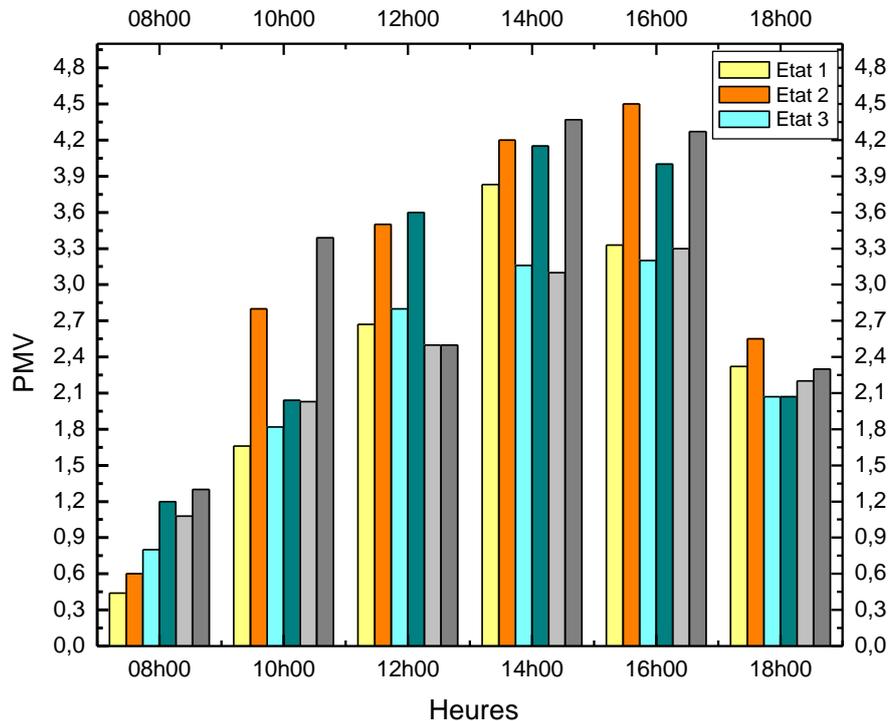


Figure 90: Variations des PMV à l'intérieur des différentes configurations.

Source : Auteur du mémoire.

4.5. Synthèse des résultats :

Cette analyse a pour objectif d'étudier les corrélations existantes entre les indicateurs caractérisant la morphologie des états représentatifs des transformations urbaines et les échelles de confort durant une journée d'été. Ainsi, nous rappelons que nous avons évalué deux indicateurs physico-géométriques. Il s'agit de l'albédo et du facteur de vue de ciel.

En effet, l'évolution du microclimat à travers ces transformations nous a permis d'analyser les variations microclimatiques localisées ou élargies dans le temps. Les corrélations sont constituées de variations des indicateurs physico-géométriques qui convergent vers les mêmes effets microclimatiques de l'histoire des transformations urbaines.

- L'état de la surface urbaine des sols a été influencé par l'albédo moyen de surface. En revanche, ce dernier affecte les effets microclimatiques mais ne présente pas de corrélations avec les résultats de confort.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

En effet, la comparaison de l'albédo du sol naturel et le pavé des états 1 et 2 avec le bitume de l'état 3 qui ont des valeurs respectives de 0,25 ; 0,10 et 0,05, nous a permis de déduire que l'albédo ne permet pas de différencier l'impact de ces surfaces sur les échelles de confort d'une manière étendue sur tous les espaces. En effet, d'autres paramètres ont intervenu pour fluctuer les résultats de confort.

Pour la minéralisation due à la végétation et aux arbres, des variations microclimatiques considérables ont été enregistrées au niveau des trois états par la présence de ces derniers, nous observons une baisse de température de surface des sols. Cette minéralisation par végétation caractérisée par son albédo élevé a contribué à baisser les températures de surface, réduire la chaleur et emmener l'échelle de confort vers la valeur (neutre).

- Le vide urbain a été caractérisé lors des simulations par le facteur de vue de ciel qui affecte lui aussi les variations microclimatiques et le confort thermique extérieur. Cependant, nous avons remarqué des fortes corrélations entre le facteur de vue de ciel et les résultats de confort.

L'analyse nous a permis de montrer, et cela dans les différents états que les espaces présentant une forte valeur de facteur de vue de ciel (de l'ordre de 0,5) favorisent le confort après 18h00 avec une plage de 2,07 à 2,55. En effet, la chaleur sera évacuée rapidement dans ces zones pendant la nuit. Ce fait est confirmé lors de toutes les transformations urbaines du quartier de Bab El Hadid. Cependant, dans le cas contraire, au niveau des ruelles présentes dans les trois états représentatifs, des situations d'inconfort se présentent avec des valeurs de 3.02, où le facteur de vue de ciel est réduit à une valeur de 0,19 après 18h00.

Un autre paramètre important qui a affecté l'évolution du microclimat urbain est la perméabilisation des espaces urbains face aux écoulements de l'air. Le processus de percée de la rue a permis de diminuer le prospect de la rue et d'augmenter la vitesse du vent face à la densification qui a conduit plutôt à réduire la perméabilité des rues aux écoulements d'air.

Le tableau suivant récapitule le croisement entre les valeurs des différentes variables d'indicateurs physico-géométriques, les paramètres microclimatiques et les résultats de confort.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Configurations urbaines		Indicateurs physico-géométriques		Paramètres microclimatiques		Echelles de confort
		Facteur de vue de ciel	Albédo du sol	Température de surface au sol	Vitesse du vent	
1^{er} état (période précoloniale, 1800).	Min	0,10	0,18	20,27	0,60	0,30
	Max	0,55	0,29	42,00	2,40	4,25
2^{ème} état (période coloniale, 1900).	Min	0,10	0,19	24,20	0,50	1,46
	Max	0,50	0,43	41,76	2,60	4,10
3^{ème} état (période actuelle, 2018)	Min	0,10	0,22	24,77	0,62	1,08
	Max	0,50	0,67	46,33	3,08	4,59

Tableau 24: Croisement entre valeurs d'indicateurs physico-géométriques, paramètres microclimatiques et échelles de confort.

Source : Auteur du mémoire.

En résumé, les simulations numériques nous ont permis d'affirmer que les transformations urbaines ont conduit à des variations microclimatiques répétées tout au long des différentes phases. En parallèle, certaines interventions n'ont influé les paramètres physiques qu'à des moments temporels précis et restreints.

Chapitre II : Caractérisation des indicateurs morphologiques et simulation des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid.

Nous pouvons déduire que les indicateurs caractérisant la morphologie restent complexes. En effet, la densité des villes historiques a pu assurer le confort thermique aux humains sur une durée étalée pendant le jour. L'avènement de l'urbanisme salubriste a su rafraîchir l'air par l'évapotranspiration des arbres et aires végétales, a augmenté relativement la vitesse du vent et a pu évacuer la chaleur nocturne par l'augmentation du FVC mais au détriment de la surchauffe de l'atmosphère urbaine.

Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons caractérisé les indicateurs morphologiques afin de mieux appréhender notre secteur d'étude. Après avoir étudié la variabilité des indicateurs précisant trois configurations de périodes distinctes de transformations urbaines, nous avons quantifié par l'outil ENVI-MET l'évolution des principaux paramètres physiques du microclimat urbain et mis en évidence le poids de ces transformations urbaines dans cette évolution.

L'analyse des résultats de confort issus de l'indice PMV nous a conduits à tirer des conclusions. Les paramètres physiques de température de surface et de vitesse du vent vérifient le confort thermique. Le niveau de confort est prioritairement influencé par l'ombre procuré par le bâti, en second lieu, par l'ombre des arbres dans les canyons ouverts, ensuite, le faible albédo des surfaces au sol et enfin le FVC élevé qui permet de dissiper la chaleur nocturne.

L'état 1 a présenté pendant la matinée les résultats de confort les plus satisfaisants, cela est justifié par sa morphologie. Par ailleurs, l'aménagement des deux autres états ouvrant ces espaces à l'extérieur a nécessité des aménagements urbains supplémentaires tels que la plantation d'arbres pour réguler le microclimat et limiter le stress thermique tout en se penchant vers la zone de confort sur une longue durée.

CHAPITRE III :

Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Introduction :

Les indicateurs morphologiques et géométriques du tissu urbain sont des paramètres critiques dans la formation des microclimats extérieurs. Ils ont des effets sur le confort thermique des piétons.

L'objectif de ce chapitre est d'enquêter dans quelle mesure la morphologie du site pourrait améliorer le microclimat extérieur, de chercher la relation entre la perception subjective et la quantification objective de l'environnement thermique. Et enfin, de proposer des lignes directrices de conception et de réhabilitation du site historique fondées sur l'établissement de liens entre la configuration du site, les conditions microclimatiques et la perception des usagers.

A ce titre, nous avons analysé le microclimat de l'actuel quartier historique « Bab El Hadid » de la ville de Tlemcen, par une enquête par questionnaire et par une simulation numérique validée par des mesures du microclimat que nous avons effectuées. Pour cela nous avons appliqué le modèle ENVI-MET 4.1 pendant l'hiver et l'été. Les paramètres urbains sont représentés dans différents points de mesure caractérisés par une variabilité du facteur de vue de ciel.

Les modèles PMV discutés donnent des informations sur les endroits les plus appropriés pour les piétons. Nous avons proposé des orientations urbaines qui pourraient limiter les conditions défavorables dans les espaces extérieurs. Elles sont utiles pour les architectes et urbanistes dans la conception et la réhabilitation des centres historiques.

1. La nécessité de la prise en compte du microclimat dans la conception des espaces urbains:

Le patrimoine urbain est considéré comme une ressource pour le développement durable des villes. Les sites des villes historiques sont particulièrement sensibles aux phénomènes météorologiques et aux changements climatiques²⁷¹. La morphologie urbaine est l'une des caractéristiques qui peut affecter le microclimat des espaces ouverts dans les villes vernaculaires.

²⁷¹ Phillips, H. (2015). The capacity to adapt to climate change at heritage sites—The development of a conceptual framework. *Environmental Science & Policy*, 47, 118–125. doi:10.1016/j.envsci.2014.11.003.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

La conception des espaces urbains devrait prévoir la problématique thermique²⁷² découlant de la relation entre la forme urbaine et les conditions climatiques locales. Pour cela, la qualité des ambiances microclimatiques extérieures doit être modifiée lors de la conception. Le confort thermique est la sensation de bien-être qui exprime la satisfaction à l'environnement thermique et est estimé par une évaluation subjective et objective. Afin de déterminer si une personne se trouve dans une situation confortable, il est nécessaire de trouver le lien entre la sensation thermique et ce degré de satisfaction.

Cependant dans le contexte des villes anciennes, le processus est plus complexe. Il nécessite la mise en place de liens entre les valeurs historiques, culturelles et le confort des usagers dans l'environnement bâti²⁷³.

Durant ces dernières décennies, plusieurs recherches concernant le relevé des proportions optimales des canyons de rue et des espaces urbains ouverts, ont été effectuées et ce, à des différents climats: aride²⁷⁴, méditerranéen²⁷⁵ et méditerranéen subtropical²⁷⁶.

En outre, plusieurs études se focalisent sur les configurations urbaines spécifiques telles que les cours, les rues ou blocs du bâti afin de discuter les résultats de l'analyse microclimatique et proposer des recommandations de conception²⁷⁷. Une rénovation d'une zone urbaine a eu lieu à Crète englobant des critères bioclimatiques²⁷⁸. Une amélioration du microclimat a été proposée dans une étude menée sur Athènes par le remplacement des matériaux de chaussée²⁷⁹.

²⁷² Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77–86. doi:10.1016/s0378-7788(02)00082-8.

²⁷³ Peng, C., Ming, T., Gui, J., Tao, Y., & Peng, Z. (2015). Numerical analysis on the thermal environment of an old city district during urban renewal. *Energy and Buildings*, 89, 18–31. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.023.

²⁷⁴ Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). 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(2), 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013.

²⁷⁵ Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182–188. doi:10.1016/j.renene.2012.12.040.

²⁷⁶ Achour-Younsi, S., & Kharrat, F. (2016). Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 689–700. doi:10.1016/j.sbspro.2015.12.062.

²⁷⁷ Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 29, 97–106. doi:10.1016/j.scs.2016.12.004.

²⁷⁸ Tsitoura, M., Michailidou, M., & Tsoutsos, T. (2016). Achieving sustainability through the management of microclimate parameters in Mediterranean urban environments during summer. *Sustainable Cities and Society*, 26, 48–64. doi:10.1016/j.scs.2016.05.006.

²⁷⁹ Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., & Kardomateas, T. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53, 128–136. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.022.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

En effet, des simulations ont été menées sur des régions climatiques similaires (climat chaud tempéré). A Modène la végétation et les arbres étaient la mesure la plus efficace afin d'atténuer la température de l'air pendant l'été à une hauteur de 10 m, par contre le pic de refroidissement au niveau du sol était perçu dans les surfaces perméables²⁸⁰. A Padoue, les résultats de simulation ont montrés que l'augmentation du facteur de vue de ciel, le sol vert, les trottoirs frais et les pavements frais permettent d'assurer un PMV confortable²⁸¹.

Quant à Stuttgart²⁸², l'amélioration du microclimat local était perçue dans les zones à espaces verts et ombragés, tandis que les rues orientées nord sud présentaient un stress thermique.

A Tlemcen, le microclimat n'est pas pris en compte dans la conception et dans la réhabilitation des tissus urbains. C'est pour cela que nous voulons montrer dans notre travail l'importance de la sauvegarde du patrimoine urbain par le renouvellement de la vieille ville et la réhabilitation bioclimatique de ses espaces urbains. Par conséquent, une conception urbaine efficace tenant compte du climat local est devenue une tâche importante et urgente pour les villes densément construites.

Le quartier historique de Bab El Hadid de la ville de Tlemcen a été choisi comme cas d'étude afin d'examiner l'influence de la forme urbaine sur les ambiances microclimatiques. Ce centre ancien se caractérise par une morphologie urbaine compacte et des bâtiments de hauteur moyenne. Cette compacité a des effets négatifs comme par exemple l'îlot de chaleur urbain.

Dans notre travail, nous évaluons les microclimats qui résultent dans les canyons de rue, pouvant être à l'origine des conditions défavorables. Nous proposons donc des solutions possibles pour améliorer les ambiances thermiques.

Nous avons alors élaboré des questionnaires effectués en chaque point de mesure du site historique. Nous avons validé les simulations CFD effectuées par ENVI-MET, par les mesures que nous avons effectuées sur le terrain. La distribution de PMV et l'enquête sur la perception de l'environnement thermique dans les rues ont été analysées pour indiquer les espaces les plus appropriés en fonction des besoins des piétons. Les résultats obtenus deviennent ainsi des outils nécessaires pour l'extraction

²⁸⁰ Zauli, S., Marchesi, S., Lauriola, P., Tomozeiu, R., Botarelli, L., Bonafè, G., ... Bonazzi, F. (2016). UHI in the Metropolitan Cluster of Bologna-Modena: Mitigation and Adaptation Strategies. *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*, 131–200. doi:10.1007/978-3-319-10425-6_6.

²⁸¹ Noro, M., Lazzarin, R., & Busato, F. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Experimental and theoretical analysis. *Indoor and Built Environment*. 24 (4), 514–533. doi: 10.1177/14203 26X13517404.

²⁸² Rinke R. et al. (2016). Pilot Actions in European Cities – Stuttgart. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_10.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

de données sur le microclimat et constituent ainsi la base de nouvelles méthodes, lignes directrices et réglementations pour la conception et la planification urbaines.

2. Méthodes:

2.1. Zone d'étude:

Comme nous l'avons précisé dans les chapitres précédents, nous avons choisi une partie du quartier « Bab El Hadid », situé au sud-ouest de la médina de Tlemcen.

La morphologie urbaine de la zone est le résultat de la modification à travers plusieurs périodes, caractérisée par une structure arborescente constituée de ruelles, d'impasses et d'une grille orthogonale datant de la période coloniale (1830- 1962).

Ces interventions urbaines et architecturales n'ont pas toujours été liées aux conditions climatiques locales. La forme urbaine initiale était de type méditerranéen, chaud en été, minimisant les ouvertures vers l'extérieur et favorisant la compacité. Un modèle importé, par la suite, fut érigé par les français comprenant quelques remaniements, effectués au niveau des façades et des matériaux.

Ces mutations ont généré plusieurs typologies suivant le rythme de l'expansion urbaine. La distance entre les façades des bâtiments de la rue de Paris est de 8 m, la largeur des trottoirs est de 1 m. Dans certains cas, quelques ruelles piétonnes ont une largeur de moins de 2m. Il existe aussi une rue mécanique avec une largeur de 3 m sans trottoirs, et enfin, une Tahtaha avec une largeur qui varie de 10m à 28 m. La hauteur des façades varie de 4 m à 10m.

L'étude a été menée dans cinq points sélectionnés, caractérisés par une variété du rapport d'aspect du canyon (H/L) dans le quartier historique de Bab El Hadid de la ville de Tlemcen.

Ces rapports sont variables: ils passent de très large dans le cas de la Tahaha (0,6-0,85), à large dans le cas de la rue de Paris (1,18-1,70), à moyen dans la rue Hamzaoui (2.00) et enfin étroit dans la plupart des ruelles (2,00-3,00).

Les emplacements des rues sélectionnées pour l'étude sont montrés sur la figure 101. Leurs sections transversales sont présentées sur la figure 102.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.



Figure 91: Points de mesure dans le fragment urbain.

Source : Auteur du mémoire, (2017)

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

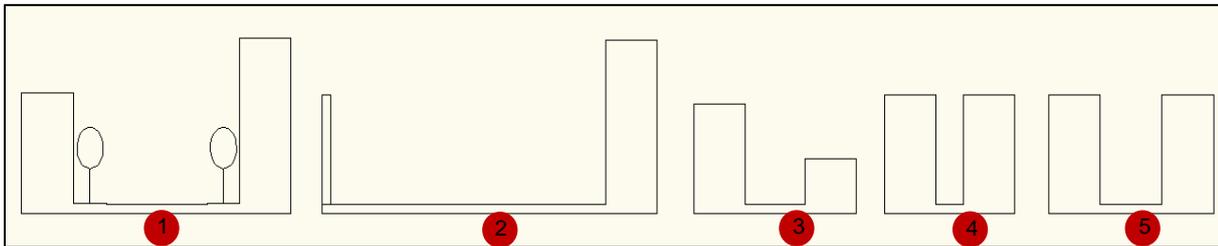


Figure 92: Coupes transversales de canyons de rue.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

2.2. Le climat:

Le climat de Tlemcen est chaud et tempéré. En hiver, Il se caractérise par des précipitations bien plus importantes qu'en été. D'après Köppen et Geiger, le climat y est classé Csa. La température moyenne annuelle à Tlemcen est de 17,6 °C en 2018. Le maximum quotidien moyen des températures de l'air varie de 23,3 °C à 30,8°C mais peuvent atteindre plus de 38°C. Les températures moyennes minimales quotidiennes de l'air varient de 7,1 °C à 14,5°C. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un climat extrêmement chaud, ces températures estivales sont supérieures aux zones de confort. La direction du vent est nord-ouest, sud-ouest. L'humidité moyenne annuelle est de 66,9%²⁸³.

2.3. Méthodologie :

Des mesures microclimatiques, entrevues, observations sur les passagers et photos ont été prises tout au long du travail sur le terrain. Des simulations par le logiciel ENVI-MET, ont été effectuées et combinées aux entretiens dans le but de pouvoir comparer la relation complexe entre les gens, le microclimat et la météo.

La surveillance météorologique a été effectuée pendant les journées ensoleillées et sans pluie²⁸⁴ (K. Villadiego, M.A. Velay-Dabat, 2014) au courant de l'année 2018 pour couvrir toutes les conditions microclimatiques.

²⁸³ Archives de la station météo Zenata: <https://fr.tutiempo.net/climat/2018/ws-605310.html>.

²⁸⁴ Villadiego, K., & Velay-Dabat, M. A. (2014). Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment*, 75, 142–152. doi:10.1016/j.buildenv.2014.01.017.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Afin de valider les simulations réalisées par ENVI-MET et déterminer les zones favorables au confort thermique des piétons, nous avons utilisé un anémomètre CR 2032 (figure 103) que nous avons placé à la hauteur spécifique (1,1 m) au-dessus du sol pour mesurer la température de l'air et la vitesse du vent dans chaque point de mesure du site historique.



Figure 93: Instrument « Anémomètre CR2032 » pour mesurer les données microclimatiques locales dans le site urbain historique de Bad el Hadid.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Le tableau suivant présente les détails techniques de l'appareil de mesure.

Données météorologiques	Symbole	Unité	Instrument	Précision	Plage de mesure
Température de l'air	Ta	°C	Anémomètre CR2032	+/- 2°C	-10°C à 45°C
Vitesse du vent	V	m/s	Anémomètre CR2032	+/- 5%	0 à 30 m/s

Tableau 25: Données météorologiques mesurées et précision de l'instrument de mesure.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

La température de l'air du microclimat de la zone d'étude ainsi que les données de la station météorologique de 5 jours critiques sont présentées dans le tableau suivant :

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Jour de l'enquête	Température moyenne de l'air : Données de la station météo	Température moyenne de l'air : Données sur le microclimat	Différence : Données microclimatiques e- données de la station météo	Nom du site microclimatique
18/02/2018	10,5	9,8	-0,7	Canyon 1
07/08/2018	30,8	28,9	-1,9	
20/02/2018	11,1	11,9	0,8	Canyon 2
08/08/2018	29,5	30,2	0,7	
22/02/2018	9,3	8,1	-1,2	Canyon 3
09/08/2018	27,3	26,4	-0,9	
23/02/2018	9,8	8,8	-1	Canyon 4
10/08/2018	27,7	27,2	-0,5	
24/02/2018	8,9	8,1	-0,8	Canyon 5
11/08/2018	29,6	28,9	-0,7	

Tableau 26: Comparaison des données sur le microclimat et les stations météorologiques entre 09h00 et 18h00.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Le tableau 27 représente les jours et les heures des études de terrain en détail.

