

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB BLIDA 1
INSTITUT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

DÉPARTEMENT HABITAT

MÉMOIRE DE MASTER 2
ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

**Les toitures végétalisées pour lutter contre
les ilots de chaleur urbain**

Cas d'étude : l'hôpital Mustapha Pacha, Alger

Réalisé par :

OULD AMRI Ibtissem

Encadré par :

Dr. LAMRAOUI Samia

2018/2019

Remerciements

Louange à Allah pour m'avoir donné force et courage afin de mener à bout ce travail.

J'exprime ma plus sincère gratitude à Dr. LAMRAOUI. S, mon encadreur, pour ses précieuses orientations à l'aboutissement de ce mémoire.

J'exprime mon entière gratitude à mes parents et mes frères, pour leur soutien durant tout mon cursus.

Je remercie mes très chers amis : Imane, kader, Simsim, Asma, Fanta, Lamini et Aissam pour leur aide et leur soutien.

Je remercie mes collègues de travail Med Bakir et Med Benelbar pour leur encouragement et leur compréhension.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Merci à vous tous et toutes

Résumé

Cette étude, élaborée dans le cadre d'un Master2 en Architecture Bioclimatique, s'inscrit dans le domaine de l'environnement climatique et du développement durable. Notre intérêt porte sur la relation entre le climat et la ville. En effet, les villes sont souvent citées dans les recherches qui traitent du réchauffement climatique urbain. Ces recherches établissent un rapport entre leurs morphologies urbaines et la formation de l'îlot de chaleur urbain (ICU) notamment le faible ratio des surfaces végétales comparé aux surfaces minérales. Mais comment le végétal peut-il lutter à ces phénomènes climatiques ? Comment peut-il être utilisé pour réduire de l'intensité des ICU ? Quel type de végétation doit-il être choisi ?

La végétation des toitures constitue une des réponses à ce phénomène. Voilà pourquoi nous en avons fait l'objet de notre étude. Nous pensons qu'elle améliore le climat urbain, participe à la régulation des températures, et constitue ainsi une stratégie bioclimatique adéquate pour parer à l'ICU.

L'objectif de notre recherche est double : d'abord pédagogique, vise l'acquisition d'une méthodologie de recherche. Et scientifique, il permet d'une part, d'examiner l'ICU et identifier les stratégies de son amélioration, et d'autre part, d'évaluer le rôle de la végétation notamment sur les toitures des bâtiments dans le rafraîchissement du microclimat urbain et de le valider par la simulation numérique.

Nous avons inscrit cette étude dans une série d'articles qui traitent de l'îlot de chaleur urbain à Alger. Elle est en continuité des perspectives émises par ces recherches notamment en ce qui concerne l'approche par la simulation numérique.

Les résultats de la simulation ont montré que les toitures végétalisées permettent un rafraîchissement actif de l'air ce qui contribue à atténuer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

Mots clés : changement climatique, microclimat urbain, îlot de chaleurs urbain (ICU), toitures végétalisées, ENVI-Met, simulatio, Alger.

هذه الدراسة، التي أعدت في إطار الماستر 2 ، تندمج ضمن الدراسات التي تبحث في البيئة المناخية والتنمية المستدامة. و من خلالها نركز اهتمامنا على العلاقة بين المناخ و المدينة. ذلك لان الكثير من الباحثين يذكر تأثير المدن على الاحترار العالمي الحضري

هذه البحوث تشير الى وجود علاقة بين المورفولوجيا الحضرية وتكوين جزيرة الحرارة الحضرية ، بما في ذلك النسبة المنخفضة للأسطح النباتية مقارنة بالأسطح المعدنية . ولكن كيف يمكن للنبات مكافحة هذه الظواهر المناخية ؟ كيف يمكن استخدام هذه النباتات للحد من شدة الجزر الحرارية الحضرية ؟ ما هو نوع الغطاء النباتي الذي ينبغي اختياره للقيام بذلك؟

لهذا ركزنا اهتمامنا في هذا البحث على الأسطح الخضراء. نعتقد انها تحسن المناخ الحضري ، وتساهم في تنظيم درجة الحرارة، وبالتالي تشكل استراتيجية كافية لمواجهة جزيرة الحرارة الحضرية

هدفنا من هذا البحث مزدوج: تربوي وعلمي . يتجلى الاول في الحصول على منهجية البحث العلمي والثاني في التقريب عن المعلومات و دراستها خاصة المتعلقة بجزيرة الحرارة الحضرية وتحديد استراتيجيات لتحسينه ، تقييم دور الغطاء النباتي خاصة على أسطح المباني في تبريد المناخ وكذا التحقق من صحة ذلك من خلال المحاكاة الرقمية

هذا البحث يعد مكمل لسلسلة بحوث علمية تناولت جزيرة الحرارة الحضرية في الجزائر العاصمة، ولا سيما فيما يتعلق بالسطح الخضراء والمحاكاة الرقمية

أظهرت نتائج بحثنا ان الأسطح النباتية تسمح بالتبريد للهواء وبالتالي تتقليل من حدة الجزيرة الحرارية الحضرية

الكلمات الرئيسية: تغير المناخ، المناخ الحضري ، جزيرة الحرارة الحضرية ، الأسطح الخضراء المحاكاة الرقمية،الجزائر

Abstract

This study, developed as part of a Master2 in Bioclimatic Architecture, is part of the field of climate environment and sustainable development. Our interest is focused on the relationship between climate and the city. Indeed, cities are often cited in researches that deal with urban global warming. This research establishes a relationship between their urban morphologies and the formation of the urban heat island (UHI), including the low ratio of plant surfaces compared to mineral surfaces. But how can the plant combat these climatic phenomena? How can the plant be used to reduce UHI intensity? What type of vegetation should be chosen? For this reason, we focus our interest on green roofs. We believe that they improve the urban climate, contribute to temperature regulation, and thus constitute an adequate bioclimatic strategy to counter the UHI.

The objective of our research is twofold: first of all pedagogical, aims at the acquisition of a research methodology. And scientific, it allows, on the one hand, examining the UHI and identifying strategies for its improvement, on the other hand, to evaluate the role of vegetation especially on the roofs of buildings in the refreshment of the urban microclimate and to validate it digital simulation.

We have included this study in a series of articles dealing with the urban heat island in Algiers. It is in continuity with the perspectives expressed by this research, particularly with regard to the digital simulation approach.

The results of the simulation showed that the vegetated roofs allow an active cooling of the air and thus attenuation of the urban heat island by the effect of the shade they offer and by the evapotranspiration process.

Keywords: climate change, urban microclimate, Urban Heat Island, vegetated roofs, ENVI-Met, simulation, Algiers

Tables des matières

Remerciements	I
Résumé	II
ملخص	III
Abstract	V
Tables des matières	V
Introduction générale	1
Chapitre 1 Etat des connaissances	5
1.1 Le microclimat urbain :.....	6
1.1.1 Les paramètres du microclimat	6
1.1.2 Les paramètres morphologiques :	8
1.1.3 Les paramètres surfaciques :	9
1.1.4 Les paramètres énergétiques :	11
1.2 L'îlot de chaleur urbain, ICU :.....	12
1.2.1 Définition du phénomène îlot de chaleur urbain, ICU	13
1.2.2 Les types d'îlot de chaleur urbain (ICU) :.....	14
1.2.3 Facteurs aggravants d'ICU :.....	14
1.2.4 L'impact du l'ICU.....	17
1.2.5 Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains :	19
1.3 Concept de végétalisation des toits :.....	22
1.3.1 Définition d'une toiture végétalisée :.....	23
1.3.2 Composants type d'une toiture végétalisée :.....	23
1.3.3 Différents procédés de végétalisation des toits :	25
1.3.4 Le choix des végétaux :.....	26
1.3.5 Avantage et inconvénients :	28
1.3.6 Les atouts des toitures végétalisées :.....	29
1.3.7 Récentes avancés des toits verts :.....	33
1.3.6 exemples d'emploi des toitures vertes dansd le monde :	33
1.4 La simulation informatique :.....	37
1.4.1 Les Modèles de simulation climatiques :	38
Chapitre 2 Cas d'étude et méthodologie	35
2.1 Présentation de la ville d'Alger :.....	40
2.1.1 Les paramètres microclimatique de la ville d'Alger :	41
2.1.2 Les paramètres morphologiques :	44

2.1.3	Les paramètres surfaciques :	46
2.1.4	Paramètres énergétiques :	48
2.2	Présentation du cas d'étude :	48
2.2.1	Aperçu historique :	49
2.2.2	Caractéristiques du site d'étude :	50
2.3	Présentation du logiciel Envi-Met :	53
2.3.1	Avantages de logiciel Envi-Met :	54
2.3.2	Limites du logiciel ENVI_MET 4.4.3.....	55
2.3.3	Description du logiciel :	55
Chapitre 3 Évaluation des toitures végétalisées dans la lutte des ilots de chaleur urbain.....		58
3.1	Création du modèle à simuler :	59
3.1.1	Insertion des paramètres dans l'interface de logiciel :	59
3.2	Exécution de la simulation :	64
3.2.1	Les paramètres prise en considération pour la simulation :	64
3.2.2	Visualisation des résultats à l'aide de LEONARDO :	66
3.3	Résultats et discussion :	67
3.3.1	Ilot de chaleur à l'hôpital Mustapha :	67
3.3.2	Etude comparative :	68
Conclusion :		70
Conclusion générale :		75
Bibliographie :		78
Annexe:		81

Liste des figures :

Figure 1 : Bilan radiatif au-dessus d'une ville,.....	6
Figure 2 : Les profils urbains,.....	8
Figure 3 : Albédo dans un environnement urbain.....	10
Figure 4 : Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain.....	11
Figure 5 : profile de l'îlot de chaleur urbain.....	13
Figure 6 : Les types d'îlot de chaleur urbain,	14
Figure 7 : Principaux facteurs et différentes échelles influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain	15
Figure 8 : Illustration du piégeage radiatif.....	16
Figure 9 : Boucle d'amplification des îlots de chaleur urbains,	19
Figure 10 : aire de stationnement végétalisé.....	21
Figure 11 : Le Quai Branly (Paris). 2006	21
Figure 12 : un toit vet.....	21
Figure 13 : les principales composantes d'une toiture végétalisée.....	23
Figure 14 : Sédums sur un toit extensif	26
Figure 15 : plante vivace sur un toit jardin	
Figure 16 : différents type de plante vivaces	27
Figure 17 : fétuques bleus.....	27
Figure 18 : comportement d'un végétale face au phénomène d'évapotranspiration	29
Figure 19 : phénomène d'absorption du CO2 par la végétation	30
Figure 20 : phénomène d'absorption des poussières par la végétation.....	30
Figure 21 : Rôle de rétention des eaux des toitures végétalisées.....	31
Figure 22 : Phénomène d'isolation thermique par la végétation.....	32
Figure 23 : carte de la ville d'Alger	41
Figure 24: plan topographique de la ville d'Alger	44
Figure 25 : Profil d'Alger actuellement	44
Figure 26 : Alger après la colonisation.	
Figure 27 ; vue sur la ville d'Alger.....	45
Figure 28 : Albédo dans la ville d'Alger	46
Figure 29 : Les principaux espaces verts Algérois	47
Figure 30 : Vue sur la baie d'Alger	47
Figure 31 : Plan de situation de l'hôpital Mustapha Bacha à Alger.....	48
Figure 32 : Carte de l'Hôpital CHU Mustapha Bacha,.....	49
Figure 33 : schéma de l'hôpital Mustapha.....	49

Figure 34 : carte des gabarits	50
Figure 35 : Allée principale de l'hôpital Mustapha montre l'important flux mécanique et piéton.	51
Figure 36 : Végétation au niveau de l'axe principale de l'hôpital.....	52
Figure 37 : Photo aérienne qui montre la présence de la végétation au niveau de l'hôpital Mustapha Pacha	52
Figure 38 : Végétation au niveau de l'axe principale de l'hôpital.....	52
Figure 39 : l'entrée mécanique à l'hôpital Mustapha pacha.....	53
Figure 40 : Les interactions calculées par Envi-met,.....	54
Figure 41: Schéma de base des entrées et des sorties du logiciel	56
Figure 42 : Menu, ENVI-met V4.4, 2 Source : Auteur(2019).....	59
Figure 43 : localisation de la zone d'étude	60
Figure 44: la géométrie du modèle	60
Figure 45 : Paramètre des matériaux	60
Figure 46 : Editeur du bâti ; Mustapha pacha	61
Figure 47 : Editeur de végétation, Mustapha Pacha	61
Figure 48 : Editeur des sols, Mustapha Pacha	62
Figure 49 : Emplacement des récepteurs	62
Figure 50 : Date et durée de la simulation	
Figure 51 : Adresse des fichiers d'entrées/ sorties	63
Figure 52 : Les paramètres météorologiques relatifs.....	63
Figure 53 : Les paramètres météorologiques relatifs	
Figure 54 : Résumé de fichier de configuration de l'hôpital Mustapha	63
Figure 55 : Exécution de la simulation	64
Figure 56 : fenêtre de modification.....	65
Figure 57 : Illustration schématique du processus d'extraction et traitement des données des simulations.....	66
Figure 58 : 3D de l'hôpital Mustapha Pacha avec des toitures minérales	68
Figure 59 : 3D de l'hôpital Mustapha Pacha avec des toitures végétalisées	68
Figure 60 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 06h et 10h.....	69
Figure 61 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 12h et 16h.....	70
Figure 62 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 18h et 22h.....	71
Figure 63 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 00h et 04h.....	72

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Comparaison entre les 3 procédés de végétation	26
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des toitures végétales extensives et intensives	28
Tableau 3 : Liste des projets évalués.....	36
Tableau 4: principale habitats du tissu urbain d'Alger.....	45
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des principaux matériaux avec leurs albédos et émissivité correspondants.....	46
Tableau 6 : Les valeurs d'albédo	65

Liste des graphes :

Graphe 1 : variation de la température de la ville d'Alger	42
Graphe 2 : variation de la précipitation	42
Graphe 3 : variation du rayonnement	43
Graphe 4 : variation de l'ensoleillement.....	43
Graphe 5 : variation de température simulé, mesuré et celle de l'ONM.	67
Graphe 6 : variation des températures des deux simulations.....	73

Introduction générale

Introduction

Depuis une centaine d'années, le climat change sur notre planète. La plupart de ces changements sont dus aux activités humaines sur l'environnement. Ces changements sont liés principalement aux émissions de gaz à effet de serre (GES), à la densité des infrastructures et au couvert végétal limité. Leurs conséquences sont néfastes sur les écosystèmes, l'économie, les populations, leur santé et leur confort.

L'homme a toujours privilégié la vie en ville grâce à la proximité des services, la disponibilité des postes de travail, la densité des réseaux de transport et tous les autres avantages qu'on peut y trouver, par conséquent, « la population urbaine a dépassé en nombre la population rurale et à l'horizon 2030 elle devrait atteindre cinq milliards d'individus pour huit milliards d'habitants sur la planète » (ONU,2011).

Le souhait de vivre dans un milieu urbain a poussé l'homme aux cours des siècles vers la création de nouvelles villes et l'extension de celles qui existaient déjà. Mais aujourd'hui l'homme est dépassé par ce souhait. L'exode rural et le surpeuplement sont des facteurs parmi d'autres qui ont provoqué une croissance urbaine démesurée, qui a non seulement engendré une crise urbaine, mais aussi une crise environnementale. Ce dernier est d'actualité notamment avec l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Celui-ci se caractérise par des températures estivales plus élevées en milieux urbains que dans les zones rurales environnantes. Selon les observations, cette différence de température, principalement attribuable au cadre bâti urbain, varie entre 2 et 12°C et s'avère particulièrement menaçante pour la population urbaine (DRBEO, 2009). Il dû principalement au manque du couvert végétal, à la morphologie urbaine, aux émissions des gaz à effet de serre et au comportement des matériaux.

Ce phénomène a été observé dès 1820 par Luke Howard sur la ville de Londres. Mais c'est à partir de la canicule de 2003 en Europe, qui a provoqué plus de 1« 1500 morts », que la société mondiale a pris conscience de la gravité de la situation. «Certains villes comme Paris et Chicago l'ont comprises à la suite des épisodes de canicule qui se sont avérées hautement mortelles » (Besancenot, 2005)

Pour cela, repenser les orientations urbanistiques et architecturales est devenu une nécessité. Il paraît, en effet, indispensable de les établir en rapport avec l'environnement notamment climatique.

¹ D'après une recherche fait au Centre national de recherche météorologique France en 2013 (CNRM)

Plusieurs chercheurs ont soulevé la problématique d'îlot de chaleur urbain dans leurs travaux (Munck, 2013 ; Achour-Bouakkaz, 2006 ; Laconte, 2015 ; Colombert, 2008), pour comprendre les causes de ce phénomène et lutter contre son apparition.

Afin d'atténuer le phénomène des îlots de chaleur urbain, plusieurs mesures d'aménagement urbain ont été prouvées par les chercheurs. Il s'agit principalement de :

- la végétalisation ;
- infrastructures urbaines (architecture et aménagement du territoire).
- la gestion des eaux pluviales et de perméabilité du sol.
- la réduction de la chaleur anthropique.

Dans le cadre de notre travail, notre intérêt a porté sur l'effet de la végétalisation sur l'îlot de chaleur urbain.

Problématique de la recherche :

À l'heure actuelle, les préoccupations des architectes et urbanistes se dirigent de plus en plus vers les questions environnementales.

L'urbanisation engendre, par l'imperméabilisation des surfaces et la présence de bâtiments, une modification locale du climat et, plus spécifiquement, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce phénomène se traduit par l'augmentation de la température en ville. Lors des vagues de chaleur ce phénomène peut causer un inconfort. Dans le contexte du changement climatique et d'une dynamique démographique importante,

Des impacts négatifs sur la santé, sur la qualité des milieux de vie, sur l'augmentation des besoins énergétiques sont aggravés par la présence des ICU.

Selon Wilmers (1988) « les deux aspects négatifs du climat urbain sont l'îlot de chaleur urbain et la pollution de l'air. Ils peuvent tous deux être corrigés par les espaces végétalisés ».

Les végétaux agissent comme un climatiseur passif. Ils consomment de la chaleur et rejettent de la vapeur d'eau, qui permet de rafraîchir l'air ambiant.

Alger est caractérisé par milieu urbain dense, où il n'est pas toujours possible de planter des arbres ou de verdir les rues, à cause de la forte densification des zones urbaines, cela va donner un espace plus réduit aux moyens de rafraîchissement naturel au niveau de la ville.

C'est pourquoi, il serait nécessaire de trouver des solutions d'aménagement plus efficace au moyen de végétation afin de les intégrer dans les zones urbaines et plus précisément dans la ville d'Alger.

Cette réflexion nous a conduits de poser certaines questions :

Comment apparait l'îlot de chaleur urbain ? A quel moment de la journée son impact est considérable ?

De quelle manière, la végétation contribue-t-elle à lutter contre l'apparition de l'ICU ?

Plus précisément :

Les toitures végétalisées, peuvent-elles présenter une solution pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain ?

Les hypothèses de la recherche :

Afin de répondre à notre problématique, nous exprimerons les hypothèses suivantes :

- L'îlot de chaleur urbain apparaît par le remplacement des sols végétalisés et perméables par des bâtiments et des revêtements imperméables qui stockent la chaleur dans les matériaux la journée et la restitue la nuit. Et, est renforcé par les activités humaines génératrices de chaleur.
- La végétation peut agir dans la lutte contre l'îlot de chaleur urbain. Elle permet de stabiliser la température de l'air par la rétention de l'eau dans les feuilles, par l'évapotranspiration de l'eau à leur surface et par l'effet d'ombrage.
- La végétalisation des toitures contribue à l'atténuation de l'effet de l'îlot de chaleur urbain.

Objectifs :

L'objectif de cette recherche est double : pédagogique et scientifique. Le premier vise à acquérir une méthodologie de recherche et des connaissances concernant le sujet. Le second permet de :

- Examiner l'îlot de chaleur urbain et identifier les stratégies de son amélioration.
- Montrer l'intérêt d'introduire la nature en milieu urbain pour l'atténuation d'îlot de chaleur urbain.
- Évaluer le rôle de la végétation notamment sur les toitures des bâtiments dans le rafraîchissement du microclimat urbain.
- Vérifier la capacité de rafraîchissement procurée par les toitures végétalisées à l'aide de simulation numérique.

Méthodologie de la recherche :

Cette recherche de Master 2 va se développer en deux parties :

La première partie théorique, basée sur une recherche bibliographique, référant sur les travaux de recherche de (Achour-Bouakkaz, 2006 ; Atik, 2011 ; Daoudi, et al., 2015) dans le but d'inscrire notre recherche qui traite l'îlot de chaleur urbain en continuité des perspectives émises par les recherches citées auparavant, notamment en ce qui concerne le choix du cas d'étude et l'approche par la simulation numérique.

La seconde partie pratique est une analyse microclimatiques à l'aide d'une simulation par ENVI-MET.4.4.3.

Afin de répondre à notre problématique, notre recherche va s'articuler entre deux méthodes, la 1ere est la méthode déductive, elle nous permet d'identifier les stratégies d'amélioration du phénomène étudié. La 2eme est la méthode comparative, qui se base sur une lecture comparative entre deux scénarios de simulations qui aboutissent à des résultats numériques, à travers l'usage d'outils statistiques, ce qui nous permet d'identifier l'effet des toitures végétalisées pour le rafraîchissement de l'air niveau de l'hôpital Mustapha.

Structure de mémoire :

Dans le but d'atteindre les objectifs fixés préalablement . Nous avons structuré notre mémoire de Master 2 en trois chapitres, précédés par une introduction générale et suivis par une conclusion générale.

- **Introduction générale :**

Comporte le contexte de la recherche, présente nos objectifs à travers une problématique liée au problème d'étude suivi par des questionnements ou les réponses sont sous forme d'hypothèses, les objectifs et la méthodologie de la recherche.

- **Le chapitre 01 :**

Ce chapitre englobe les aspects théoriques sur la question d'îlot de chaleur urbain et les moyens permettant son atténuation. Mais pour saisir cette question, nous avons d'abord approché le microclimat. A cet effet :

La première partie de ce chapitre consiste à définir la notion du microclimat et ses différents paramètres (paramètres climatique, morphologiques, surfaciques ...).

La deuxième partie consiste à définir le phénomène d'îlot de chaleur urbain avec les différents facteurs qui l'influencent, ses impacts et les différentes mesures de lutttes contre ce phénomène.

La troisième partie a pour objectif la définition de tous les concepts se rapportant aux toits végétalisés. Et à la fin, une présentation de la simulation numérique.

- **Le chapitre 02 :**

Ce chapitre se devise en deux parties :

La première partie présente les paramètres du site d'étude choisi, soit la ville d'Alger, et les caractéristiques de l'entité d'étude l'hôpital Mustapha.

La deuxième partie présente le logiciel de simulation ENVI-MET, ses avantages et ses limites et son mode d'emploi.

- **Le chapitre 03 :**

Ce chapitre traite l'évaluation et l'effet des toitures végétalisées sur l'îlot de chaleur urbain.

La simulation par le logiciel ENVI-MET nous permettra d'analyser les données, discuter et interpréter les résultats pour enfin confirmer ou infirmer les hypothèses.

- **Conclusion générale :**

Elle présente le bilan de tout le travail, suivie par les perspectives des futures recherches.

Chapitre 1

Etat des connaissances

Introduction

Ce chapitre va nous permettre d'acquérir les connaissances nécessaires pour la compréhension du phénomène d'îlot de chaleur urbain et les moyens d'atténuer son apparition.

Pour cela, nous allons d'abord commencer par définir le microclimat et ses paramètres, pour ensuite exposer des connaissances sur l'îlot de chaleur urbain, les toitures végétalisées et enfin aborder l'intérêt et les modèles de la simulation informatique.

1.1 Le microclimat urbain :

Le microclimat des villes est influencé par différents paramètres (météorologique, morphologique énergétique). Nous allons les exposer dans ce qui suit.

1.1.1 Les paramètres du microclimat

Les paramètres météorologiques :

Ces paramètres se déclinent en :

- Bilan radiatif
- La température de l'air
- L'humidité
- Le vent

1.1.1.1 Le bilan radiatif :

Le bilan radiatif ou rayonnement net représente « un rayonnement net (R_n) qui correspond à la fraction de l'énergie rayonnante de courtes ($R_g - R_r$) et de grandes longueurs d'ondes ($R_a - R_t$) absorbée par le système végétal et le sol. Ce bilan dépend de l'énergie globale incidente (R_g) et les caractéristiques de la surface réceptrice (R_r et R_t) selon l'équation

$$K_n = R_g - R_r + R_a - R_t \gg$$

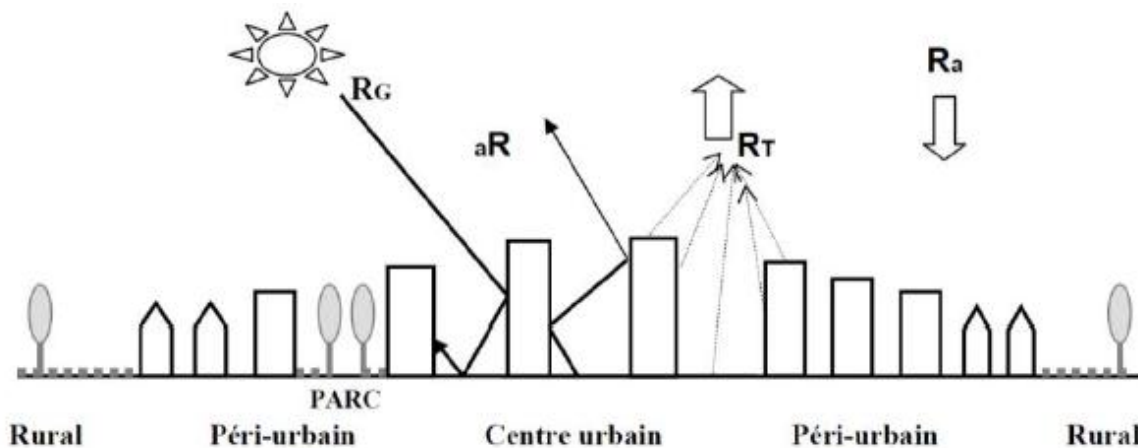


Figure 1 : Bilan radiatif au-dessus d'une ville,
Source : Ringenbach N, 2004.

Aussi l'aspect vertical des façades des immeubles augmente les surfaces d'échange de rayonnement par rapport à ce que l'on peut trouver en campagne, (Ringebach, 2004)

- **Le rayonnement incident :** La surface terrestre reçoit deux types de rayonnement :
 - Le rayonnement global (RG). Il correspond à la somme des rayonnements direct et diffus incident (rayonnement visible).
 - Le rayonnement atmosphérique (infrarouge) (Ra).