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Date de questionnaire enquête	18/02/2018	20/02/2018	22/02/2018	23/02/2018	24/02/2018
	07/07/2018	08/07/2018	09/07/2018	10/07/2018	11/07/2018
Temps de questionnaire sondage pour chaque journée d'enquête	10h-12h 14h- 16h				
Nombre Valide de questionnaire	82	74	60	60	69

Tableau 27: Description de la date des enquêtes sur le terrain dans chaque zone.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Le questionnaire a été développé en cohérence avec les recherches antérieures²⁸⁵⁻²⁸⁶.

Il comporte deux sections, la première section concerne les renseignements personnels des piétons, y compris le genre, le poids, la taille, la ville et le lieu de résidence, etc. La deuxième section porte sur la sensation thermique des piétons, leur préférence thermique, leur satisfaction thermique, la durée du séjour en ville et le type d'activité.

2.4. Enquête sur la perception des ambiances climatiques de la zone d'étude :

Le questionnaire est un instrument utilisé pour distinguer des phénomènes intelligible par le langage tels que les attitudes, les opinions, l'agrément, les préférences, etc.

Il s'agit d'évaluer une condition subjective de manière la plus objective possible. Ce qui nous intéresse c'est la possibilité de tirer des conclusions larges auprès des individus interrogés.

En effet, nous avons construit un questionnaire sur la base d'une classification d'individus fonction de leurs caractéristiques personnelles (âge, genre, habillement, etc) en vue d'une interprétation et d'une généralisation.

La technique du questionnaire repose exclusivement sur le discours verbal, ce qui présente la difficulté de formulation des questions et de l'interprétation des réponses.

Les enquêtés ont un certain degré de liberté accordé par l'enquêteur. Pour la réponse, elle peut être d'une façon moins directive tel que l'interview ou le questionnaire tel qu'il a été proposé dans notre choix : en formulant des questions à l'avance et en accordant un choix de réponses limité.

Cela implique d'interpréter des questions précises dans l'ordre convenable, de préparer une fiche complète, synthétique, bien fournie en renseignements et facile à maîtriser par l'enquêteur. Nous avons pris en considération le facteur spatio-temporel dans notre enquête afin de corrélérer les résultats avec la simulation.

²⁸⁵ Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*, 125, 356–372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.09.006.

²⁸⁶ Villadiego, K., & Velay-Dabat, M. A. (2014). Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment*, 75, 142–152. doi:10.1016/j.buildenv.2014.01.017.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Un autre facteur important lors de la passation est que nous avons essayé d'être neutre et ne pas influencer le sujet dans ses réponses pour obtenir une réaction spontanée par rapport aux thèmes auxquels il est soumis et en lui accordant le temps de réflexion.

2.4.1. Présentation du questionnaire :

Nous nous sommes appuyés sur un questionnaire rédigé en une seule page lors de la passation pour faciliter le recueil et la transcription des discours des usagers. Nous le présentons dans le tableau 28. Il est composé de questions et une partie signalétique.

Le tableau suivant représente un échantillon des principaux éléments du questionnaire :

Enquête par questionnaire														
Analyse du confort thermique extérieur														
Localisation :		Date :			Heure :									
Nom de la rue :				Orientation de la rue :										
Type/fonction de la rue :														
Genre :		Male				Femelle								
Age :	<20 ans	<input type="checkbox"/>	21-35 ans	<input type="checkbox"/>	36-50 ans	<input type="checkbox"/>	51-60 ans	<input type="checkbox"/>	>60 ans	<input type="checkbox"/>				
Taille et poids de la personne :		Maigre			Normal			Surpoids						
Activité :		Passive (assis/debout immobile) <input type="checkbox"/>			Modéré (marche/debout en activité) <input type="checkbox"/>			Intensive (course/marche rapide) <input type="checkbox"/>						
Qui ressemble le plus à vos vêtements ?														
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
La tête ou le corps du sujet est-il exposé directement à la lumière du soleil ?					Oui					Non				
Habitez-vous dans ce secteur ?					Oui <input type="checkbox"/>					Non <input type="checkbox"/>				
Durée de vie dans le secteur		Moins d'un an			Moins de 5 ans			Plus de 5 ans						
Combien de fois vous fréquentez ce secteur ?		Tous les jours	<input type="checkbox"/>	Quelques fois par semaine	<input type="checkbox"/>	Occasionnellement	<input type="checkbox"/>	1 ère fois	<input type="checkbox"/>					

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Maintenant et à cet endroit même où on se trouve, est ce que vous trouvez qu'il fait:	-3 Très froid	-2 Froid	-1 Légèrement froid	0 neutre	+1 Légèrement chaud	+2 Chaud	+3 Très chaud
				Aucun vent	Peu de vent	Vent modéré	Vent très fort
				Aucun rayonnement	Peu de rayonnement	Rayonnement un peu fort	Rayonnement trop fort
Dans cet état, quel est votre degré de satisfaction par rapport au microclimat local ?	Parfaitement satisfait	Satisfait	Neutre		Plutôt insatisfait	Extrêmement insatisfait	
Quelle est la situation microclimatique que vous préférez ?	Plus frais			Moins de vent		Moins de soleil	
	Pareil, sans changement			Pareil, sans changement		Pareil, sans changement	
	Plus de chaleur			Plus de vent		Plus de soleil	
Comment peut-on améliorer le confort thermique ?	se déplacer vers des arbres ombragés / abris	porter un parapluie ouvert ou un chapeau	boire plus	réduire les vêtements		rien/ s'en aller	

Tableau 28: Partie sélectionnée du questionnaire utilisé dans cette étude.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

Les sujets sont progressivement dirigés vers les paramètres climatiques. Au début, ces paramètres ne sont pas évoqués d'une manière directe sauf si le sujet les aborde lui-même. Et, peu à peu nous demandons aux usagers d'évaluer les facteurs microclimatiques et enfin nous les interrogeons sur la condition climatique la plus gênante dans ces espaces.

En premier lieu, nous cherchons si les paramètres climatiques interviennent dans la partition que les usagers font de l'espace. Donc, l'objectif est de voir si les sujets perçoivent l'espace dans sa globalité ou en plusieurs zones distinctes. L'intérêt est d'évoquer dans leurs discours certains facteurs microclimatiques tels que : parties ombragées, ensoleillées, ventées, etc, et de voir aussi si les facteurs physiques sont abordés dans la partition de l'espace comme la morphologie, la topologie,etc.

Ensuite, pour les questions fermées, elles sont orientées vers les sensations climatiques des utilisateurs dans les différents espaces étudiés. Ce travail s'est déroulé dans les cinq points de mesure de simulation. Pour la construction du questionnaire, nous nous sommes basés sur les travaux de Katia VILLADIEGO et N NASROLLAHI. Ces références nous renseignent sur la perception du confort dans les espaces extérieurs. Ce dernier ne dépend pas seulement des facteurs

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

microclimatiques et physiologiques mais aux attentes des individus aussi. Nous avons interrogé les usagers de ces espaces sur la sensation, le degré de satisfaction et la préférence par rapport aux variables microclimatiques (température de l'air, vent et rayonnement solaire).

Enfin, nous cherchons les conditions climatiques les plus gênantes par des questions directes pour vérifier si celles-ci risquent de limiter les activités des sujets interrogés dans ces espaces.

La partie signalétique nous informe sur les conditions spatio-temporelles à savoir l'emplacement du déroulement de l'enquête (exposé au soleil ou à l'ombre), la date, l'heure exacte, l'âge, le sexe, la taille, l'habillement, l'activité et mentionner si l'enquêté est habitant, commerçant ou passager.

Echelle	Sensation thermique	Sensation du vent	Sensation du rayonnement solaire
-3	Très froid		
-2	Froid		
-1	Un peu froid		
0	Ni froid/ni chaud	Aucun vent	Aucun rayonnement
1	Un peu chaud	Peu de vent	Peu de rayonnement
2	Chaud	Vent modéré	Rayonnement un peu fort
3	Très chaud	Vent très fort	Rayonnement trop fort
NR	Ne répond pas		

Tableau 29: Echelles de sensation de confort pour l'analyse des résultats de l'enquête.

Echelle	Agrément
5	Parfaitement satisfait
4	Satisfait
3	Neutre
2	Plutôt insatisfait
1	Extrêmement insatisfait
NR	Ne répond pas

Tableau 30 : Echelle de perception sur le degré de satisfaction pour l'analyse des résultats de l'enquête.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Echelle	Préférence thermique	Préférence du vent	Préférence du rayonnement solaire
-1	Plus frais	Moins de vent	Moins de soleil
0	Pareil, sans changement	Pareil, sans changement	Pareil, sans changement
1	Plus de chaleur	Plus de vent	Plus de soleil
NR	Ne répond pas	Ne répond pas	Ne répond pas

Tableau 31 : Echelle de préférence climatique pour l'analyse des résultats de l'enquête.

2.5. Validation :

D'après les données climatiques de la moyenne décennale (2009- 2018), le mois le plus froid (février) et le plus chaud (aout) ont été considérés pour simuler et valider les résultats dans la zone urbaine historique.

Les diagrammes suivants décrivent la comparaison entre les températures simulées et les températures mesurées.

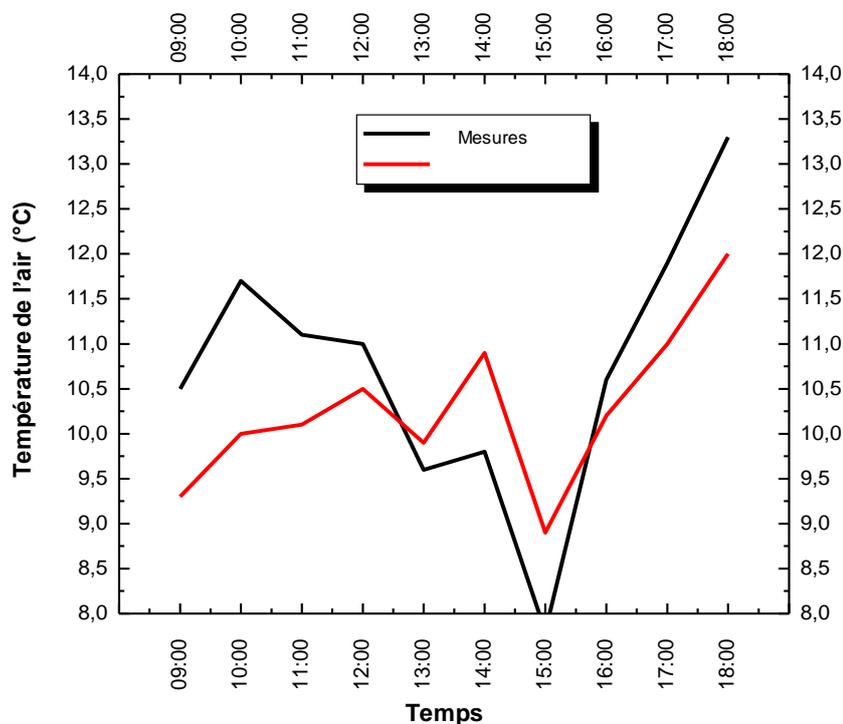


Figure 94 : Température de l'air mesurée et simulée, en fonction de l'horaire pour l'hiver.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

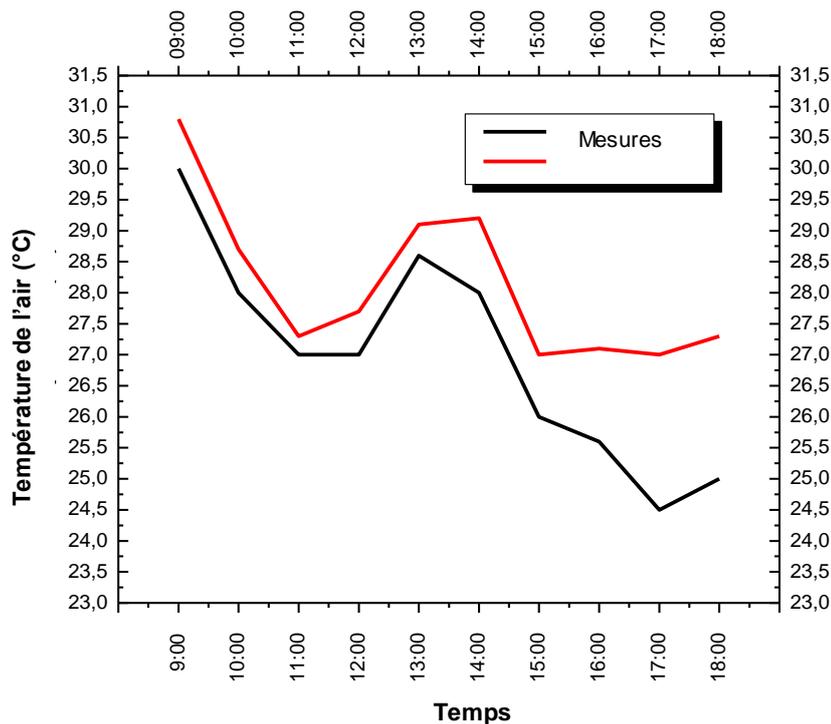


Figure 95: Température de l'air mesurée et simulée, en fonction de l'horaire pour l'été.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

La moyenne des températures minimales et maximales sont respectivement 4 °C et 16,4°C pour le mois le plus frais et 20,1 °C et 34,4 °C pour le mois le plus chaud dans les différents points de mesure du site historique.

Afin d'augmenter l'exactitude des résultats dans chaque point de mesure, une erreur moyenne est calculée et appliquée, obtenue à partir de la valeur moyenne de la variable des températures mesurées divisée par la valeur moyenne des températures obtenues à partir des résultats de la simulation.

La différence entre les résultats obtenus par les mesures réelles et ceux de la simulation pourrait être expliquée par les limites des détails morphologiques²⁸⁷, la nature des matériaux de revêtements présents dans le modèle et la différence dans la température de rayonnement moyen²⁸⁸.

²⁸⁷ Acero, J. A., & Herranz-Pascual, K. (2015). A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*, 93, 245–257. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.028.

²⁸⁸ Yang, S.-R., & Lin, T.-P. (2016). An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions. *Building and Environment*, 99, 149–160. doi:10.1016/j.buildenv.2016.01.001.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

En outre, comparées aux études précédentes, les simulations faites ont un taux de précision acceptable.

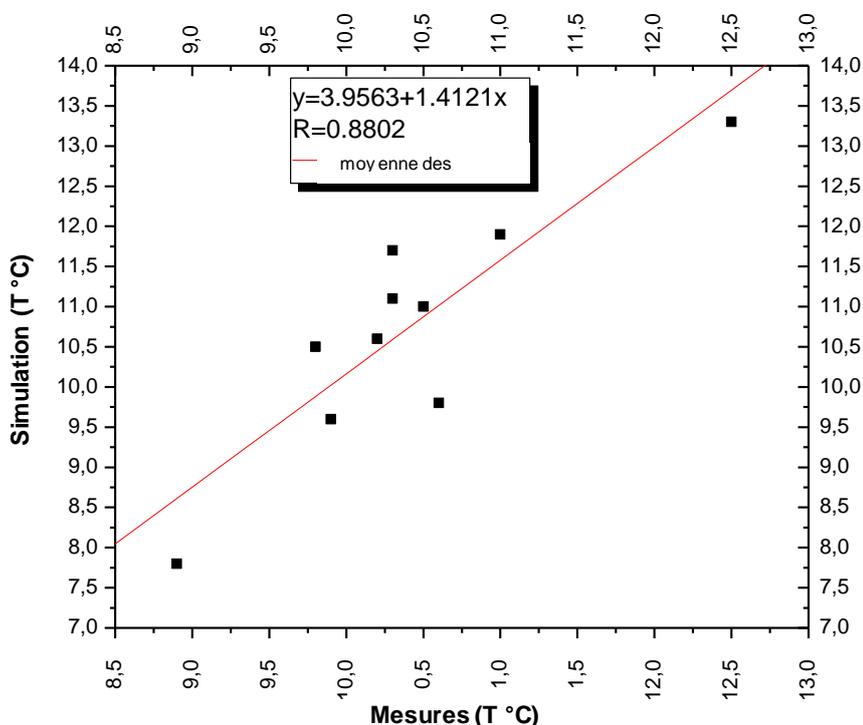


Figure 96: Le diagramme de dispersion de la température entre la mesure et la simulation en hiver.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

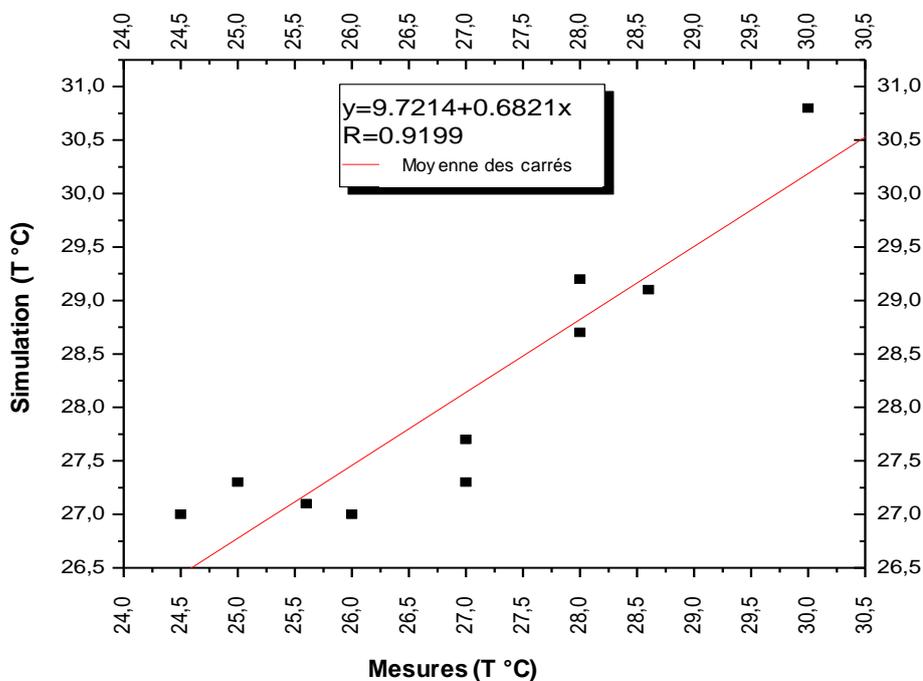


Figure 97: Le diagramme de dispersion de la température entre la mesure et la simulation en été.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

2.6. Simulation :

La zone d'étude a été modélisée avec le logiciel ENVI-MET présenté précédemment. Le modèle géométrique de l'étude est représenté sur la figure 108.

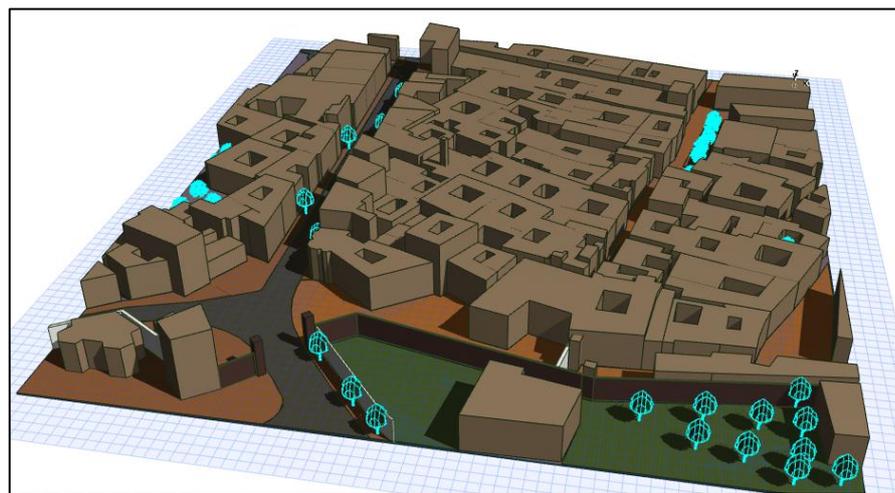


Figure 98: Modèle géométrique de l'étude.

Source : Auteur du mémoire, (2017).

De nombreuses études ont montré qu'ENVI-MET est capable de simuler des environnements thermiques extérieurs dans différents modèles climatiques avec une précision acceptable²⁸⁹⁻²⁹⁰. L'environnement thermique chez l'homme est quantifié par un indice thermique PMV.

Les données météorologiques ont été prises en compte pour simuler la zone urbaine historique dans ENVI-MET. Les résultats de la simulation sont : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température du rayonnement moyen. Ces paramètres peuvent nous renseigner sur l'indice thermique du vote moyen prévisible (PMV).

Les détails de la simulation sont présentés dans le tableau suivant:

²⁸⁹ Taleb, D., & Abu-Hijleh, B. (2013). Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. *Renewable Energy*, 50, 747–762. doi:10.1016/j.renene.2012.07.030.

²⁹⁰ Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*, 125, 356–372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.09.006.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

	Paramètres							
	Température de l'air (°C)		Humidité relative (%)		vitesse du vent à 10 m de hauteur (m/s)	Direction du vent (°)	Couverture nuage (Octans)	Rugosité Longueur
	Max	Min	Max	Min				
Eté	34,4	20,1	28,0	73,0	8,3	N-O	0	0,01
Hiver	16,4	4,0	61,0	86,0	9,6	nord-ouest		

Tableau 32: Description du modèle de configuration des limites météorologiques.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

2.7. Indices de confort thermique:

Nous avons utilisé les valeurs du Vote Moyen Prévisible (PMV), pour caractériser les conditions de confort extérieur des piétons et le comparer avec la perception de l'environnement thermique des piétons. ENVI-MET prend en compte le rayonnement direct et diffus de courte longueur d'onde et les flux de rayonnement de longue longueur d'onde provenant du sol, des surfaces des bâtiments et de l'atmosphère libre. Pour notre étude, nous avons analysé les conditions microclimatiques au niveau des rues où le rayonnement solaire du sol diminue avec la hauteur des bâtiments.

Les valeurs de perception thermique et physiologique indiquent plusieurs situations, l'absence de stress thermique est comprise entre -1 et +1, les conditions de froid léger entre -2 et -1, les conditions de froid extrême sont inférieures à - 4, les valeurs de +1 à +2 correspondent à des conditions légèrement chaudes à chaudes et au-dessus de +4 le PMV montre des conditions très chaudes. Cette grille est variable pour des piétons ayant 80 W (Watt) de production de chaleur interne et 0,9 clo (clothes) de résistance de vêtements. Cependant si ces deux variables changent, les valeurs de PMV passent légèrement au-dessus ou en-dessous de la grille.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

3. Résultats:

3.1. Variation de la température de l'air à l'intérieur des canyons urbains microclimatiques :

Selon les données de la station météorologique, la température moyenne de l'hiver durant les jours d'enquête est de 10,1°C et 27,1 °C pour l'été. D'après les mesures microclimatiques, le canyon urbain 3 englobe la température moyenne la plus basse en raison de la valeur élevée du ratio d'aspect de canyon H/L, de la présence d'arbres et de l'orientation.

La température moyenne la plus élevée a été observée le 2^{ème} jour dans la zone du canyon 2. Les données de la station montrent une valeur typique. Nous concluons donc que cela est dû à l'effet microclimatique généré par le bâti.

Les résultats montrent que les canyons orientés nord-sud ont des températures plus basses. Par contre ceux qui sont orientés est-ouest ont des taux plus élevés, ce qui pourra provoquer un effet d'îlot de chaleur urbain.

La température microclimatique de l'air la plus élevée a été observée dans le canyon 2 où la différence avec les données de référence est de +0,8 °C en hiver et 0,7 °C en été. Par contre, cette différence est équivalente à -0,7 °C et -1,19 °C en hiver et -1,93 °C et -0,9 en été, dans les canyons nord-sud. Cette orientation procure plus d'effet de refroidissement par rapport à celle est-ouest par la non exposition aux rayonnements solaires radiatifs diurnes.

Les études précédentes ont démontré que la température de l'air est moins élevée par rapport aux données météorologiques à cause de la géométrie urbaine.

3.2. Variation de la vitesse du vent à l'intérieur des sites microclimatiques :

Les canyons urbains ouverts montrent des vitesses de vent plus faible par rapport aux données météorologiques.

En outre, les canyons urbains dont le rapport H/L est élevé présentent des vitesses de vent encore plus faible par rapport aux données de la station météo, ce qui limite l'atténuation des températures.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

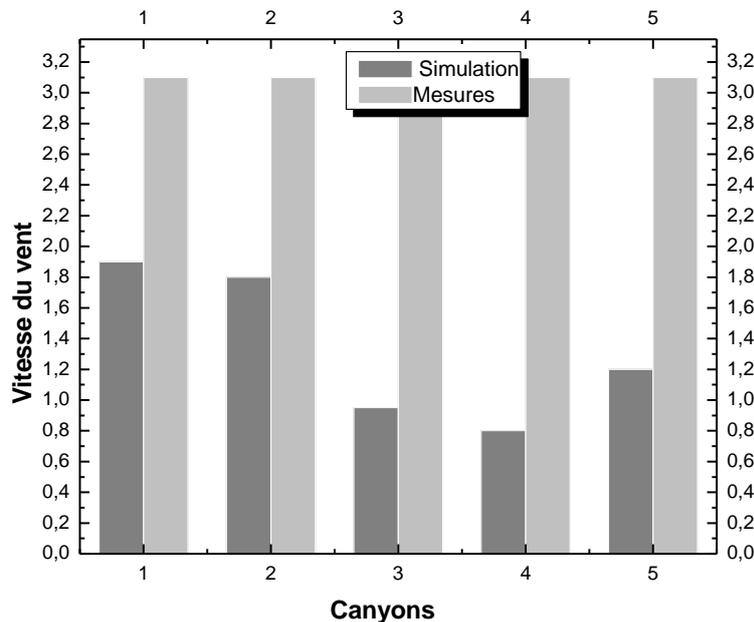


Figure 99: Comparaison des données de la vitesse moyenne du vent entre microclimat et la référence (station météorologique) de 12 h à 15 h.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Les résultats montrent qu'il existe d'autres paramètres de la géométrie urbaine qui influent sur la ventilation urbaine telles que la régularité de la hauteur des bâtiments et leurs orientations par rapport à la rue et au vent.

Des études ont démontré que la ventilation urbaine est inversement liée à la densité urbaine et elle peut être améliorée par la variabilité de la hauteur des bâtiments ainsi que par leur exposition à une direction oblique du vent.

Donc, une turbulence plus élevée a été constatée au niveau du canyon 1 à cause de la variabilité de la hauteur des bâtiments et du faible rapport d'aspect de canyon.

3.3. Analyse du confort thermique :

La température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative mesurées pendant le remplissage du questionnaire, ainsi que la température radiante moyenne simulée ont été introduites dans le modèle

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

ENVI-MET (dans l'application Biomet) afin de calculer l'indice thermique du vote moyen prévisible (PMV).

L'indice PMV a été calculé au taux métabolique de 126 Watt pour un homme de 35 ans avec 1,70 m de haut et 75 kg.

Les résultats montrent qu'il y a une corrélation entre les valeurs de PMV et la réponse des piétons à la sensation thermique lors du questionnaire.

3.3.1. Impact de la géométrie urbaine sur la sensation thermique :

Pendant les jours critiques chauds de l'enquête environ 59% des données ont été recueillies et 41% durant l'hiver. La sensation thermique des gens a été élaborée sur la base d'une enquête sur la perception de l'environnement thermique ; ce travail s'est déroulé en parallèle avec la prise de mesures.

En se basant sur des travaux de recherche, nous avons choisi l'approche adaptative, selon laquelle la perception du confort ne dépend pas que des facteurs microclimatiques et physiologiques, mais aussi des attentes et de la mémoire de l'individu ; donc nous les avons interrogé sur la sensation, le degré de satisfaction et la préférence par rapport aux variables microclimatiques.

L'analyse des données recueillies révèle des corrélations entre la perception de l'environnement thermique et la température de l'air. Quand la température de l'air augmente, les réponses tendent vers les sensations chaudes. Par contre, les corrélations sont négatives, quand la vitesse du vent augmente.

Une différence de sensation par rapport au genre a été constatée. Un faible pourcentage pour les hommes qui se sentaient neutre contre un grand pourcentage de femmes dans la catégorie extrêmes (+3) et (-3), ce qui explique qu'elles sont plus vulnérables aux conditions thermiques.

En ce qui concerne l'activité, la majorité des répondants en activité modéré (en marche) ont une sensation de +2, ceci est dû à leur métabolisme élevé. Les personnes dans la catégorie de (+3) se trouvaient dans leurs magasins climatisés, ils sont les plus sensibles aux situations chaudes. Le type d'habillement et la durée de fréquentation des lieux n'ont pas eu un impact significatif sur la sensation thermique.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

L'analyse de la sensation et la préférence du confort ressentis par les piétons a révélé que 40% des personnes avaient « légèrement chaud » à « chaud » et 20% étaient neutres. Cela signifie que ces personnes se trouvaient dans une situation au-dessus du niveau de confort. Ceci est compatible avec la période de l'enquête.

Les conditions de confort de la saison estivale pour le climat chaud tempéré étaient au-dessus des températures réelles pendant la période de l'enquête. Cela suggère que la préférence des gens dépend de leurs attentes et de leur niveau d'adaptation au contexte climatique et culturel.

La figure suivante illustre la distribution de la sensation et satisfaction thermique des personnes interrogées.

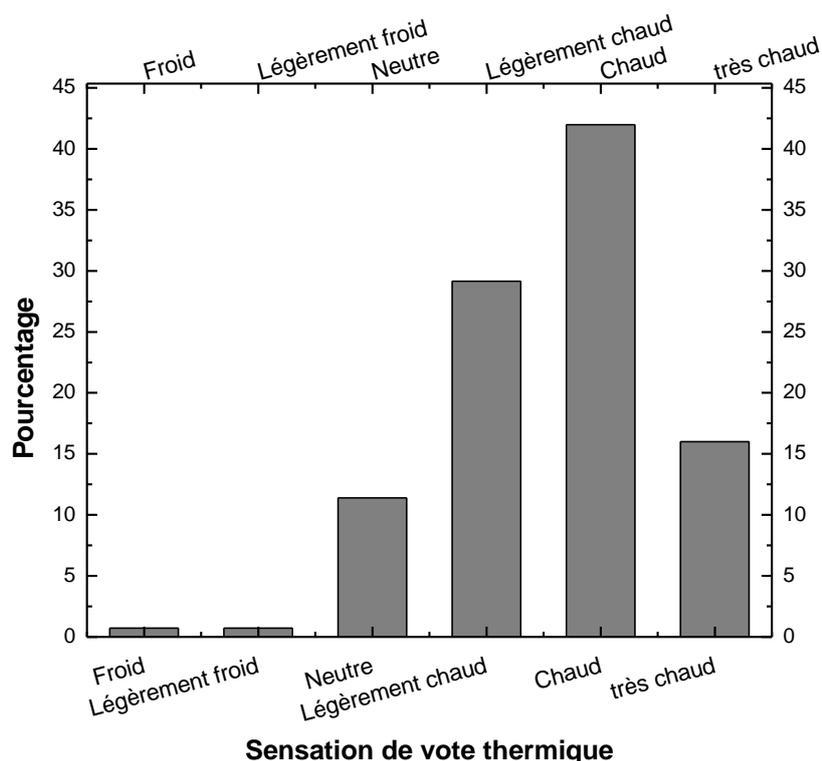


Figure 100: Répartition en pourcentage des votes sur les sensations thermiques dans le secteur d'étude.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

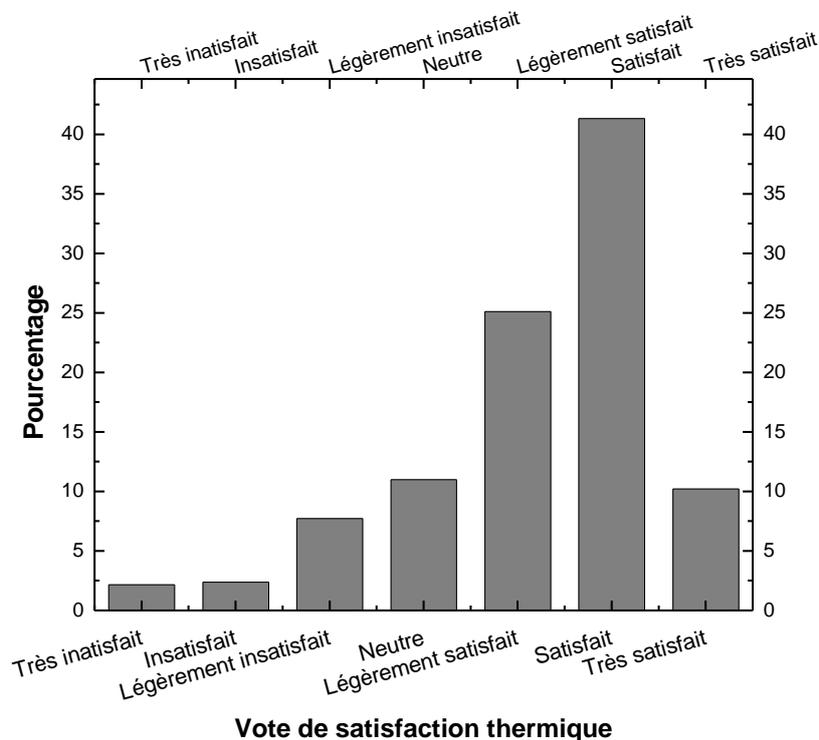


Figure 101: Répartition de la satisfaction à l'égard de l'espace extérieur dans le site historique.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

En ce qui concerne la satisfaction des piétons, les résultats du questionnaire durant la période chaude ont indiqué que 41,35 % des piétons étaient satisfaits, 25,12 % étaient légèrement satisfaits et 10,23 % étaient très satisfaits des conditions thermiques chaudes. Ce taux de satisfaction pourrait être associé à leur préférence du froid durant cette période, quand ils comparent avec les années précédentes.

3.3.2. Comparaison des conditions thermiques dans différents canyons urbains :

Les résultats de simulation dans les microclimats de chaque canyon urbain étaient différents. Pendant l'été, les conditions de confort variaient de 2,33 à 3,75 de PMV à 10h00, de 3,80 à 5,1 de PMV à 16h00. Un confort thermique a été perceptible le matin et le soir à partir de 19h00 dans les canyons 1 et 2. Par contre, pendant l'hiver, entre 14h00 et 16h00, nous avons constaté des conditions relativement confortables dans les différents canyons.

La figure 112 illustre la variation des PMV dans les différents canyons urbains.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

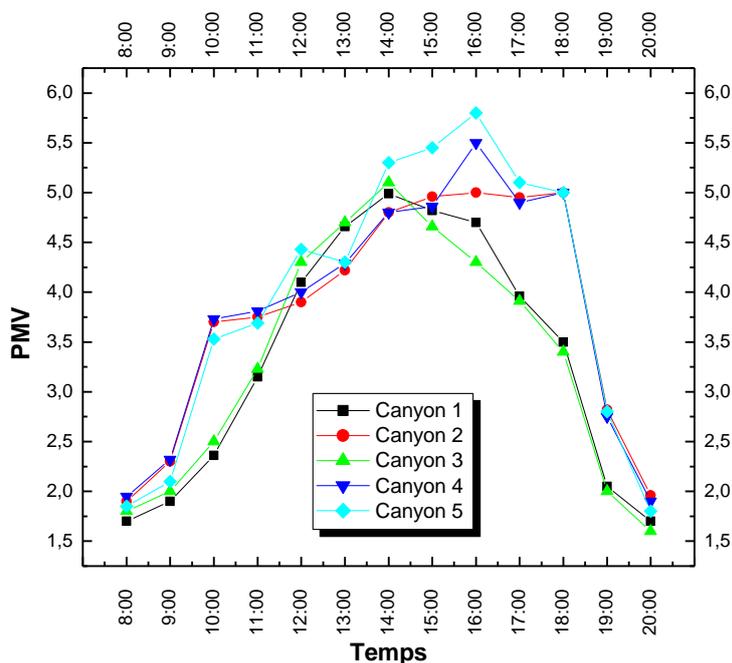


Figure 102: Comparaison du confort thermique entre les différents canyons urbains en été.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

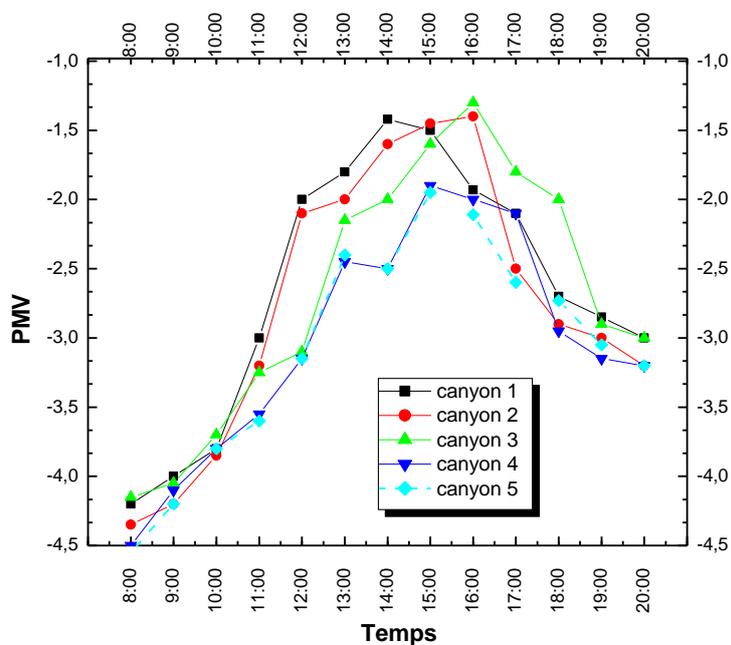


Figure 103: Comparaison du confort thermique entre les différents canyons urbains en hiver.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Pendant les jours d'été, les plages de confort sont perceptibles à 16 h:00 où le PMV atteint son pic dans les rues orientées est-ouest, nord-ouest et sud-est.

Cependant, la zone relative au point de mesure 2 présente des conditions relativement confortables avec un PMV de 3,60 par rapport aux autres points où les PMV varient de 4,30 à 4,50. En revanche, un stress thermique est perceptible au point 2 à 18h00 avec une valeur de PMV de 4,80.

En outre, les espaces présentant de bonnes conditions thermiques sont situées dans les zones des points de mesure 1 et 3, en raison de leurs rapports d'aspect de canyon (compris entre 0,5 et 2), leurs orientations nord-est, sud-ouest, nord-ouest et sud-est, et par l'ombrage dans ces zones.

Les patios ouverts des maisons présentent des PMV similaires à ceux des rues extérieures entre 10h00 et 13h00. A partir de 16 h00 des îlots de fraîcheur sont perceptibles dans les patios des maisons et dans la rue plantée d'arbres, les valeurs des PMV de l'intérieur sont inférieures à celles de l'extérieur.

On remarque à 10 h:00 que les valeurs de PMV sont stables (PMV= 3,73) au niveau des différents points, sauf au point 1 où le PMV est équivalent à 2,36.

De ce point de vue, les usagers de cette rue peuvent se déplacer dans les zones appropriées en fonction de leurs perceptions. Le stress thermique peut être présent du côté ouest de la rue, durant la matinée, alors qu'il peut être perceptible l'après-midi, du côté est. Ces résultats sont similaires à ceux de la référence²⁹¹.

Les ruelles orientées est ouest (points 4 et 5) présentent des situations inconfortables pour une longue période temporelle. Le pic de température est observé à 12h00 dans les points 4 et 5 où le nombre d'heures d'inconfort pourrait être réduit lorsque la hauteur des bâtiments augmente. Cependant les rues orientées nord sud présentent un confort pour une courte période et se refroidissent rapidement en raison de la courte durée d'exposition.

Pendant la nuit, entre 22h00 et 00h00, le PMV tend à se stabiliser de 1,05 à 1,59, il présente des valeurs minimales dans les ruelles orientées est-ouest et les patios des maisons. Il est maximal dans

²⁹¹ Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L., & Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*, 101, 85–101. doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

les autres rues. Les conditions thermiques sont similaires dans le courant de la nuit, pendant la saison hivernale. Cela est dû à l'absence de rayonnement solaire.

En revanche, le point 2 présente de meilleures conditions. Le PMV en hiver est équivalent à -1.39. Dans cette zone, l'orientation et le faible rapport d'aspect de canyon ont favorisé son exposition au soleil.

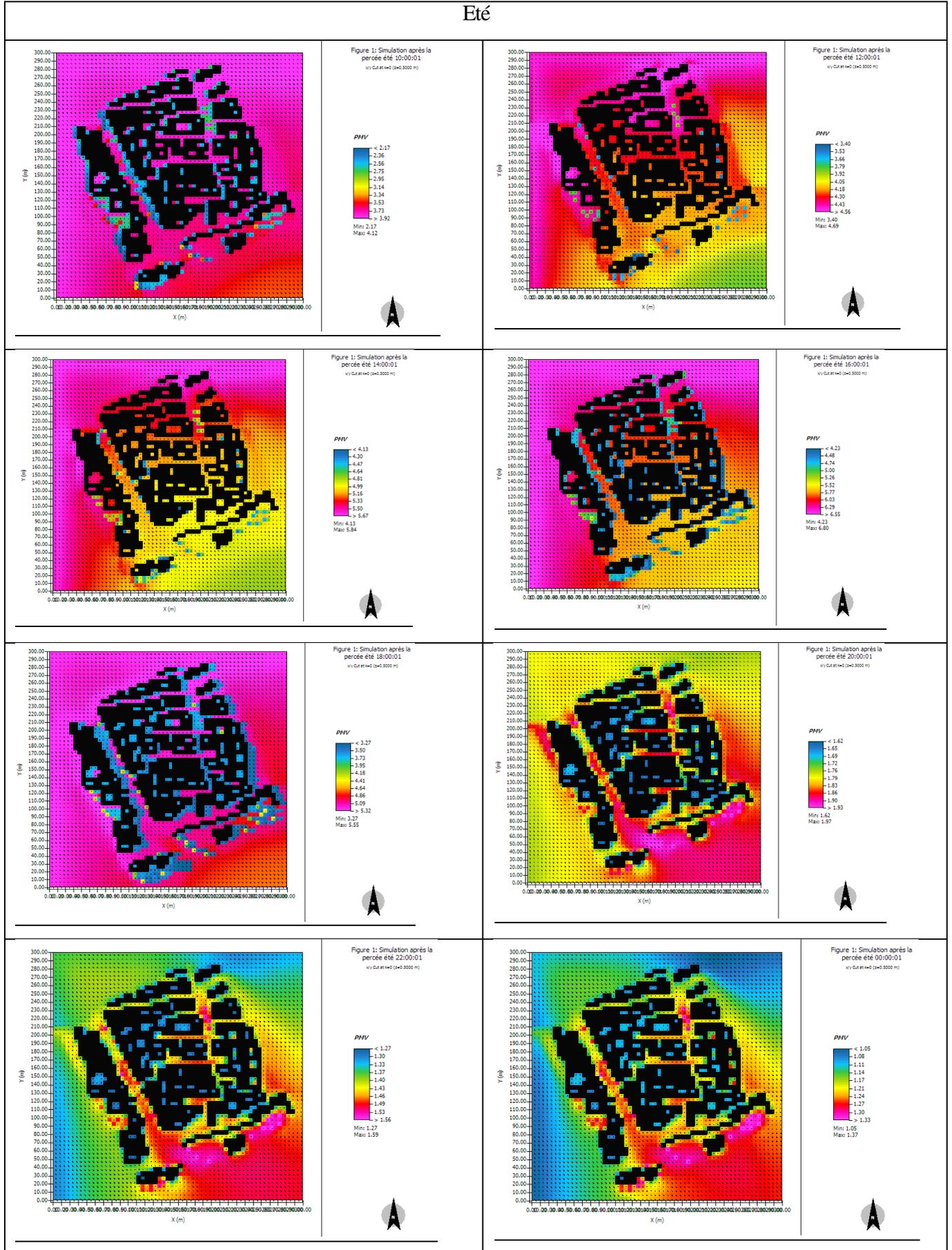
Par conséquent, en hiver, le rapport d'aspect de canyon des rues les plus défavorables par rapport à la perception thermique (orientées est ouest) pourrait être amélioré en augmentant l'exposition solaire.