Au-dessus d'une ville, on observe que le rayonnement solaire global incident est plus faible par rapport aux espaces ruraux environnants. Cela s'explique par une plus grande concentration de polluants dans l'atmosphère urbaine. (Ringebach, 2004)

- **Le rayonnement global réfléchi, (RGr) :** Le rayonnement global réfléchi par la canopée urbaine est donné par l'albédo de la zone. Il peut être affecté par la morphologie urbaine ; par exemple l'effet des rues canyons.
- **Le rayonnement terrestre, (Rt) :** Celui-ci correspond à l'émission par la surface, en grande longueur d'onde (domaine d'infrarouge). Il est relatif aux caractéristiques thermiques des matériaux et leur capacité à emmagasiner la chaleur. (Ringebach, 2004)
- **Température de l'air :** En milieu urbain, la principale caractéristique climatique est la température de l'air qui change d'un endroit à un autre selon la fermeture ou l'ouverture de l'espace. Les températures sont liées aux apports solaires et l'écoulement du vent. Mais, en milieu urbain les températures sont influencées par d'autres paramètres tels que : la nature de tissu urbaine (tissu dense, moyen, matériaux de construction, le prospect), les consommations énergétiques (l'éclairage public, le chauffage) et la présence des espaces végétales et minérales.

1.1.1.2 L'humidité :

L'humidité est la concentration de vapeur d'eau atmosphérique. En milieu urbain On constate un excès d'humidité la nuit par rapport aux zones rurales. Un écart de pression partielle de vapeur d'eau peut varier entre 0.6 g.kg⁻¹ et 4.3 g.kg⁻¹, (Pigeon, 2007). Mais cela reste très variable selon les régions et selon les périodes de l'année. Un taux d'humidité élevé induit une température ressentie plus élevée que la température mesurée. Voilà pourquoi les systèmes de prévision et d'avertissement se basent sur la combinaison de la température et de l'humidité.

1.1.1.3 Les vents :

Une masse d'air lors de son déplacement peut être considérée comme homogène, la présence d'une zone urbaine va modifier les caractéristiques de la masse d'air, (Ringebach, 2004). En plus dans une zone agglomérée en raison des constructions qui augmentent la rugosité de la surface, engendre une réduction de la vitesse du vent avec une augmentation de la turbulence par rapport au milieu rural, (Colombert, 2008), (Ringebach, 2004), créant ainsi des conditions favorables à la formation des ICU.

1.1.2 Les paramètres morphologiques :

Plusieurs indicateurs morphologiques ont été sélectionnés tel que la volumétrie de la ville (forme urbaine) et les espaces bâti et non bâti dans une ville, ayant chacun une influence différente sur le microclimat locale.

1.1.2.1 La forme urbaine :

L'agencement spatial des bâtiments et de l'espace public des uns par rapports aux autres ainsi que leurs importances en termes de surface au sein de la ville est le plus souvent représentatif d'une époque et/ou d'une architecture, (Colombert, 2008), comme visible en figure 3.

Cet agencement de pleins et de vides détermine à la fois le plan, le maillage, et le volume urbain, (Colombert, 2008). Les rapports de prospect, l'alignement des bâtiments sur la rue, l'emplacement des espaces verts et la silhouette des villes révèlent les différents paramètres qui influencent différemment les bilans radiatifs, aérodynamiques et énergétiques des villes

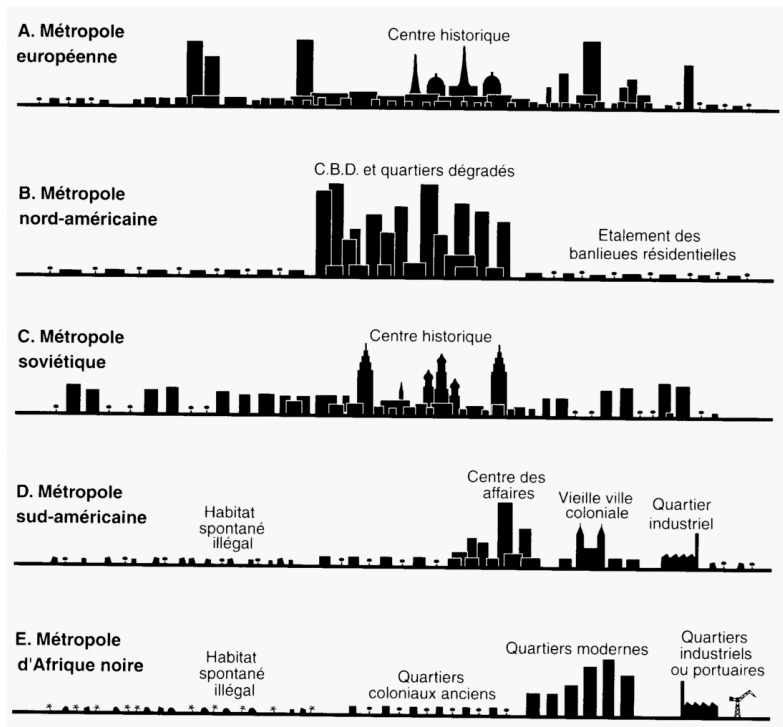


Figure 2 : Les profils urbains,
Source : P.Claval, 1981, R.Froment et divers, 1993.

1.1.2.2 Espaces bâtis/ non bâtis :

L'espace bâti : est déterminé par l'emprise au sol des bâtiments, qui est lié à la vocation du bâtiment et aux contraintes réglementaires, (Colombert, 2008). Le cadre bâti par sa forme, en termes de taille et de gabarit, révèle la rugosité du milieu urbain ainsi que l'exposition au rayonnement solaire. De même l'enveloppe, en termes de matériaux et de couleurs, influence le micro climat urbain avec son comportement thermique.

L'espace non bâti : selon sa nature, il constitue un facteur important dans la transformation du micro climat urbain, Il est déterminé par :

- La structure viaire : les types de rue sont très variables, mais on peut citer quelque paramètres qui influencent le micro climat urbain : la forme (largeur et rapport chaussée-trottoir), les matériaux de composition (définissent le comportement thermique et radiatif de la voirie), et la géométrie (rectiligne ou sinueux en rajoutant l'orientation, influencent la ventilation du milieu urbain).
- Les places par leur emplacement, le type de revêtement, ainsi que la présence de la végétation.
- Les espaces verts ou végétalisés qui sont considérés comme une source de rafraîchissement naturel, dont l'intensité est tributaire du type d'espaces en termes de parc, jardin ou square, et de la densité et de la nature de la végétation.

1.1.3 Les paramètres surfaciques :

Des notions telles que l'albédo et l'ombrage viennent transcrire l'influence des paramètres surfaciques, comme développés ci-dessus :

1.1.3.1 L'albédo :

L'albédo d'une surface dépend notamment du matériau (couleur et état de surface). Il influe sur le comportement des matériaux face à la chaleur, il correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire reçue par une surface,(Anquez & Herlem , 2011).

Les éléments des surfaces urbaines présentent des albédos très variés.

L'albédo s'exprime en fraction de 0 à 1, où 1 représenterait une surface qui réfléchirait 100 % de l'énergie et 0 une surface qui absorberait entièrement les rayonnements sans aucune réflexion. Ainsi, une surface dont l'albédo est inférieur à 0,03 (ou 3 %) est perçue comme noire, celle dont l'albédo est supérieur à 0,8 (ou 80 %) est perçue comme blanche. Une surface parfaitement blanche ou un miroir parfait réfléchit 100 % de la lumière, et a donc un albédo de 1, à l'inverse, une surface parfaitement transparente ou d'un noir parfait a un albédo de 0.

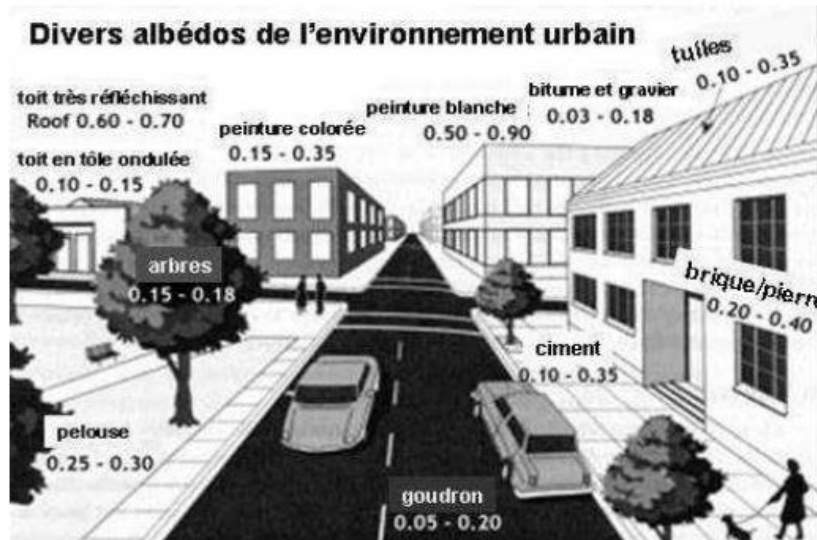


Figure 3 : Albédo dans un environnement urbain

Source : Akbari et al (1992)

1.1.3.2 L'ombrage :

L'ombrage est dû à l'ombre portée des végétations ou des bâtiments, ce qui induit moins d'énergie stockée pendant la journée.

1.1.3.3 Le couvert végétal :

La végétation permet de stabiliser la température de l'air par rétention de l'eau dans les feuilles et par évapotranspiration de l'eau à leur surface. Cela engendre à la fois une baisse de la température et une augmentation du taux d'humidité de l'air. L'ensemble de ces paramètres participe activement au rafraîchissement de l'espace

La contribution spécifique d'un arbre en milieu urbain est primordiale. Outre la réduction des îlots de chaleur par le biais de l'évapotranspiration et l'absorption de l'énergie solaire, la végétation contribue au maintien de la qualité de l'air par absorption de CO₂ et le rejet d'O₂ ainsi que la filtration des particules. Ils participent à la diminution du ruissellement de surface et des polluants. Enfin, ils limitent la consommation énergétique des bâtiments lorsqu'ils sont associés à une architecture bioclimatique.

1.1.3.4 L'eau :

L'eau a un rôle très important de rafraîchissement de l'air, Les précipitations sont interceptées par les toits et les routes, et sont ensuite rejetées vers les égouts. Le milieu urbain composé essentiellement de surfaces imperméables affecte les mécanismes d'échange en eau, moins de phénomène d'évaporation et plus de ruissellement, la figure montre le rapport entre l'imperméabilisation des sols et les phénomènes d'évapotranspiration, de ruissellement et d'infiltration.

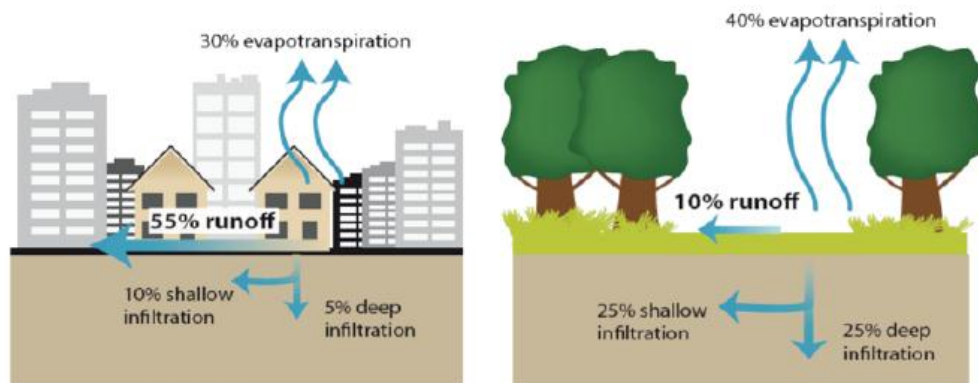


Figure 4 : Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain
Source : United States Environmental Protection Agency, 2008

1.1.4 Les paramètres énergétiques :

« Le bilan d'énergie regroupe les différents flux de chaleur qui se manifestent dans une zone urbaine. Il dépend des caractéristiques propres à la surface ainsi que des gradients de température et d'humidité ». (Ringebach, 2004).

1.1.4.1 Source de chaleur anthropique :

On entend par une chaleur anthropique ; la chaleur produit par les activités humaines ; comme les transports, la climatisation, le chauffage, ainsi que les humains eux-mêmes sont considérés comme des sources de chaleur anthropique. (Laconte, 2015).

Cette chaleur est liée à la taille, la densité et la fonction de la ville. (Colombert, 2008).

1.1.4.2 Flux de chaleur dans le sol et les bâtiments

C'est la quantité d'énergie stockée dans le sol et les matériaux, elle est en rapport avec leur capacité à transmettre et à stocker de l'énergie. L'absence de végétation et une importante capacité thermique des matériaux font que l'énergie stockée est plus importante en ville qu'à la campagne, (Ringebach, 2004).

1.1.4.3 Flux de chaleur latente

La chaleur latente est représentée par l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau, en milieu urbain avec la présence de surfaces imperméables et l'absence de couvert végétale, la chaleur latente est inversement proportionnelle avec les surfaces imperméabilisées et le couvert végétal.

1.1.4.4 Flux de chaleur sensible

L'énergie stockée dans les matériaux sera aussi restituée par convection sous forme d'un flux de chaleur sensible, elle sera plus évidente la nuit en ville, ce qui explique un refroidissement plus lent en ville qu'à la campagne, (Ringebach, 2004).

Synthèse :

Le microclimat d'un milieu urbain est influencé par différents paramètres : météorologiques, morphologiques, surfaciques et énergétiques. Ces derniers sont les principaux paramètres à prendre en charge afin d'arriver à maîtriser le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

1.2 L'îlot de chaleur urbain, ICU :

Les villes aujourd'hui connaissent une grande pression démographique. En effet, plus de 50% de la population mondiale habite en milieu urbain. Les chercheurs indiquent que l'essor démographique et l'urbanisation rapide des métropoles sont les principales causes des changements climatiques et des problèmes qui lui sont liés, à savoir les gaz à effet de serre, la déforestation, la désertification et la perte de la biodiversité (Daoudi, et al, 2015).

D'où la nécessité d'agir pour palier ses problèmes, répondre aux orientations du développement durable et améliorer la qualité de vie des citoyens (Anquez & Herlem, 2011).

Un des phénomènes environnementaux le plus décrié de nos jours est l'îlot de chaleur urbain (ICU). Il se traduit par une augmentation des températures d'air en centre urbain comparées à celles en périphéries (Natalia, 2010).

Les études sur le climat urbain sont très anciennes. Plusieurs chercheurs ont soulevé les relations entre l'aménagement des villes et les conditions climatiques. Nous pouvons citer les travaux de Cotte (1774) sur le climat de Paris et Howard sur Londres. Ce dernier a publié en 1883 un livre intitulé « the climate of London », où il a constaté que la température au centre-ville est considérablement plus élevée que dans les zones rurales, (Pigeon, 2007 ; Colombert, 2008). La plus ancienne apparition du terme îlot de chaleur urbain remonte à Balch et Pye (1947) (Pigeon, 2007).

(Gendron & Bouchard, 2013) affirment que « les ICU induisent un stress thermique qui a des conséquences sanitaires ». Cette causalité a fait l'objet de nombreuses études qui ont démontré l'impact des changements climatiques sur la santé humaine (Daoudi, et al., 2015). Le phénomène d'îlots de chaleur urbain pose surtout des problèmes d'ordre sanitaire. La canicule d'août 2003 en Europe est particulièrement en France, en témoigne d'ailleurs elle est souvent citée. Lors de cet épisode climatique, il a été observé un écart de 10°C voire 16°C par rapport aux températures minimales observées en fin de nuit, (Greuillet & Galsomies, 2013) Depuis, les chercheurs ne cessent d'observer et même de projeter une hausse de température moyenne liée principalement à l'urbanisation et à l'activité anthropique, GIEC, (2010). Aujourd'hui, l'adaptation des villes aux changements climatiques devient un enjeu principal afin d'améliorer la qualité de vie des citoyens. Ce qui inclut la caractérisation, la maîtrise et la réduction des ICU par la mise en disposition des outils d'atténuation.

1.2.1 Définition du phénomène îlot de chaleur urbain, ICU

L'îlot de chaleur urbain se développe dans une zone urbanisée caractérisée par des températures d'air plus élevées par rapport aux zones environnantes, (Natalia, 2010).

L'ICU est souvent qualifié comme un phénomène régional, puisqu'il se développe entre un centre-ville et sa périphérie. Au début, vu le schéma de développement des villes, son allure suit le développement concentrique des villes. Aujourd'hui les villes sont devenues hétérogènes avec des limites floues, par conséquent les limites de l'ICU sont devenues plus compliquées à identifier. L'ICU est qualifié comme un phénomène localisé (Greuillet & Galsomies, 2013)

Les facteurs de son apparition et de son développement sont étroitement liés à l'urbanisation, ce qui rend l'îlot de chaleur urbain une caractéristique principale du microclimat des villes, (Pigeon, 2007). La différence de température peut varier de 2°C jusqu'à 12°C (Greuillet & Galsomies, 2013), encore plus, (Anquez & Herlem, 2011), « L'intensité des îlots de chaleur urbains varie sur une base journalière et saisonnière ».

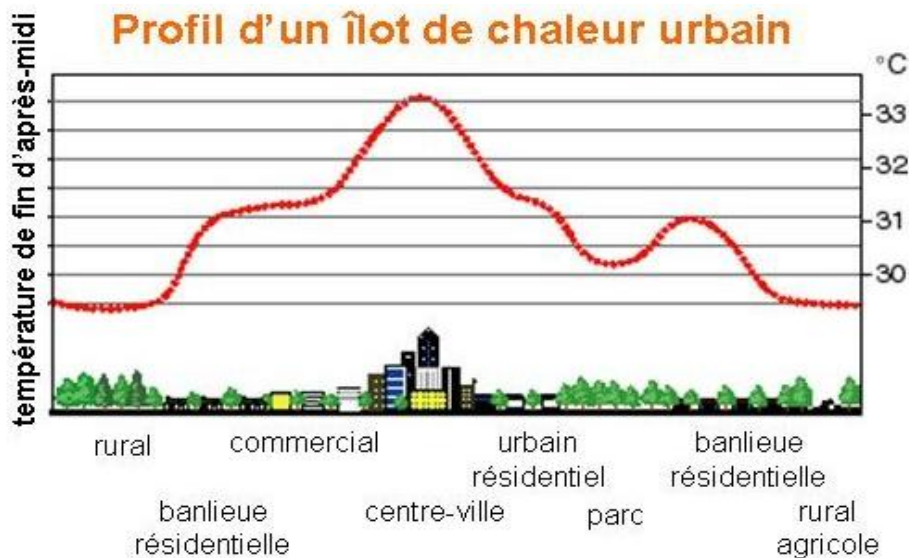


Figure 5 : profile de l'îlot de chaleur urbain
Source: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000

En effet, les différences de températures entre la ville et la campagne sont plus sensibles la nuit car la ville restitue la chaleur emmagasinée durant la journée plus lentement que son environnement rural. Toutefois, en présence de vent les températures tendent à s'uniformiser et donc à dissiper le phénomène (figure 7). Son intensité est variable, de 3° à 5° en moyenne mais peut atteindre 8° à 10° voir 14° dans des cas extrêmes (Achour-Bouakkaz, 2006).

1.2.2 Les types d'îlot de chaleur urbain (ICU) :

Selon (Giguère, 2009), il existe trois types d'îlots de chaleur, illustrés en figure ci-contre

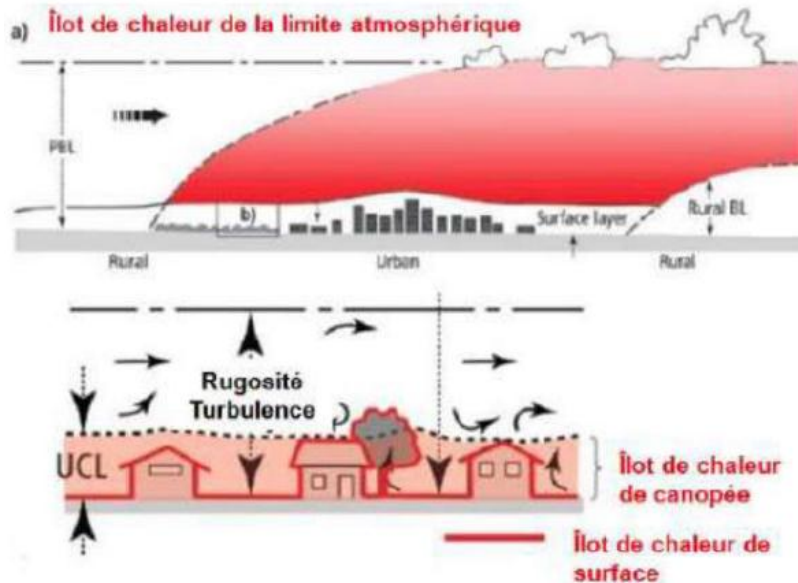


Figure 6 : Les types d'îlot de chaleur urbain,

Source : Carpentier, (2012).

1. **Les îlots de chaleur de surface** : en général les surfaces artificielles par leurs caractéristiques thermiques, et lors d'une journée ensoleillée sont plus chaudes que les surfaces naturellement végétalisées.
2. **Les îlots de chaleur de la canopée urbaine** : c'est la couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments, où l'essentiel de l'activité humaine se déroule.
3. **Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine** : située au-dessus de la couche de la canopée.

1.2.3 Facteurs aggravants d'ICU :

Les facteurs aggravants de ce phénomène dépendent des conditions naturelles liés à la météorologie mais surtout dans la réduction du rapport entre les surfaces minéralisées et des surfaces végétalisées trouvées en ville.

Dubois a distingué deux types : facteurs naturels et les facteurs humains

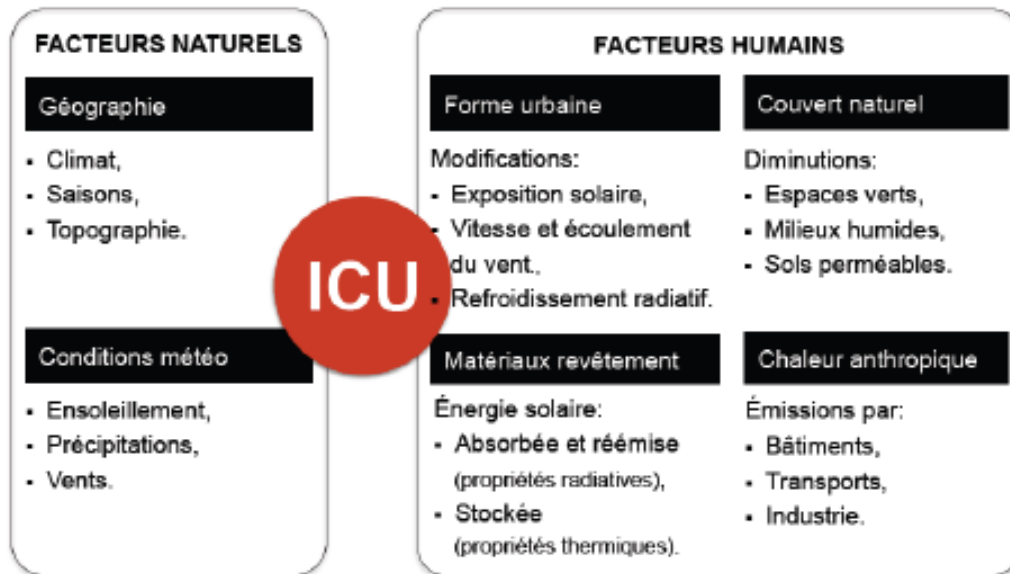


Figure 7 : Principaux facteurs et différentes échelles influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain

Source : Dubois, 2014.

1.2.3.1 Les facteurs naturels

Ce sont des facteurs incontrôlables. Ils sont relatifs à la situation géographique et sont étroitement liés à la météorologie ;

a Les facteurs géographiques :

L'emplacement géographique de la ville définit le type du climat et du micro climat, ces aspects peuvent affecter l'intensité de l'îlot de chaleur.

• **Le relief** a été mis en évidence comme un élément modifiant la structure d'ICU, (Pigeon, 2007), où il existe une relation entre intensité de l'ICU et l'altitude de la zone d'étude.

La proximité de la mer ou des lacs influencent aussi l'ICU surtout par l'apport rafraichissant de la brise de mer.

b Les facteurs climatiques

Les facteurs climatiques tels que les précipitations, les vents, l'humidité sont parmi les facteurs influençant les ICU. L'augmentation de l'humidité dans l'air, le manque de vent, peut faire augmenter la sensation de chaleur produite par l'ICU.

1.2.3.2 Les facteurs humains :

a Forme urbaine :

Un autre effet de l'urbanisation est la morphologie urbaine. La forme de la ville, avec la disposition de ses rues et de ses bâtiments, leurs tailles, formes et orientations, affecte les flux

d'énergie et d'air. Elles créent des canyons où s'accumule la chaleur par le rayonnement solaire et les activités humaines. (Giguère, 2009)

Le piégeage radiatif ; un phénomène se produit lors dans une forme urbaine à un important 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. La température à l'intérieur de la rue canyon s'en trouvera donc augmentée. Les rayons infrarouges émanant des matériaux urbains chauffés sont piégés de la même manière. (Colombert, 2008)

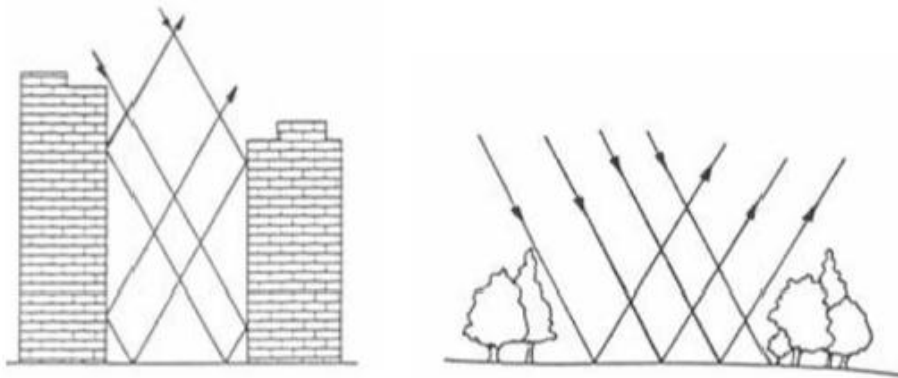


Figure 8 : Illustration du piégeage radiatif

Source : Griffiths, 1976

b Matériaux et revêtement :

Les matériaux et revêtement sont caractérisés par une propriété thermique qui les rend parmi les principaux facteurs influençant le bilan radiatif, car ils stockent beaucoup de chaleur durant la journée et de la restituer pendant la nuit. Cette restitution va créer la différence de température entre les centres urbains et les campagnes la nuit. (Giguère, 2009)

c Couvert naturel :

Les végétaux jouent un rôle essentiel dans le rafraîchissement de l'atmosphère, or la densification progressive des villes et le développement des infrastructures urbaines se fait au détriment de ce couvert naturel, qui va créer une perte de fraîcheur en milieu urbain.

d Chaleur anthropique :

Le chauffage et/ou la climatisation des habitations et des équipements, la circulation automobile, et les industries constituent des sources de production de chaleur anthropique.

1.2.3.3 Les variations de l'îlot de chaleur urbain :

a Les conditions moyennes : cycle diurne

Les villes souvent situées à des latitudes moyennes montrent souvent des résultats comparables quant aux variations de l'ICU. Or l'îlot de chaleur urbain augmente en fin d'après-midi et commence à croître rapidement vers le crépuscule. Il atteint son apogée au milieu de la nuit. On peut constater qu'il est réduit vers l'aube et est au minimum vers midi.

Entre l'environnement rural et urbain, on remarque que l'urbain prend plus de temps pour restituer l'énergie accumulée en tant que stock. Dans la nuit les résultats s'harmonisent en abaissant l'intensité. L'environnement rural fait décliner l'intensité de l'îlot de chaleur grâce à son réchauffement rapide après le lever du soleil (Achour-Bouakkaz, 2006)

b Les variations saisonnières du cycle diurne

Le cycle diurne et les gradients qui le causent varient saisonnièrement. L'accroissement de l'ICU se fait plutôt en hiver car le refroidissement urbain se fait plus tard. Selon Oke et Maxwell (1975) ce phénomène est attribué au fait que les heures d'affluence y sont décalées plus près et toujours après le coucher du soleil. Cet apport se réalise alors que la stabilité nocturne fait déjà effet à la perte de chaleur venant des rues. Selon les auteurs, en général, en hiver au coucher du soleil 50% de l'intensité maximale de l'ICU atteinte dans la journée est dépassée, alors que ce n'est que 35% pour l'été et le printemps et 10% pour l'automne.

La variabilité saisonnière du gradient de refroidissement urbain étant faible, ce sont donc, les changements dans celui du site rural qui sont les plus responsables des oscillations de l'ICU. Et il semblerait, en effet, que le surplus de chaleur anthropique dégagé pour le chauffage des habitations serait suffisamment important pour avoir une influence sur la température en hiver, ce qui provoque directement la diminution de l'amplitude annuelle des températures en ville (Achour-Bouakkaz, 2006).

1.2.4 L'impact du l'ICU

Les îlots de chaleurs urbains peuvent générer des impacts négatifs sur l'environnement et la santé des populations notamment en période estivale.

1.2.4.1 Impacts sur l'environnement :

a Détérioration de la qualité d'air extérieur :

Les îlots de chaleur urbains ont des conséquences sur la qualité de l'air extérieur, par la contribution à la formation du smog, ce dernier est une brume urbaine composé par des rayons du soleil, de la chaleur et de divers polluants. (Anquez & Herlem , 2011)

b Détérioration de la qualité d'air intérieur

Les hausses de température ont un effet sur la qualité de l'air intérieur, car elles favorisent la multiplication des acariens, des moisissures et des bactéries. De plus, Les chaleurs accrues peuvent mener à l'émanation de substances toxiques, telles que les formaldéhydes, qui sont utilisées dans les colles pour la fabrication des meubles et les matériaux de construction. (Giguère, 2009)

1.2.4.2 Impact sur la santé :

La hausse de chaleur générée par les ICU accentue la fréquence, la durée et l'intensité des vagues de chaleur accablante, ce qui peut créer un stress thermique pour la population, (Anquez & Herlem , 2011). Ces derniers affirment que « Le stress thermique est provoqué par l'accumulation de chaleur par le corps humain et peut s'avérer fatal ».

Certaines personnes sont plus vulnérables aux ICU, qui, selon (Giguère, 2009) sont les personnes vulnérables socialement et physiquement. Cette chaleur peut provoquer des troubles de santé : hyperthermie, déshydratation, syncopes, coups de chaleur et accentuer les maladies chroniques telles que le diabète les insuffisances respiratoires et cardiaques. On cite la canicule d'août 2003 en Europe et particulièrement en France, durant laquelle on a dénombré 1500 morts, et où on a observé un écart de 10°C voire 16°C par rapport aux températures minimales observées en fin de nuit. (Giguère, 2009)

1.2.4.3 Impacts sur la consommation d'énergie

a Hausse de consommation d'énergie

Les îlots de chaleur urbaine peuvent être bénéfiques en hiver, contrairement en été, il agit sur le confort intérieur, d'où la recherche des moyens de rafraîchissement de l'air, ce qui nécessite plus d'énergie à consommer. (Anquez & Herlem , 2011). Selon (Giguère, 2009), l'élévation de la température de 2°C causé par les ICU induit une augmentation de 5% de la consommation d'énergie.

b Climatisation :

La climatisation est devenue une nécessité indispensable pour la population en période estivale pour avoir un certain confort thermique.

Aujourd'hui on la retrouve partout, à domicile, au travail, dans les lieux publics et même dans la voiture et les moyens de transport. Par conséquent elle participe énormément à l'augmentation de la consommation d'énergie, et dispense de la chaleur anthropique, (Giguère, 2009). Les systèmes de climatisation lors de leur fonctionnement rejettent l'air chaud et vicié à l'extérieur des bâtiments créant ainsi un cercle vicieux, (Giguère, 2009).

La figure suivante montre le cercle d'amplification des ICU, causé par l'expansion et la densification des villes et la climatisation.

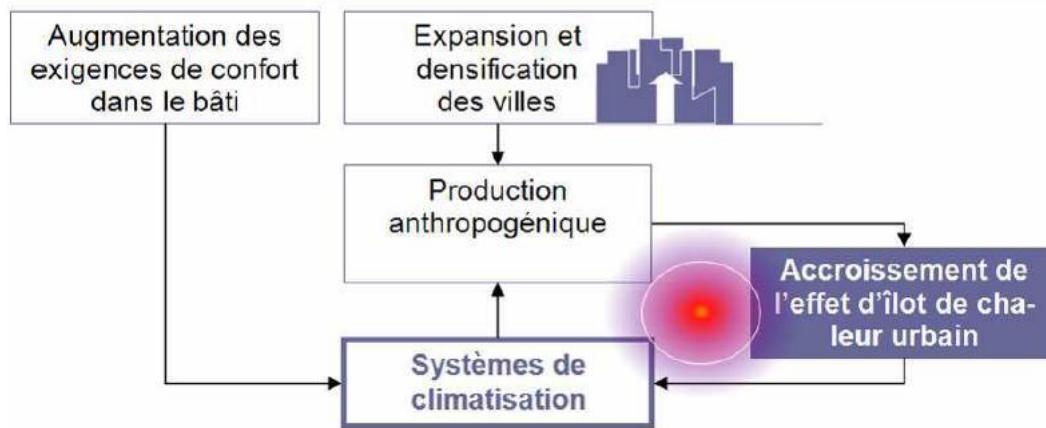


Figure 9 : Boucle d'amplification des îlots de chaleur urbains,

Source : Bozonnet, 2006

1.2.5 Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains :

Vue les impacts néfastes des îlots de chaleur urbains, il est nécessaire de trouver des solutions pour lutter contre ce dernier. Plusieurs mesures d'aménagement urbain s'avèrent efficaces. Il est possible de répertorier ces solutions selon quatre types de mesures : les mesures de contrôle des sources de chaleur anthropiques ; mesures de gestion des eaux pluviales ; mesures de végétalisation et les mesures ciblant les infrastructures.

1.2.5.1 Mesure de contrôle des chaleurs anthropiques :

a Contrôle de la production de la chaleur dans le bâtiment :

La production de chaleur à l'intérieur d'un bâtiment contribue à sa surchauffe en période estivale, notamment lorsqu'elle s'ajoute au rayonnement solaire direct ou à la mauvaise isolation thermique du bâtiment. Les appareils électroménagers, les appareils du bureautique et la lumière artificiel, par exemple, transforment l'énergie qu'ils consomment en chaleur.

Pour cela, il est nécessaire de réduire les pertes de chaleur du bâtiment, par une bonne isolation thermique, la réduction du vitrage, et l'utilisation des matériaux caractérisés par une faible émissivité.

b contrôle de la demande de climatisation :

Il existe des solutions de remplacement pour la climatisation plus durables pour rafraîchir l'air intérieur des bâtiments. En effet, il est possible de recourir à différentes techniques de climatisation passive afin de rafraîchir un bâtiment qui n'a pas été conçu pour se protéger des températures très chaudes en favorisant les systèmes de ventilation naturelle et mécanique.

c Réduction du parc automobile en milieu urbain :

Les automobiles et véhicules contribuent à l'émission de chaleur en milieu urbain. Afin de garantir plus de fraîcheur dans les milieux urbains est d'y limiter l'accès et la circulation des véhicules on améliorant les systèmes de transport en commun, et en se basant sur les moyens combinant la mobilité douce.

La création de parkings en sous-sol et non en surfaces.

1.2.5.2 Mesure de gestion des eaux pluviales :

Afin de favoriser l'humidification des sols en milieux urbains et d'assurer une disponibilité en eau pour les végétaux, plusieurs pratiques de gestion durable des eaux pluviales existent et s'inscrivent dans l'approche de développement à faible impact.

- **Revêtements perméables :** Les revêtements perméables permettent à l'eau de percoler à travers le pavé ou la végétation.
- **Jardins pluviaux :** Les jardins pluviaux² sont un moyen de réduire le ruissellement et d'augmenter le taux d'humidification des sols pour éviter que les eaux de pluie s'écoulent directement sur le toit.
- **Arrosage des pavés imperméables avec de l'eau recyclée :** Grâce au processus d'évaporation, l'arrosage des surfaces pavées imperméables est un moyen efficace de réduire.
- **Chaussées à structure réservoir :** Les chaussées à structure réservoir sont constituées des pavés poreux favorisant l'infiltration de l'eau à la source. Elles laissent passer l'eau et l'air à même le revêtement, ne requièrent pas d'espace supplémentaire et s'intègrent bien au milieu urbain.

1.2.5.3 Mesure de végétalisation :

La mesure de végétalisation en milieu urbain a pour objectif d'augmenter l'indice global de végétalisation dans une ville. À cette fin, la végétation peut être disposée dans de nombreux espaces, comme :

a Plantation ponctuelle des arbres et de végétation :

La qualité des sols, la disponibilité des ressources hydriques l'espace suffisant permettent une bonne croissance de l'arbre pour une meilleure fraîcheur au niveau de la ville.

² Selon la société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL), 2005 : le jardin pluvial est « un lit de plantes ou de pierres, conçu expressément pour capter les eaux pluviales et permettre au sol de les absorber lentement par infiltration ».

b Végétalisation des stationnements :

Le remplacement des matériaux de stationnement qui se caractérise par un faible Albédo avec un aménagement végétalisé.



Figure 10 : aire de stationnement végétalisé

c Murs végétaux :

Les murs végétaux sont des écosystèmes verticaux qui jouent un rôle important dans le processus de refroidissement des villes.



Figure 11 : Le Quai Branly (Paris). 2006

d Toitures vertes :

Le remplacement des toitures minérales par des toitures végétalisées.



Figure 12 : un toit vert

1.2.5.4 Mesure des infrastructure durable :

Cette mesure vise à réduire l'albédo des matériaux responsables d'un fort dégagement de chaleur. Ce procédé permet de travailler sur l'existant plutôt que de mettre en œuvre de nouveaux matériaux.

- **Bâtiments :**
 - Le choix des matériaux urbain avec une bonne isolation et réduction de l'émissivité.
 - L'utilisation de matériaux poreux
 - Créer une base de données sur les matériaux rafraichissants à destination des professionnels et des citoyens.
- **Infrastructures routières :**
 - Augmenter l'albédo de l'espace urbain par le choix des matériaux avec un fort albédo.

Synthèse :

Ces connaissances confirment que le phénomène ICU est généré de l'Homme et de ses pratiques urbaines. L'aggravation de ce phénomène a un impact sur la santé de l'Homme ainsi que sur son environnement. La nécessité d'intégrer des solutions d'atténuation dans les actions de planification et d'aménagement urbain sont préconisées.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés sur les mesures liées à la végétation plus précisément sur la mesure des toitures végétalisés comme une solution pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain.

Dans ce qui suit nous prendrons connaissance des toitures végétales et leurs avantages.

1.3 Concept de végétalisation des toits :

Le toit est la partie du bâtiment la plus exposée aux conditions climatiques. Sachant que, la température au-dessus du toit affecte la température de la basse atmosphère, puisqu'il se trouve que certains toits d'immeubles (les tours) sont directement au niveau de celle-ci.

La réduction des températures sur les toits peut réduire les températures de l'air extérieur et par là, la consommation énergétique pour le conditionnement de l'air en été et en hiver. (Abderrezak, 2010)

C'est ce qui a rendu la végétalisation des couvertures horizontales ou inclinées des bâtiments une alternative au rafraîchissement des centres urbains et des bâtiments. Cette pratique devient de plus en plus recommandée et même exigée par les urbanistes et les architectes dans

les centres urbains des villes développées vu le manque d'espaces verts au sol. La végétalisation des toits sera l'intérêt dans cette partie de recherche.

1.3.1 Définition d'une toiture végétalisée :

La définition d'une toiture verte, dite aussi végétale ou végétalisée est souvent liée à sa composition ou sa fonction.

Le principe de la toiture végétale consiste à recouvrir de substrat, un toit plat ou à faible pente (jusqu'à 35° et rarement plus, au-delà, on parlera de mur végétalisé).

« Le toit jardin est n'importe quel espace planté, prévu pour fournir le repos et le plaisir à l'homme ou l'agrément environnemental. Celui-ci est séparé du sol par un bâtiment ou toute autre structure » (Henderson, B., Miller, P. et al. 2003, p. 16).

1.3.2 Composants type d'une toiture végétalisée :

Un toit vert est constitué de trois complexes. Le complexe « étanchéité- isolation » mis en place sur un système pare vapeur qui protège l'élément porteur de l'humidité et des infiltrations de l'eau, et le « complexe de culture » qui comprend la couche de drainage, la couche filtrante et le substrat de culture. « Le complexe végétal » est ensuite installé selon différents modes de mise en œuvre. La figure ci-après montre la disposition type des principales composantes de la toiture végétalisée (Atik, 2011)

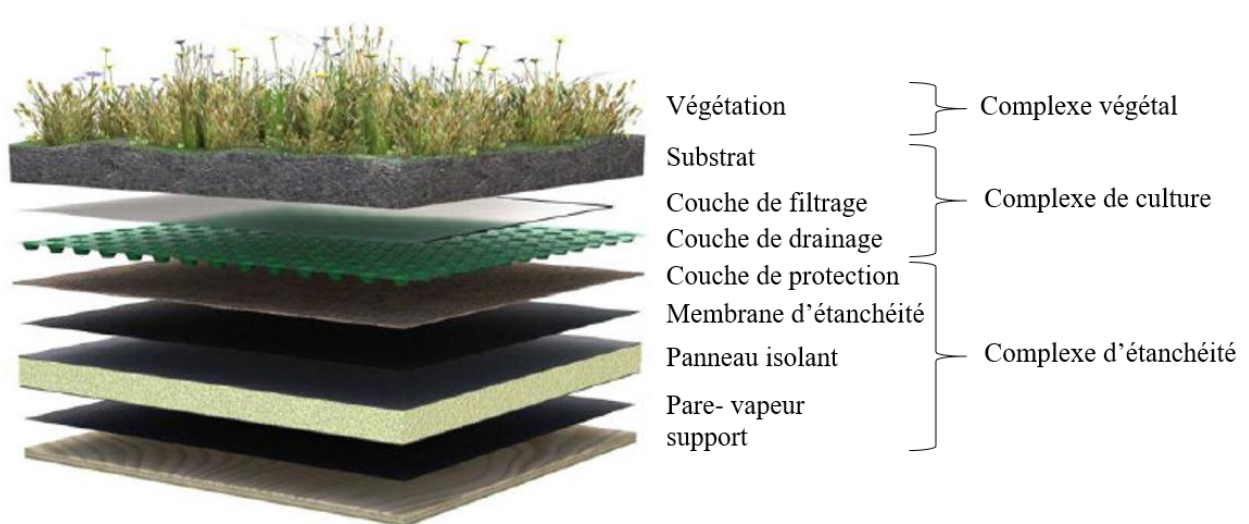


Figure 13 : les principales composantes d'une toiture végétalisée
Source : www.ma-maison-container.fr

1.3.2.1 Complexe étanchéité :

a Le support :

C'est la structure qui portera la végétation . Il peut être en bois, en béton ou métallique.

b Isolation :

Les toitures végétalisées doivent être isolées avec un isolant qui résistance à la compression compatible avec les charges prévues. Cet isolant est en forme d'un panneau mit avant la membrane anti- racine. Il est d'abord collés sur l'élément porteur, après que ce dernier soit protégé par un pare-vapeur, afin d'éviter la formation de condensation sous l'isolant.

c Etanchéité :

Le toit doit être effectivement et durablement étanche face à l'humidité pour rendre le support imperméable grâce à des membranes d'étanchéité anti- racine, et une couche de protection pour empêcher la pénétration des racines. La membrane d'étanchéité peut être en bitume, caoutchouc ou PVC, en bâche ou film plastique.

1.3.2.2 Complexe de culture

a Couche de drainage :

Elle permet de conduire le surplus des eaux plus rapidement vers les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales du toit. Elle est composée de cailloux, de graviers et de billes d'argile qui va remplir un rôle de drainage afin de prévenir la formation d'eau stagnante sur le toit

b Couche de filtrage :

C'est une couche intermédiaire entre la couche drainante et les substrats, son rôle est d'empêcher l'infiltration des particules du substrat à la couche de drainage. Elle est faite de verre ou de polyester.

c Substrat de culture :

C'est une couche d'enracinement et de base, elle est composée d'un mélange de matériaux naturels de granulométrie différente (gravier, sable, cailloux, ...) avec un faible pourcentage des matières organiques (5-10%) afin de nourrir les végétaux et de garder une quantité d'eau nécessaire à l'humidification de structure. L'épaisseur du substrat dépend directement du type de végétation qu'elle doit supporter. (Minimum 10 cm d'épaisseur)

1.3.2.3 Complexe végétal :

La végétation accompagnant un bâtiment doit s'accorder avec le style architectural. La végétation doit s'adapter progressivement à son milieu en étant résistante à différents types de stress (thermique, hydrique et lumineux) pour pouvoir accomplir son rôle esthétique, environnemental ou autre.

1.3.3 Différents procédés de végétalisation des toits :

On distingue trois types de toitures végétalisées, selon les caractéristiques de la couche de culture et la technique d'installation ou le type de végétal ; la végétalisation intensive, la végétalisation extensive et la végétalisation semi intensive.

1.3.3.1 Végétalisation intensive :

Elle est appelé aussi « terrasse/toiture jardin », « terrasse traditionnelle » ou « toit jardin ». Elle consiste en, la conception d'un jardin ressemblant à ceux aménagés sur le sol de par les différentes espèces végétales autorisées (plantes vivaces, arbres, arbustes, plantes grimpantes, gazon, etc. Elle nécessite de grandes masses de terre végétale, dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 2m et une hauteur des végétaux considérable. C'est un procédé qui demande un entretien équivalent à celui que requiert un jardin au sol (Abderrezak, 2010).

1.3.3.2 Végétalisation extensive :

C'est un procédé de végétalisation moderne qui ne nécessite pas une grande couche de terre dans l'épaisseur du substrat ne dépassent pas 12cm (Abderrezak, 2010), elle peut être réalisé sur des nouveaux bâtiments ou bien sur des toits des bâtiments déjà existant sans calcul préalable des surcharges, elle nécessite peu d'entretien. (Benassil Chabane, 2012)

1.3.3.3 Végétalisation semi intensive

C'est l'intermédiaire des deux catégories précédente, dans épaisseur du substrat entre 12 et 30 cm pour un poids compris entre 50 et 350 daN/m² et une pente ne dépassant pas. Ce type de procédé nécessite un entretien régulier mais restent modérés par rapport à la végétalisation intensive.

Le tableau suivant résume les exigences et les conditions de chaque procédés selon Direction de l'Environnement et de l'Energie en France :

	Végétation intensive	Végétation semi intensive	Végétation extensive
Épaisseur du substrat	30 cm < e < 200 cm	12 cm < e < 30cm	< 12 cm
Poids du complexe de végétation	> 600 kg/m ²	150 à 350 kg/m ²	env, 100 kg/m ²
Support admissible	béton	Béton, acier, bois	Béton, acier, bois
Pente maximale	5%	20%	30%
Choix de végétation	Très large	large	Restreint
Entretien	Important	limité	Faible (1 à 3 passages /an)
Coût global toiture	Elevé	moyen	économique

Tableau 1 : Comparaison entre les 3 procédés de végétation

Source : <http://www.referencenature.fr>

1.3.4 Le choix des végétaux :

Le choix des végétaux dépend de plusieurs facteurs :

- Le type de la toiture végétalisée.
- Les conditions du milieu (urbain, rural..., exposition au soleil, au froid et au vent...).
- L'esthétique (composition, intégration...).
- Les possibilités d'entretien.
- Les coûts de réalisation et de gestion.

1.3.4.1 Les plantes grasses :

Également répertoriées dans la catégorie des plantes charnues³, les plantes grasses les plus utilisées en toiture sont les sédums⁴. Ces derniers nécessitent très peu d'entretien.



Figure 14 : Sédums sur un toit extensif

³ Plante charnue : est une plante qui s'adapte pour survivre dans des milieux arides du fait des caractéristiques du sol, du climat ou à forte concentration en sel.

⁴ Les sédums : Ce sont de petits arbustes qui ont la particularité de pouvoir s'acclimater aussi bien à la chaleur, au froid qu'à la sécheresse.

1.3.4.2 Les plantes vivaces et bulbeuses :

C'est une plante fleurissante qui résiste aux rigueurs de la mauvaise saison, qu'il s'agisse de l'hiver ou de la sécheresse. Cette catégorie de plantes offre une multitude de choix en ce qui concerne les fleurs et leurs coloris.



Figure 15 : plante vivace sur un toit jardin



Figure 16 : différents type de plante vivaces

1.3.4.3 Les graminées :

Les graminées englobent toutes les plantes qui peuvent représenter les « herbes ». Les plus utilisés dans la toiture végétalisée sont les fétuques⁵ qui sont connues pour leur grande résistance. Les graminées s'entretiennent très facilement.



Figure 17 : fétuques bleus

La couche de végétation d'une **toiture verte extensive** peut être composée de sedums (herbes et plantes grasses), d'herbes résistantes à la sécheresse ou la recherchant.

La couche de végétation d'une **toiture verte intensive** peut en plus aussi accueillir des buissons et même des arbres.

⁵ Fétuques : Plante de la famille des graminées fourragère vivace des prairies naturelles et temporaires qui se développe en touffes serrées.

1.3.5 Avantage et inconvénients :

Chacune de ces typologies présente ses avantages et ses inconvénients. On trouve généralement une opposition toiture végétalisée extensive / toiture végétalisée intensive sur les points suivants :

Type de toiture	AVANTAGES	INCONVENIENTS
<p>Toiture à végétation Extensive</p> <p>Mince couche de sol, peu ou pas d'irrigation, faible diversité dans le choix de plantes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Léger, le toit n'a généralement pas besoin d'être renforcé • Convient aux grands espaces • Convient aux toits à pentes de 0 à 30 degrés • Peu d'entretien, longue durée de vie • Ne nécessite pas d'irrigation ou de système de drainage dans la majorité des cas • Peu d'expertise technique requise • S'intègre bien à des travaux de rénovation • Développement spontané des plantes indigènes • Peu onéreux • Allure naturelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Choix limité de plantes • Rarement utilisable comme lieu récréatif (majorité des cas) • Attrait esthétique moindre pour certain, surtout en hiver • Efficacité énergétique et rétention des eaux pluviales moindres
<p>Toiture à végétation Intensive</p> <p>Sol plus profond, besoin d'un système d'irrigation, conditions favorables aux plantes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permet l'implantation de nombreuses variétés de plantes et d'habitats • Bonnes propriétés isolantes et meilleure capacité de rétention des eaux • Peut simuler un jardin naturel, avec des étangs, des abris pour les oiseaux et même des potagers • Permet des loisirs récréatifs, peut être très attrayant • Durée supérieure de la membrane 	<ul style="list-style-type: none"> • Ajoute plus de poids au toit • Besoin d'irrigation et de système de drainage (besoin de plus d'énergie, d'eau, de matériel, etc.) • Coût plus élevé • Un système plus complexe et plus d'expertise est requise

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des toitures végétales extensives et intensives

Source : Adaptation tirée de *Des toitures vertes et des billets verts : un nouveau secteur d'activités au Canada SCHL 1998*

1.3.6 Les atouts des toitures végétalisées :

1.3.6.1 Un atout pour l'amélioration des conditions climatiques en ville :

Les toitures végétalisées peuvent participer à réduire les pics de température estivale et à améliorer les conditions climatiques.

Plusieurs phénomènes sont en jeu avec la végétation. Le premier est l'évapotranspiration, Cette dernière qualifie la transformation d'eau liquide en vapeur d'eau qui a lieu lors de la photosynthèse ou lors de la régulation thermique des tissus de la plante. Cette évapotranspiration consomme de l'eau liquide qui est prélevée dans le sol et qui sera diffusée grâce à la plante dans l'air ambiant sous forme de vapeur d'eau. Ce processus consomme de l'énergie, cette dernière sera prélevée dans l'environnement et participera à son refroidissement. (Figure 20)

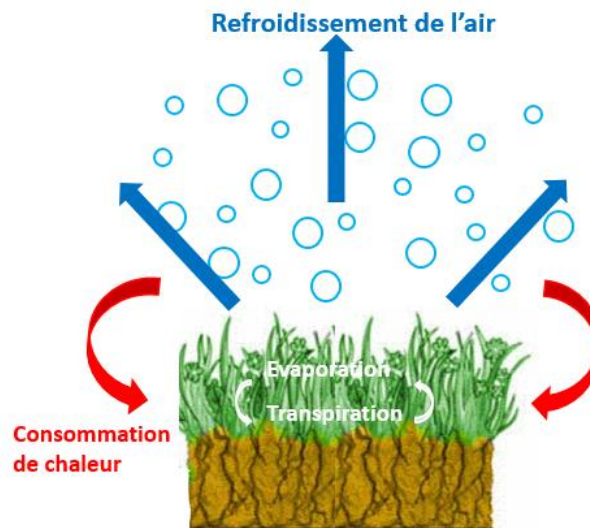


Figure 18 : comportement d'une végétale face au phénomène d'évapotranspiration

Le deuxième phénomène lié à la volumétrie de la végétation, cette dernière permet de créer un ombrage qui sera tributaire de la densité foliaire. L'impact de cet ombrage se constatera aussi la nuit de façon différée, en effet les portions qui ont bénéficié d'un bon niveau d'ombrage pendant la journée ne s'échaufferont pas et ne stockeront pas d'énergie solaire. Le soir ces espaces resteront froids et ne participeront pas à l'ICU.