En outre, les espaces présentant un stress thermique en hiver pourraient être réhabilités par des aménagements bioclimatiques tels que la plantation d'arbres, le rapport d'aspect de canyon et l'orientation des rues.

Nous constatons que le rapport d'aspect de canyon reste très limité par rapport à l'orientation des rues.

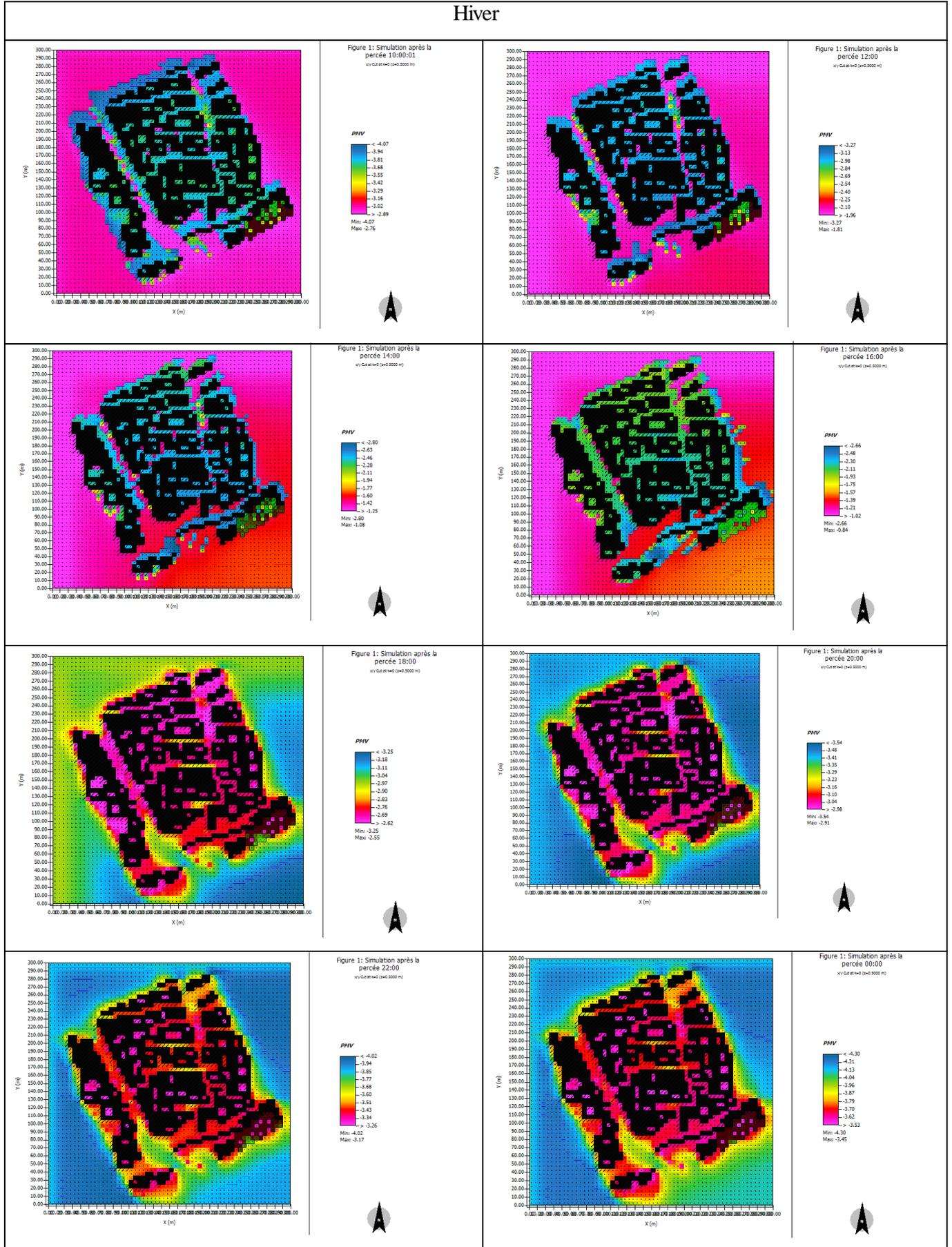
Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Été



Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Hiver



Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Tableau 33 : Distribution du PMV en hiver dans la zone d'étude.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Les deux figures suivantes illustrent les valeurs extrêmes de PMV des conditions extrêmes de la saison estivale et hivernale à 12 h:00 et à 16 h:00.

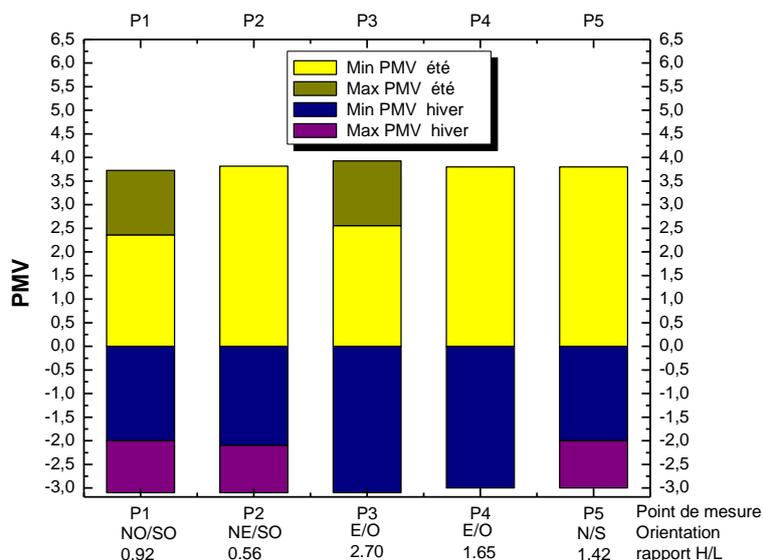


Figure 104 : Valeurs du PMV pour différents points de mesure à 12h00.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

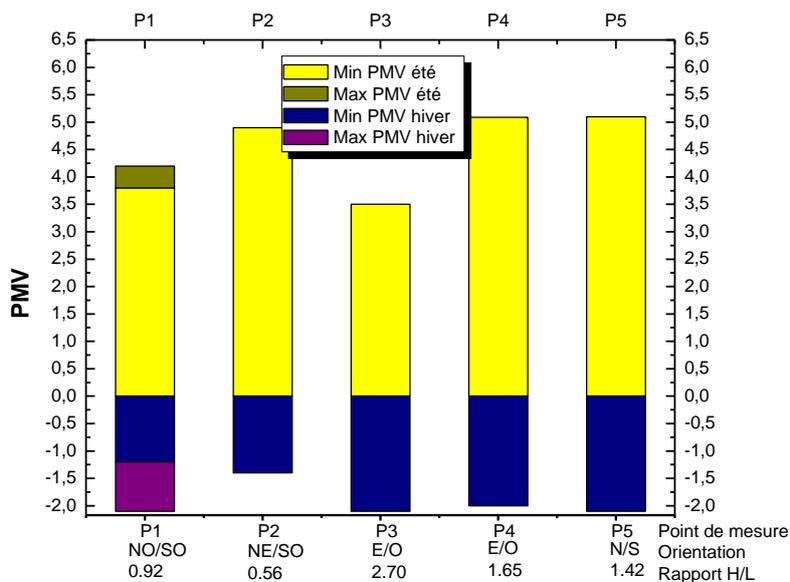


Figure 105: Valeurs du PMV pour différents points de mesure à 16h00.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

3.3.3. Comparaison des résultats de la simulation et du questionnaire :

Dans les modèles de simulation, deux canyons urbains ont présenté des conditions favorables de confort thermique (1 et 2) et un niveau de satisfaction très élevé dans les réponses au questionnaire. La présence de monuments tels que la porte des carrières, le bordj de « Bab El Hadid », le mur d'enceinte et la présence d'arbres ont augmenté considérablement le niveau de perception du confort thermique.

Cependant, des conditions de confort thermique relativement défavorable et un faible niveau de satisfaction se sont présentés, pour les deux autres canyons (4 et 5). Le canyon 4 avait le plus grand pourcentage d'insatisfaction (25%) par rapport aux autres canyons urbains. Selon la simulation, le canyon 5 a connu les conditions les plus défavorables pendant la journée.

Le canyon 3, a connu un pourcentage de satisfaction thermique plus élevé que celui des canyons 4 et 5, alors que les résultats de simulation ont montré des conditions défavorables. Cela pourrait être dû aux facteurs psychologiques et au sentiment d'appartenance des piétons à ce quartier. C'est-à-dire que les gens s'attendaient à des conditions de confort thermique plus favorables en traversant cette ruelle menant à la « Tahtaha » où le monument historique est présent. Par conséquent, leur niveau de satisfaction à l'égard du confort thermique dans ce site a augmenté. De même, plusieurs recherches ont approuvé une corrélation entre l'adaptation psychologique des gens et le confort thermique, à savoir rues, parcs et places²⁹².

Le tableau suivant illustre le pourcentage de satisfaction des piétons dans chaque canyon urbain.

²⁹² Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2013). Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*, 37, 1–10. doi:10.1016/j.apgeog.2012.11.001.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Canyon urbain	Satisfaction (%)	Neutre (%)	Insatisfaction (%)
Canyon urbain 1	61,87	7,67	0,00
Canyon urbain 2	58,25	14,58	0,00
Canyon urbain 3	39,15	4,33	1,22
Canyon urbain 4	20,75	17,52	4,17
Canyon urbain 5	26,73	10,90	6,61

Tableau 34: Satisfaction thermique des piétons dans les canyons urbains pendant le mois le plus froid.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

3.4. Exposition solaire :

La forme urbaine a un effet sur l'ensoleillement pendant la période estivale et hivernale car des situations critiques peuvent se manifester au milieu de la journée et pendant la nuit²⁹³.

Le facteur de vue de ciel exprime l'ouverture du ciel et détermine les échanges radiatifs entre le ciel et la structure physique de la ville²⁹⁴.

Les résultats indiquent que les zones 3, et 5 ont une faible valeur de facteur de vue de ciel (0,31) à cause de la hauteur des bâtiments. Cet indicateur prend la valeur de 0,51 aux points 1 et 4 avec une valeur minimale de 0,1 dans quelques points. Cette réduction est dû aux obstructions causées par la présence d'arbres. Par contre au point 2, la vue de ciel est dépourvue de toute obstruction, avec un FVC compris entre 0,7 et 0,9.

En outre, les orientations nord-sud présentent des opportunités pour favoriser l'exposition solaire en hiver. Par contre en été il serait intéressant d'introduire des éléments de conception tels que la ventilation naturelle et l'ombrage des arbres pour éviter la surchauffe.

De ce point de vue, l'orientation est-ouest pourrait capter plus de rayonnement solaire en été à l'opposé de la saison hivernale où la position la plus haute du soleil serait basse.

²⁹³ Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). 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(2), 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013.

²⁹⁴ Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

Donc, les rues étroites avec un grand rapport d'aspect de canyon diminuent le facteur de vue de ciel et par conséquent limite l'ensoleillement et sa durée.

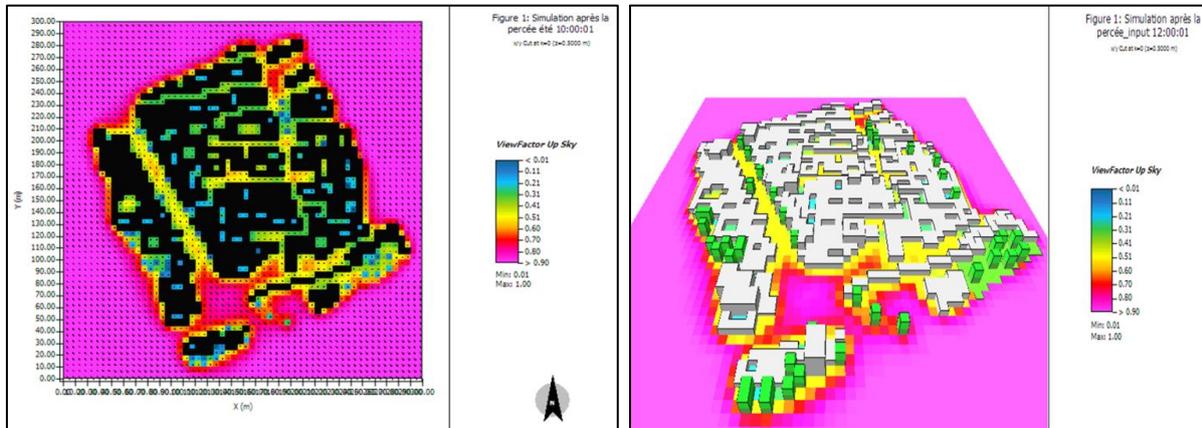


Figure 106: Facteurs de vue du ciel calculés avec ENVI_MET.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

3.5. Orientations urbaines:

L'influence de la morphologie urbaine sur les ambiances thermiques dans les espaces extérieurs a généré une classification des rues. De façon globale, l'orientation nord-sud présentant un faible rapport d'aspect est plus intéressante en hiver car elle peut jouer le rôle de source de chaleur.

A partir des situations citées ci-dessus, nous pouvons déduire une meilleure stratégie pour limiter le stress thermique, à l'opposé de l'orientation est-ouest où la sensation de froid pourrait être ressentie et où les rues ne peuvent pas être utilisées comme une source thermique.

Par contre, les ruelles étroites, la présence d'arbres, de galeries et de pergolas dans les espaces présentant un grand facteur de vue de ciel dans l'orientation nord-sud, pourraient améliorer la perception thermique.

A cet égard, dans notre cas, la rue de Paris orientée nord-ouest, sud-est avec le rapport d'aspect de canyon compris entre 1,18 à 1,70, comprenant une rangée d'arbres de part et

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

d'autre sur les trottoirs, et la ruelle orientée nord-sud par son grand ratio $H/L=1,5$, possèdent les meilleures conditions de perception thermique dans les climats chauds tempérés.

Il serait difficile d'atteindre le confort, de manière passive, mais ces orientations sont indispensables afin d'améliorer les conditions microclimatiques dans des régions climatiques similaires. De ce fait, nous avons élaboré des scénarios afin de limiter les conditions défavorables dans les espaces urbains.

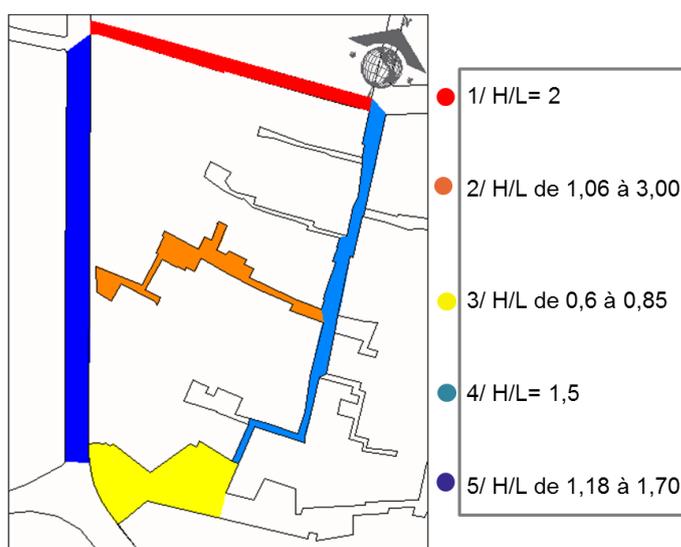


Figure 107 : Classification thermique des rues par priorité d'intervention.

Source : Auteur du mémoire, (2018).

Notre scénario propose une amélioration des conditions thermiques des piétons dans la rue orientée est-ouest ayant un rapport d'aspect de canyon équivalent à 2. Les conditions défavorables se présentent pendant les deux saisons à cause du grand rapport d'aspect de canyon et par conséquent le petit facteur de vue de ciel limite l'exposition solaire.

La deuxième action prioritaire touche aussi la ruelle orientée est-ouest, où le rapport d'aspect de canyon varie de 1,06 à 3,00. Certaines zones sont acceptables pour le piéton en hiver à cause du faible ratio. Par contre, le reste de la rue n'est pas favorable pour les piétons.

Les espaces de canyon urbain présentant un ratio de 0,6 à 0,85 sont très exposés au soleil et sont très convenables pour les piétons en hiver à cause du grand facteur de vue de ciel. Mais

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

ils peuvent aussi facilement rayonner de la chaleur, ce qui pourrait présenter un inconvénient par rapport au froid pendant la nuit.

Cependant, la réhabilitation bioclimatique au sein de cette zone orientée est-ouest pourrait protéger les piétons par la création de l'ombrage pendant l'été, grâce à des arbres et des galeries. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des actions afin d'améliorer le confort thermique en fonction des canyons urbains.

A l'instar d'autres stratégies, l'incitation du facteur psychologique augmentera le sentiment d'appartenance et de fierté des individus dans l'espace urbain à travers sa mise en valeur. La lisibilité et la valeur évocatrice du lieu renoue l'intérêt des visiteurs et touristes à fréquenter ces lieux historiques.

4. Discussion:

Ce travail présente une étude sur les conditions microclimatiques, la morphologie urbaine du site et la perception de l'homme dans un climat chaud tempéré.

Les résultats que nous avons obtenus concernent les conditions de confort thermique extérieur, la sensation, la satisfaction et la préférence thermique des usagers, la température de l'air et l'indice thermique PMV. Des corrélations ont été distinguées entre le PMV et le TVS des personnes.

Nos résultats confirment que l'indicateur géométrique d'aspect de canyon et son orientation, le facteur de vue de ciel (FVC), ainsi que les attentes des usagers influencent fortement la perception thermique des piétons. La valeur élevée du facteur de vue de ciel augmente considérablement la valeur du PMV.

A l'issue de ce constat, nous avons proposé des orientations de conception et de réhabilitation dans les tissus urbains anciens ayant des climats chauds et tempérés. Cette approche pourrait être élargie dans d'autres zones présentant des conditions climatiques similaires afin d'optimiser les conditions thermiques extérieures et par suite, le confort des usagers. Ainsi, ces orientations urbaines devraient faire partie du règlement de la planification urbaine, complétée par d'autres critères typologiques, culturels, fonctionnels...etc.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

L'ensoleillement a un impact direct sur les conditions microclimatiques pendant toutes les heures de la journée. Durant la saison hivernale, le climat et la durée du jour génèrent moins d'heures d'ensoleillement. Mais la valeur élevée du facteur de vue de ciel augmente aussi l'exposition solaire, ce qui améliore le confort pendant l'hiver.

Les rues reçoivent moins d'heures d'ensoleillement lorsque le facteur de vue de ciel est réduit, ce qui présente des conditions défavorables en hiver. Cependant, les cartes de distribution de PMV montrent les endroits les plus appropriés pour les piétons.

L'orientation des canyons présentent différentes réponses de la distribution de PMV. Les résultats démontrent que les rues orientées nord-sud, présentent les meilleures conditions thermiques. De ce fait, le percement de la rue impériale bordée d'arbres, a modifié considérablement la morphologie du tissu et a favorisé l'exposition solaire. Ce qui a amélioré le microclimat thermique.

En outre, l'orientation nord-sud a révélé que l'exposition solaire est garantie en hiver. Les arbres dans cette orientation pourraient aider à réduire le FVC et réduisent les gains de chaleur provenant du rayonnement solaire en été.

En corrélation avec nos résultats, des études, menées à Camagüey-Cuba²⁹⁵, à Thessaloniki-Grèce²⁹⁶, à Tunis-Tunisie²⁹⁷ et à Ghardaïa-Algérie²⁹⁸, ont montré des similitudes en termes de conditions de confort dans les orientations nord-sud et nord-sud intermédiaires des canyons urbains. Selon notre étude, il serait nécessaire d'utiliser des éléments d'ombrage dans l'espace orienté nord-est, sud-ouest (point 2) présentant un faible rapport d'aspect de canyon.

De ce point de vue, l'orientation, le FVC influent très fortement le confort thermique.

²⁹⁵ Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L., & Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*, 101, 85–101. doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026.

²⁹⁶ Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 33, 85–101. doi:10.1016/j.scs.2017.05.019.

²⁹⁷ Achour-Younsi, S., & Kharrat, F. (2016). Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 689–700. doi:10.1016/j.sbspro.2015.12.062.

²⁹⁸ Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). 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(2), 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

En outre, le cas le plus critique est celui de l'orientation est-ouest où l'exposition solaire est limitée en hiver.

Le rapport d'aspect du canyon entraîne une grande variation de distribution du PMV entre les rues profondes et larges, par contre la température de l'air présente de petites fluctuations.

Le canyon profond (H/L de 1,06 à 3) situé au point de mesure 3 présente des valeurs de PMV très basses dans la partie sud où le rapport est élevé (3). Par contre le PMV semble être plus confortable pendant l'hiver dans la partie nord où le rapport d'aspect du canyon tend à diminuer vers 1,06. Dans la même saison, le point situé dans la rue orientée nord-ouest, sud-est est plus favorable par son rapport d'aspect de canyon équivalent à 1,17. Cette rue a des valeurs minimales de PMV en été avec la présence d'arbres.