1.3.6.2 La toiture végétalisée, un atout pour la qualité de l'air urbain :

Les émissions de Carbone et les activités de la communauté urbaine sont responsables d'émission de gaz à effet de serre qui entraînent de fortes concentrations d'ozone, extrêmement nocives pour la santé.

Le processus de la photosynthèse, est un effet positif de la végétation sur la qualité de l'air en milieu urbain ; elle fixe le Carbone et le CO₂ et produit de l'oxygène.

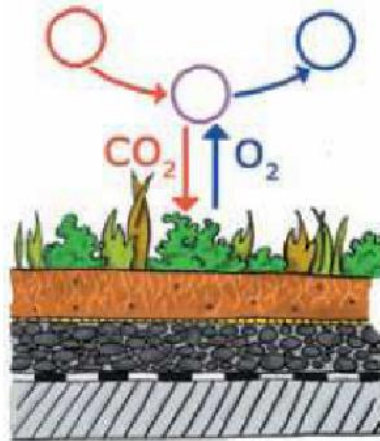


Figure 19 : phénomène d'absorption du CO₂ par la végétation

Source : direction de l'urbanisme de Paris

Du point de vue des composés chimiques (diminution des concentrations de CO et CO₂, apport d'oxygène, filtration de polluants atmosphériques tel le dioxyde de soufre ou l'oxyde d'azote) mais aussi du point de vue de la fixation des poussières et des pollens. En effet, l'évapotranspiration engendrée par les terrasses plantées élève l'humidité de l'air et favorise donc la formation de rosée, indispensable à la fixation des poussières et des pollens en suspension dans l'air. Les particules de plomb, de carbone, les matières organiques particulaires ou de faible densité sont fixées dans le substrat ou nourrissent les bactéries, plantes et insectes qui s'y développent.



Figure 20 : phénomène d'absorption des poussières par la végétation

Source : direction d'urbanisme de Paris

1.3.6.3 La toiture végétalisée, un facteur de rétention des eaux de pluies :

Les toitures végétalisées représentent une réponse efficace pour la réduction des espaces imperméables par sa forte capacité de rétention des eaux de pluies.

Une fois stockée, l'eau est pour une part utilisée par les plantes, pour une autre libérée par évapotranspiration. Le restant sera évacué graduellement par les canalisations, limitant ainsi les forts débits d'eaux pluviales tels que ceux engendrés par les pluies d'orage et le risque de saturation des réseaux d'assainissement (figure 22). Les toitures végétalisées provoquent un retard d'écoulement de 50 à 75% lors de pluies d'orages. (CSTB⁶).

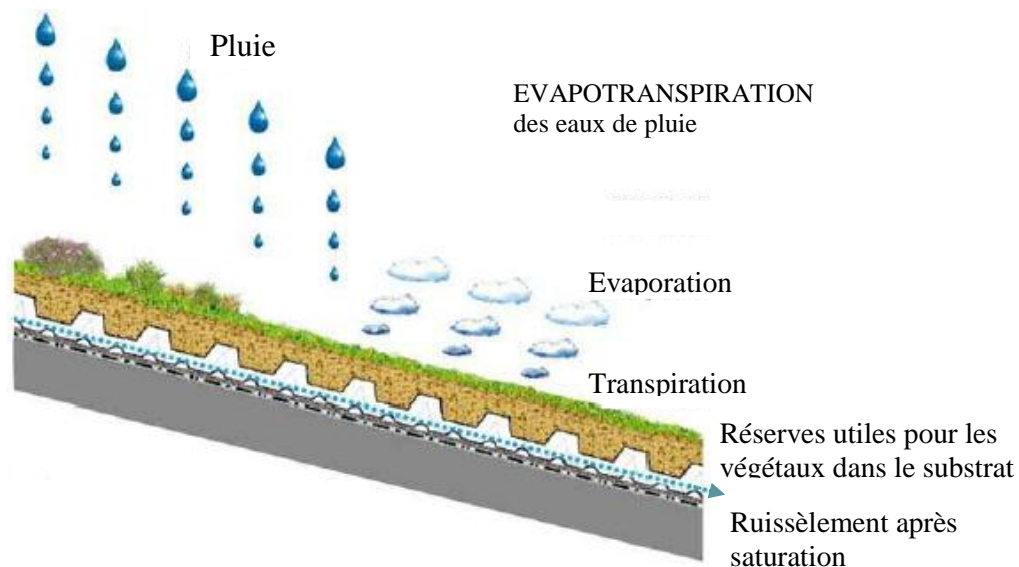


Figure 21 : Rôle de rétention des eaux des toitures végétalisées

(Source : Ecovégétal)

1.3.6.4 La toiture végétalisée, un isolant phonique :

La toiture végétalisée contribue à la réduction des nuisances dues aux trafics routier et aérien. Une couche supplémentaire sur le toit des bâtiments, elle permet en effet de diviser au moins par deux les nuisances sonores urbaines et aériennes.

Un substrat de 12 cm d'épaisseur peut réduire les bruits de 40 dB à 50 dB⁷.

⁶ CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

⁷ Objectif exprimé dans le Projet d'aménagement et de développement durables de Nice.

1.3.6.5 La toiture végétalisée, un isolant thermique :

La toiture végétalisée est aussi reconnue pour sa capacité d'isolant thermique, en particulier en cas de fortes. En effet, alors qu'un toit en béton peut atteindre 60 à 70°C, la toiture végétalisée ne dépasse pas 5 à 20°C. Or, la température de la toiture influe sur la température intérieure d'un logement et donc sur les éventuels besoins en climatisation.

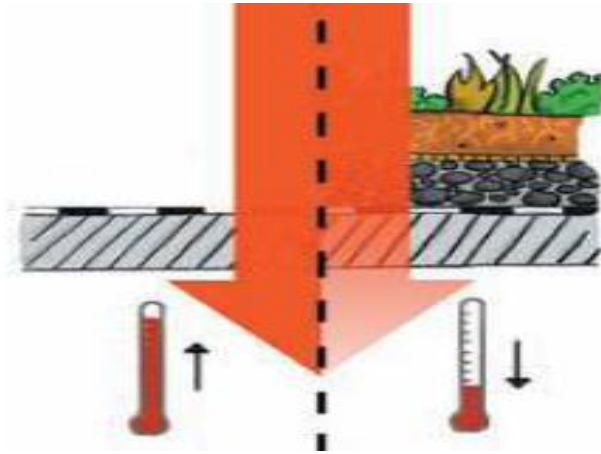


Figure 22 : Phénomène d'isolation thermique par la végétation

Source : Direction de l'urbanisme de Paris

La couche supplémentaire apportée par un toit végétal réduit aussi sensiblement les pertes de chaleur en hiver, mais cet impact est moindre que celui de la protection contre la chaleur en été.

1.3.6.6 La toiture végétalisée, un facteur d'allongement de la durée de vie des toits :

La toiture végétalisée représente une protection mécanique et permet de doubler la durée de vie de l'étanchéité du toit des bâtiments. En effet, comme cité plus haut, le caractère isolant de la toiture végétalisée permet de limiter considérablement les chocs thermiques. En outre, la couverture du toit par un complexe de végétalisation protège les membranes des rayonnements ultraviolets, responsables à eux seuls de 5% de leur vieillissement. Les contraintes subies par le système d'étanchéité du toit sont ainsi diminuées, allongeant sa durée de vie.

1.3.6.7 Un rôle dans la préservation de la biodiversité et la continuité écologique en ville :

La végétalisation des toitures participe à la production de paysages urbains vivants et au rétablissement des corridors écologiques en ville.

Les toits végétaux peuvent accueillir de nombreuses espèces d'insectes et d'invertébrés, et contribuer ainsi à minimiser la perte de biodiversité en milieu urbain. Ils sont le lieu de nouveaux équilibres naturels. Où l'on peut également y installer des ruches, ce qui permet notamment la réintroduction des abeilles en ville, indispensables à la pollinisation des végétaux.

1.3.7 Récentes avancés des toits verts :

Green Roofs for Healthy Cities (GRHC), une association sans but lucratif, effectue, chaque année. Elle publie ensuite un rapport sur la progression des toits verts construits en Amérique du Nord. Voici la figure représentant la croissance estimée des toits verts en Amérique du Nord.

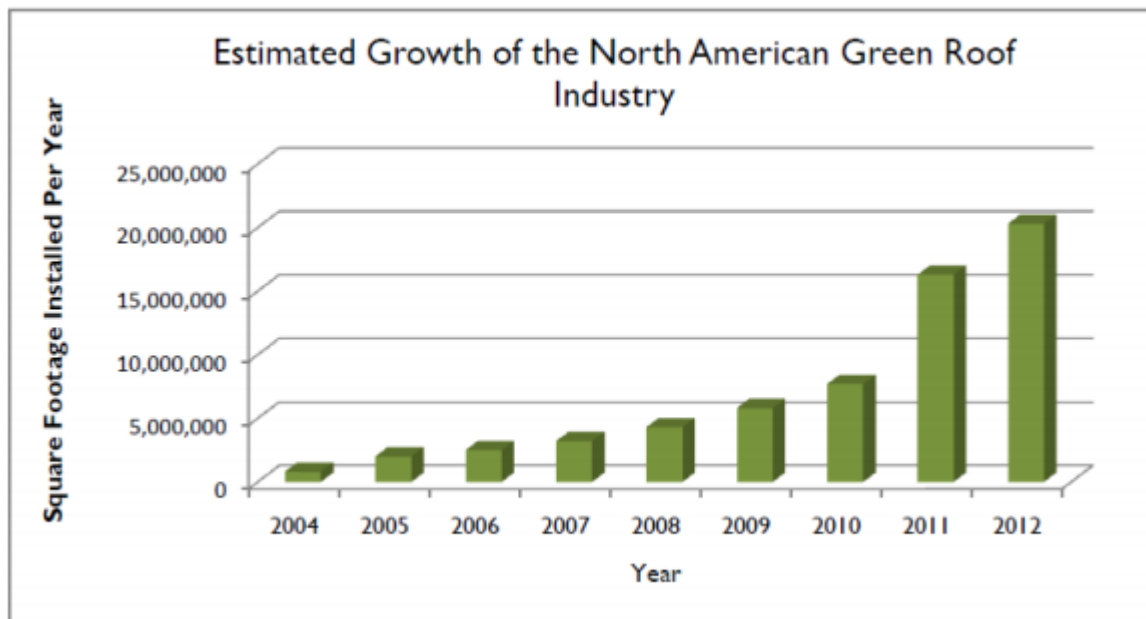


Figure 23 : Croissance estimée de l'introduction des toitures vertes en Amérique du Nord

Tirés de GRHC.2013

1.3.8 Exemples d'emploi des toitures vertes dans le monde:

Plusieurs grandes villes dans le monde ont mis de l'avant des programmes de verdissement pour combattre les problèmes environnementales liés à l'urbanisation. « Le verdissement des toits s'accélère : un million de mètres carrés de nouvelles toitures végétalisées a été construit en France en 2012, autant aux États-Unis et dix fois plus en Allemagne, pionnière dans le

domaine. A Paris, 22 hectares de toits - sur un potentiel de 80 ha - sont végétalisés. » (Garric, 2013)

1.3.8.1 Allemagne –Stuttgart

L'émergence de la conception du toit vert en Allemagne a ses origines dans la croissance du mouvement écologiste dans les années 1970. En 2003, un rapport technique de Punion européenne estimait que 14 % des toits en Allemagne étaient végétalisés (Prokop, 2011). Stuttgart a été un chef de file incontesté dans la mise en œuvre de politiques encourageant et exigeant des toits verts depuis 1986. Le cadre juridique de ces progrès a été établi dans les codes de droit fédéral de protection de la nature et de la construction (Nature et Paysage Conservation Act 5 9; Loi sur le bâtiment et de la planification 5 72). Les deux ont pour but l'amélioration de l'environnement et l'atténuation des impacts liés aux îlots de chaleur urbains. Cependant, un ensemble de politiques, de règlements et de programmes incitatifs au niveau municipal ont joué un rôle dans boom de la construction de toits verts a Stuttgart et ailleurs en Allemagne. Le directeur du Green Roof Association résume cette combinaison de facteurs comme suit (Ansel, 2009)

- La fédérale sur la protection de la Nature comprend des dispositions pour la compensation écologique qui exigent de nouveaux espaces verts pour remplacer les espaces verts et les biens environnementaux perdus à la suite du développement.

- Les toitures végétales sont souvent une option moins onéreuse que la protection des espaces verts dans l'arrière-pays et fournissent des prestations sociales, écologiques et financières multiples dans une plus grande proximité des impacts environnementaux d'origine;

- Les réglementations locales dans de nombreuses grandes villes allemandes, comme Stuttgart, imposent, comme condition au développement, l'installation de toits verts lorsque cela est techniquement possible (pour les toits dont la pente est inférieure a20%

- Les subventions financières directes par le gouvernement sous forme de subvention de démarrage peuvent s'élever de 10 a 20 euros /m de toit vert. Les subventions incitent certains propriétaires de propriétés privées ou commerciales à installer volontairement des toits verts. Ces subventions sont accordées pour les projets a valeur ajoutée, autres que ceux qui sont imposés comme condition au développement. Au cours des dernières années, le gouvernement fédéral a aussi développé d'autres sources de financement pour les toits verts visant à réduire les émissions de CO2 et la consommation d'énergie. A Stuttgart, le personnel de la Ville offre une consultation gratuite pour le développement de toit vert, et l'intérêt et la

demande est forte ; en mai 2009, il y avait des demandes de financement en attente pour 4000 m² de toit vert.

1.3.8.2 États-Unis - Chicago, Illinois Chicago,

De par son climat et sa densité, fait face à des îlots de chaleur urbains et de pollution de l'air. De nombreux décès y sont attribués à la chaleur (Lawlor, G, 2006a). Malgré cela, elle ambitionne, tout de même, de se qualifier a ville durable dès 2015 ». Pour atteindre cet ambitieux objectif, Chicago a mis en place un centre d'information, le Chicago Center for Green technologies, rassemblant de documentation sur les différentes techniques vertes, dont le toit vert et des spécialistes disponibles six jours par semaine (City of Chi go, 2014). Le processus de traitement des demandes de permis est accéléré, et une réduction des frais est possible pour les bâtiments écologiques comme ceux qui comportent un toit vert.

1.3.8.3 Ilot de chaleur urbain à Montréal : Renforcer le patrimoine vert

Le Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 du gouvernement du Québec visait notamment l'adaptation des communautés aux changements climatiques. Au cours des années 2011 et 2012, plusieurs projets de création d'îlots de fraîcheur ont été mis en place dans divers arrondissements de la ville incluant, entre autres, des actions de végétalisation et d'aménagements de cours d'écoles, de terrains sportifs et de stationnements. Ces projets avaient aussi comme objectif de favoriser l'accroissement de la végétation et des surfaces réfléchissantes.

Afin d'évaluer les retombées de ces mesures de lutte aux ICU de manière concrète. Leur expertise a permis d'évaluer la performance des mesures d'atténuation des ICU de certains projets de démonstration dans la région de Montréal. Six projets et sites spécifiques ont été sélectionnés, assurant la représentativité de divers milieux, dans le but de quantifier les impacts des réaménagements. Cette évaluation est une première au pays dans le domaine des prévisions environnementales urbaines. Elle a permis l'acquisition de connaissances et le développement de méthodes pertinentes contribuant à améliorer les nouveaux projets de lutte aux ICU.

Projet	Ville
<u>Verdun fait sa fraîche</u>	Verdun, Montréal
<u>Place fraîcheur à l'école Calixa-Lavallée</u>	Montréal-Nord, Montréal
<u>Verdissement du pôle d'Entraide</u>	Brossard
<u>Vague de fraîcheur du Palais Culti-Vert</u>	Ville-Marie, Montréal
<u>Îlots de fraîcheur urbains : Les écoles d'abord</u>	Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, Montréal
<u>Effet de terre aux Habitations Jeanne-Mance</u>	Ville-Marie, Montréal

Tableau 3 :Liste des projets évalués

Source : Environnement Canada (2014). Les liens hypertextes mènent à la description des projets sur le site Web

Les résultats des modélisations numériques de surface montrent que l'effet rafraîchissant des modifications des sites apparait davantage la nuit lorsque les matériaux relâchent l'énergie accumulée durant le jour.

Les résultats de l'étude montrent l'efficacité de plusieurs interventions mises en place pour réduire l'effet d'ICU (réduction de la surface bétonnée, végétalisation, etc.), mais pas de toutes. Certaines devront être priorisées afin de réaliser le plus de gains de fraîcheur possible. Cette étude permet finalement de conclure que la superficie des projets doit être suffisamment importante pour obtenir un effet significatif et mesurable avec les outils existants.

1.3.8.4 Canada - Toronto

Toronto avait comme objectif de s'attaquer à la réduction des îlots de chaleur urbains et au remplacement d'espaces verts perdus. Elle est la première ville d'Amérique du Nord à s'être dotée d'un règlement qui exige et règlemente les toits verts pour les nouveaux développements. Ce règlement a été adopté par le conseil de la Ville de Toronto en mai 2009. La Ville de Montréal vient tout juste d'adopter une réglementation concernant les toitures dans le but de combattre les îlots de chaleur. * Lors de la réfection complète d'un toit ou de la construction d'un nouveau bâtiment (public ou privé), le propriétaire est tenu d'installer un revêtement de toiture favorisant la réduction des îlots de chaleur urbains. » (Ville de Montréal, 2012)

Pour qu'on puisse apprécier l'impact des toitures vertes sur les îlots de chaleur urbain, une modélisation a été réalisée à Toronto en juin 2000. Selon les auteurs, si seulement 5 % des toitures de Toronto étaient végétalisées, la température globale de la ville en serait diminuée de 0,5° C. De plus, si les toits verts étaient irrigués dans un milieu de forte densité, l'effet de rafraîchissement serait de l'ordre de 1 à 2°C par rapport au scénario de base (Bass et autres, 2002). C'est dire à quel point l'irrigation a une influence sur la réduction des îlots de chaleur si nous les récoltons pour irriguer les toits.

Synthèse :

Ces connaissances des différents types et procédés de végétalisation des toits, ainsi que leurs composantes de base et les atouts d'elles offrent, confirment que les toitures végétalisées sont considérées comme étant une des solutions la plus intéressante pour lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Dans ce qui suit nous allons parler de la simulation informatique du climat ainsi que les modèles climatiques existant.

1.4 La simulation informatique :

Dans le domaine de la recherche, le terme « simulation » est très récurrent dans plusieurs domaines scientifiques. En effet, notamment pour le milieu urbain, la simulation se présente aujourd'hui comme un moyen incontournable pour développer une méthodologie permettant de matérialiser la relation entre la morphologie urbaine et le climat.

Il existe de multiples programmes et logiciels qui permettent de représenter graphiquement la morphologie urbaine, qu'elle soit existante ou en projet, en tenant compte de la complexité des formes qui la composent. Ils peuvent être classés selon leur échelle spatiale, qui peut aller de kilomètres à quelques centimètres. Souvent, ils sont développés afin d'étudier des phénomènes liés à la climatologie urbaine, comme par exemple le phénomène de l'îlot de chaleur urbain, exigent une résolution spatiale importante qui correspond à une échelle d'environ ~ 1/500.

L'outil de simulation pour l'étude des questions climatiques en milieu urbain confère un avantage important en comparaison avec les mesures globales in-situ. La capacité de traitement de multiples variables de l'espace urbain ainsi que de différents phénomènes climatiques, rendent leurs usages de plus en plus courants. Cet outil permet de modéliser avec précision les champs de vitesse et de température autour d'un ou plusieurs bâtiments, d'évaluer le confort des piétons en milieu urbain et d'étudier l'impact d'espaces végétaux sur la

température de l'air en ville ou l'influence de l'environnement extérieur sur les performances énergétiques des bâtiments.

Enfin, la simulation pourrait contribuer par des résultats virtuels à une meilleure aide à la décision, à la planification urbaine et à la satisfaction des exigences contemporaines de confort thermique et d'efficacité énergétique.

1.4.1 Les Modèles de simulation climatiques :

Les modèles qui simulent l'échelle locale ou l'échelle du quartier sont caractérisés par un maillage relativement fin, qui permet une description précise du cadre bâti afin d'aboutir à une représentation des qualités climatiques les plus proches du réel. Nous allons présenter trois modèles LUMPS, SOLENE et ENVI-met :

1.4.1.1 LUMPS

Le modèle LUMPS (Local Scale Urban Meteorological Parametrization Schene) consiste en une série d'équations permettant de calculer les flux de chaleurs dans l'environnement urbain à l'échelle locale, à savoir le flux de stockage, ainsi que les flux de chaleur sensible et latente, (Ringebach, 2004)

Les effets du vent et des sources importantes de chaleur anthropique sont mal pris en compte, et que dans les situations où ces variables sont importantes, LUMPS ne peut être utilisé.

1.4.1.2 SOLENE

Logiciel thermo-radiatif a été élaboré par le CERMA⁸. Il peut être appliqué à un modèle 3D de la géométrie urbaine détaillé, pas besoin de simplifier. Il permet de simuler pour tous les points de la géométrie reproduite les différents flux du bilan radiatif et la température de surface.

Il se base sur un système ouvert de questionnement solaire, lumineux et thermique organisé autour de fonctions de simulation, il travaille à une échelle plus réduite, celle d'un ensemble urbain donné par sa volumétrie. Par contre Il ne prend pas en compte le flux de chaleur latente et de chaleur anthropique et n'intègre pas les bilans hydriques. (Ringebach, 2004), (Colombert, 2008). Une application du modèle sur un quartier de Marseille, et la ville de Strasbourg,

⁸ CERMA : Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture de Nantes.

1.4.1.3 Envi-met (Environmental Meteorology)

Ce modèle a été développé au département de géographie de l'université de Bochum en Allemagne par Michael Bruse (1998). Il simule les interactions entre différentes surfaces urbaines, la végétation et l'atmosphère ; il permet d'analyser l'impact des modifications de l'environnement urbain sur le microclimat, (Colombert, 2008).

ENVI-met est un modèle 3D non hydrostatique qui s'appuie sur une grille géométrique. La résolution maximale est de 250x250x25 mailles, ce qui permet de couvrir une zone de 1km x 1km l'équivalant d'un quartier. « Il calcule l'écoulement du vent autour des différentes structures urbaines ainsi que les autres variables associées au bilan d'énergie et aux processus de transfert atmosphérique (calcul des ombres, de la réflexion, de la turbulence, de l'évaporation des plantes, etc. »(Colombert, 2008).

L'interface est simple d'utilisation, permet d'entrer les différents paramètres de simulation à savoir l'implantation du bâti, la hauteur des bâtiments, emplacement et type de végétation, nature de sols, etc. La simulation qui peut être effectuée sur un ordinateur de bureau, peut prendre entre quelques heures et quelques jours selon la modélisation effectuée, (Colombert, 2008).

ENVI-met est accessible gratuitement pour des raisons d'étude et de recherche scientifique (site web : www.envi-met.com) ; il est accompagné d'un outil de visualisation (LEONARDO) permet de visualiser les résultats en 2d et en 3d.

Synthèse

Selon les caractéristiques et l'échelle de notre site d'investigation, nous pouvons conclure qu'ENVI_MET est le plus adapté à notre recherche.

Conclusion

Ce chapitre nous a fourni un support théorique sur quatre thématiques de base pour notre travail ; à savoir le microclimat, l'ICU, les toitures végétalisées et la simulation informatique.

En ce qui concerne le microclimat urbain. Cette partie nous a permis d'exposer les paramètres influençant le microclimat dans un milieu urbain.

Pour ce qui est de l'îlot de chaleur urbain ICU : nous allons présenter les facteurs aggravants l'ICU, leurs impacts et les différentes mesures pour lutter contre ce dernier.

Pour ce qui est des toitures végétalisées : dans cette partie, nous avons exposé les composants, les types et les atouts d'une toiture végétalisée.

Pour ce qui est de la simulation informatique : nous avons pris connaissance de ce type d'évaluation climatique et les modèles qu'elles offrent.

Chapitre 2

Cas d'étude et méthodologie

Introduction

La thématique de l'environnement est devenue une thématique d'actualité due au changement climatique que le monde entier a connu. De nombreuses études ont été réalisées dans cette perspective. En Algérie un nombre limité d'étude été réalisé. On cite les travaux d'Achour-Bouakkaz (2006) où elle établit la relation entre l'îlot de chaleurs urbains et la densité du plan bâti à Alger. Ainsi le travail de Atik Tarik (2011) dont l'objet est d'estimer la contribution des toitures vertes dans l'amélioration du microclimat et du confort thermique dans la ville d'Alger. Et le travail de (Daoudi,N ; Lamraoui,S ; Mestoul,D, 2015) dont l'objet est de requalifier les espaces verts algérois par la mise en évidence de leur capacité d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain par l'effet bénéfique de l'îlot de fraîcheur urbain.

Dans le but de continuer sur les résultats et les perspectives des travaux de recherches citées auparavant. Nous avons choisi de conduire cette recherche dans le centre-ville d'Alger et plus précisément à l'hôpital CHU Mustapha Pacha.

Dans ce chapitre nous allons justifier en premier lieu présenter la ville d'Alger et faire par la suite une projection des paramètres microclimatiques déjà expliqué dans le premier chapitre sur la ville d'Alger. Nous allons aussi présenter le cas d'étude et ses différentes caractéristiques.

Ensuite, nous allons présenter la description du logiciel qui nous servira pour la simulation et le traitement de l'effet des toitures vertes.

2.1 Présentation de la ville d'Alger :

Capitale du pays, elle est limitée par la mer Méditerranée au Nord, la Wilaya de Blida au Sud, la Wilaya de Tipaza à l'Ouest et la Wilaya de Boumerdes à l'Est. Le relief se caractérise par trois zones longitudinales: Le Sahel, le littoral et la Mitidja. Le territoire de la Wilaya d'Alger s'étend sur une superficie de 1190 km².

Alger est de par son statut, sa taille, ses fonctions, la première ville d'Algérie. Elle comprend les plus importantes concentrations au niveau national de populations, d'activités de services, d'équipements, d'infrastructures, de centres de recherche, d'industries et de grands projets urbains. Elle est la capitale politique, administrative et économique du pays.