Notre analyse confirme donc que le canyon orienté nord-sud est confortable pendant toute l'année. Par contre l'orientation est-ouest présente un stress au froid en hiver.

Dans le cadre de cette recherche, nous constatons donc que la stratégie urbaine la plus efficace est celle de l'orientation nord-sud. Les arbres et les auvents d'ombrage pourraient améliorer les zones climatiques défavorisées dans les canyons larges et encourage la visite des usagers. En revanche, l'étroitesse des ruelles s'avère désavantageuse en hiver.

Cependant, les variables microclimatiques ne suffisent pas à elles seules à expliquer les sensations thermiques de l'homme en raison de la variation des ajustements comportementaux et de l'adaptation psychologique.

Conclusion:

Cette recherche contribue à établir des liens entre la morphologie du tissu urbain, les conditions microclimatiques et la perception de l'environnement thermique dans un centre historique de la ville de Tlemcen, celui de « Bab El Hadid » durant les conditions extrêmes de l'année 2018.

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

A ce titre, les résultats ont validé que l'indicateur géométrique du tissu urbain et la densité d'arbres pourrait améliorer l'environnement thermique et par conséquent le confort des piétons dans les milieux extérieurs.

La température de l'air ne présente pas une grande fluctuation à l'échelle de la canopée urbaine. Par contre la distribution de l'indice thermique PMV est variable dans les divers canyons urbains. A partir de 14h, les canyons 1 et 2 se trouvent dans des conditions de confort thermique.

Dans ce sens-là, les corrélations sont très fortes entre la perception thermique, les indicateurs géométriques et les variables climatiques. Les paramètres principaux sont le ratio H/L et le FVC. Ces deux variables sont les meilleurs indicateurs pour l'indice PMV, ce qui est pertinent pour le confort extérieur. Mais ces deux variables ont une légère influence sur la température de l'air.

La sensation de confort thermique des piétons dans cette zone varie de 1,4 à 5,5 de PMV. Malgré le stress thermique élevé, environ 41,35% des piétons étaient satisfaits des conditions de confort thermique tandis que 2,4% étaient insatisfaits. Cela indique la compatibilité psychologique des piétons malgré le stress thermique élevé.

Dans cette étude, les canyons relevant les contraintes thermiques élevées dans la simulation ont eu un taux d'insatisfaction le plus élevé dans le questionnaire.

Les deux résultats sont en accord l'un avec l'autre, sauf pour le cas du canyon 3 où une légère différence a été constatée entre les résultats de simulation et ceux questionnaire. Les aspects psychologiques n'ont toutefois pas pu être pris en compte, ce qui justifie encore plus cette différence de résultats.

En effet, les piétons fréquentent les espaces les plus appropriés selon leurs perceptions thermiques. Le cas le plus favorable est celui du canyon orienté nord sud avec une vue vers le ciel obstruée d'arbres. Ce qui confirme l'hypothèse que le percement de la rue dans cette orientation pourrait être avantageux pour promouvoir le confort thermique.

Les résultats obtenus par cette étude sont utiles pour les architectes, ingénieurs et urbanistes dans l'évaluation des comportements thermiques des environnements extérieurs dans des

Chapitre III : Analyse des ambiances thermiques urbaines basée sur la perception et simulation du microclimat dans le quartier historique de Bab El Hadid.

régions climatiques similaires aux anciens quartiers ayant une valeur historique. A travers ces orientations, diverses possibilités de réadaptation, sont présentées par des techniques passives, dans les endroits défavorables, afin de limiter l'impact négatif des formes urbaines sur le microclimat.

Les résultats obtenus, peuvent être intégrés dans un guide pour les concepteurs dans le but d'améliorer la sensation thermique des usagers par la modification de la forme urbaine.

Deuxième partie: Quantification des effets microclimatiques et du confort thermique liées aux transformations urbaines dans le quartier de Bab El Hadid à Tlemcen.

Conclusion de la 2^{ème} partie :

Cette partie a fait l'objet d'une analyse des paramètres morphologiques, physiques, géométriques et de confort du fragment de Bab El Hadid. En premier, l'analyse de l'évolution historique de la zone étudiée nous a permis de mieux saisir les interventions sur les éléments de la forme urbaine. En second lieu, la caractérisation d'indicateurs liés à la morphologie dans les cinq canyons a révélé une variabilité des valeurs à l'échelle du tissu urbain et espace public. La quantification de l'évolution des paramètres physiques du microclimat urbain caractérisant la morphologie des états représentatifs des transformations urbaines par simulation nous a accordé que la température de surface et la vitesse du vent influe sur le confort thermique extérieur. Ce dernier est fortement dépendant de la morphologie du tissu urbain. La hauteur du bâti, la présence d'arbres, l'albédo moyen des surfaces et le facteur de vue de ciel permettent de différencier des échelles de confort par leur impact différent dans l'histoire des transformations urbaines de notre tissu.

Enfin, nous avons analysé les ambiances thermiques urbaines basées sur la perception et simulation du microclimat de l'actuel quartier de Bab El Hadid. Nous avons constaté une corrélation entre les résultats du questionnaire et ceux obtenus par la simulation, où 2 canyons sont dans la zone de confort pour une période, sauf pour un canyon où la satisfaction des piétons est élevée, contrairement aux résultats obtenus par la simulation, mais que nous avons pu expliquer dans nos commentaires.

Les résultats présentés en termes de vote moyen prévisible PMV, d'accès solaire, de la température de l'air, montrent que les conditions thermiques sont en rapport direct avec le facteur de vue de ciel FVC, le rapport hauteur/ largeur H/L des rues ainsi que l'orientation des canyons urbains. Les points situés dans les rues orientées nord-sud, présentent une performance acceptable. Les rues ombragées par des arbres présentant un rapport d'aspect de canyon compris entre 1,18 et 1,70 réduisent le stress thermique dans les espaces extérieurs.

Les modèles PMV discutés donnent des informations sur les endroits les plus convenables pour les piétons. Nous avons proposé des orientations urbaines qui pourraient limiter les conditions défavorables dans les espaces extérieurs. Elles pourraient être dans l'avenir utiles pour les architectes et urbanistes dans le remaniement et la réhabilitation des centres historiques, et peut être même dans la conception de nouveaux quartiers ou sites.

Conclusion générale.

Conclusion générale

Nous atteignons la fin de cette polémique portant sur le rapport entre la forme urbaine et le microclimat dans le contexte des villes anciennes. Nous avons commencé par identifier et reconnaître les enveloppes et les constituants de la problématique qui nous concernait. Nous avons cadré cette recherche par la définition des aspects théoriques. Nous avons choisi le quartier de Bab El Hadid de Tlemcen en tant que ville à climat chaud tempéré et parce qu'elle appartient à un contexte différent des villes déjà développées dans d'autres recherches.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'impact de la morphologie urbaine sur les paramètres physiques microclimatiques et la perception du confort thermique extérieur. Nous allons soumettre à travers cette conclusion et perspective, une relecture de notre travail à travers ses deux parties. En premier, nous dégageons les principales conclusions ensuite nous clarifions une ouverture vers un certain nombre de perspectives qui restent inachevées sur certains points.

Nous rappelons ici les finalités qui nous conduisent vers ce travail. En effet, les questions environnementales nous ont intéressées depuis le début des recherches doctorales. Elles représentaient un intérêt majeur qui nous a amené à nous interroger sur un certain nombre de questionnements sur l'interaction entre le microclimat et le milieu construit.

L'analyse bibliographique a permis de souligner le rôle important du rapport entre la morphologie urbaine, le microclimat et le confort thermique extérieur. Cette analyse s'est étalée sur trois registres. Le premier s'est orienté vers une rétrospective sur la morphologie urbaine et ses indicateurs qui agissent sur les paramètres physiques de confort. Cette investigation nous a permis de dresser une liste d'indicateurs physiques, morphologiques et géométriques à l'échelle du tissu urbain et espace public. Une lecture historique a été retracée, se référant aux savoir-faire des urbanistes pionniers ou autres qui ont intervenus sur la morphologie urbaine ayant pour intention la salubrité des espaces extérieurs.

Ensuite, dans le deuxième registre, nous avons présenté une lecture sur les différentes notions de climat et microclimat pour mieux appréhender le sujet. Elle a dévoilé que le principal phénomène à l'échelle microclimatique est celui de l'îlot de chaleur urbain. Nous avons également évoqué l'interaction entre les paramètres physiques du climat et le milieu construit.

Enfin, nous avons souligné les questions importantes relatives au confort thermique, à savoir les paramètres et échelles de confort. En effet, cela s'est avéré nécessaire afin de quantifier et

Conclusion générale

analyser la perception du confort dans les espaces extérieurs. Trois méthodes caractérisant le milieu urbain ont été définies ; l'expérimentation, la simulation et l'observation. De cette façon, nous avons pu mettre en place une méthode pour notre travail. Cette recherche bibliographique a constitué une trame de fond à l'ensemble de notre travail. Elle a souligné la pertinence de l'objet principal de notre travail ; l'interaction du milieu bâti et du microclimat urbain. Elle a également permis de distinguer que les situations de confort thermique varient en fonction des effets microclimatiques générés par les transformations urbaines.

Avant d'arriver à la quantification proprement dite, nous avons parcouru l'évolution de la forme urbaine du cas d'étude. Au-delà des connaissances acquises de ce processus, ce travail nous a donné comme résultat l'établissement des principaux moments de transformation de la forme urbaine en fonction de leurs effets possibles sur les microclimats. Trois moments clés se dégagent de l'analyse de l'évolution de la forme urbaine.

Pour caractériser les paramètres physiques de confort au sein de la zone d'étude choisie, nous avons présenté une lecture historique des transformations urbaines qui ont eu lieu dans notre cas d'étude. Tout d'abord, l'état 1 qui correspond à la ville précoloniale de la période ottomane, vers 1800. Ensuite, le deuxième moment de l'évolution de la forme urbaine s'est déroulé avec l'arrivée du colonialisme français. La forme urbaine de cette période était le résultat d'une interprétation du modèle colonial de tracé orthogonal mais irrégulier, mélangé à des éléments de l'héritage indigène. Le troisième moment de l'évolution urbaine confirme la tendance de la fragmentation de la ville et l'ancrage d'une nouvelle dimension : le centre se dépeupla au profit de l'activité commerciale.

De plus, cette analyse, nous a permis de constater une variabilité des indicateurs morphologiques. Nous avons en effet constaté, par le biais de la simulation numérique par le modèle ENVI-MET que les paramètres physiques de température de surface et vitesse du vent, également les indicateurs physico-géométriques d'albédo moyen des surfaces et du facteur de vue de ciel permettent de différencier des situations de confort dans les trois états de configurations urbaines étudiées.

Nous avons approfondi notre étude par une analyse comparative sur cinq canyons urbains de l'état actuel du fragment d'étude. Nous avons montré à travers une analyse des ambiances thermiques basées sur la perception et la simulation du microclimat que les conditions thermiques sont en rapport direct avec le facteur de vue de ciel, le rapport hauteur/largeur et

Conclusion générale

l'orientation des rues. Ces variables sont les meilleurs indicateurs pour l'indice PMV, ce qui est pertinent pour le confort extérieur.

Nous avons en effet, mesuré les conditions climatiques, interrogé les passants sur leur perception de l'environnement climatique et effectué des simulations numériques dans chaque canyon. Les résultats ont révélé une corrélation entre les résultats du questionnaire et ceux obtenus par la simulation, hormis le canyon 3 qui a une légère différence entre les deux résultats. Cela est probablement dû aux aspects psychologiques qui n'ont toutefois pas pu être pris en compte dans la simulation.

Les résultats démontrent dans le cadre de cette recherche, que la stratégie urbaine la plus efficace est celle de l'orientation nord-sud. Les arbres et les auvents d'ombrage pourraient améliorer les zones climatiques défavorisées dans les canyons larges et encourage la visite des usagers. En revanche, l'étroitesse des ruelles s'avère désavantageuse en hiver.

A l'issue de ce constat, nous avons proposé des orientations de remaniement et de réhabilitation dans les tissus urbains anciens ayant des climats chauds et tempérés et peut être de conception dans de nouvelles cités. Nous considérons que la principale stratégie pour combattre la méconnaissance de ce sujet est de créer une certaine sensibilité. L'implication des acteurs (autorités locales, citoyens, concepteurs et étudiants) sera la clé pour garantir la mise en place de règlements traitant la qualité des ambiances microclimatiques urbaines.

Limites et perspectives :

Cette recherche s'est articulée autour de deux grands volets : une analyse bibliographique et une quantification des effets microclimatiques. Suite aux conclusions tirées de ce travail de thèse, nous étions entravées par un certain nombre de limites qu'il nous faut clarifier pour qu'elles puissent être utilisées dans d'autres recherches. Quant à notre propre contribution, elle représente une initiative de sensibilisation pour la prise en compte du microclimat lors de la conception des projets urbains en Algérie. Elle permettra également de dégager des perspectives pour développer un outil de caractérisation environnemental dédiées aux concepteurs et planificateurs urbains.

Conclusion générale

Nous n'avons pas eu l'opportunité d'évaluer l'interaction de quelques indicateurs comme la densité et porosité urbaine avec le microclimat. Cette limite s'explique par la version du logiciel ENVI-MET Lite qui ne permet pas de les quantifier.

Nous nous sommes orientées vers les tissus anciens, alors il serait intéressant d'élargir ce champ d'étude vers d'autres formes urbaines afin de mieux saisir les spécificités de chacune et leur impact en termes de confort.

Références bibliographiques.

Articles de revues:

- Acero, J. A., & Herranz-Pascual, K. (2015). A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*, 93, 245–257. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.028.
- Achour-Younsi, S., & Kharrat, F. (2016). Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 689–700. doi:10.1016/j.sbspro.2015.12.062.
- Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183–200. doi:10.1068/b2631.
- Adolphe, L. (1998). La recherche sur les ambiances architecturales et urbaines. In *Les Cahiers de la Recherche Architecturale et urbaine*, n°42/43 ('Ambiances architecturales et urbaines'), pp.7-11.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). 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(2), 94–108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Thermal comfort in an east–west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1-4), 223–237. doi:10.1007/s00704-005-0194-4.
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182–188. doi:10.1016/j.renene.2012.12.040.
- Arnaud, P. (2013). « Contexte spatial des ambiances urbaines et usage des lieux », Ambiances [En ligne], *Environnement - Modélisation - Caractérisation*, p 03, mis en ligne le 07 février 2013, consulté le 02 mai 2017. URL : <http://ambiances.revues.org/261> ; DOI : 10.4000/ambiances.261.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. doi:10.1002/joc.859.
- Berkovic, S., Yezioro, A., & Bitan, A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate. *Solar Energy*, 86(5), 1173–1186. doi:10.1016/j.solener.2012.01.010.

Références bibliographiques.

- Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, H., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Kunert, A. (2018). Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscellanea Geographica. Regional Studies on Development*, Sciendo, vol. 14(1), pages 91-102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 33, 85–101. doi:10.1016/j.scs.2017.05.019.
- Chudnovsky, A., Ben-Dor, E., & Saaroni, H. (2004). Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings*, 36(11), 1063–1074. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.052.
- Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2013). Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*, 37, 1–10. doi:10.1016/j.apgeog.2012.11.001.
- De Portzamparc, C. (1995). La ville du troisième âge, revue projet urbain, n°3, « la ville hors la ville », ministère de l'équipement des transports et du tourisme, direction de l'architecture et de l'urbanisme.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76. doi:10.1016/s0378-7788(02)00081-6.
- Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2), 31–44. doi:10.1016/s0169-2046(00)00034-7.
- Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3), 379–392. doi:10.1016/1352-2310(95)00033-x.
- Fan, H., & Sailor, D. (2005). Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes.
- Fanger, P O. (1972). Thermal comfort, in. Berkovic S, Yezioro A, Bitan A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate, *Solar Energy*, 86: 1173-1186. 86(5), 1173–1186. doi:10.1016/j.solener.2012.01.010.
- Futcher, J., Mills, G., Emmanuel, R., & Korolija, I. (2017). Creating sustainable cities one building at a time: Towards an integrated urban design framework. *Cities*, 66, 63–71. doi:10.1016/j.cities.2017.03.009.

Références bibliographiques.

- Gaffin, S. R, Rosenzweig, C, Khanbilvardi, R, Parshall, L, Mahani, S, Glickman, H, Goldberg, R, Blake, R. Slosberg, B & Hillel, D. (2008). Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1-2), 1–11. doi:10.1007/s00704-007-0368-3.
- Gandemer, J. (1981). The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(1), 15–36. doi:10.1016/0167-6105(81)90065-9.
- Gagge AP, Fobelets AP, Berglund LG (1986). "A standard predictive index of human response to the thermal environment". *ASHRAE Transactions*;92:709e31.
- Gérard, H, Henry, T, (2007). Ambiances architecturales et urbaines. De l'environnement urbain à la ville sensible. Coutard, O and Lévy, J-P. *Ecologies urbaines : Etat des savoirs et perspectives, Economica - Anthropos*, pp.184-198, 2010. hal-00995472f.
- Ghomari, F. (2007). La médina de Tlemcen: l'héritage de l'histoire, *web journal*, disponible sur : <http://www.webjournal.unior.it/Dati/19/70/Web%20Journal%20vol.%203,%20Tlemcen.pdf>. Consulté le : 20/01/2019.
- Giannopoulou, K., Livada, I., Santamouris, M., Saliari, M., Assimakopoulos, M., & Caouris, Y. G. (2011). On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society*, 1(1), 16–28. doi:10.1016/j.scs.2010.08.003.
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 115–133.
- Givoni B. (1969). *Man, Climate, and Architecture*. Philadelphia, PA : Elsevier Architectural Science Series.
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77–86. doi:10.1016/s0378-7788(02)00082-8.
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465. doi:10.1016/1352-2310(95)00266-9.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9), 1262–1292. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<1262:apouad>2.0.co;2.

Références bibliographiques.

- Grimmond, C. S. B., Potter, S. K., Zutter, H. N., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, 21(7), 903–913. doi:10.1002/joc.659.
- Harlan, S. L., & Ruddell, D. M. (2011). Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), 126–134. doi:10.1016/j.cosust.2011.01.001.
- Hart, M. A., & Sailor, D. J. (2008). Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3-4), 397–406. doi:10.1007/s00704-008-0017-5.
- He, X., Miao, S., Shen, S., Li, J., Zhang, B., Zhang, Z., & Chen, X. (2014). Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 59(3), 285–297. doi:10.1007/s00484-014-0841-5.
- Honjo, T., (2009). Thermal comfort in outdoor environment. *Global Environmental Research* 13, 43–47. <https://www.researchgate.net/publication/228521038>, consulted the: 12/03/2019.
- Höpfe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. doi:10.1007/s004840050118.
- Hoppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *energy and building*.
- Jendritzky, G., De Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428. doi:10.1007/s00484-011-0513-7.
- Jendritzky, G., & Nübler, W. (1981). A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B*, 29(4), 313–326. Doi:10.1007/bf02263308.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.022.
- Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 78–88. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.11.003.

Références bibliographiques.

- Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography – The case of Stuttgart, Germany. *Urban Climate*, 10, 573–584. doi:10.1016/j.uclim.2014.01.003.
- Krüger, E. L., & Rossi, F. A. (2011). Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. *Building and Environment*, 46(3), 690–697. doi:10.1016/j.buildenv.2010.09.013.
- Lawless, R. (1975). «Tlemcen capitale du Maghreb central, analyse des fonctions d'une ville islamique médiévale», in *revue de l'occident musulman et de la méditerranée*, n° 1, p 49.
- Lin, T.-P. (2009). Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment*, 44(10), 2017–2026. doi:10.1016/j.buildenv.2009.02.004.
- Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*, 52(4), 281–290. doi:10.1007/s00484-007-0122-7.
- Lin, T.-P., Matzarakis, A., & Hwang, R.-L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213–221. doi:10.1016/j.buildenv.2009.06.002.
- Lindberg, F., Thorsson, S., Rayner, D., & Lau, K. (2016). The impact of urban planning strategies on heat stress in a climate-change perspective. *Sustainable Cities and Society*, 25, 1–12. doi:10.1016/j.scs.2016.04.004.
- Liu, W., Zhang, Y., & Deng, Q. (2016). The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate. *Energy and Buildings*, 128, 190–197. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.086.
- Lévy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine, *Espaces et sociétés*, 122, 25-48. DOI : 10.3917/esp.122.0025.
- Mahmoud, A. H. A. (2011). Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Building and Environment*, 46(12), 2641–2656. doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.025.
- Mansouri, O., F. Bourbia, et R. Belarbi. Effect of urban albedo surfaces on thermal comfort. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9, n° 2 (2017): 878–896. P889.
- Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 29, 97–106. doi:10.1016/j.scs.2016.12.004.

Références bibliographiques.

- Matzarakis, A., De Freitas, C. et Scott, D. (2004). Advances in tourism climatology. *Dans Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität.*
- Matzarakis A., Martinelli L., Ketterer C. (2016) Relevance of Thermal Indices for the Assessment of the Urban Heat Island. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario.* Springer, Cham. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_4.
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (1997). Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology*, 41(1), 34–39. doi:10.1007/s004840050051.
- Mestayer P.G., Anquetin S. (1995) Climatology of Cities. In: Gyr A., Rys FS. (eds) *Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields. ERCOFTAC Series*, vol 1. Springer, Dordrecht. doi : <https://doi.org/10.1007/978-94-015->.
- Musco F. et al. (2016) Mitigation of and Adaptation to UHI Phenomena: The Padua Case Study. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario.* Springer, Cham. doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_8.
- Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 22(12), 2691–2700. doi:10.1016/0004-6981(88)90437-4.
- Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*, 125, 356–372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.09.006.
- Ng, E., & Cheng, V. (2012). Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, 55, 51–65. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.025.
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227–235. doi:10.1016/s0038-092x(00)00093-1.
- Noro, M., & Lazzarin, R. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, 14, 187–196. doi:10.1016/j.uclim.2015.04.004.
- Noro M., Lazzarin R., Busato F. (2016). The Urban Corridor of Venice and The Case of Padua. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario.* Springer, Cham. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_7.