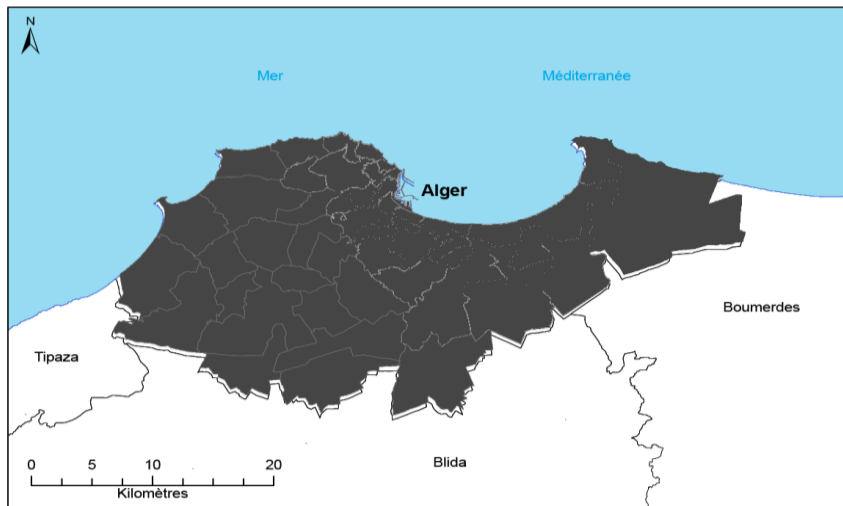


Figure 24 : carte de la ville d'Alger
Source : web

Notre choix de la ville d'Alger est basé sur les résultats de la recherche d'Achour-Bouakkaz, (2006) qui affirme la présence du phénomène d'îlot de chaleur urbain à Alger (voir annexe 01).

2.1.1 Les paramètres microclimatique de la ville d'Alger :

2.1.1.1 Paramètres météorologique:

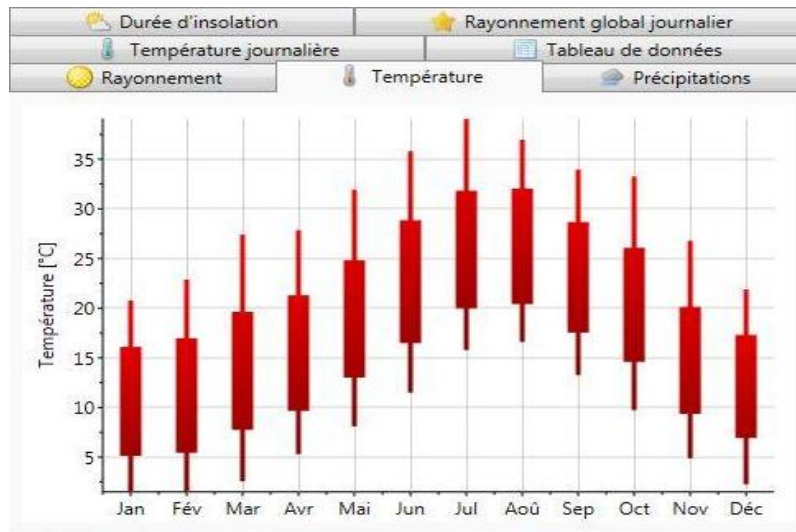
La ville d'Alger est située sur le littoral méditerranéen à 36°.43 latitude Nord et 3°.15 longitude Est ; son climat est caractérisé par un climat méditerranéen tempéré, correspondant à des hivers doux et des étés chauds.

L'hiver est plus au moins doux avec des températures moyennes aux environ de 11 °C avec un taux d'humidité relative qui peut arriver à 79%, ce qui peut causer un inconfort.

L'été, on enregistre des mois chauds, par exemple août le mois le plus chaud ; les températures d'air peuvent atteindre les valeurs maximales de 32.6 °C et un peu moins en juillet avec 31.5°C. Une durée d'insolation importante qui augmente les températures d'air et les bilans radiatifs avec un taux d'humidité important qui influe largement sur le confort d'été, (Daoudi, et al., 2015).

Une analyse climatique a été faite à partir du logiciel METEONORME.7.2 sur la climatologie de la ville.

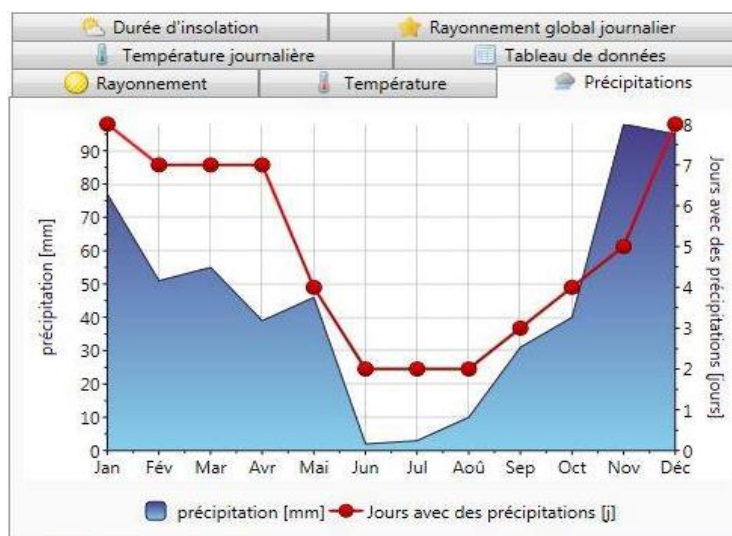
a Température :



Graph 1 : variation de la température de la ville d'Alger
Source : Meteonorme 7, 2019

On remarque que le mois d'Aout est le mois le plus chaud de l'année avec une température moyenne de 26.2°C. Tandis que le mois le froid est les mois de Janvier avec une température de 10.1°C.

b Précipitation :



Graph 2 : variation de la précipitation
Source : Meteonorme 7, 2019

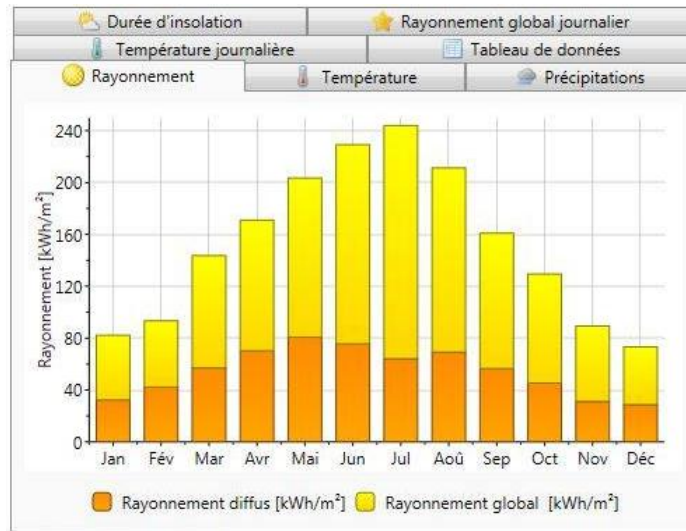
Selon la lecture du graphe, on distingue trois périodes de précipitation :

Période de forte précipitation : en mois de Décembre et Janvier arrive jusqu'à 120mm par mois.

Période d'une moyenne précipitation : en mois de Février, Mars et Avril avec une moyenne de 85mm.

Période de faible précipitation : le reste des mois de l'année (Mai, Juin, Juillet, Aout, Septembre, Octobre et Novembre), moyenne de 22.5mm.

c Rayonnement :

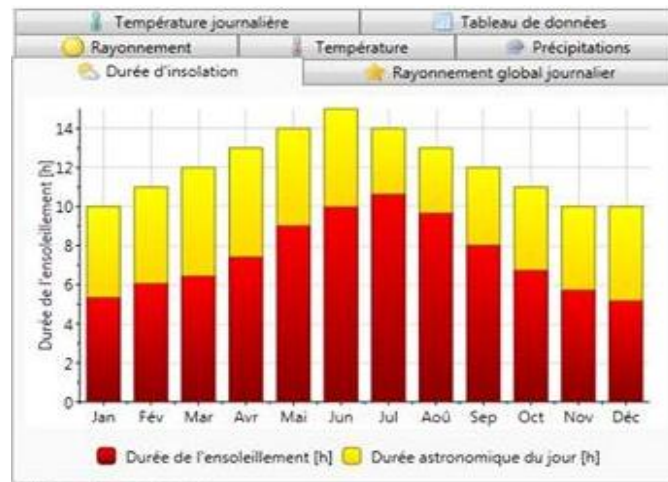


Graphe 3 : variation du rayonnement
Source : Meteonorme 7, 2019

Le rayonnement solaire global est important dans la période estivale et qui atteint sa pic dans le mois de Juillet (250 kwh/ m²).

Le rayonnement diffus est maximum au mois de Mai avec une intensité de 80 kwh/ m².

d Ensoleillement :



Graphe 4 : variation de l'ensoleillement
Source : Meteonorme 7, 2019

La durée d'ensoleillement est importante dans la période estivale arrive jusqu'à 11h en mois de juillet.

2.1.2 Les paramètres morphologiques :

2.1.2.1 La forme urbaine :

Le profil d'Alger est souvent dessiner sous une forme triangulaire, qui se développe sur une base qui donne comme une ville fortifié, un triangle dont la base donne sur la méditerranée.

Le site est globalement incliné avec une pente moyenne de 15%, en se referens a la configuration triangulaire.



Figure 25: plan topographique de la ville d'Alger
Source : auteur (2019)

La ville d'Alger a connu différentes évolution diachronique à l'époque coloniale française.

La croissance de la ville est polaire, dont le noyau est la médina, avec des réalisations intra-muros, puis d'autre extensions ont été faites suivant divers logiques.



Figure 26 : Profil d'Alger actuellement
Source : <https://www.pinterest.fr/>

2.1.2.2 Alger, un tissu compact :

La ville d'Alger a connu de nombreuses mutations surtout au niveau de l'espace urbain :

- Le découpage de la ville avec le plan en échiquier⁹, des îlots de formes régulières.
- Structuration des voies de circulation, soit par une rue, un boulevard ou une avenue.
- Espace public sous plusieurs formes : rue, place, jardin.

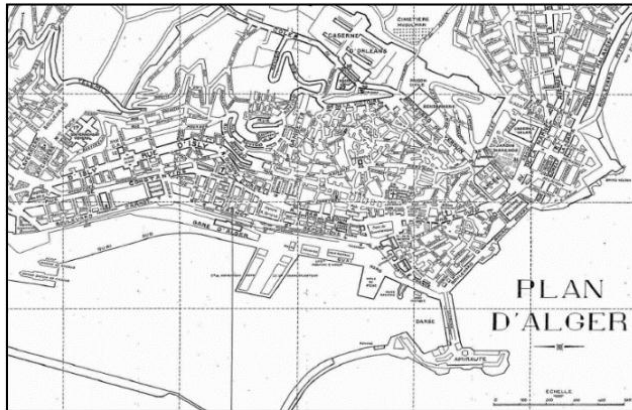


Figure 27 : Alger après la colonisation.

Source : Sakina MISSOUM : Alger à l'époque ottomane, 2003.



Figure 28 ; vue sur la ville d'Alger

Source : <https://www.pinterest.fr/>

Alger est caractérisée par un tissu compact avec une forte densité ;

Type d'habitat	CEC	COS	Principale caractéristiques
La vieille ville	0.7	1.9	maisons traditionnelles, chacune mitoyenne voies sinueuses et étroites, tissu urbain resserré et dense.
Opérations haussmannienne	0.75	4.5	tissus urbain de type colonial, multiplication de constructions mitoyennes ; unité de hauteur (R+5) génèrent des densités très élevées.
Grands ensembles coloniaux.	0.35	4.9	bâtiments barres de 14 étages, de 100 à 400 m de longueur et jusqu'à 300 appartements (F3 à F5) et 2 000 habitants / ha.
Habitat promotionnel et logements sociaux	0.3	1.8	implantés à l'alignement sur rues bordant l'îlot, les RDC sont des commerces

Tableau 4 : principale habitats du tissu urbain d'Alger

Source : HADJOU Fateh, évaluation critique des densités urbaines en Algérie, revue par Auteurs.

A partir du tableau ci-dessus on constate que :

La vieille ville et les anciennes zones urbaines centrales se caractérisent par de fortes densités bâties contrairement à la plupart des tissus urbains postcoloniaux.

⁹ Plan échiquier : un type d'organisation de la ville dans lequel les rues sont rectilignes et se croisent en angle droit, créant des îlots de forme carrée ou rectangulaire.

2.1.3 Les paramètres surfaciques :

2.1.3.1 Albédo :

Les matériaux de construction utilisés dans la ville d'Alger sont riches et variés du point de vue texture, cette propriété est représentée par la couleur et la rugosité des matériaux, qui couvrent les chaussées et les façades, et dont la valeur d'albédo de chacune d'elles fera réfléchir la quantité d'énergie solaire de manière différente, ce qui jouera un rôle primordial dans l'échauffement des surfaces et de température de l'air.

Le tableau suivant récapitule les principales valeurs d'albédo α et d'émissivité ϵ pour la ville d'Alger :

Elément	Matériau	Couleur	Rugosité	Albédo	Emissivité
Chaussées	Asphalte	Noire	Rugueuse	0.05-0.20	0.95
Trottoirs	Ciment	Grise	Rugueuse	0.1-0.35	0.92
Façades	Pierre avec peinture	Blanche	Lisse à relativement rugueuse	0.50-0.90	0.85-0.95
Toitures	Gravier	Grise	Rugueuse	0.08-0.18	0.92
	Bitume	noire	Rugueuse	0.03-0.18	0.92
Ouvertures	Persienne en bois	Bleue	Rugueuse	0.20-0.35	0.85-0.95

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des principaux matériaux avec leurs albédos et émissivité correspondants.

Source : O.K.E.T.R, 1978, (traitée par auteur).

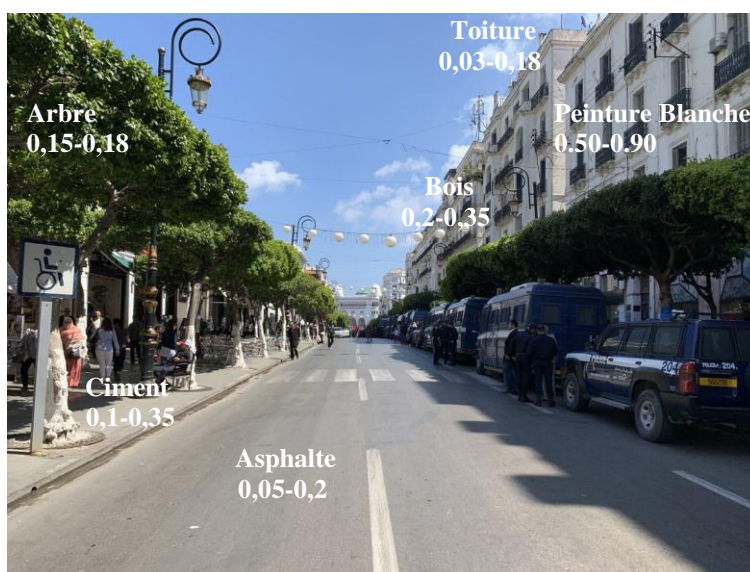


Figure 29 : Albédo dans la ville d'Alger

Source : auteur

2.1.4 Paramètres énergétiques :

2.1.4.1 Source de chaleur anthropique :

Alger par son statut capital, elle est le pôle des majorités des activités industrielles et économiques. Ces activités influent sur l'atmosphère par la production de la chaleur. Alger est aussi connu par son flux mécanique important.

Ces fonctions affectent négativement sur la ville puisqu'elles produisent de la chaleur anthropique.

2.2 Présentation du cas d'étude :

Le CHU Mustapha Pacha situé au centre-ville d'Alger dans la commune de Sidi M'hamed. Il est le plus grand hôpital urbain d'Alger dans la carte sanitaire nationale. Il est une référence, par son envergure, son histoire et le panel de praticiens de renommée nationale qui y exercent. Il comporte une cinquantaine de bâtiments et des espaces libres aménagés en allées et espaces verts. Un axe central structurant, l'avenue Salem Bouznad est aménagée en végétation et de part et d'autre sont disposés les pavillons.

L'hôpital est entouré d'une clôture et limité: au nord par le chemin Chaaf Tahar et le chemin de la ronde, au sud par l'avenue colonel Ali Mellah, à l'est la rue Ayoub Seddik et à l'ouest la rue Abdallah Harrou (Figure 31).

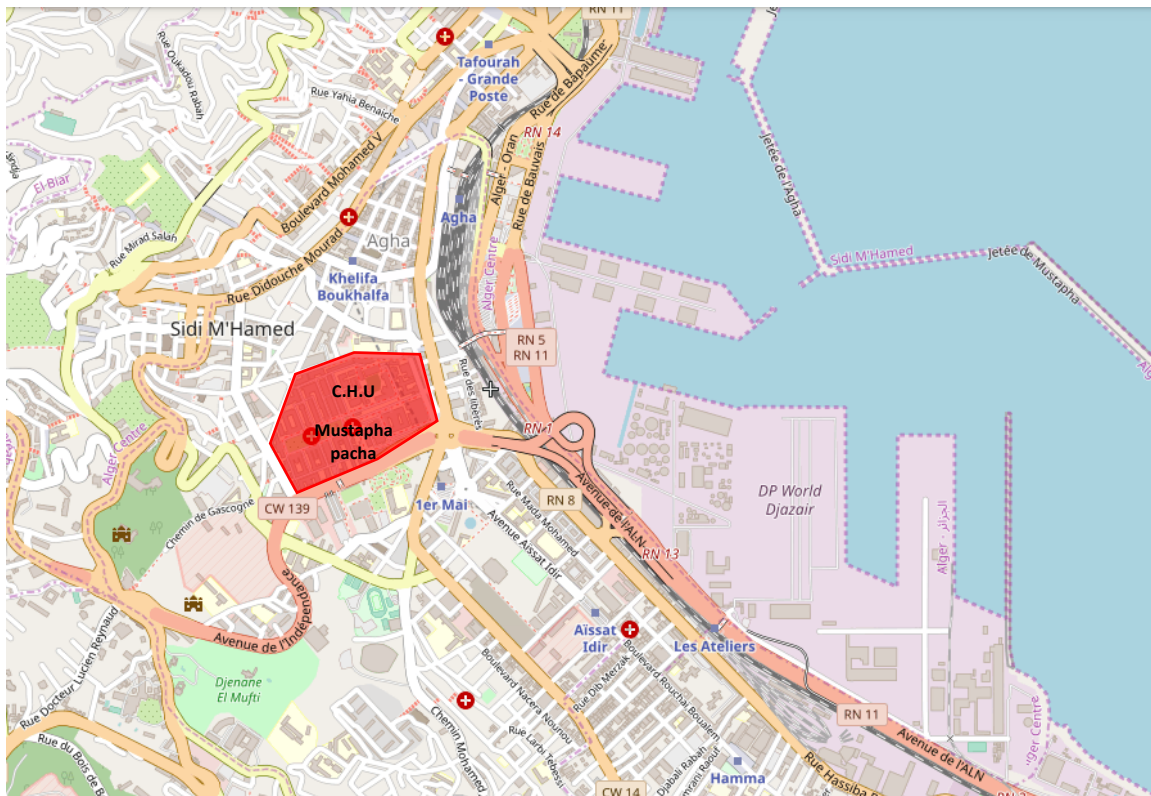


Figure 32 : Plan de situation de l'hôpital Mustapha Bacha à Alger

Source : www.wikimapia.org (adapté par Auteur)

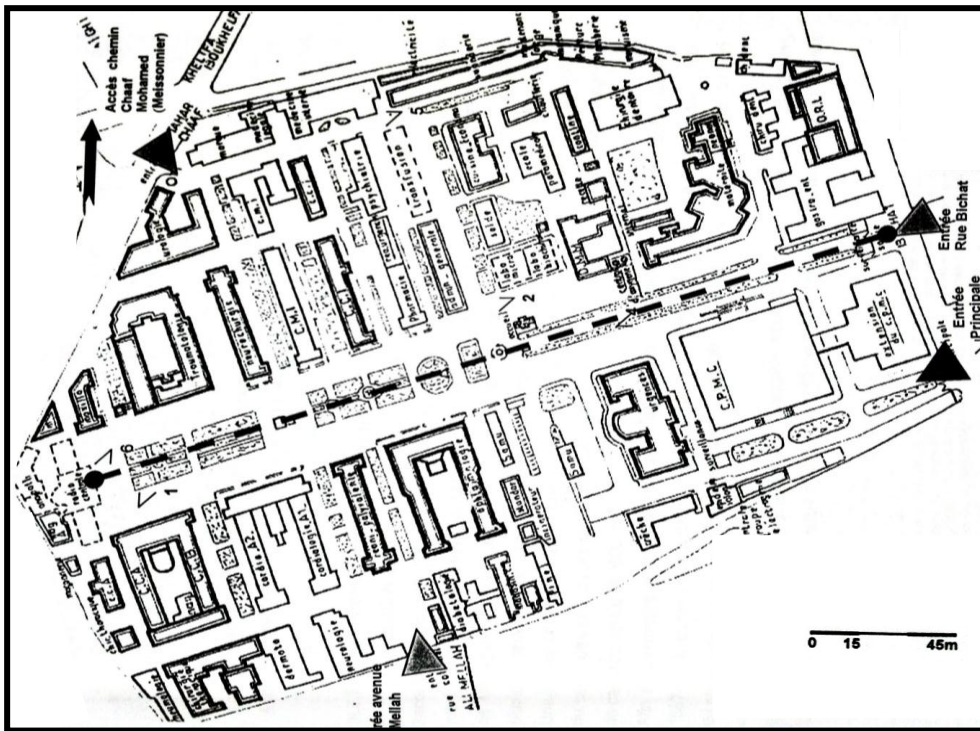


Figure 33 : Carte de l'Hôpital CHU Mustapha Bacha,

Source : plan dressé par Benchaba -Architecte

2.2.1 Aperçu historique :

À son édification en 1854 sur 8 hectares, l'hôpital était réservé exclusivement aux militaires. Quelques années plus tard, il est ouvert aux civils par la mise en place des services de pédiatrie et d'obstétrique. Son évolution s'est faite en deux parties, la 1^{ère} du côté ouest s'est développée selon un module de base alors que pour la deuxième partie est réalisée ultérieurement. Depuis, il ne cesse de s'agrandir sans se moderniser pour autant. Aujourd'hui, sa superficie est de 12 hectares.

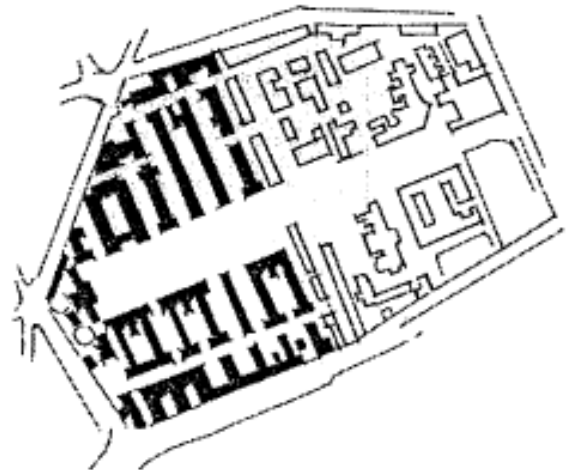


Figure 34 : schéma de l'hôpital Mustapha

Source : Hammouni Z. (2007) selon Amrouche Z

2.2.2 Caractéristiques du site d'étude :

2.2.2.1 Configuration urbaine :

- Cette structure de santé est de type pavillonnaire. Il est composé de plusieurs pavillons séparés par des voies hiérarchisées et des espaces verts. Il est matérialisé par des bâtiments en forme de barre et des blocs rigides sous forme d'îlots introvertis.
- Il se trouve en plein centre-ville d'Alger sur une pente relativement douce.
- Typologie urbaine irrégulière.
- Différence dans le gabarit est aussi un paramètre intéressant pour notre recherche, car cela nous permettra d'évaluer l'effet des toitures vertes sur le microclimat pour les différents gabarits. Les gabarits de l'hôpital Mustapha Pacha varie entre les différents pavillons de R+1 à R+3.



Figure 35 : carte des gabarits

Source : auteur

2.2.2.2 Les espaces extérieurs :

Les espaces extérieurs présentent environ 35% de la surface totale de l'hôpital Mustapha Pacha. Ils sont représentés par les allées, les espaces verts et les espaces de stationnement et parking. (Hammouni, 2007)

a Les allées :

L'hôpital Mustapha Pacha est structuré par un réseau de voirie interne hiérarchisée ;

- Les allées principales : des dimensions importantes en termes de largeur. Elles traversent l'hôpital de bout à l'autre. Elles sont bordées par une importante végétation qui est un élément de repère pendant le jour, de même l'éclairage

présente un élément de repère pendant la nuit. Elles connaissent un important flux mécanique et piétons.

- Les allées secondaires : caractérisées par des dimensions, de flux et de végétation moins importantes.



Figure 36 : Allée principale de l'hôpital Mustapha montre l'important plus mécanique et piéton.

Source : auteur, (2019)

b Les espaces verts :

Les espaces verts constituent un atout à l'hôpital Mustapha, ils sont souvent servis comme un espace d'attente pour les usagers.

La végétation du site se développe d'une manière appréciable au niveau de l'axe principal de l'hôpital, des arbres de types ficus *Myrcophylla*¹⁰ prennent cette place, avec la présence d'autres types d'arbres tels que le palmier, le cyprès, le sapin...

¹⁰ Le *Ficus macrophylla* : est un arbre de grandes dimensions à feuillage persistant, qui peut atteindre 60 mètres de haut. C'est une plante typique des forêts pluviales.



Figure 37 : Végétation au niveau de l'axe principale de l'hôpital
Source : auteur



Figure 38 : Photo aérienne qui montre la présence de la végétation au niveau de l'hôpital Mustapha Pacha
Source : Google Earth

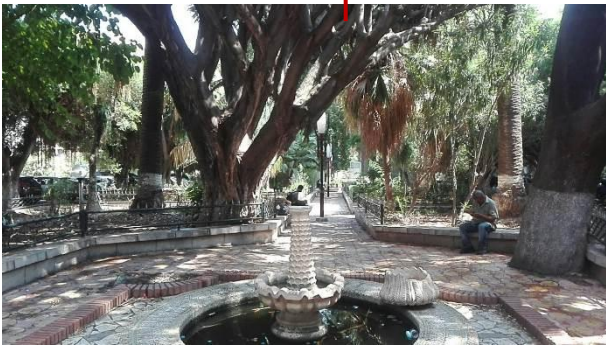


Figure 39 : Végétation au niveau de l'axe principale de l'hôpital
Source : auteur

c Aires de stationnements :

Les parkings et les aires de stationnement sont très nombreux. Ils arrivent jusqu'à limites des blocs. L'hôpital connaît un important flux mécanique.

Selon une norme italienne ; un volume de $10m^3$ correspond à une place de parking, cependant à l'hôpital Mustapha le volume totale de l'air de stationnement correspond à $720.000m^3$ qui estime 72.000 places de stationnements (Hammouni, 2007). Cette normes est dépassé et de beaucoup dans le cas de l'hôpital Mustapha Pacha.



*Figure 40 : l'entrée mécanique à l'hôpital Mustapha pacha
Source : auteur*

Synthèse :

Dans cette partie, nous avons présenté le site d'étude, les critères du choix ainsi les caractéristiques de ce site. Pour la deuxième partie qui se suit nous allons présenter le logiciel de simulation ENVI-Met.