Références bibliographiques.

- Noro, M., Lazzarin, R., & Busato, F. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Experimental and theoretical analysis. *Indoor and Built Environment*, 24 (4), 514–533. doi: 10.1177/14203 26X13517404.
- Nunez. M, Oke T.R. (1977). The energy balance of an urban canyon, *journal of applied meteorology*, 16 :11-19. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016%3C0011:TEBOAU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016%3C0011:TEBOAU%3E2.0.CO;2).
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254. doi:10.1002/joc.3370010304.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6.
- Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), 233–245. doi:10.1007/bf00116120.
- Peng, C., Ming, T., gui, J., Tao, Y., & Peng, Z. (2015). Numerical analysis on the thermal environment of an old city district during urban renewal. *Energy and Buildings*, 89, 18–31. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.023.
- Phillips, H. (2015). The capacity to adapt to climate change at heritage sites—The development of a conceptual framework. *Environmental Science & Policy*, 47, 118–125. doi:10.1016/j.envsci.2014.11.003.
- Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300.
- Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., & Hidalgo, J. (2008). De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville. *La Météorologie*, 8(62), 39. doi:10.4267/2042/19174.
- Picard, A. (1994). « Architecture et urbanisme en Algérie. D'une rive à l'autre (1830-1962) ». *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée* 73, n° : 121-36. <https://doi.org/10.3406/remmm.1994.1671>.
- Rinke R. et al. (2016). Pilot Actions in European Cities – Stuttgart. In: Musco F. (eds) *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_10.
- Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L., & Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort

Références bibliographiques.

- in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*, 101, 85–101. doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026.
- Rotach, M. (2000). "Review of atmospheric turbulence over cities". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 941–990.
 - Ruiz, M. A., & Correa, E. N. (2015). Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1-2), 69–83. doi:10.1007/s00704-014-1279-8.
 - Sailor, D & Lu, L. (2004). A top down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, no. 38, pages 2737–2748.
 - Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy. *Building and Environment*, 96, 46–61. doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.023.
 - Slater, k, (1986). Discussion paper the assessment of comfort, *the journal of the textile institute*, 77:3, 157-171, doi: 10.1080/00405008608658406.
 - Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., & Kardomateas, T. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53, 128–136. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.022.
 - Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. doi:10.1016/j.solener.2010.12.023.
 - Spagnolo .J, De Dear .R (2003). "A field study of thermal comfort in outdoor and semioutdoor environments in subtropical Sydney Australia". *Building and Environment* 38, 721 – 738.
 - Svensson, M. K. (2004). Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, 11(3), 201–211. doi:10.1017/s1350482704001288.
 - Taleb, D., & Abu-Hijleh, B. (2013). Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. *Renewable Energy*, 50, 747–762. doi:10.1016/j.renene.2012.07.030.
 - Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., & Konishi, M. (2002). Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation

Références bibliographiques.

- models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637–646. doi:10.1016/s0378-7788(02)00014-2.
- The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (IUPS Thermal Commission). (2001). Glossary of terms for thermal physiology. *The Japanese Journal of Physiology* Vol. 51, No. 2. Consulté le: 08/04/2019. <http://www.or.org/pdf/ThermalPhysiologyGlossary.pdf>.
 - Tsitoura, M., Michailidou, M., & Tsoutsos, T. (2016). Achieving sustainability through the management of microclimate parameters in Mediterranean urban environments during summer. *Sustainable Cities and Society*, 26, 48–64. doi:10.1016/j.scs.2016.05.006.
 - Villadiego, K., & Velay-Dabat, M. A. (2014). Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment*, 75, 142–152. doi:10.1016/j.buildenv.2014.01.017.
 - Wheeler, D., & Wilkinson, C. (2004). from calm to storm: the origins of the beaufort wind scale. *The mariner's mirror*, 90(2), 187–201. doi:10.1080/00253359.2004.10656896.
 - Yan, H., Fan, S., Guo, C., Wu, F., Zhang, N., & Dong, L. (2014). Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: The case of Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 44–53. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.007.
 - Yang, S.-R., & Lin, T.-P. (2016). An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions. *Building and Environment*, 99, 149–160. doi:10.1016/j.buildenv.2016.01.001.
 - Zauli Sajani, S., Marchesi, S., Lauriola, P., Tomozeiu, R., Botarelli, L., Bonafè, G., Guaragno, G., Fiumi, F., Zanelli, M., Gherardi, L., Capucci, M., Rizzo, C., Bonazzi, F. (2016). UHI in the Metropolitan Cluster of Bologna-Modena: Mitigation and Adaptation Strategies. *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*, 131–200. doi:10.1007/978-3-319-10425-6_6.
 - Zhao, C., Fu, G., Liu, X., & Fu, F. (2011). Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. *Building and Environment*, 46(5), 1174–1183. doi:10.1016/j.buildenv.2010.12.009.

Ouvrages généraux :

- Abbadie, L. (1994). Tlemcen au passé retrouvé, *Ed Jaques Candini*, Nice, 143 pages.
- Abbadie, L. (2005). Tlemcen de ma jeunesse. Nice : *Edition Jacques Gandini*. 207 pages.
- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., & Winnett, S. (1992). *Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing.* U.S. *Government Printing Office*, Washington D.C., page 217.
- Allain, R. (2004). Morphologie urbaine géographie, aménagement et architecture de la ville, *armano colin*, 257 pages.
- Barges, J-L. (Abbé). (1859). Tlemcen, ancienne capitale du royaume de ce nom, sa topographie, son histoire, description de ses principaux monuments, anecdotes, légendes et récits divers, souvenirs d'un voyage. Paris: *Edition Barges B.Duprat*. p 191.
- Cabirol, T, Faure, D, Roux Daniel (1982). Chauffage de l'habitat et énergie solaire, tome1: Confort thermique et techniques de chauffage, *Ed Edisud*, 164 pages.
- Didier, P. (2000). L'atmosphère terrestre, consulté le 11 janvier 2017, disponible sous le lien : <http://www.fondation-lamap.org/fr/page/12039/latmosphere-terrestre>. Ed par : *Fondation coopération scientifique pour l'éducation à la science*.
- Escourrou, G. (1991). Le climat et la ville, Paris : *Nathan*, 190 pages.
- Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort. New York, Etats Unis : *McGraw-Hill*. 244 pages.
- Fernandez, P & Lavigne, P. (2009). Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes, *Ed Le moniteur*, Paris. 430 pages.
- Gauzin-Muller, D. (2001). L'architecture écologique 29 exemples européens (urbanisme et développement durable, architecture et qualité de environnementale, démarche HQE), *Le Moniteur*, Paris, 287 pages.
- Givoni, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. *Editions Le Moniteur*; Paris, 460 pages.
- Givoni, B (1998). Climate considerations in building and urban design, *John Wiley & Sons*, New York, 444 pages.
- Grundström, K., Johansson, E., Mraissi, M., & Ouahrani, D. (2003). Climat et Urbanisme - La Relation entre le Confort Thermique et la Forme du Cadre Bâti. (Report; Vol. 8). *Housing Development and management*, 153 pages.

Références bibliographiques.

- Guillaume, A. (1990). Les temps de l'eau : la cité, l'eau et les techniques, *coll. Milieux, Champ vallon, Macon*, 263 pages.
- Guyot, G. (1999). Climatologie de l'environnement ; cours et exercices corrigés. Paris, *Dunod*, 632 pages.
- Harouel, J.L. (1993). L'embellissement des villes l'urbanisme français au XVIIIe siècle, *Picard*, Paris. 335 pages.
- Hassan, F. (1986). Natural energy and vernacular architecture: principles and examples with reference to hot arid climates, *University of Chicago Press*, Chicago, IL, 172 pages.
- Lavedan, P. (1959). Géographie des villes. L'Information Géographique, 24-3, *Gallimard*, pp. 134-135.
- Lawless, R, Gerald, B. (1976). Tlemcen, continuity and change in an Algerian Islamic town, London, p298.
- Lecocq, A. (1940). Histoire de Tlemcen, ville française, tome I : l'administration militaire, 1842-1852, *Ed internationales S.S*, Tanger, 337 pages.
- Le Corbusier, (1957). La Charte d'Athènes, *Minuit*, Paris, 189 pages.
- Liebard, A, De Herde, A, (2006). Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatique : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, *Le Moniteur*, Paris, 736 pages.
- Lynch, K. (1999). L'image de la cité. M-F. Vénard et J-L. Vénard, (trad.). Paris, France : *Dunond*, 221 pages. (Ouvrage original publié en 1960 sous le titre The image of the city. Massachussets, MA : *MIT Press*).
- Marçais, W. et Marçais, G. (1903). "Les monuments arabes de Tlemcen", Ed. Albert Fontemoing, 440 pages.
- Muratori, S. (1960). Studi per una operante storia urbana di venezia. Roma, Istituto poligrafico dello Stato, *Libreria dello Stato*, 112 pages.
- Nikolopoulou, M. (Ed.) (2004). *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach. Athens: Centre for Renewable Energy Sources, EESD, FP5.*
- Olgyay, V. (1963). Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Issue 1. Princeton, NJ : *Princeton University Press*, 224 pages.
- Panerai, Ph. Castex, J. Depaule, J-Ch, et al. (1997-2001). Formes urbaines : de l'îlot à la barre, *Parenthèses*, Marseille, 196 pages.
- Panerai, Ph. et Langé, J. (2001). Formes urbaines, Tissus urbains, Essai de bibliographie raisonnée 1940-2000. Paris, France : Ministère de l'équipement, des

Références bibliographiques.

- transports et du logement, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction - DGUHC, *Centre de documentation de l'urbanisme*, 92 pages.
- Peneau, J-P. (2000). Les ambiances urbaines. In *donnés urbaines*. Paris : *Anthropos*, p.380.
 - Panerai, Ph, Depaule, J-C et Demorgon, M (1999), *Analyse Urbaine*, *Edition Parenthèses*, 190 pages.
 - Salat, S. (2011). Les villes et les formes sur l'urbanisme durable, ed *Hermann & CSTB*.543 pages.
 - Santamoris M. (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, *James & James*, London, 401 pages.
 - Tabeaud, M. (2000). *La climatologie*. Paris, *Armand Colin*, 175 pages.
 - Thiberge, C. (2002). *La ville en creux*, *éditions du Linteau*, Paris.
 - VDI (Verein Deutscher Ingenieure), (2008) VDI 3787-2, *Environmental Meteorology—Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning at Regional Level. Part 1: Climate*. Beuth, Berlin.

Thèses :

- Athamena, K. (2012). *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers*, thèse de doctorat, Architecture, Ecole Centrale de Nantes. (ECN). French. <NNT : 498-231>. <tel-00811583>.
- Benguella, S. (2012). *Le processus d'appropriation des places Emir Abdelkader et Mohamed Khemisti de la ville de Tlemcen*, thèse de Magister, université de Tlemcen.
- Benzerzour, M. (2004). *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"*. Histoire. Université de Nantes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00428536/>.
- Bonhomme, M. (2013). *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine*, thèse de doctorat, institut national de sciences appliquées de Toulouse, 11 décembre 2013.

Références bibliographiques.

- Bourbia, F. (1999). Building cluster and shading in hot dry climate. Thèse de Doctorat. University of reading.
- Boussoualim, A. (2002). Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur- Etude de cas à Blagnac -, Architecture, espace management. Thèse de doctorat, Université de Nantes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01083203>.
- Bozonnet, E. (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments cas des rues canyons. Thèse de doctorat, Université de Rochelle.
- Colin, J. (2001). Définition d'une approche de la modélisation de la rugosité aérodynamique en milieu urbain. Thèse de maîtrise de Géographie. Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (Contribution to the analysis of various means to take into account urban climate in urban planning). Thèse de doctorat, Université Paris-Est. Consulté à l'adresse <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00470536/>.
- Fouchier, V. (1997), Des fortes densités urbaines : les villes nouvelles dans l'espace métropolitain, thèse de doctorat en urbanisme, Paris, France.
- Glockner, S. (2000). Contribution à modélisation de la pollution atmosphérique dans les villes. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1.
- Kassab, T. (2007). Antagonisme entre espace historiques et développement urbain, cas de Tlemcen. Thèse de doctorat d'État en Architecture et Urbanisme, option: préservation des sites et monuments historiques, École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme.
- Lescop, L. (1999). La représentation des ambiances architecturales et urbaines : Introduction à une pédagogie des ambiances. Thèse de doctorat. Nantes : Université de Nantes, Institut des Sciences de l'Ingénieur en Thermique Énergétique et Matériaux, 475 p.
- Moudjalled, B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, Thèse de doctorat en Génie civil, INSA, Lyon.
- Narçon. S. (2001). Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort, thèse de doctorat, l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, p : 9.

Références bibliographiques.

- Ouamer, A. F. (2007). Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : Étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec, maîtrise en science de l'architecture, École d'architecture faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels, Université Laval, Québec.
- Robitu M. (2005). Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.
- Selka, C. (2019). Evolution de l'architecture défensive de Tlemcen à l'époque médiévale : techniques, matériaux et critères d'intervention, thèse de Doctorat, Université de Tlemcen.

Actes de séminaires :

- Achour-Younsi, S., & Kharrat, F. (2016). Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 689–700. doi:10.1016/j.sbspro.2015.12.062.
- Adolphe L., (2001). Modeling the link between built environment and urban climate: towards simplified indicators of the city environment, *Building Simulation, Proceedings of IBPSA (International Building Performance Simulation Association)*, pp. 679- 684.
- Ait-ameur, K. (2002). Characterization of the microclimate in urban public spaces through the validation of a morpho-climatic indicator system, *Design with the Environment, Proceedings of PLEA (Passive Low Energy Architecture)*.
- Altinisik, L., Klemm, W., Peretti, G., & Bruse, M. (2014). Integration of Microclimate- Responsive design in the planning of Urban outdoor spaces- a case study in Athens, Greece. *Third int. conf. on countermeasures to urban heat island*. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/324491>.
- Arantes, L, Rollet, P, Baverel, O & Quenard, D. (2010), For A Rationalized Refurbishment Of The 1960s-70s Towers: The Core-Skin-Shell Concept, *WIT Transactions on Ecology and the Environment, Conference: The Sustainable World*.
- Candas, V. (2003). "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : "*Habitat, confort et énergie*". *Actes de la 13e Journée du CUEPE*, p : 12.

Références bibliographiques.

- Cartin R, Moujalled B et Guarracino G, (2005), complexité du confort thermique dans les bâtiments, *6ème congrès Européen de Science des Systèmes*, Paris, 19-20.
- Davenport, A., Grimmond, G., Oke, T. et Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. Dans *Preprints, 12th Conf. on Applied Climatology, Asheville, NC, American Meteorology Society*, 96–99.
- Emmanuel Bozonnet, E. Wurtz, Rafik Belarbi, Francis Allard. (2002). Simulation thermo-aéraulique du microclimat urbain à l'échelle d'une rue de type canyon. *Congrès IBPSA France*, France. pp.n.a. (hal-00312390).
- Fabbri, K., Di Nunzio, A., Gaspari, J., Antonini, E., & Boeri, A. (2017). Outdoor Comfort: The ENVI-BUG tool to Evaluate PMV Values Output Comfort Point by Point. *Energy Procedia*, 111, 510–519. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.213.
- Gaspari, J., & Fabbri, K. (2017). A Study on the Use of Outdoor Microclimate Map to Address Design Solutions for Urban Regeneration. *Energy Procedia*, 111, 500–509. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.212.
- Jacopo, G, Kristian, F. (2017). Une étude sur l'utilisation de la carte de microclimat extérieur pour aborder les solutions de conception pour la régénération urbaine, *journal Energy Procedia* 111, p 504.
- Katzschner , L, Bosch, U & Roettgen, M. (2003). A methodology for bioclimatic microscale mapping of open spaces, *Conference on urban space*. Consulté le : 09 Avril 2018, disponible sous le lien : http://meteo.geo.uni.lodz.pl/icuc5/text/P_1_1.pdf.
- Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., & Desplat, J. (2011). Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique (Evolution of urban climate of Paris in the context of climate change). In *Proceedings of 2R2CV*. Université Paul Verlaine - Metz, France. Consulté à l'adresse <http://www.univmetz.fr/recherche/labs/cegum/2R2CV/Actes/Kounkou-Arnaud.pdf>.
- Lahme, E., Bruse, M. (2003). microclimatic effects of a small urban park in a densely build up area: meassurements and model simulations, ICU5, *Fifth international conference on urban climate*. Lodz : [s.n].
- Taha H, Bornstein, R. (1999). "Urbanization of meteorological models and implications on simulated heat islands and air quality". *Proc. Int. Conf. on Urban Climatology (ICB-ICUC '99)*, Sydney, Australia, Macquarie University, 431–435.
- Vieira, H. et Vasconcelos, J. (2003). Urban morphology characterization to include in a GIS for climatic purposes in Lisbon. Discussion of two different methods. *Proceeding*

Références bibliographiques.

5th Int Conf on Urban Climate, 2, 417–420.
<https://www.researchgate.net/publication/237255125>.

- Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142–149. doi:10.1016/j.proeng.2016.10.017.

Normes :

- ASHRAE Standard 55. (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Norme ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Switzerland: ISO.

Rapports :

- Adolphe L., Chatelet A., Maïzia M., Levy A., Casal A., Boussoulim A., & Ait-ameur K., (2002). SAGAcCités : Systèmes d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines, Rapport final. *MENRT*, Action Concertée Incitative Ville.
- Atelier parisien d'urbanisme, APUR, Ateliers Parisien d'Urbanisme – Cahier 1 : Les îlots de chaleur urbain à Paris, Décembre 2012.
- CNRM. Description de la couche limite atmosphérique, version numérique, 2010. *Centre National de Recherches météorologiques*. Disponible sous le lien <http://www.cnrn-game.fr> [Dernière visite le 11 janvier 2017].
- Gandemer J. & Guyot A. (1976), Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, *Ministère de l'Équipement*, Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme.
- Jojo, M. Nassopoulos, H. Colombert, M. (2015). *Projet Adaptatio : Simulations effectuées avec le logiciel ENVI-met sur le secteur de Tolbiac Chevaleret*.

Références bibliographiques.

- Masterson, J. M et Richardson, F. A. (1979). Humidex ; a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity, Downsview, Ont. : *Environment Canada, Atmospheric Environment*.
- Moulinié, C & Naudin-Adam, M. (2005). Appréhender la densité, note rapide sur l'occupation du sol n383.
- Musy, M, Molines, N, Pham, T, D, Siret, D & Groleau, D. (2006). Adequa: aménagement durable d'un quartier: élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel, *rapport final du CERMA*, Université de Nantes.
- Traisnel, J.P. (1986). Architecture, Climats, Energie. Outils et Démarches Pédagogiques. *Cahiers Scientifiques et Techniques Cofedes*.
- United States Environmental Protection Agency. (2008, octobre). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Consulté à l'adresse <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>, le 17/01/2017, p07.

Directions :

- Archives de l'APC de Tlemcen.
- Archives de la station météo Zenata: <https://fr.tutiempo.net/climat/2018/ws-605310.html>.
- Archives militaires de Vincennes.
- Archives militaires de Vincennes.
- Direction de la Culture – Tlemcen, Plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur du secteur sauvegardé de la vieille ville de Tlemcen.

Site web :

- <https://www.energieplus-lesite.be>.
- <https://fr.tutiempo.net/climat/2018/ws-605310.html>.

Annexes.

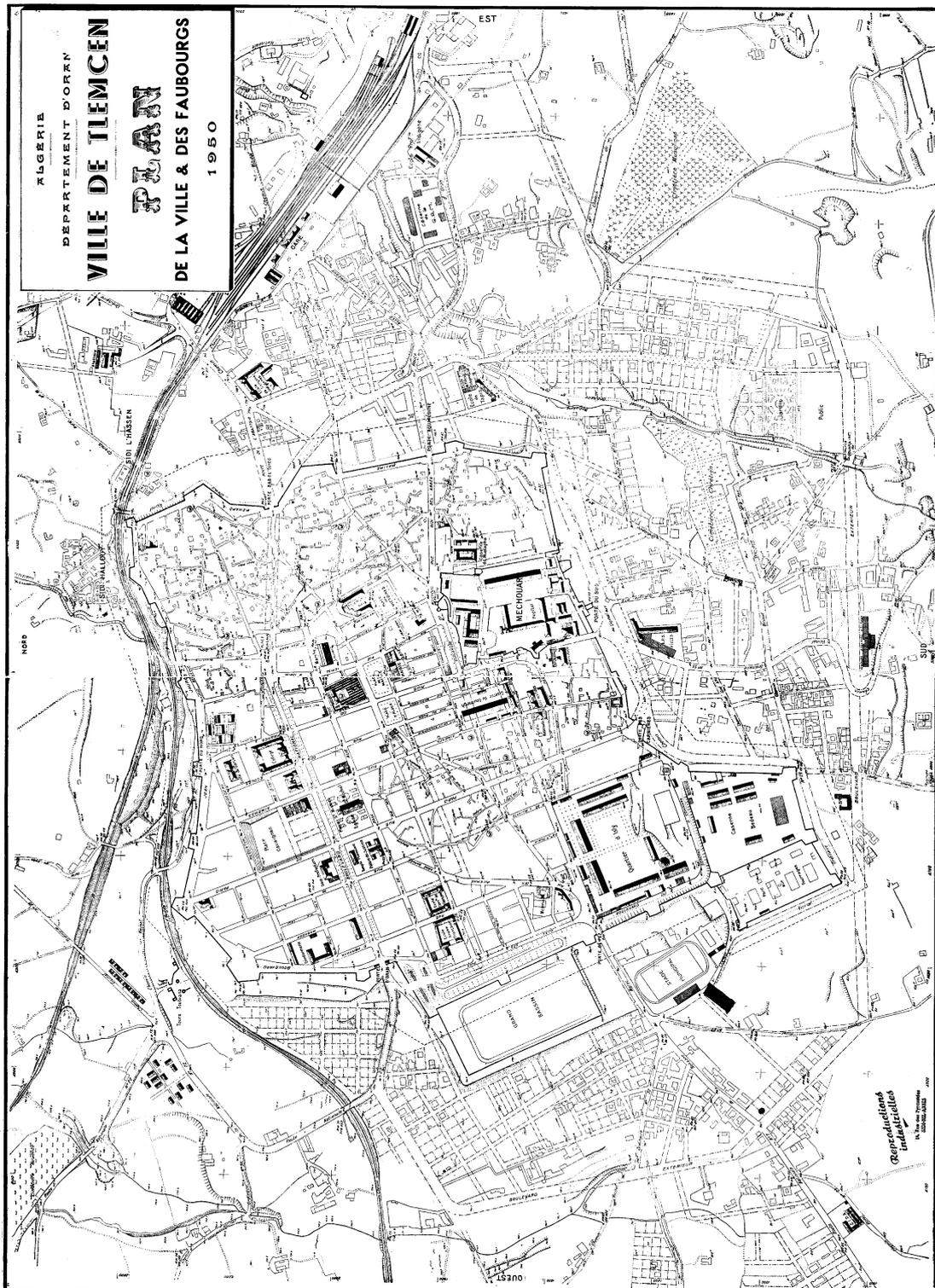
Annexe 2: Plan d'alignement de la ville de Tlemcen approuvé par arrêté du 9 Mai 1877.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.