2.3 Présentation du logiciel Envi-Met :

Envi-met est un modèle qui a été développé au département de géographie de l'université de Bochum en Allemagne par Michael Bruse (1998). Envi-met permet de créer un modèle tridimensionnel et de simuler les phénomènes microclimatiques.

Son nom est tiré du terme « Environmental meteorology » et il est utilisé dans divers domaines tel que la géographie, l'économie et la gestion urbaine etc.

Il simule les interactions entre différentes surfaces urbaines ; le sol, les surfaces, la végétation et l'atmosphère. Visible en figure ci-contre

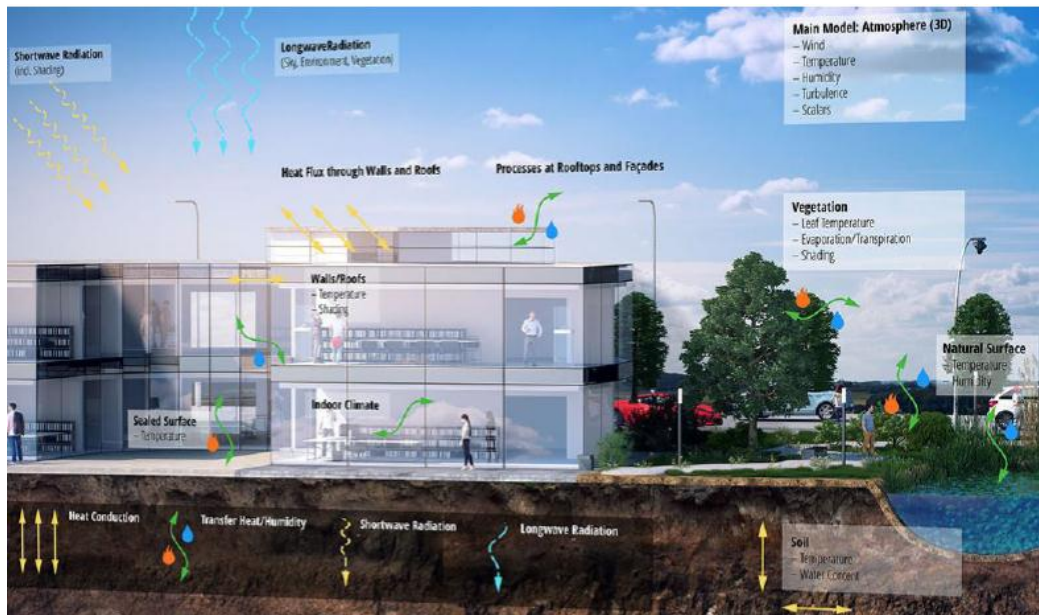


Figure 41 : Les interactions calculées par Envi-met,

Source : <http://www.envi-met.com>

Il permet d'analyser l'impact des modifications de l'environnement urbain sur le microclimat (Colombert, 2008).

ENVI-met est un modèle 3D non hydrostatique qui s'appuie sur une grille géométrique. La résolution maximale est de 250x250x25 mailles, ce qui permet de couvrir une zone de 1km x 1km l'équivalant d'un quartier. « Il calcule l'écoulement du vent autour des différentes structures urbaines ainsi que les autres variables associées au bilan d'énergie et aux processus de transfert atmosphérique (calcul des ombres, de la réflexion, de la turbulence, de l'évaporation des plantes, etc.) », (Colombert, 2008).

ENVI-met est accessible gratuitement pour des raisons d'étude et de recherche scientifique (site web : www.envi-met.com) ; il est accompagné d'un outil de visualisation (LEONARDO) permet de visualiser les résultats en 2d et en 3d.

2.3.1 Avantages de logiciel Envi-Met :

Envi-met offre une multitude d'avantages dont on cite ceux relatifs à notre recherche :

- La simulation dynamique du microclimat avec un cycle journalier.
- Le traitement de plusieurs structures urbaines : bâtie avec différentes configurations, possibilité d'utiliser plusieurs type de végétation et calculer l'effet de l'ombre d'évapotranspiration et de photosynthèse, et enfin il propose différent type de sol.
- La haute résolution spatiale et temporelle est utilisée par le logiciel.
- Le nombre des entrées nécessaires pour la simulation est limité alors que celui des sorties est illimité.

ENVI-met permet le calcul de:

- Les ondes de radiation Courtes et longues avec le respect d'ombre, la réflexion et la radiation dissipée depuis les bâtiments et la végétation ainsi que les températures surfaciques de chaque point de la grille
- Eau et échange de chaleur à l'intérieur du sol
- Transpiration, Evaporation et la chaleur sensible émise par la végétation et d'autres paramètres physiques propres aux plantes.
- Le calcul des paramètres bioclimatiques tels que la température radiante moyenne (Mrt) et la valeur du PMV.
- Dispersion des gaz et des particules intérieurs en incluant la sédimentation des particules de surfaces des feuilles de plantes.
- Constructions, végétations, sol/surfaces et les sources de polluants peuvent être placés à l'intérieur du modèle à côté des surfaces naturelles et artificielles.

2.3.2 Limites du logiciel ENVI_MET 4.4.3

Malgré ses avantages Envi-met a aussi des limites dont on cite :

- Durée de simulation importante, de 24h à 48h dans le cas de nos différentes simulations
- Complexité de visualisation des résultats et sous forme limités.

D'autres cités par (Atik, 2011) :

- La configuration obligatoire d'un terrain plat et des toitures horizontales
- Les outils de création de l'environnement urbain sont limités aux bâtiments, matériaux de sols/trottoirs et arbres/végétation et il n'y en a aucun outil pour créer d'autres objets en tant que structures indépendantes des éléments bâtis.
- L'eau dans le milieu urbain et naturel représenté par ENVI-met comme un type de sol, il ne prend pas en charge l'eau animé comme les fontaines et jets d'eau.
- Le nombre de plantes et d'arbre proposé est limité (24 au total).

2.3.3 Description du logiciel :

Afin de lancer une simulation par Envi-met deux principaux fichiers d'entrées (Input) doivent être préparés, le premier c'est le fichier éditeur (.in) et le deuxième fichier de configuration (.cf) qui comportent les différentes données relatives au site et les circonstances de la simulation

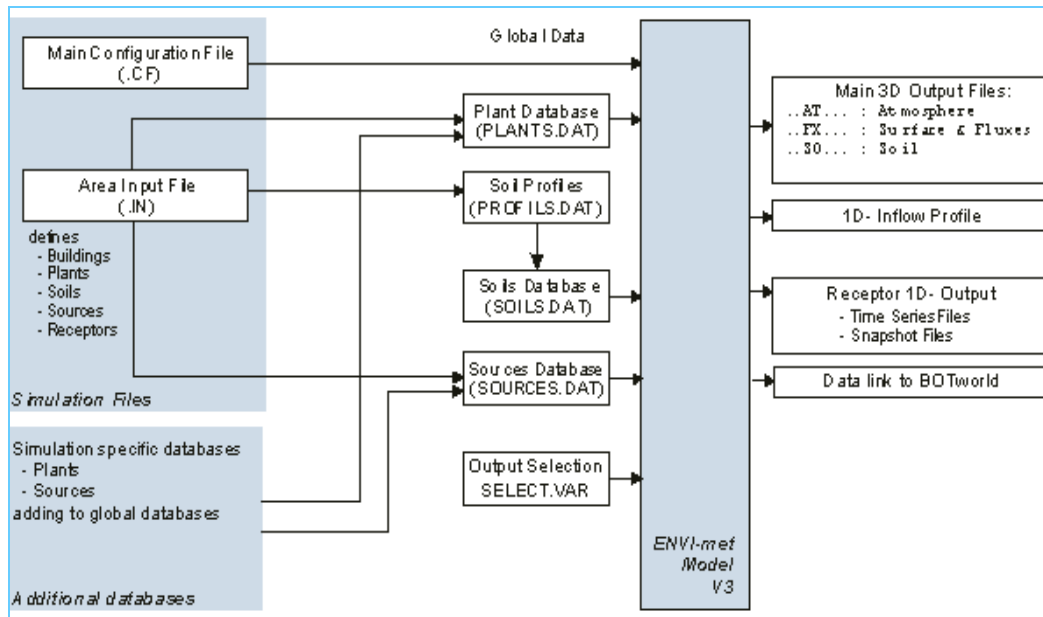


Figure 42: Schéma de base des entrées et des sorties du logiciel
Source : ATIK (2011)

2.3.3.1 Données d'entrée (Inputs) :

a Fichier éditeur :

Le fichier éditeur (.in) contient le model à simuler, donc c'est la représentation du model urbain tel qu'il est à la réalité dans les trois dimensions.

Il est nécessaire d'introduire les informations suivantes :

- **Editeur construction/végétation**
- Projeter les constructions en déterminant leurs hauteurs ainsi que tous les éléments saillants.
- La projection des différents types de plantes existantes.
- Pour Envi-met les plantes ne sont pas de simples obstacles physiques face au vent et aux radiations solaires : Ce sont des corps biologiques qui interagissent avec l'environnement par des échanges thermiques et évaporatifs. (Atik, 2011)
- **Sources** : Définir les différentes sources qui se trouvent tel que :
 - "CO", "CO2", «NO", «NO2, "SO2", "NH3", "H2O2".
- **Récepteur** : Envi-met peut projeter jusqu'a 100 récepteurs. Ce sont des points qui donnent les paramètres d'un point à l'intérieur du model simulé de Z=0 jusqu'à Z max

b Fichiers de configurations C.F (*.cf)

Ce sont des fichiers textes qui décrivent les caractéristiques principales de la simulation.

- Noms des fichiers entrées/sorties.
- Nom de la simulation.
- La date et la durée de la simulation, l'intervalle de temps
- Les paramètres climatiques : Température atmosphérique initiale, humidité spécifique, humidité relative.
- Adresse du fichier des données PLANTS.DAT

Données propres à l'espace urbain :

- Situation géographique (longitude, latitude)
- L'intervalle du temps pour la mise à jour des paramètres microclimatiques.
- Caractéristiques physiques des constructions.
- Caractéristiques physiques du sol.
- Comme on peut ajouter d'autres données tel que : données propre au sol, position, construction, temps de simulation...etc

2.3.3.2 Les sorties (Outputs)

Envi-met peut générer une multitude de paramètres enregistrés dans plusieurs répertoires les plus importants sont :

Fichiers de sortie en 3D : Contiennent les fichiers atmosphère, surface et sol. Les résultats sont stockés sous un format binaire et visualisés grâce à un autre logiciel LEONARDO 4.4.3.

Fichiers des récepteurs : Ces fichiers permettent la définition des récepteurs à l'intérieur du model et de les voir de plus en plus en détail. Ce sont des simples fichiers qui peuvent être visualisés avec un simple programme tel qu'Excel.

1D fichiers model : Contiennent les données du profil vertical du model Uni – dimensionnel de l'Envi-met dans un format ASII. Ces fichiers sont généralement utilisés pour la vérification et la résolution des problèmes qui peuvent figurer pendant la simulation.

Synthèse :

ENVI_MET propose un niveau de simplicité adéquat pour le cadre bâti et il intègre plus en détail la végétation et ses inter-réactions avec l'atmosphère. Malgré les limites qui l'a.

Deux principaux fichiers afin d'arriver au résultat : fichier d'entrée et de sortie.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes basés sur les résultats obtenus des travaux d'Achour Bouakkez N, (2006) qui identifier la présence du phénomène d'îlot de chaleur urbain à Alger. D'où le choix de la ville d'Alger comme une ville d'étude.

Et sur les résultats et perspectives du travail d'ATIK, T (2011), ainsi sur le projet de recherche CNEPRU de Daouidi, N ; Lamraoui, S ; Mestoul, D (2015), pour le choix du cas d'étude de l'hôpital Mustapha Pacha.

La méthodologie choisie pour l'exécution de ce travail est basé sur la simulation informatique à l'aide de logiciel de simulation ENVI_MET4.4.3. Ce dernier a la capacité d'intégrer les conditions climatiques avec le cadre bâti pour l'obtention des résultats atmosphériques tout en prenant en considération l'élément végétal.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les différentes étapes de simulation avec ENVI_MET, suivit par la discussion des résultats.

Chapitre 3

**Évaluation des toitures végétalisées
dans la lutte des îlots de chaleur
urbain**

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de vérifier la contribution des toitures végétalisées à la diminution de l'intensité d'îlot de chaleur urbain, à l'aide d'ENVI-met.

En premier lieu, nous allons présenter toute la démarche de la simulation (création et modélisation de la zone à simuler, simulation et visualisation des résultats). Après nous allons établir une lecture comparative entre deux scénarios de simulations. La première porte sur des toitures minérales et la deuxième porte sur des toitures végétalisées.

3.1 Création du modèle à simuler :

Le logiciel ENVI_MET4.4.2 est composé de plusieurs paramètres qui permettent la création du modèle à simuler jusqu'à la visualisation des résultats.

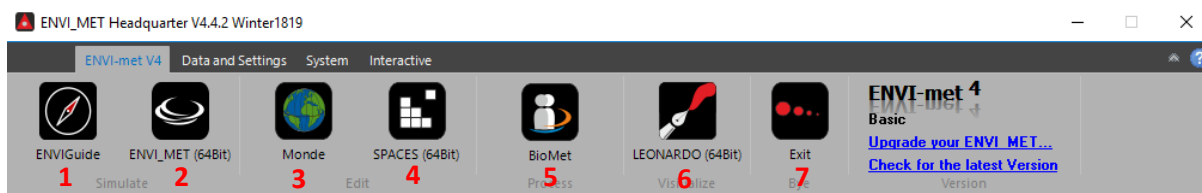


Figure 43 : Menu, ENVI-met V4.4, 2 Source : Auteur(2019).

- 1- Editeur de configuration ; 2- Démarrer simulation ; 3- Pré-traiteur de zone/ modèle ; 4- Editeur de zone/ modèle ; 5- Outil de poste traitement ; 6- LEONARDO visualisation des résultats ; 7- Terminer

3.1.1 Insertion des paramètres dans l'interface de logiciel :

Afin de lancer la simulation, deux principaux fichiers sont nécessaires : fichier éditeur (.in) et le fichier de configuration.

3.1.1.1 Fichier éditeur (.in)

Le fichier éditeur (.in) contient le modèle à simuler, donc on doit insérer tous les paramètres géographiques et morphologiques relatives à la zone à étudier.

a Création de la zone

Pour créer une zone il suffit d'insérer ses dimensions et ses données géographiques.

Les figures(43-44-45) montrent les données relatives à notre zone d'étude l'hôpital CHU Mustapha pacha, elle fait 100x70 m, la hauteur on la fixe à 22m afin d'intégrer les interactions avec la couche limite atmosphérique et pour avoir des résultats plus corrects, latitude 36,75 et longitude 3,06.

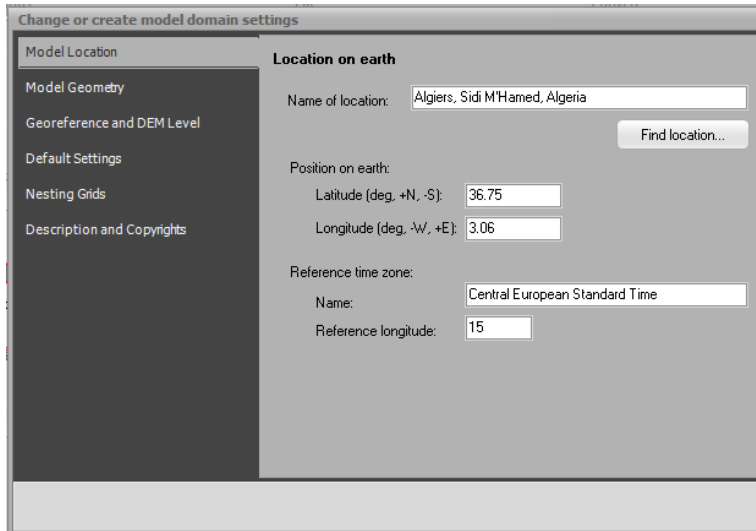


Figure 44 : localisation de la zone d'étude

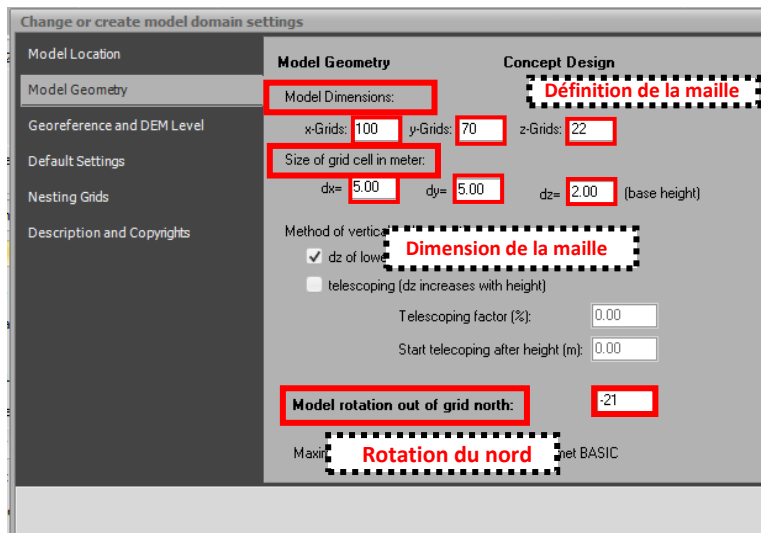


Figure 45: la géométrie du modèle

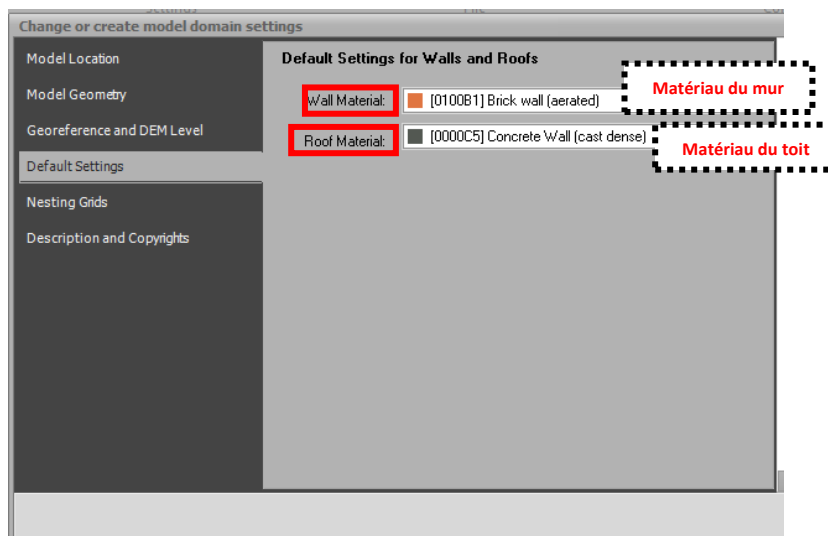


Figure 46 : Paramètre des matériaux

Source : auteur (2019)

b Modélisation de la zone :

Elle comprend quatre (04) paramètres essentiels :

- **Bâti :**

Représentation de la géométrie de la zone d'étude par l'importation d'un plan ou photo aérienne comme un font en respectant la dimension de la maille choisie. Le gabarit est fixé au choix, il est modifiable pour chaque bloc.

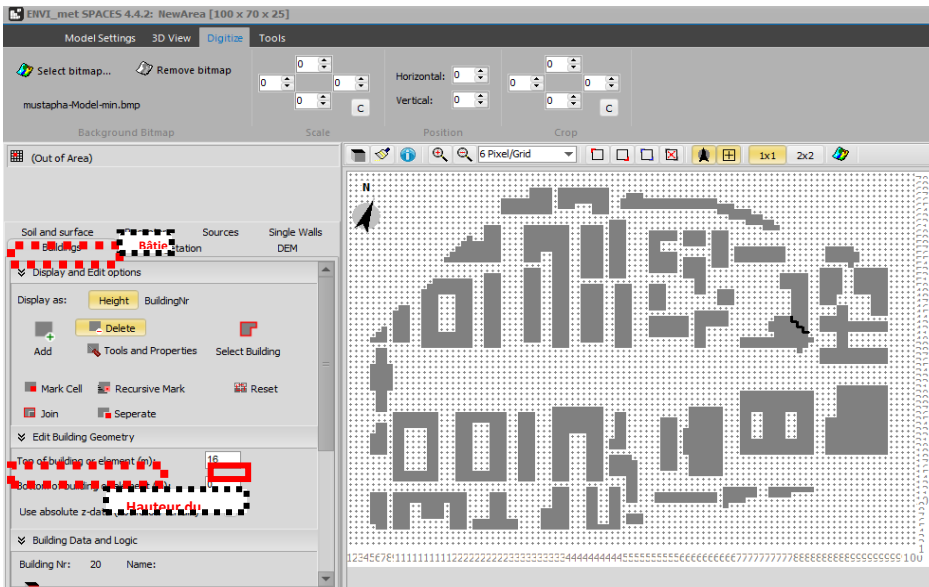


Figure 47 : Editeur du bâti ; Mustapha pacha
Source : auteur (2019)

- **Végétation :**

Le logiciel offre une base de données pour la végétation, avec les différents paramètres du type, de hauteur et de densité du végétale.

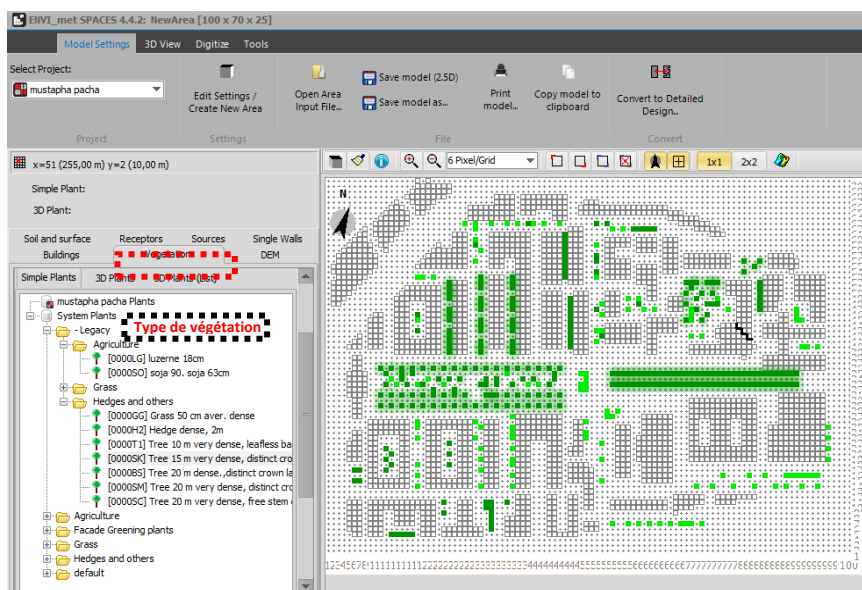


Figure 48 : Editeur de végétation, Mustapha Pacha
Source : auteur (2019)

• **Sols :**

Le logiciel offre aussi une base de données pour les types de sols.

Le logiciel par défaut offre un sol pour la zone modélisée. Nous avons ajouté l'Asphalte pour la représentation des rues.

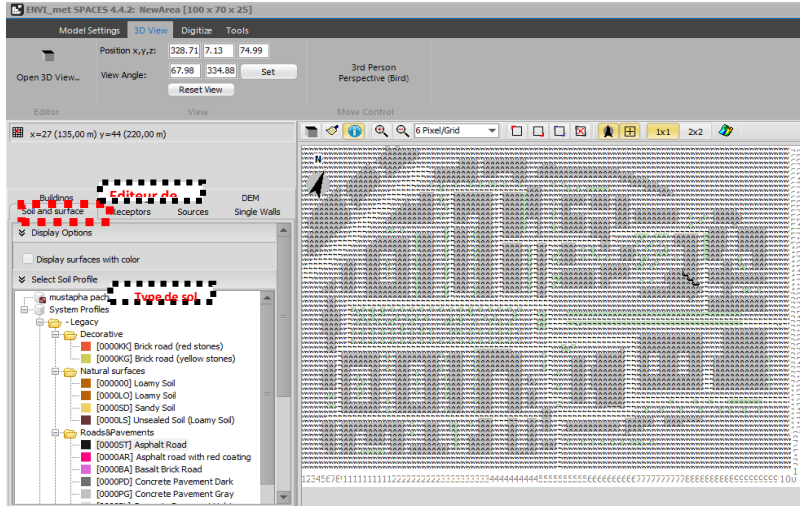


Figure 49 : Editeur des sols, Mustapha Pacha
Source : auteur (2019)

• **Récepteurs :**

Le logiciel permet de placer des récepteurs ponctuels qui enregistrent les différents paramètres de Z=0 jusqu'à Z max, comme on peut placer un nombre important de récepteur qui peut arriver jusqu'à 100.

Afin de comparer les résultats obtenus, on a placé deux (02) récepteurs :

- Récepteur 01 : dans l'extrémité droite du site, sur un bâtiment de 16m de hauteur où il y a une densité du bâti et peu de végétation.
- Récepteur 02 : placé dans l'axe principal, sur un bâtiment de 9m de hauteur, à proximité d'un grand espace végétalisé.

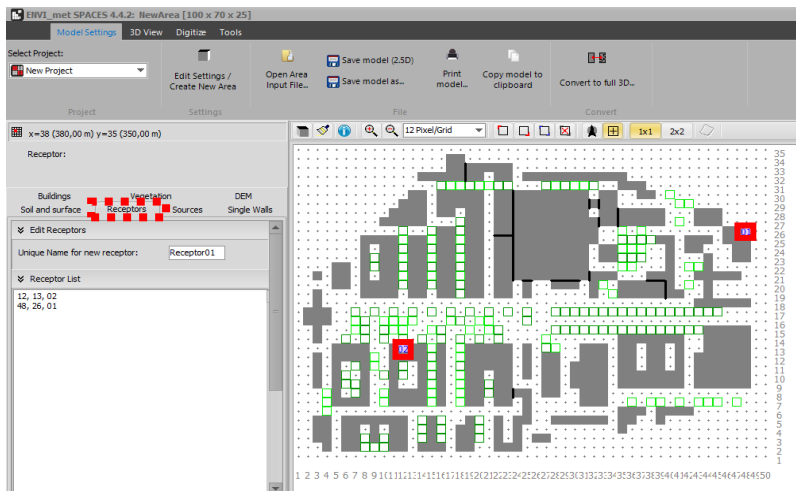


Figure 50 : Emplacement des récepteurs

3.1.1.2 Fichier de configuration (.CF) :

Le fichier de configuration contient toutes les informations spécifiques à la simulation telles que : le nom de la simulation, adresse des fichiers d'entrées/sorties, date et durée de la simulation ainsi que les paramètres météorologique relatifs.

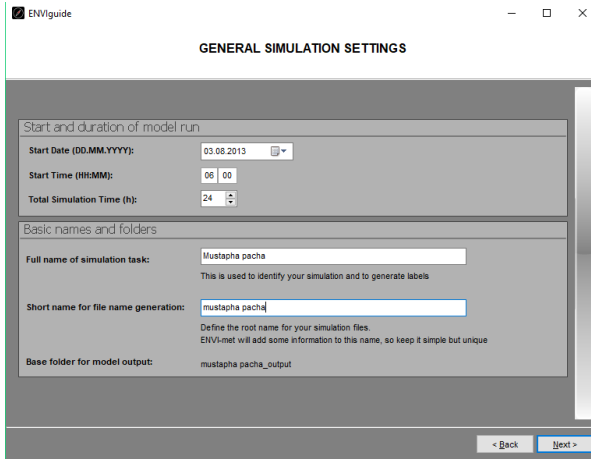


Figure 51 : Date et durée de la simulation

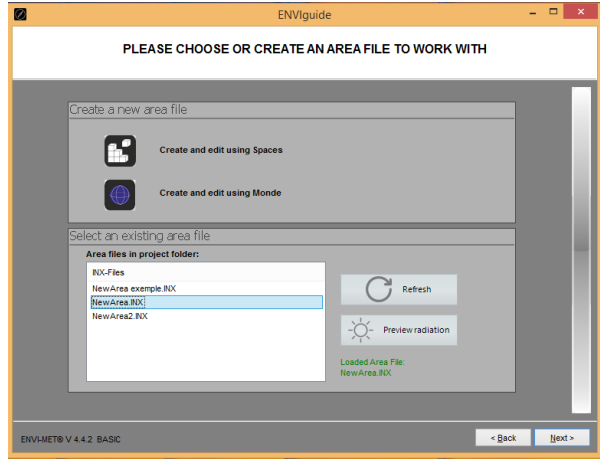


Figure 52 : Adresse des fichiers d'entrées/ sorties

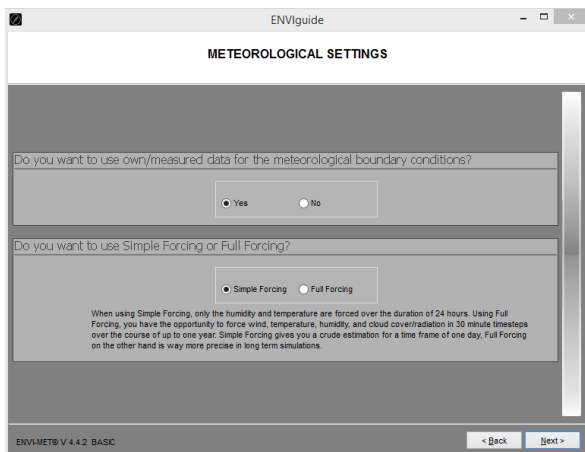


Figure 53 : Les paramètres météorologiques relatifs

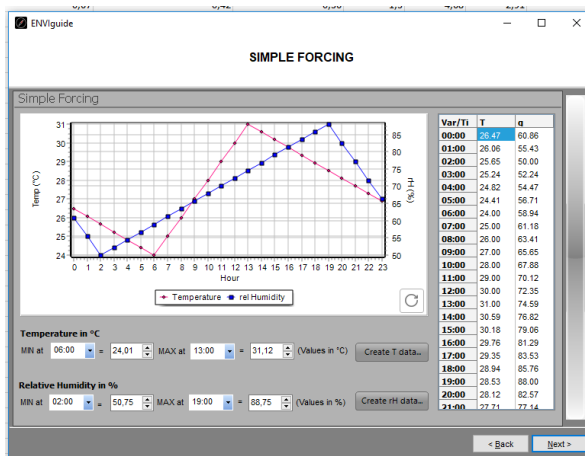
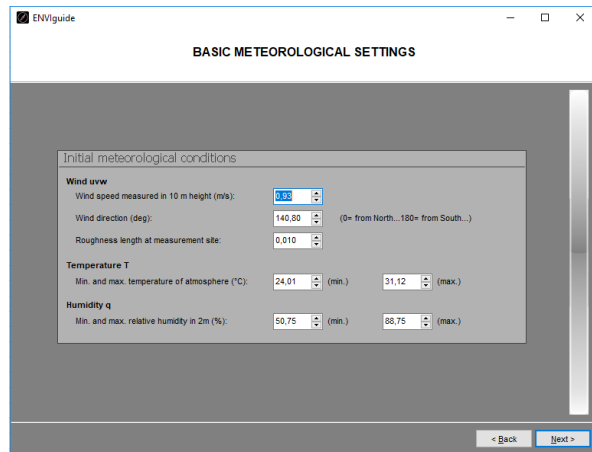


Figure 54 : Les paramètres météorologiques relatifs

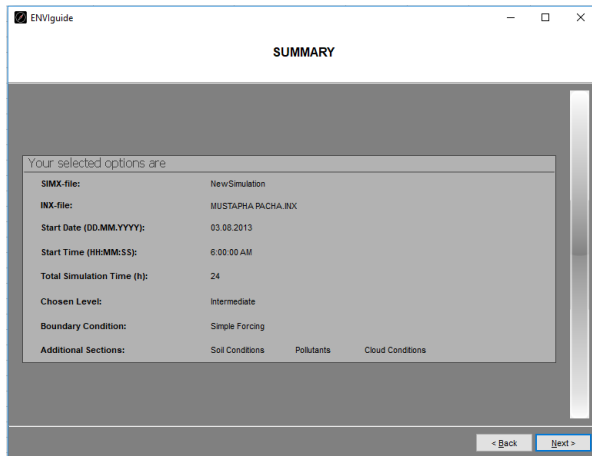


Figure 55 : Résumé de fichier de configuration de l'hôpital Mustapha Pacha

3.2 Exécution de la simulation :

Afin d'exécuter la simulation, il nous faut le fichier éditeur (.IN) qui contient le modèle a simulé, et le fichier de configuration (.CF) qui contient les données météorologiques ainsi que toutes les données spécifiques à la simulation. Ces deux fichiers sont insérés dans une même fenêtre [ENVI-met] pour que la simulation puisse commencer.

Afin d'évaluer la possibilité des toitures végétalisées pour l'atténuation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain pour le site choisi l'hôpital Mustapha Pacha. Nous allons exécuter deux scénarios de simulations. Ces deux derniers contiennent le même fichier de configuration (.CF), avec un fichier éditeur (.IN) différent.

SIMILATION 01 : simulation de la zone d'étude avec des toitures couvertes par des gravillons.

SIMULATION 02 : simulation de la zone avec des toitures végétalisées.

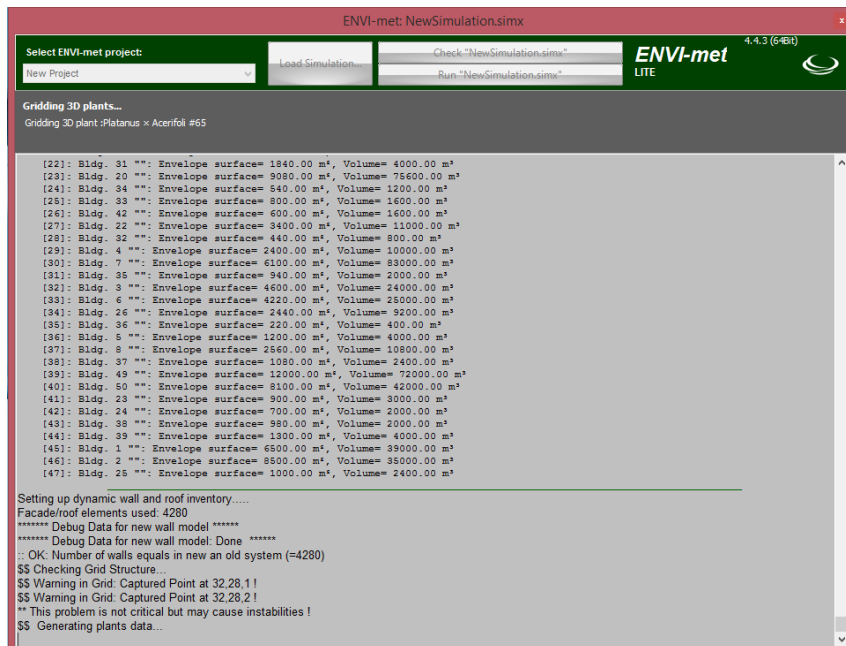


Figure 56 : Exécution de la simulation

3.2.1 Les paramètres prise en considération pour la simulation :

Le logiciel de simulation, et avec sa base de donnée, prend certains paramètres par défauts. Afin d'avoir des résultats plus précises, nous avons pris en considération les paramètres suivants :

3.2.1.1 Date et heure :

La date a été choisie selon les données climatiques obtenues correspond à une journée chaude du 03-08-2013.

Le choix de l'heure de lancement de simulation est très important parce qu'il fixe les paramètres météorologiques, selon la littérature l'heure idéal pour les simulations est comprise entre minuit (00 :00) et huit heure (08 :00), puisque l'ICU est un phénomène nocturne et les observations doivent être entre 2h à 3h après le crépuscule, pour une période estivale c'est l'équivalent de (00 :00) à (03 :00). Ce qui rend cette période sensible pour le début de simulation.

Nous allons choisir de lancer la simulation à 6 :00 du matin.

Les paramètres météorologiques : ces paramètres ont été récupérés depuis le laboratoire de recherche LAE de l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme.

- Température Max et Min de la journée d'étude.
- Humidité relative Max et Min.
- Vitesse et direction du vent.

3.2.1.2 Les matériaux :

ENVI_MET4.4.2 permet de choisir les matériaux de construction pour chaque bloc, en sélectionnant sur le bloc et par la suite, choisir les matériaux des murs ainsi que pour les planchers.

L'hôpital a connu plusieurs stratifications constructives. La majorité des blocs ont été construite par des matériaux à usage courant qui sont : la brique pour les murs et des planchers en béton.

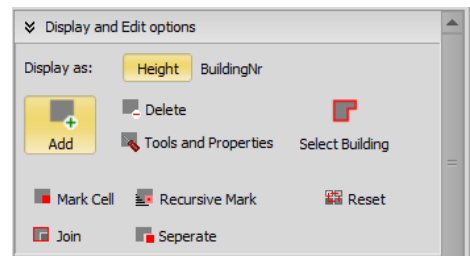


Figure 57 : fenêtre de modification

3.2.1.3 Albédo :

L'albédo est relatif à la couleur des surfaces, le tableau montre les valeurs d'albédo attribué pour les murs et les toitures.

	Natures de surfaces	Valeurs d'albédo
Hôpital Mustapha pacha	Peinture blanche	0.05
	gravillon	0.08
	Gazon	0.2
	arbre	0.2
	asphalte	0.2

Tableau 6 : Les valeurs d'albédo
Source : (Akbari et al 1992 ; Atik 2011) (adapté par auteur)

3.2.1.4 La végétation :

Nous avons implanté différents types de végétations au même emplacement sur le site d'étude telles que les palmiers [PW], les cyprès [ZY] et le sapin [C2] et d'autres qui sont inclus dans la base de données d'ENVI_MET.

Pour la représentation des toitures végétalisées ; ENVI-MET offre deux types de végétation que l'on puisse utiliser pour une toiture végétalisée.

Le premier est de type gazon qui offre deux modèles : gazon moyen et dense de 25cm [XX] et 50cm [XY].

Le deuxième type ; est de la famille d'agriculture qui offre deux modèles : Soja [SO] et Luzerne [LG].

Nous avons choisi le Soja [SO] moyen et dense pour guider notre simulation.

3.2.1.5 Emplacement des répéteurs :

Nous avons choisi l'emplacement des récepteurs par rapport à trois paramètres : la proximité ou non des espaces verts, la densification du cadre bâti et la hauteur des bâtiments.

3.2.2 Visualisation des résultats à l'aide de LEONARDO :

A partir des résultats des simulations, ENVI-met permet d'extraire des cartes microclimatiques par heure et par variable climatique, grâce à une application créée à cet effet, baptisée « Leonardo ».

Afin de pouvoir traiter de manière efficace et automatique le volume très important de résultats de simulation obtenus (environ 250 Mo de données), une chaîne d'outils d'extraction et de traitement des données a été développée et mise en œuvre. Elle est basée sur le développement de bibliothèques de lecture des fichiers de simulation (données d'entrées) et des différents formats de fichiers de résultats des simulations (caractéristiques physiques de l'atmosphère, thermiques des bâtiments, physiologiques,)

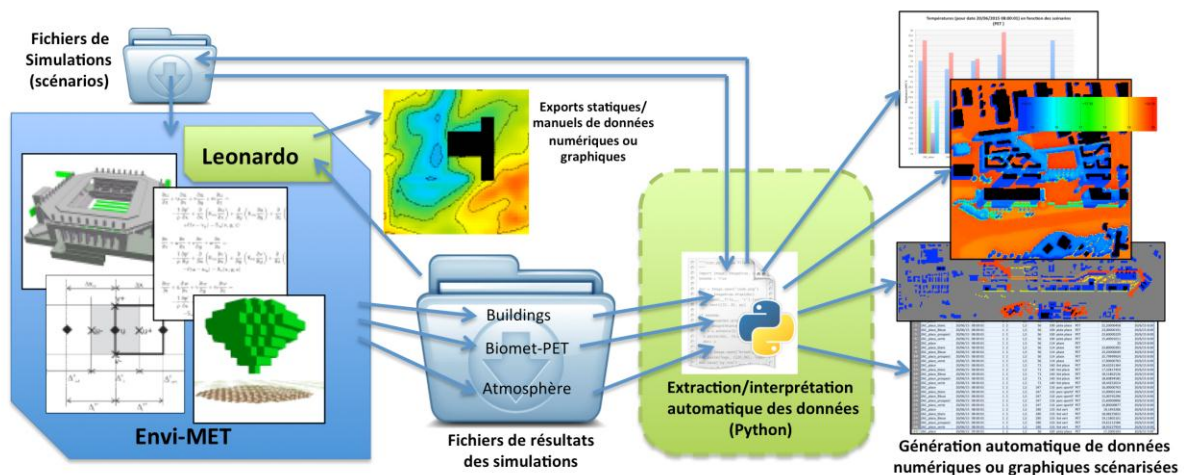


Figure 58 : Illustration schématique du processus d'extraction et traitement des données des simulations.

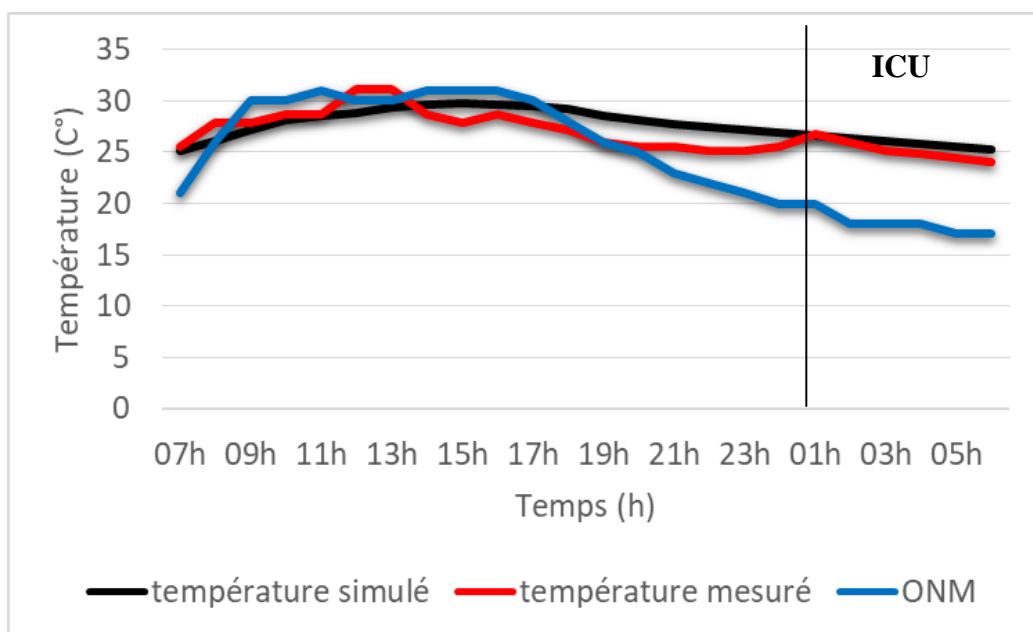
L'application LEONARDO facilite l'interprétation de ces résultats en proposant des fonctionnalités spécifiques mettant mieux en évidence les caractéristiques liées à l'analyse microclimatique et du confort thermique. Parmi ces fonctionnalités, sont proposés :

- Une analyse quantitative (calcul des valeurs minimales, maximales, moyennes,) aux différentes échelles,
- L'extraction automatique de valeurs de variables en des points caractéristiques (Ponctuels, selon un itinéraire,...).
- La consolidation de données (fichiers CSV) et création (semi-)automatique de courbes pour chacune des variables ou emplacement étudiés,
- Le calcul de cartes des écarts de valeurs de variables par rapport à un scénario de référence (impacts sur le rafraîchissement, le réchauffement,).
- Le calcul d'indicateurs énergétiques simplifiés à partir des valeurs de températures de surface des bâtiments (charges de climatisation,).
- L'extraction de représentations graphiques évoluées (animation 2D, modélisation 3D).

3.3 Résultats et discussion :

3.3.1 Ilot de chaleur à l'hôpital Mustapha :

Afin de montrer la présence du phénomène d'ICU au niveau de l'hôpital Mustapha. Nous avons comparé les températures obtenues de la simulation, les températures mesurés lors du projet CNE-PRU avec celle de l'ONM. Pour la journée d'étude du 03-08-2013.



Graphie 5 : variation de température simulé, mesuré et celle de l'ONM.

On peut lire le graphe selon deux périodes :

- [7h – 20h] : on remarque qu'il y a un rapprochement entre les températures simulé et les températures présent par l'ONM. Elles varient entre 24°C et 31°C.
- [20h – 7h] : on remarque que les températures présent par l'ONM commencent à diminuer progressivement jusqu'à atteindre les 20°C à 7h. Tandis que les températures (mesuré et simulé) restent élevées à 24°C à 7h.

Synthèse : d'après la lecture de graphe, on constate la présence du phénomène d'îlot de chaleur urbain au niveau de l'hôpital Mustapha. Il apparait le plus du 01h jusqu'à 7h.

3.3.2 Etude comparative :

Nous allons comparer les deux scénarios de simulation pour l'hôpital Mustapha Pacha

Simulation 01 : simulation du site d'étude avec des toitures minérales

Simulation 02 : simulation du site d'étude avec des toitures végétalisées.

Les résultats sont présentés en plusieurs périodes avec un intervalle de deux heures. Les résultats sont représentés par une cartographique des températures de l'air. Cette dernière reflète les différentes interactions entre la zone d'étude et l'atmosphère, afin de confirmé l'effet des toitures végétales sur la température de l'air.

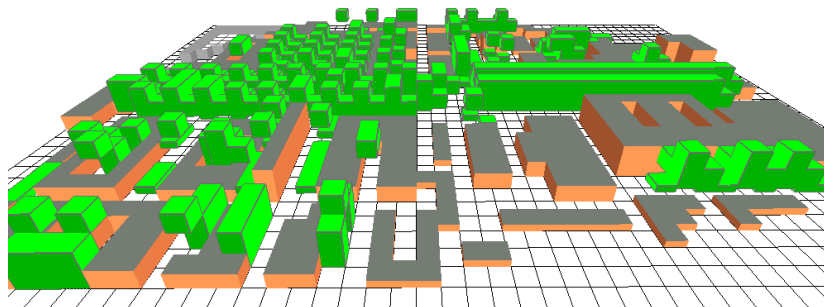


Figure 59 : 3D de l'hôpital Mustapha Pacha avec des toitures minérales

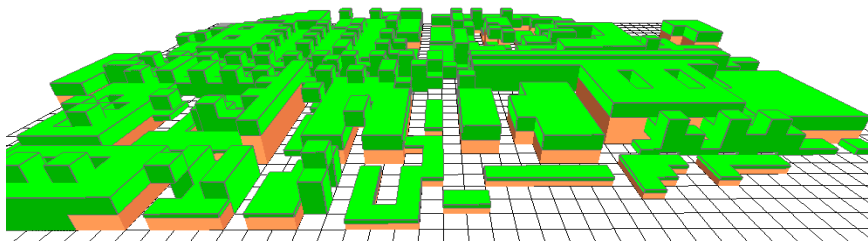


Figure 60 : 3D de l'hôpital Mustapha Pacha avec des toitures végétalisées

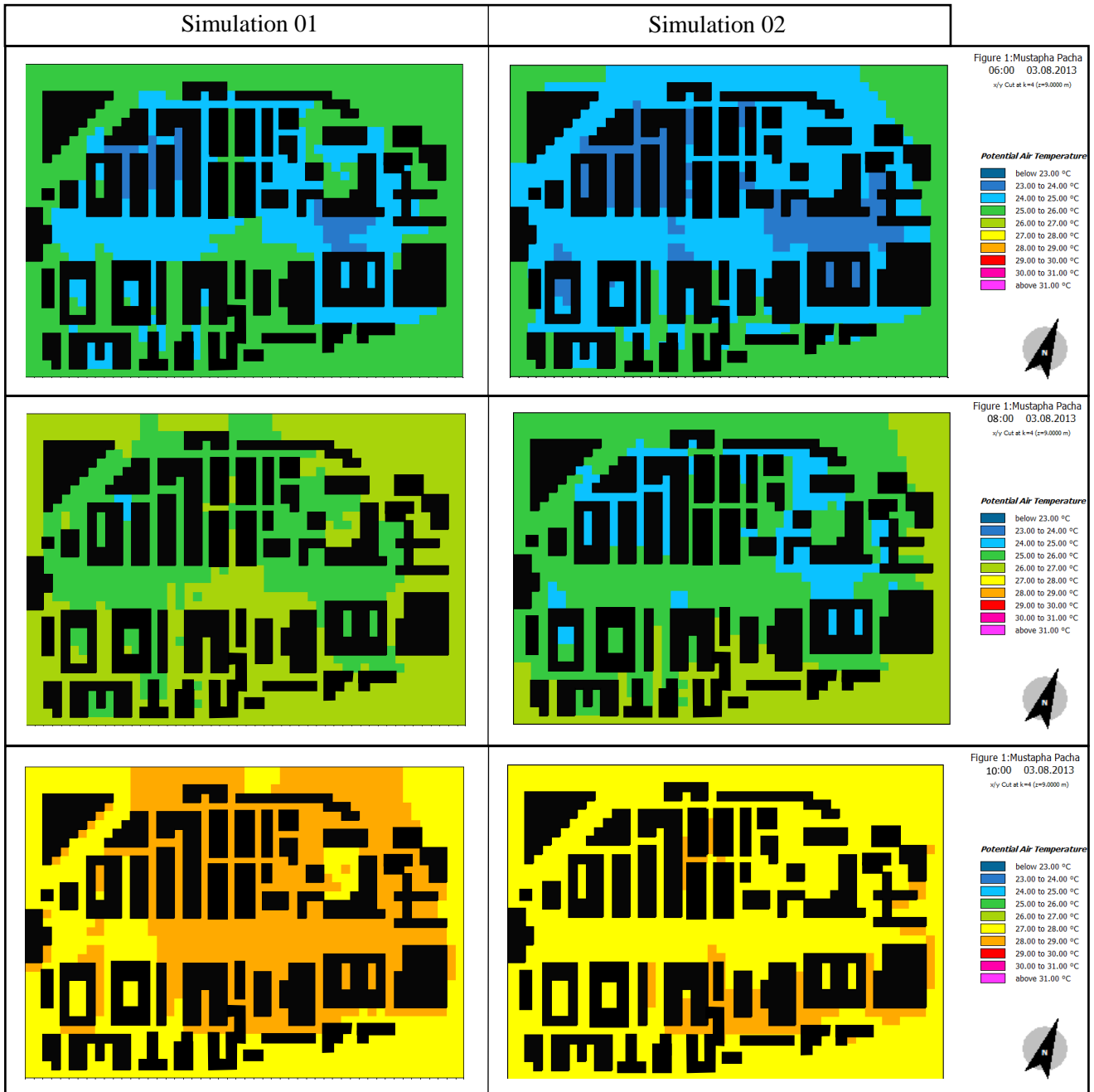


Figure 61 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 06h et 10h

De 06h à 10h, durant cette période on remarque que le l'hôpital Mustapha Pacha se réchauffe presque avec les mêmes valeurs pour les deux scénarios (toitures minérales et toitures végétales) jusqu'à atteindre une température maximale de 28.15°C à 10h.

Cela remonte au faible albédo pour les deux cas de toitures, ce qui a permet d'absorbé la même quantité de chaleur.

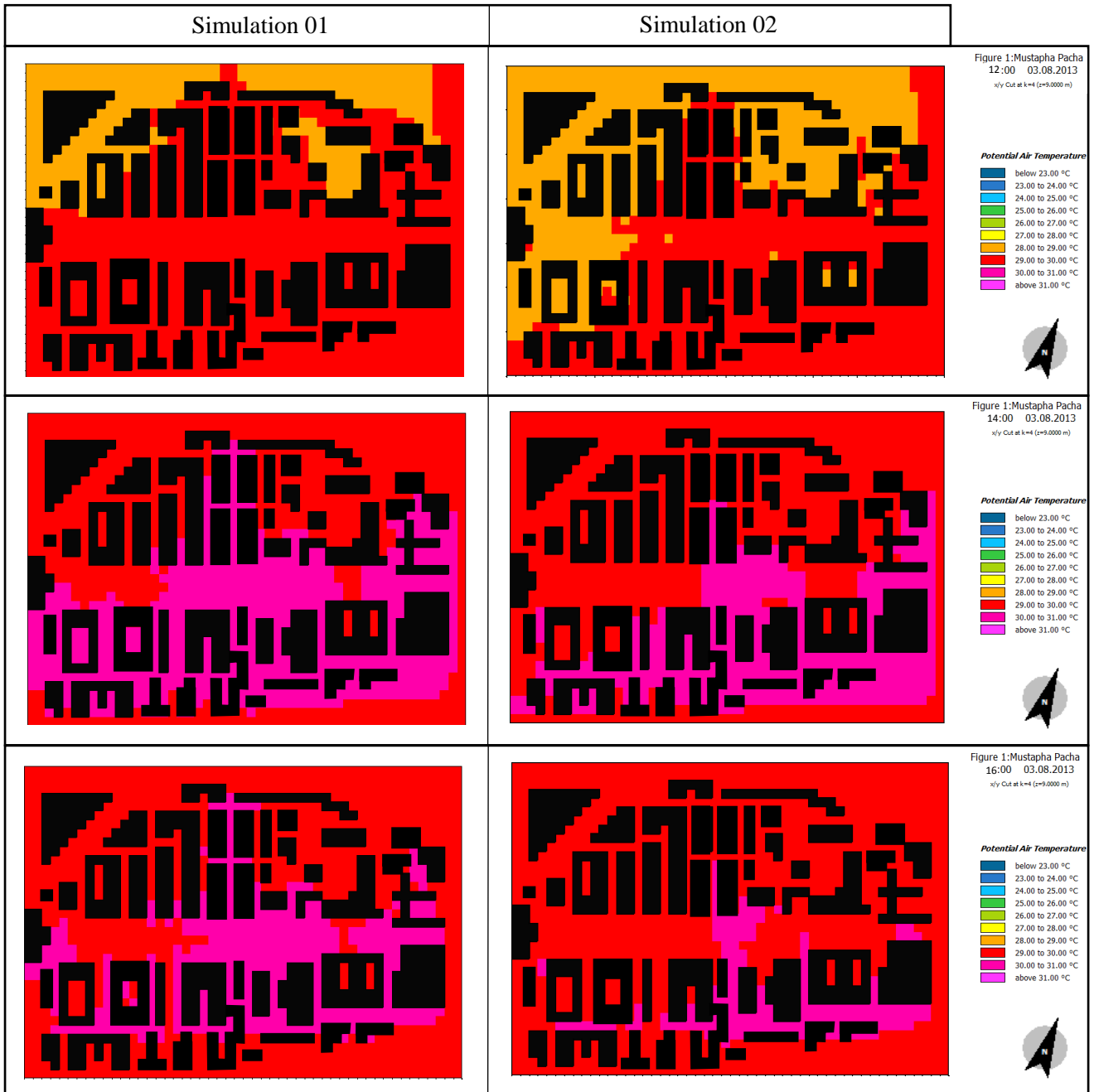


Figure 62 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 12h et 16h

De 14h à 16h, on remarque que l'hôpital continu à se réchauffer avec la même tendance jusqu'à attendre le pic de chaleur 29.73°C à 14h pour les deux scénarios. Après cette heure les températures commencent à se diminuer légèrement pour les deux cas.