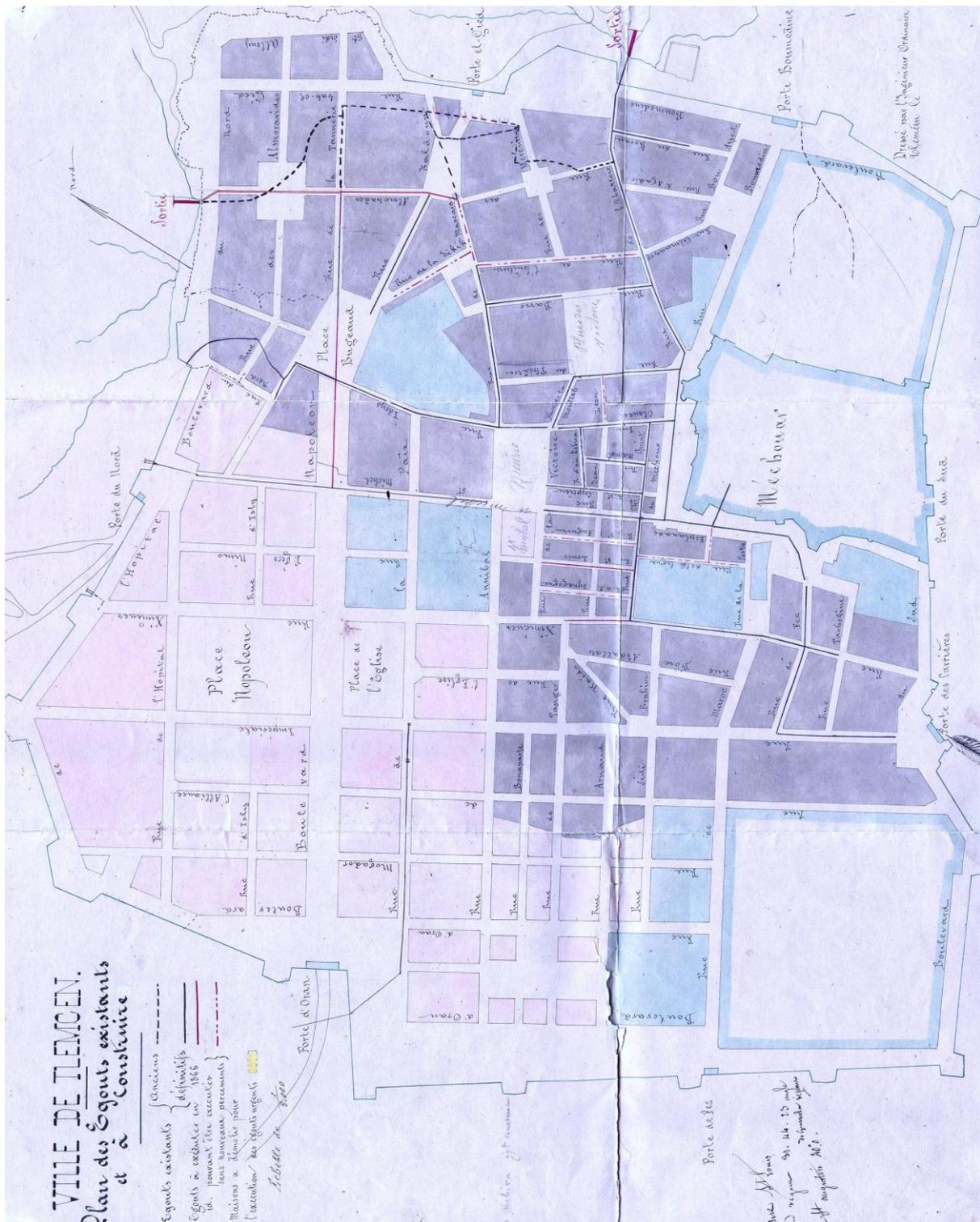
Annexe 3: Plan de la ville de Tlemcen et des faubourgs 1950.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.



Annexe 4: Plan des égouts existants et à construire de la ville de Tlemcen en 1866.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.



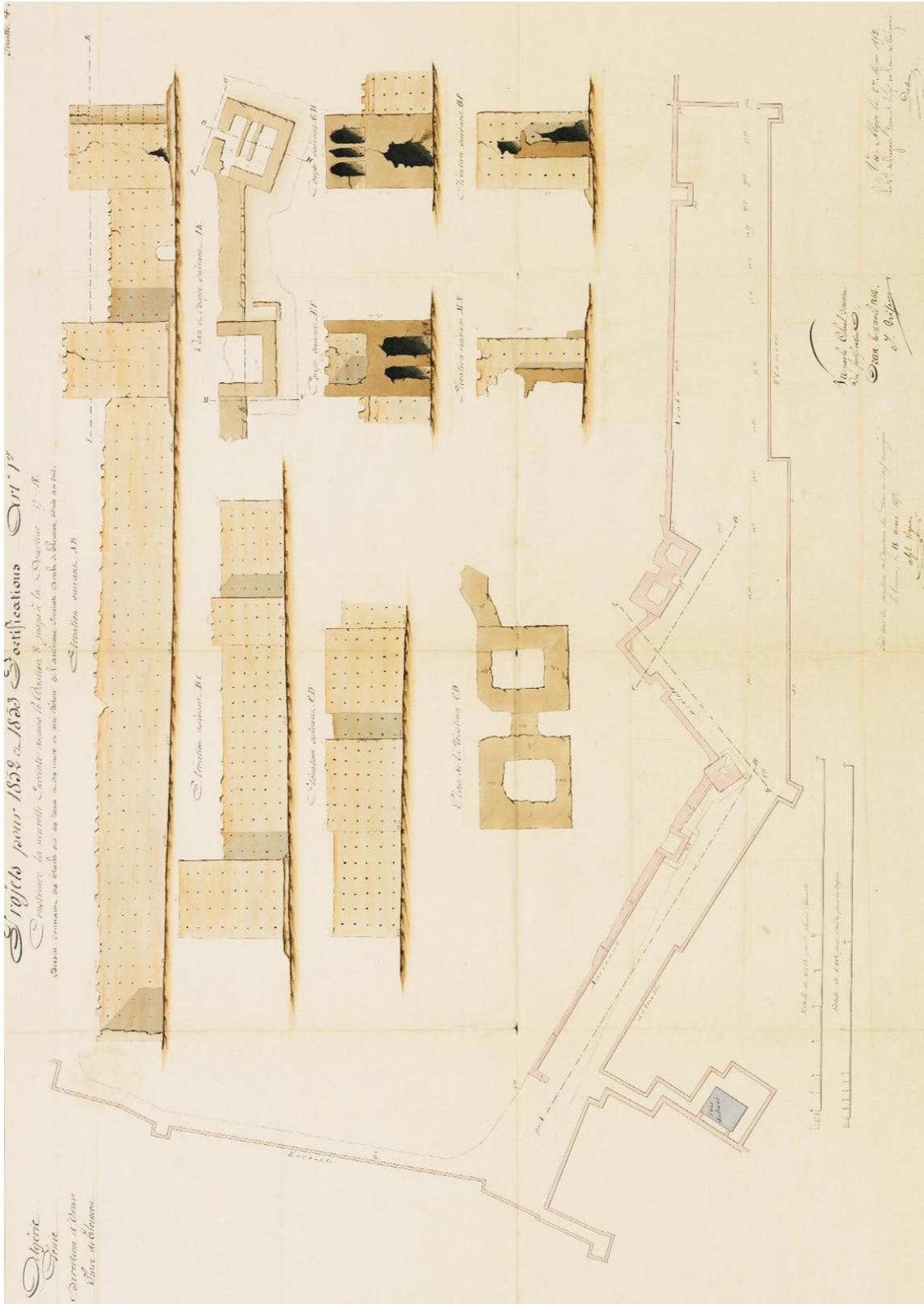
Annexe 5: Plan des percements au niveau du quartier de Bab el Hadid.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.



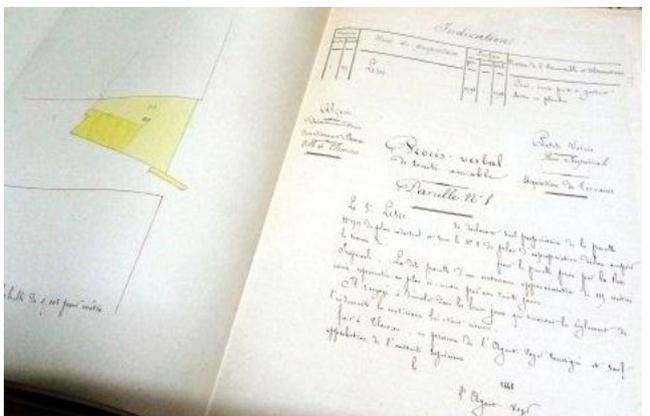
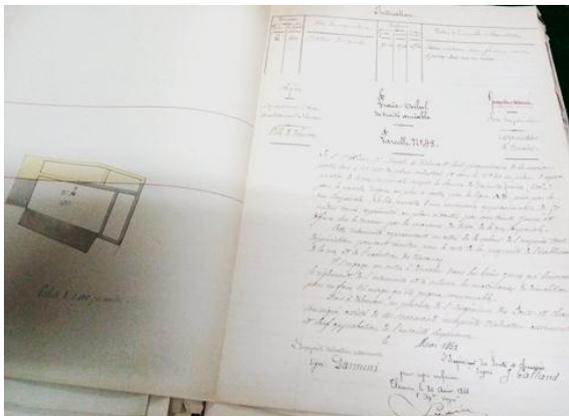
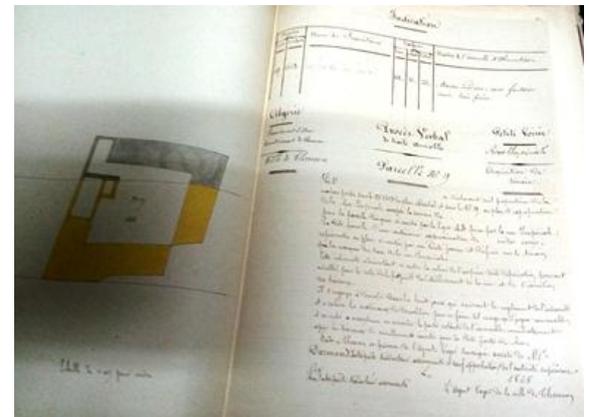
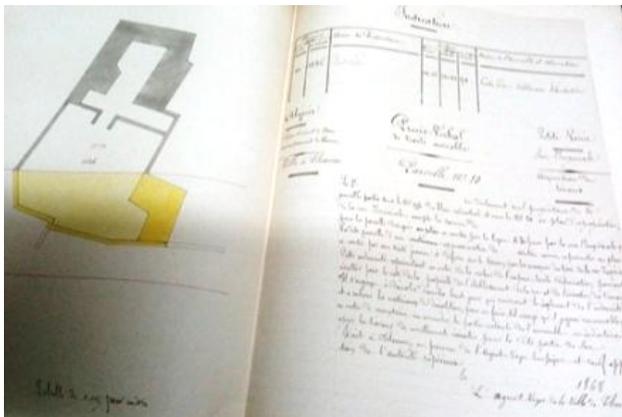
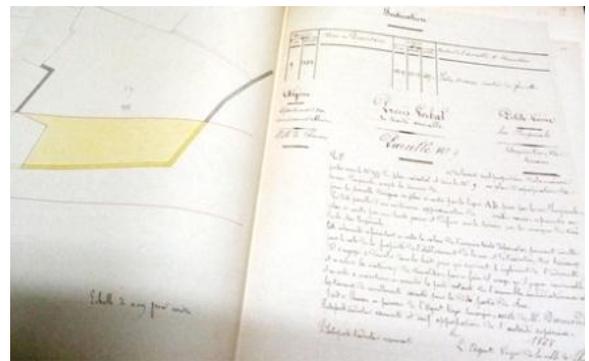
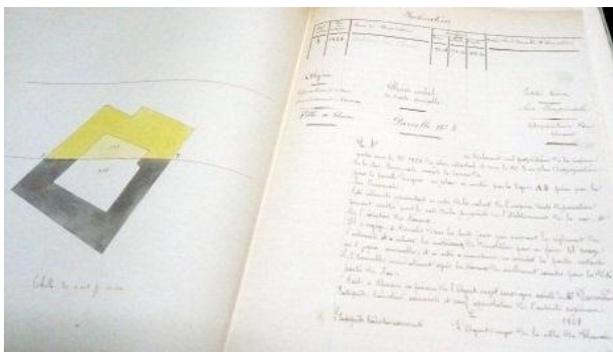
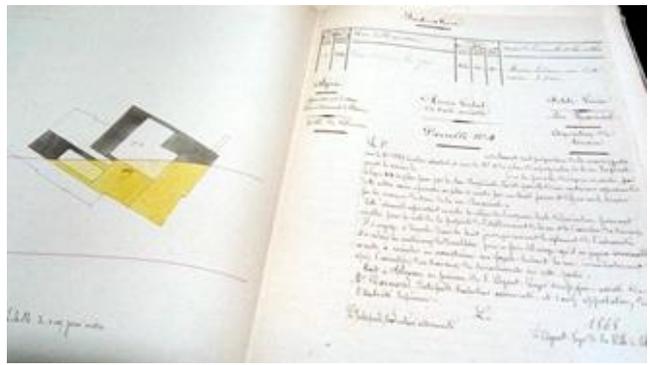
Annexe 6: Relevé d'une partie de l'enceinte médiévale Sud de Tlemcen.

Source : Agnès CHARPENTIER.



Annexe 8: Procès-verbal des Immeubles à exproprier effectuées au niveau de la rue de Paris.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.



Annexe 9 : Descriptif de la nature des travaux exécutés au niveau de la zone d'étude.

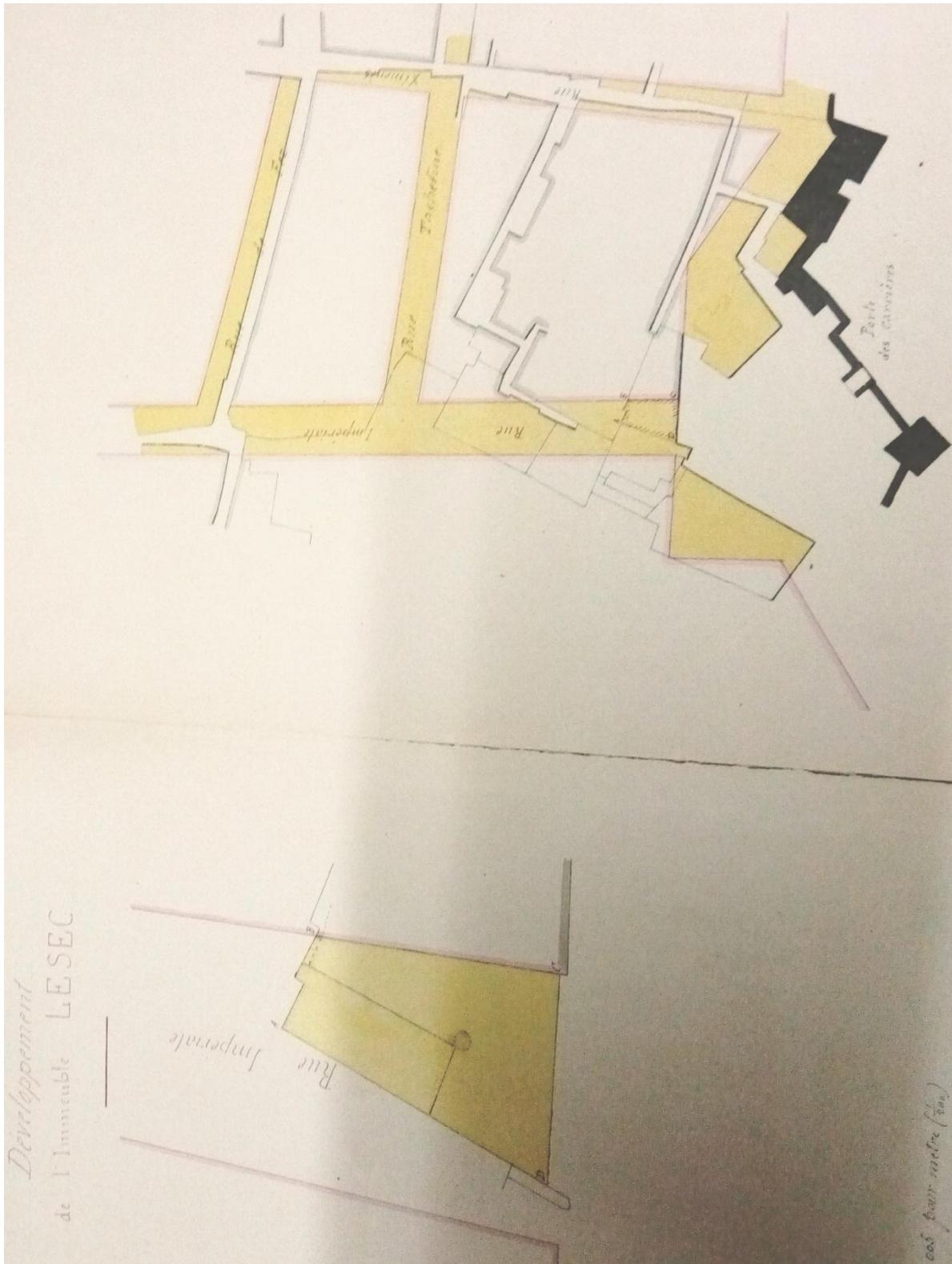
Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.

D. DÉPARTEMENT Oran 26/9
 COMMUNE Tlemcen
 VILLE DE TLEMCCEN
ELARGISSEMENT ET MODIFICATION DES PORTES DE LA VILLE.-
DEMOLITION DE LA PORTE DES CARRIERES.
MARCHÉ DE GRÉ A GRÉ
 passé en vertu de la délibération du Conseil municipal en date du 3 Octobre 1931, approuvée par Monsieur le Préfet le 5 Novembre 1931
 du 15 Septembre 1931
 M. SAUVIAT Raoul
 SOUMISSIONNAIRE
 ALGERIE
 5.60
 IMPÔT DU TIMBRE
 Je soussigné SAUVIAT Raoul, entrepreneur, demeurant à Tlemcen, faisant par les présentes élection de domicile à Tlemcen, me soumet et m'engage envers la commune de Tlemcen, à exécuter, aux conditions ci-après, les travaux dont le détail suit, ayant pour objet : **La démolition de la porte des carrières et travaux divers.**

Numéros des prix	BORDEREAU DES PRIX ET DÉTAIL ESTIMATIF DESIGNATION DES QUANTITÉS	QUANTITÉS	PRIX de l'unité	PRODUITS	
				Partiels	Totaux
1	Démolition de la porte des carrières	I	P.F.		8000.
2	Bordure de trottoir en calcaire dur	300ml	14.		4200.
3	Pavés pour caniveaux de 0.50 de largeur en calcaire dur.....	300ml	8.		2400.
4	Piliers en pierre de taille.....	2	2000.		4000.
5	Pavés pour caniveaux de 0.50 de longueur en calcaire dur droites	6	50.		300.
		6	60.		360.
6	Démolition de maçonnerie de moëllons calcaire dur.....	60m3	13.		780.
7	Maçonnerie de moëllons de calcaire	30m3	105.		3150.
8	Pose de bordures de trottoirs et caniveaux pavés a) sur forme de sable de 0.15 de hauteur	200ml	15.		3000.
		100ml	23.		2300.
Total					28490.

Annexe 10: Plan du projet d'ouverture des rues à Bab El Hadid 1868.

Source : Les archives de l'APC de Tlemcen.

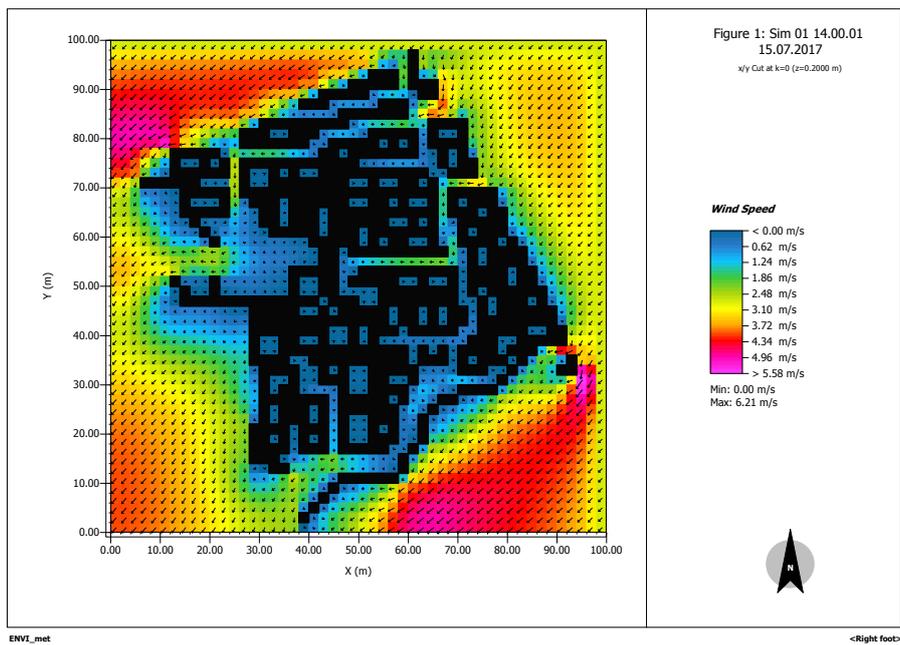
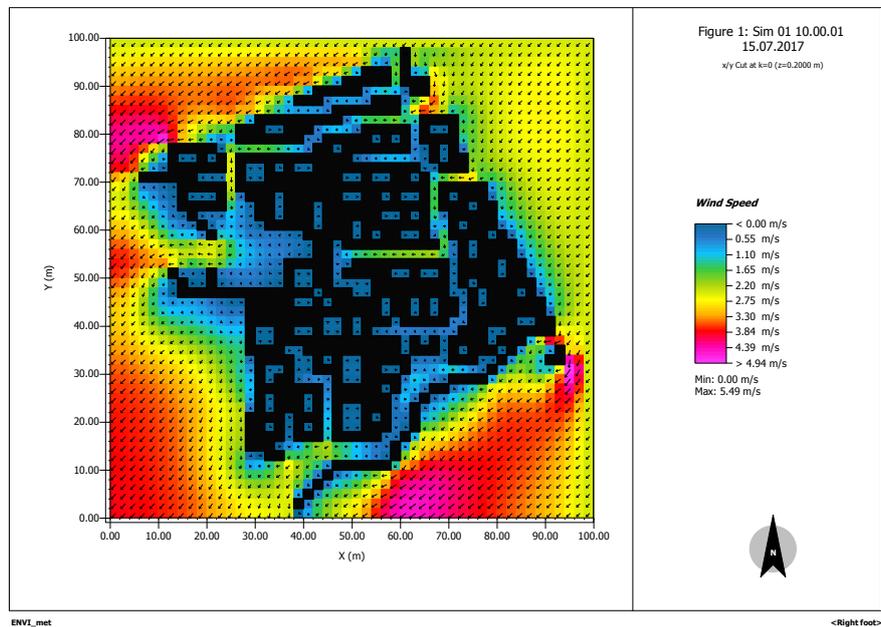


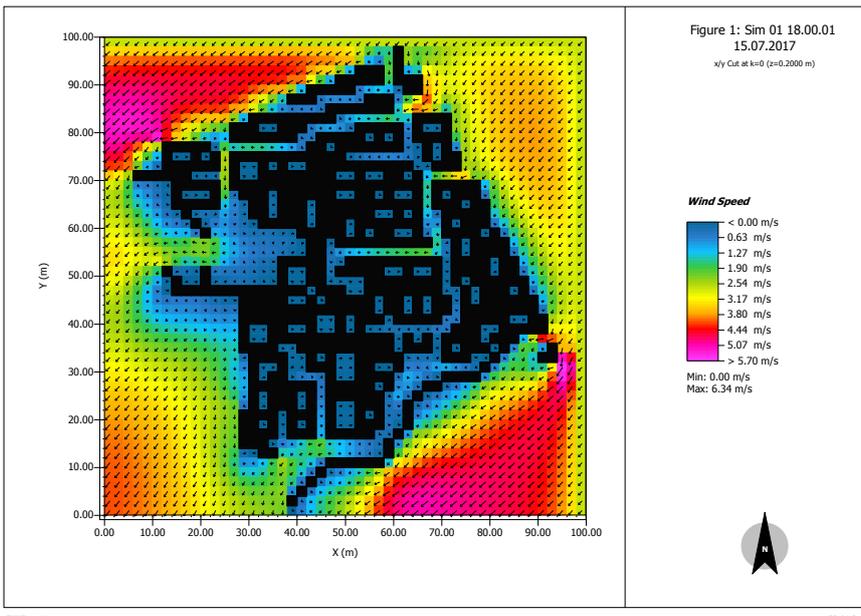
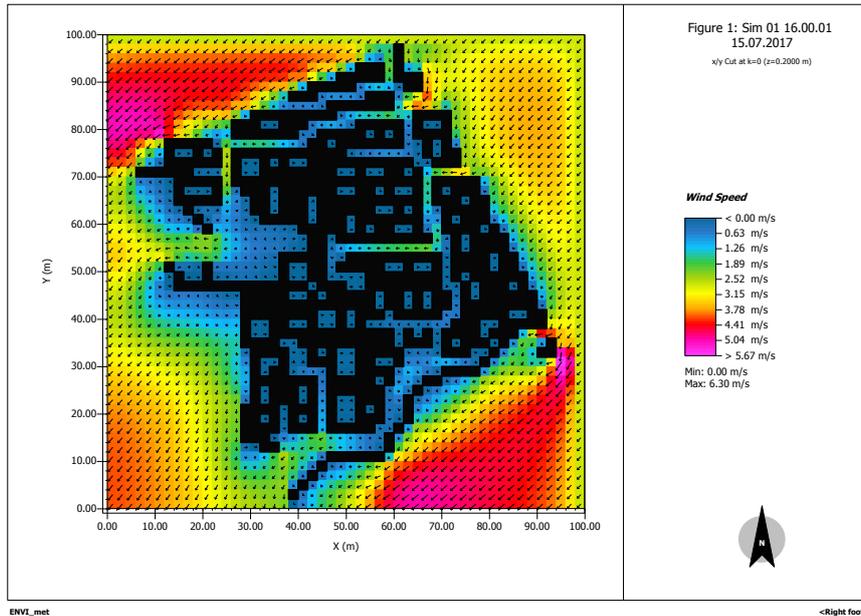
Annexe 11: Les données météorologiques d'entrée pour les simulations.

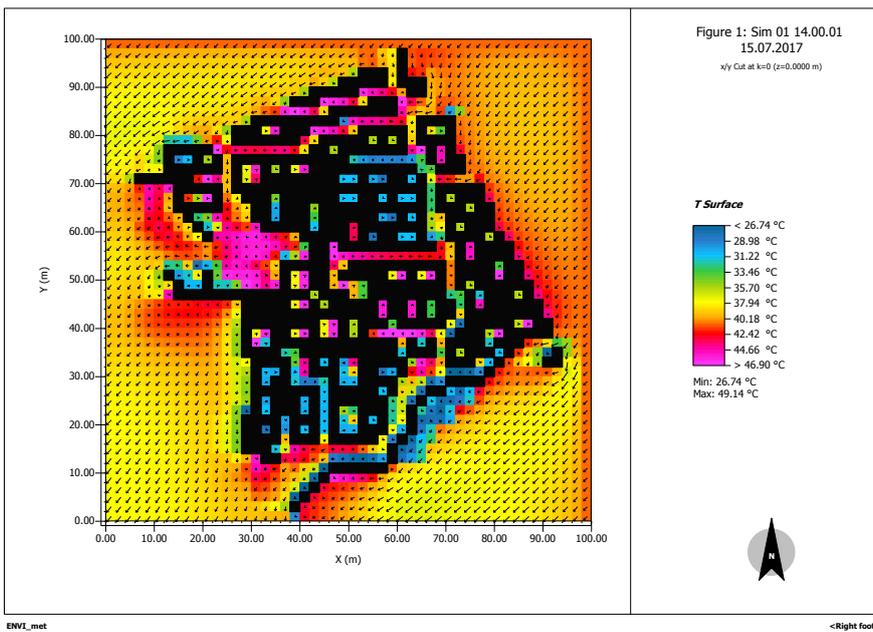
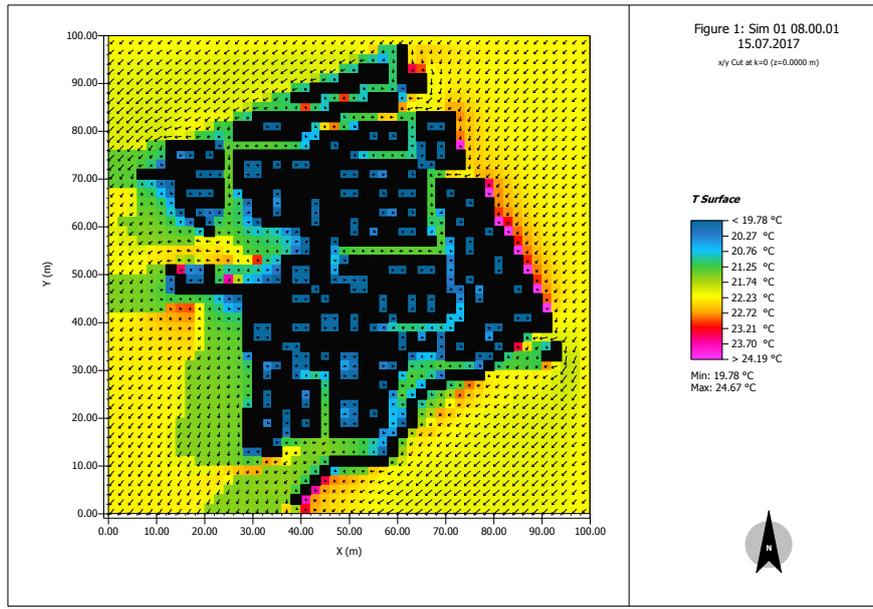
Source : Archives météo Zenata.

Heure	Température de l'air (°C)	Humidité relative
0:00	23	94
1:00	23	94
2:00	23	94
3:00	24	89
4:00	24	89
5:00	24	89
6:00	23	94
7:00	23	89
8:00	24	83
9:00	25	74
10:00	29	62
11:00	30	55
12:00	32	49
13:00	33	46
14:00	32	49
15:00	31	52
16:00	30	55
17:00	30	59
18:00	29	62
19:00	28	62
20:00	26	70
21 :00	24	83
22 :00	24	83
23 :00	23	89

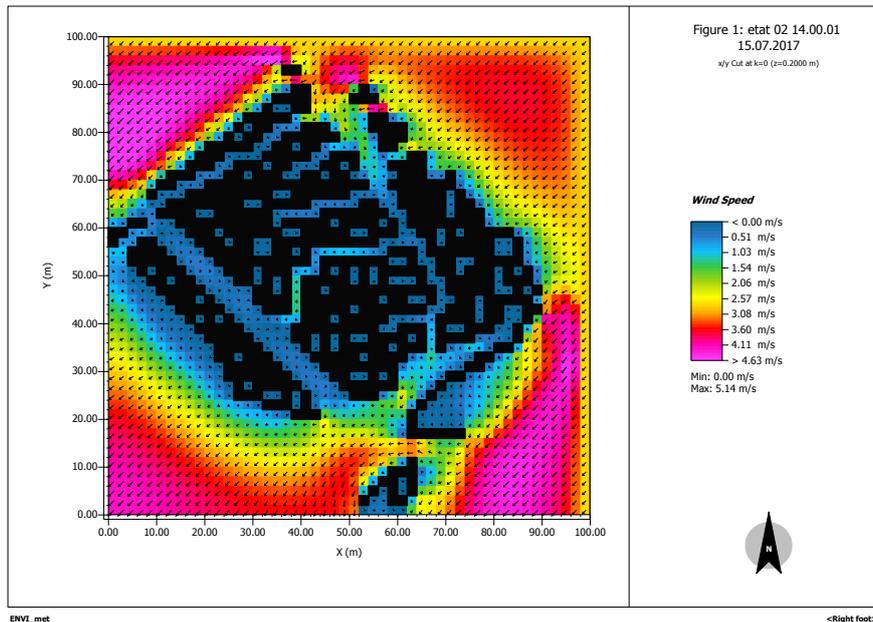
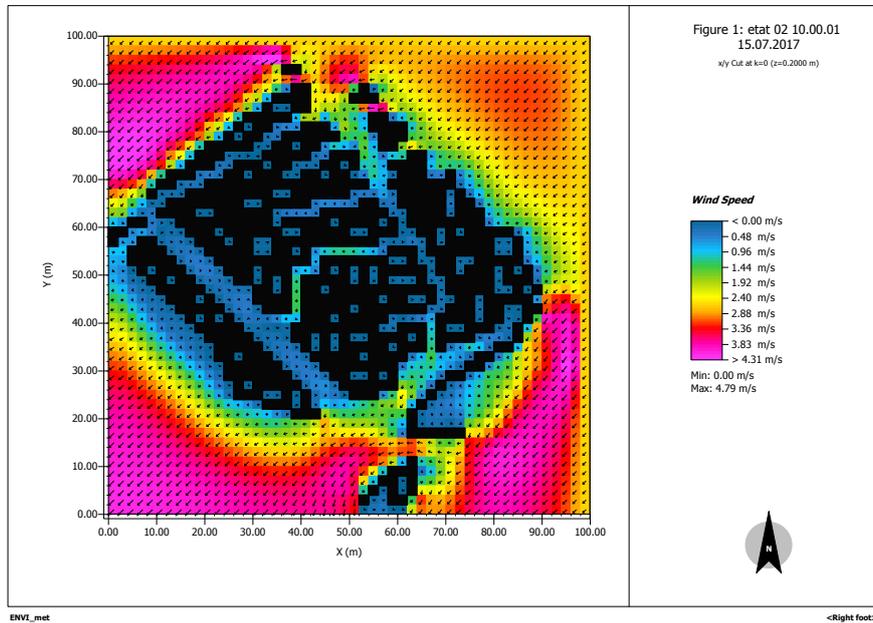
Annexe 12: Vitesse de l'air et température de surface pendant l'été 2017 de la configuration urbaine 1.

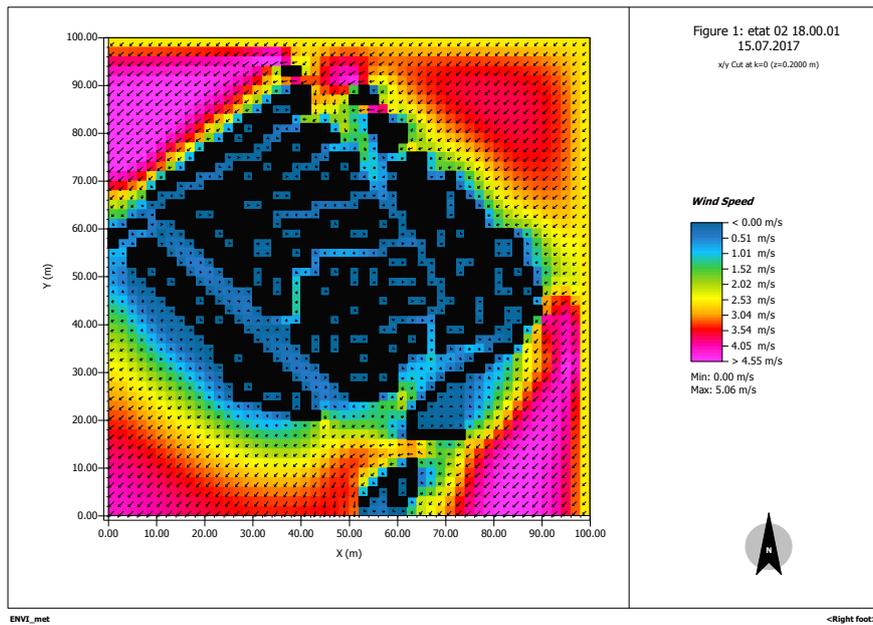
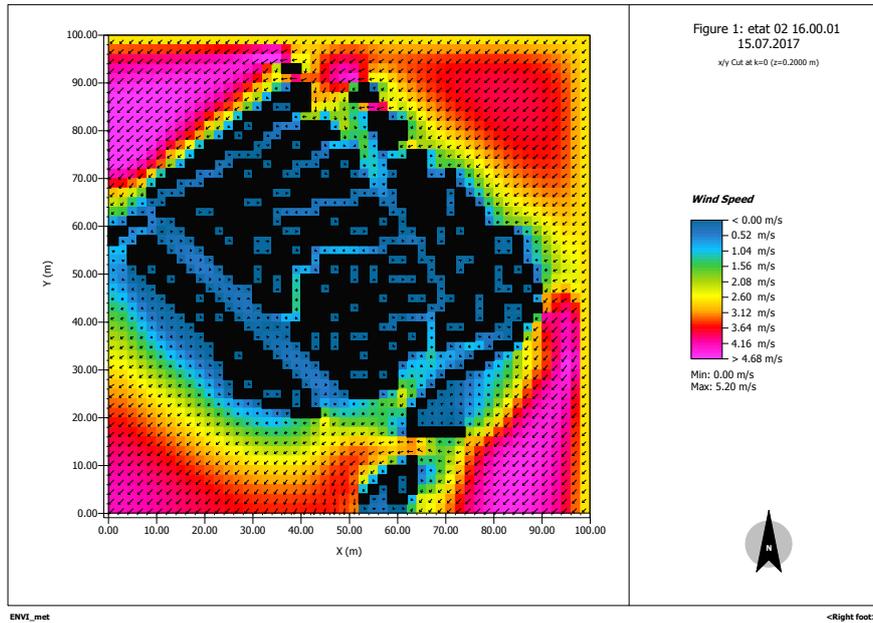


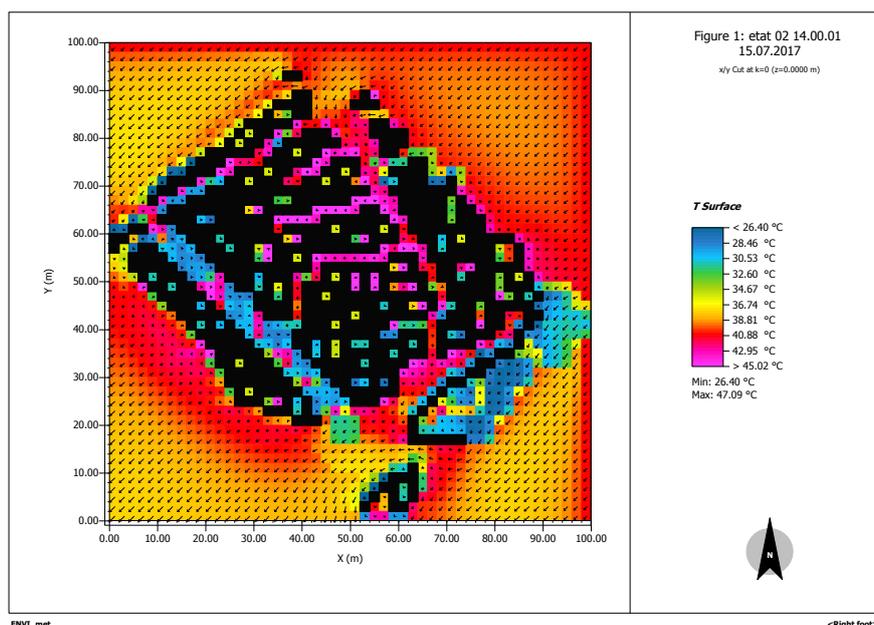
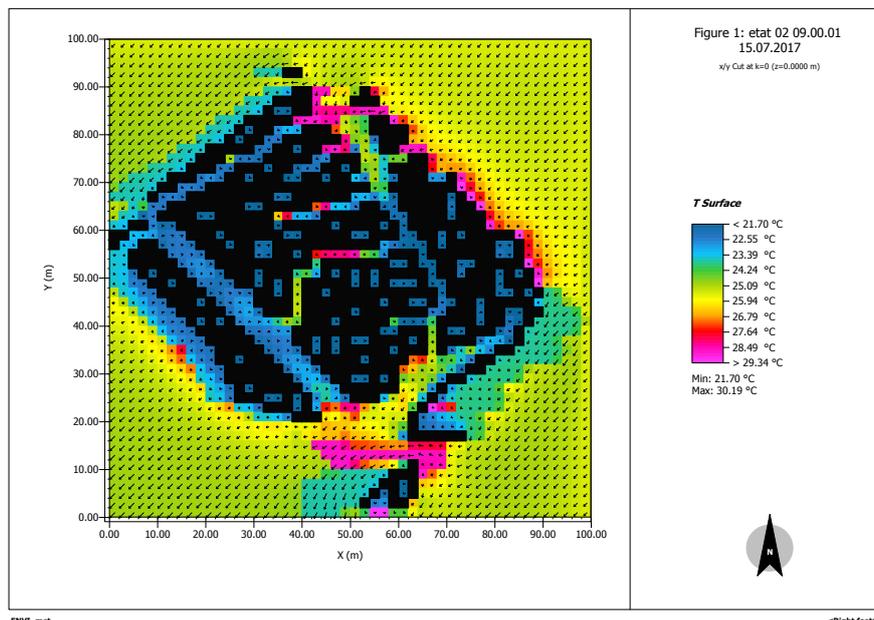




Annexe 13: Vitesse de l'air et température de surface pendant l'été 2017 de la configuration urbaine 2.







Annexe 14 : Vitesse de l'air et température de surface pendant l'été 2017 de la configuration urbaine 3.