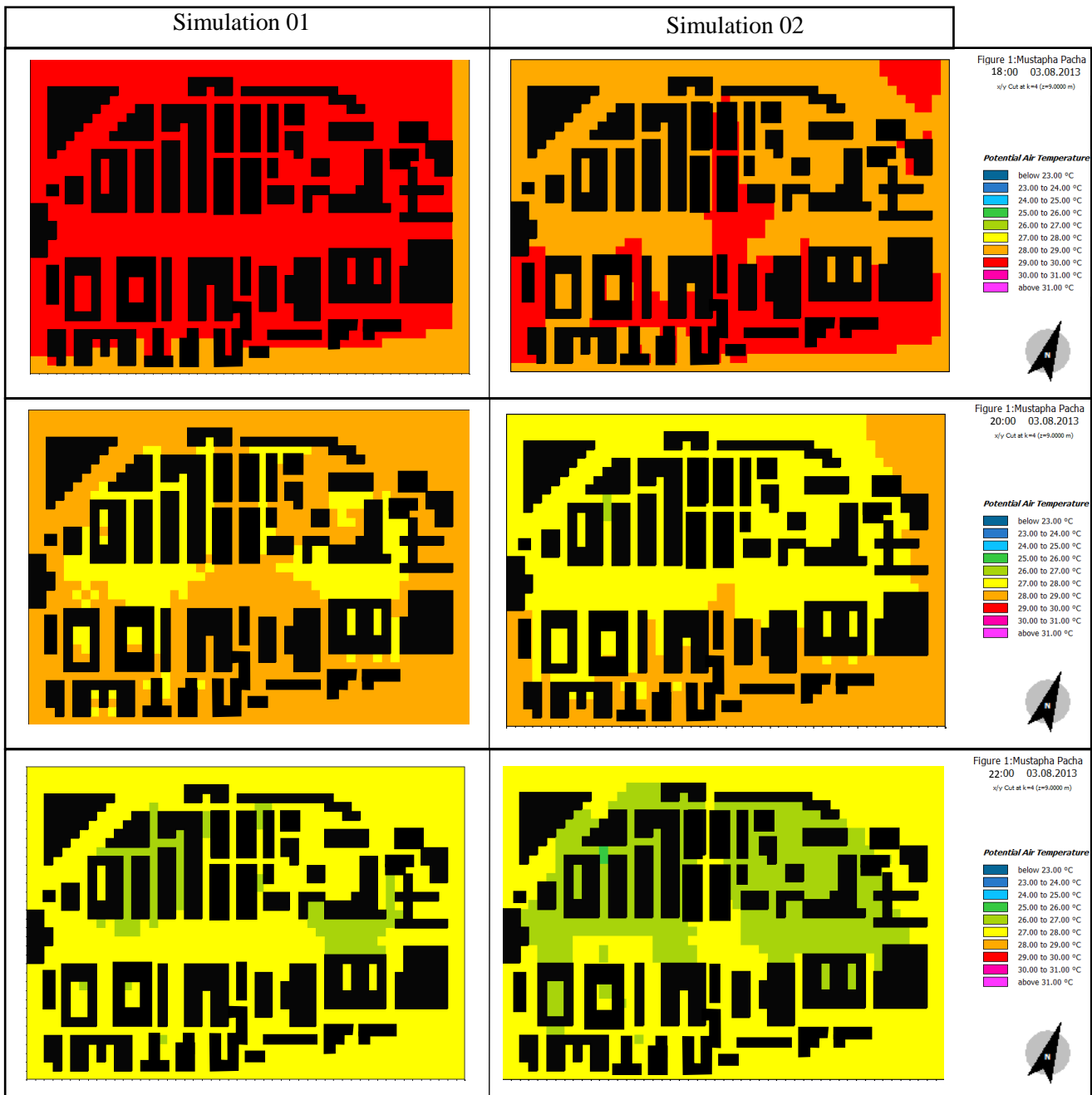


Figure 63 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 18h et 22h

De 18h à 22h, on remarque un refroidissement progressif des deux cas, important pour le cas des toitures végétalisées qui atteint rapidement des températures d'air qui varie entre 27.45 et 29.17 °C. Par contre il est moins important pour le cas des toitures minérales avec des températures d'air qui varie entre 26.80 et 28.92 °C. Cela explique l'impact des matériaux et les revêtements des sols ont emmagasiné la chaleur durant la période où l'ensoleillement est extrême.

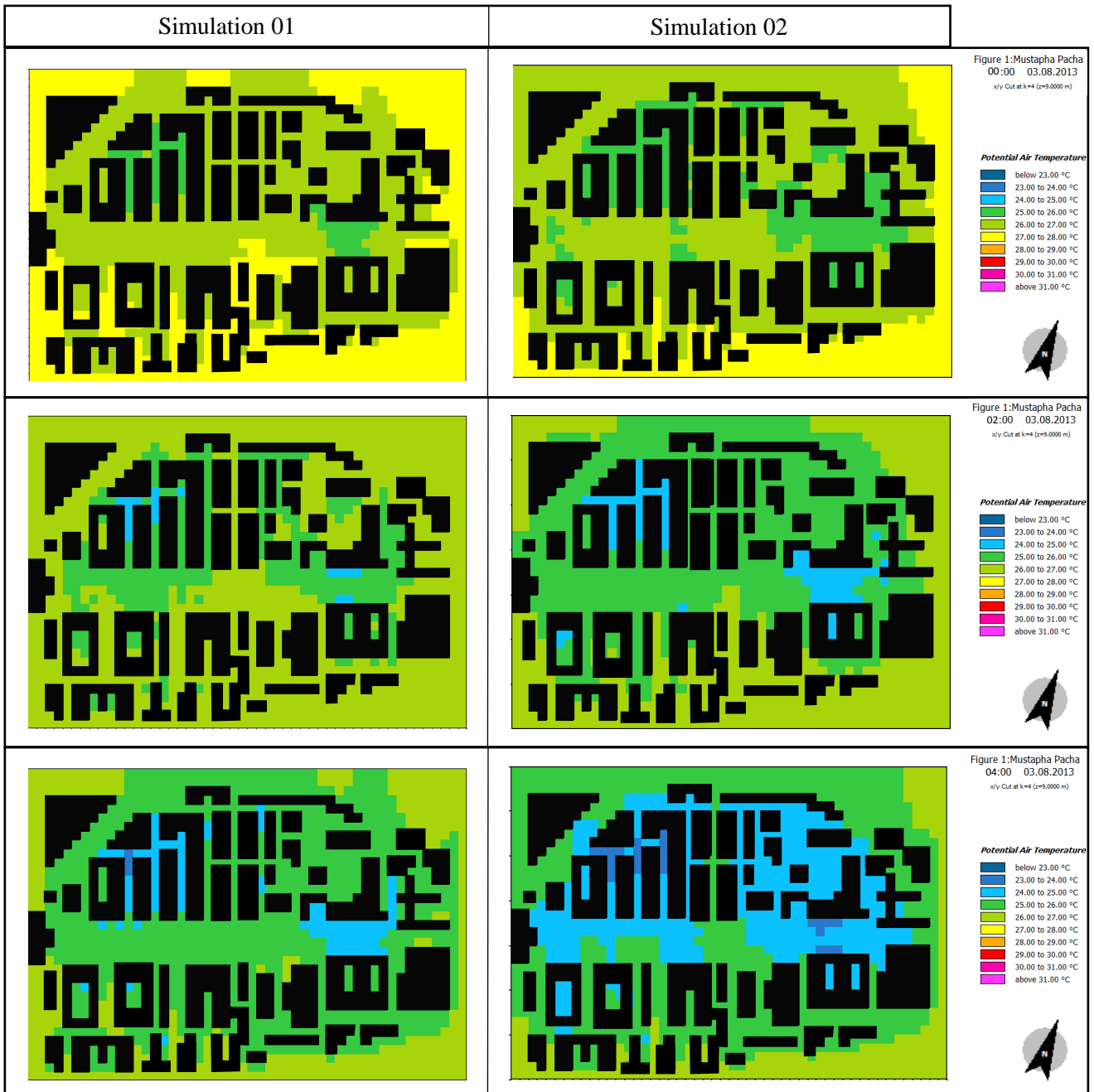
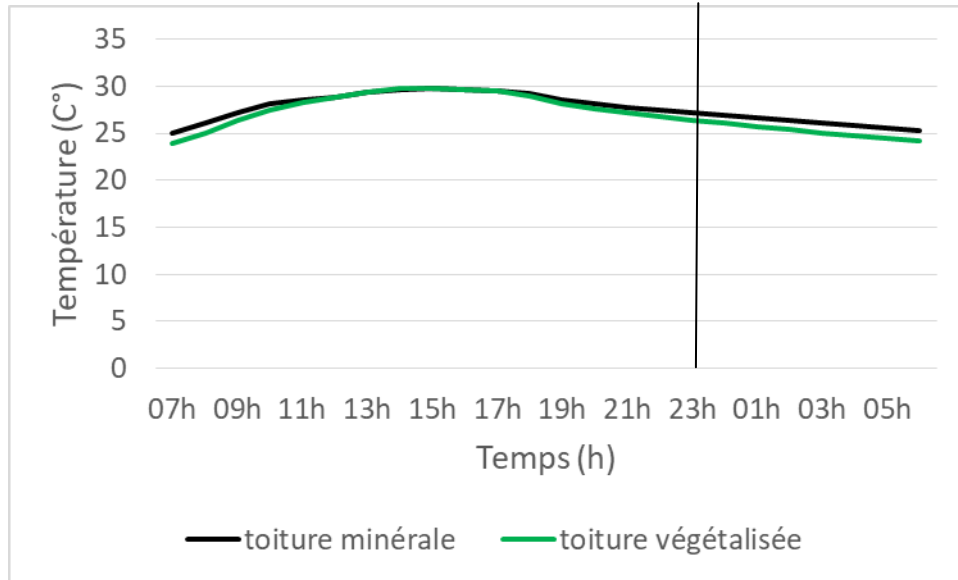


Figure 64 : étude comparative entre les deux scénarios de simulation entre 00h et 04h

De 00h à 04h, on remarque que l'hôpital Mustapha se caractérise par un ICU avec des températures d'air qui varie entre 24.50 et 26.06 °C, due à la grande capacité thermique des matériaux utilisés, ces derniers restituent la chaleur emmagasinée pendant la journée, ce qui induit à augmenter l'intensité de l'îlot de chaleur. Tandis que dans le cas des toitures végétalisées, les températures de l'air sont moins importantes comparant à celles des toitures minérales, cela remonte à l'effet de la végétation sur la qualité de l'air.

Cette lecture comparative nous permet de voir l'effet de la végétation à baisser les températures de l'air et donc atténuer l'îlot de chaleur urbain

Dans ce qui suit nous allons comparer les températures de l'air obtenu de la simulation pour les deux cas (toitures minérales et toitures végétalisées)



Graph 6 : variation des températures des deux simulations.

La lecture du graphe se fait selon deux périodes :

[10h – 19h] : on remarque les températures de l'aire pour les deux scénarios sont presque similaire, le faible albédo pour les deux cas permet d'absorbé les mêmes quantités de chaleur

[19h – 10h] : durant cette période, on voit que les températures de l'air dans le cas des toitures végétalisées se baissent d'une valeur remarquable que dans le cas des toitures minérales. D'un écart qui peut aller jusqu'à 1.20°C.

Synthèse :

Cette lecture comparative des deux scénarios de simulations nous permet de visualiser les variations de la température d'air ainsi que le rôle de la végétation dans le rafraîchissement de l'air dans la ville.

Conclusion :

Ce chapitre avait pour objectif de montrer l'impact de la végétation des toitures des bâtiments de l'hôpital Mustapha sur l'îlot de chaleur urbain.

Pour cela nous avons utilisé la méthode par simulation numérique. Ces simulations ont été effectuées avec le logiciel ENVI-met 4.4.2. En effet, celui-ci permet de simuler les interactions surfaces- végétation-air avec une résolution qui peut aller jusqu'à 1m.

Afin d'effectuer ces simulations, nous avons d'abord, délimité la zone sur laquelle portera notre travail. Ensuite, nous avons inséré les caractéristiques de cette zone dans le logiciel, par la suite, nous avons modélisé notre zone d'étude pour pouvoir lancer la simulation qui a duré 24h. Les résultats des simulations sont sous forme d'un fichier (output). La visualisation de ses résultats ne se fait qu'avec l'application LEONARDO, qui permet d'interpréter les résultats sous forme des cartes climatiques.

La comparaison des résultats des simulations nous ont montré l'effet de la végétalisation des toitures sur le microclimat. Pour notre cas, nous avons remarqué un écart de la température entre 4h et 8h, dont la différence maximale de la température arrive jusqu'à 1.20°C entre les deux scénarios sur une hauteur de 9m.

Toutefois, nous avons constaté que dans le cas des toitures végétalisées, les températures sont légèrement plus hautes que dans le cas des toitures minérales avec un écart de 0.1°C entre 12h et 16h. Nous pensons que cette hausse est due au fort albédo de la végétation.

Pour l'îlot de chaleur urbain, les résultats nous ont confirmé que les toitures végétalisées est une des solutions d'atténuation de l'intensité d'îlot de chaleur urbain.

Cependant, le logiciel offre un choix très limité de plantes adaptées aux toitures végétalisées extensives dans la base de données du modèle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude, nous a permis de montrer l'intérêt de l'introduction du végétal dans l'aménagement des villes. En effet, ces dernières, caractérisées de plus en plus dans leur développement par la présence de surfaces minérales et imperméables, participent à la modification du climat local notamment à l'apparition de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce phénomène se définit par l'élévation de la température dans les villes.

Plusieurs travaux ont montré la contribution des toitures végétalisées dans la réduction des effets de l'ICU. A cet effet, nous en avons fait notre objet d'étude pour comprendre et montrer en quoi la végétalisation des toits représente un moyen de lutte contre les îlots de chaleurs urbains ?

Pour ce faire, nous avons approché certains travaux dont la problématique s'articule autour de cette thématique. Notons notamment ceux élaborés par ATIK, T (2011) dans le cadre d'une recherche en magister, par Achour-Bouakkaz, N (2006) également dans le cadre d'une recherche de Magister et par N. DAOUDI, S. LAMRAOUI, D. MESTOUL (2015) dans le cadre d'un CNEPRU. Ces travaux nous ont motivés à inscrire notre étude dans la continuité de leurs perspectives. Ce qui explique le choix de la thématique, du cas d'étude et de la méthodologie utilisée.

Trois hypothèses ont été émises au départ de cette recherche :

1- L'îlot de chaleur urbain apparaît par le remplacement des sols végétalisés et perméables par des bâtiments et des revêtements imperméables qui stockent la chaleur dans les matériaux.

- ✓ Cette hypothèse a été vérifiée grâce à l'état des connaissances développé dans le premier chapitre dans lequel nous retenons que l'îlot de chaleur urbain est plus ressenti la nuit que dans la journée. C'est parce que, la ville par, sa structure, sa morphologie, et les matériaux des bâtiments piège la chaleur issue du rayonnement solaire la journée et la restitue la nuit.

2- La végétation peut agir dans la lutte contre l'îlot de chaleur urbain. Elle permet de stabiliser la température de l'air par la rétention de l'eau dans les feuilles, par l'évapotranspiration de l'eau à leur surface et par l'effet d'ombrage.

- ✓ Force est de constater qu'une approche intelligente et réfléchie par le biais de différents critères permet aux végétaux d'améliorer considérablement le confort de vie urbain. Les températures sont diminuées grâce à la végétation qui améliore ainsi

considérablement la qualité de l'air. Les différentes épaisseurs de couches ainsi que le type de végétation optimisent leurs incidences.

3- La végétalisation des toitures contribue à l'atténuation de l'effet de l'îlot de chaleur urbain.

- ✓ Qui a pu être vérifié grâce à la simulation climatique à l'aide d'ENVI-met, qui nous a permis de confirmer que les toitures végétalisées sont un moyen de rafraîchissement de l'air. Où nous avons enregistré une diminution de 1.20°C lors de la deuxième simulation (cas des toitures végétalisées) au niveau de l'hôpital Mustapha Pacha.

Toutefois, notons que certaines difficultés ont entravé le bon déroulement de cette recherche. Il s'agit notamment de :

- Le logiciel de simulation ENVI-met 4.4.2. offre un choix limité au le type de végétal destiné aux toitures.
- La durée de la simulation (24h par simulation).
- Difficulté d'obtenir des données météorologiques plus récentes (ce qui nous a contraint de travailler avec les données enregistrées par l'équipe (N. Daoudi et al) sur le site de l'Hôpital Mustapha Bacha.

Au final, cette étude nous a permis :

- D'une part, de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain, de l'examiner et identifier les stratégies de son amélioration.
- D'autre part, étudier l'impact des toitures végétalisées pour l'atténuation de l'ICU à travers une étude comparative entre deux scénarios de simulations à l'aide d'ENVI_MET (SIMUL 01 : toitures minérales ; SIMUL 02 : toitures végétales)
- De montrer que, comme l'ont attesté (Daoudi, Lamraoui, Mestoul, 2015), les toitures végétalisées, présentent une des solutions d'atténuations et de mitigation du phénomène d'ICU.

En nous basant sur l'élément végétal, de suggérer quelques perspectives de recherche, à savoir :

- Le rôle des îlots de fraîcheurs urbain (IFU) dans l'atténuation des îlots de chaleurs urbains (ICU).
- L'emploi des toitures végétalisées sur une échelle plus grande (échelle de la ville) pour lutter aux îlots de chaleurs urbains à Alger. En effet, avec une échelle réduit

tel que le site de l'hôpital Mustapha Pacha, nous avons pu atteindre 1.20°C de différence avec l'emploi des toitures végétalisés. Nous pensons que si nous intervenons sur une échelle plus grande, nous arriverons à des résultats plus importants.

- La multiplication des surfaces végétalisées au sol ou sur les bâtiments (sur les toits et murs) comme une solution de mitigation de l'îlot de chaleur urbain.

Bibliographie

1. Abderrezak, A., 2010. *évaluation de l'efficacité d'un rafraîchissement passif d'une toiture végétalisée sous un climat semi-aride*, université de Constantine : Mémoire de magistère, option architecture bioclimatique .
2. Achour-Bouakkaz, N., 2006. *La Relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène de changement climatique et la densité du plan bâti : cas de la ville d'Alger*, s.l.: Mémoire de magistère, faculté des science et de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire.
3. Adjiel, A., 2010. *évaluation de l'efficacité énergétique d'un rafraichissement passif* , s.l.: s.n.
4. al, M. C. e., 2012. Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *la revue électronique en science de l'environnement* , 12 mai .
5. Alonso, L., s.d. *Caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains lyonnais à l'aide de mesures satellitaires, mobiles et participatives* , université de Lyon : mémoire de master .
6. Anon., 2014. *Incidence des enveloppes végétales sur les performances énergétiques et environnementales des bâtiments et sur le microclimat urbain* , Lille : université de la Rochelle et université de Lorraine .
7. Anquez , P. & Herlem , A., 2011. *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions, chaire de responsabilité sociale et de développement durable*, s.l.: université du Québec à Montréal.
8. Atik, T., 2011. *les toitures végétalisées à Alger, pour une contribution à l'amélioration du microclimat urbain méditerranéen* », *Mémoire de magistère, Option Architecture et environnement*, Alger : Mémoire de magistère, option architecture et environnement, EPAU.
9. Benassil Chabane, F., 2012. *l'intégration du végétal dans le processus de revalorisation des paysages urbains denses*, Alger: mémoire de magister, option: architecture et environnement, EPAU.
10. Benzerzour, M., 2004. *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur - morpho climatique*, Nantes: Mémoire de doctorat, spécialité science pour ingénieur, option architecture .
11. Besancenot, J., 2005. *La mortalité consécutive à la vague de chaleur 2003, étude épidémiologique*. s.l.:press therm climat.
12. Chabane, F. B., 2012. *L'Intégration du végétal dans le processus de revalorisation des paysages urbains denses*, Alger : Mémoire de magistère, option architecture et environnement, EPAU.
13. Colombert, M., 2008. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*, Université Paris-Est : thèse de doctorat, école doctorale ville et environnement .
14. Daoudi, N., Lamraoui, S., Mestoul, D. & Mezouari, F., 2015. *Rapport intermédiaire d'un Projet PRU en cours« Îlots de fraîcheur comme stratégies de réduction des îlots de chaleur urbains : Cas d'Alger* », s.l.: validé entre 2014 et 2017.

15. Escourrou, G., 1999. *Le climat et la ville*. France : NATHAN .
16. Filiatreault, Y., 2015. *changements climatiques et îlots de chaleur : indicateurs de performance pour les mesures d'adaptation*, université de Sherbrooke : Mémoire en vue l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M.Env) .
17. Gendron, J. & Bouchard, P., 2013. *analyse des outils administratifs et des mesures de lutte aux îlots de chaleur dans les milieux de vie des communautés thermiquement vulnérables à Montréal, thèse en vue de l'obtention du grade de maître en environnement*, s.l.: université de Sherbrooke,.
18. Giguère, M., 2009. *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Institut national de santé urbaine du Québec, éd. s.l.:Revue de littérature.
19. Givonni, B., 1978. *L'HOMME, L'ARCHITECTURE ET LE CLIMAT*. Paris: LE MONITEUR.
20. Greuillet, C. & Galsomies, L., 2013. *L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air, Pollution atmosphérique*, s.l.: numéro spécial, PP 163-172..
21. Guyot, G., 1999. *Climatologie de l'environnement, cours et exercices corrigés*. 2e éd. Paris : DUNOD .
22. Hammouni, Z., 2007. *la notion de confort en milieu hospitalier* , Alger : Mémoire de magistère EPAU .
23. Herlem, P. A. e. A., 2011. *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions, chaire de responsabilité sociale et de développement durable*, Montréal : université de Québec .
24. Houssin, E., 2012. *les toitures végétalisées : conception, réalisation et entretien*. Paris : CSTB .
25. Kadri, W., 2012. *Végétation urbaine : entre effets microclimatiques et représentation des usagers*, Alger : Mémoire de magistère EPAU .
26. Kingsbury, N. D. e. N., 2005. *Toits et murs végétaux*. Italie : Rouergue .
27. Laconte, F., 2015. *Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy*, université de Lorraine : thèse de doctorat .
28. Laroche , D., 2004. *les toits verts aujourd'hui : c'est construire le Montréal de demain*, Montréal: Mémoire présenté à l'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme.
29. Lassale, F., 2008. *végétalisation extensive des terrasses et toitures », conception et mise en œuvre Aspects réglementaires Données économiques Exigences et solutions*. Paris : LE MONITEUR .
30. Moriyama, H. T. e. M., 2006. *Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island*, Kobe university Rokko : Elsevier .
31. Munck, C. D., 2013. *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*, université de Toulouse : Mémoire de doctorat, option océan, atmosphère et surfaces continentales .
32. Natalia, E., 2010. *Les îlots de chaleur urbains en Mauricie*, université de Québec : département de chimie-biologie .

33. ONERC, 2010. *villes et adaptation au changement climatique*. Paris : la documentation française .
34. Pauline Laille, D. P. F. C., 2013. *Plante et Cité, ingénierie de la nature en ville*, s.l.: les bienfaits du végétal en ville.
35. Pigeon, G., 2007. *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine*, Toulouse III: thèse de doctorat, Université Paul Sabatier.
36. Ringenbach, N., 2004. *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures modélisation et validation sur Strasbourg*, s.l.: hèse de doctorat, école nationale supérieure de physique de Strasbourg..
37. Sciama, Y., 2007. *le changement climatique : une nouvelle ère sur la terre*. France : petite encyclopédie LAROUSSE .
38. St-Onge, S., 2011. *Îlots de chaleur urbains : définition et impacts*, s.l.: s.n.
39. St-Onge, S., 2011. *Lutter contre les îlots de chaleur urbains*. s.l.:s.n.
40. Tabeaud, A. G. e. M., 2009. *Les climats : mécanisme, variabilités, répartition*. Paris : ARMAND COLIN .
41. Terrin, J.-J., 2015. *ville et changement climatique, îlot de chaleur urbain*, Marseille: Edition Parenthèse.
42. Toudert, F. A., 2000. *intégration de la dimension climatique en urbanisme*, Alger: Mémoire de magistère, option urbanisme, EPAU .
43. Yolène, H., 2017. *Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain et recherche d'une solution ; paysagère pour le site de la résidence Damrémont à Paris* , La combre Horta : Mémoire de fin d'étude, faculté d'architecture .

Webographie :

- <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/avril-2004/la-toiture-vegetalisee-une-technique-damenagement-durable.html>
- <http://toiture-bio.com/toitvert.htm>
- <https://greenroofs.org/>
- www.elsevier.com/locate/landurbplan
- <https://www.boutique.afnor.org/extraits/FA092143.pdf>
- <https://journals.openedition.org/vertigo/11811#tocfrom1n2>
- <https://architecteo.com/>
- <http://www.maison-blog.com/toiture-vegetalisee.html>
- <http://www.sagacite.org/2011/04/lutter-contre-les-ilots-de-chaleur-urbains/>
- <http://www.sagacite.org/2011/03/ilots-de-chaleur-urbain-definition-et-impacts/>
-

Annexe

Annexe 01

- **La Relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bâti : cas de la ville d'Alger, mené par Achour-Bouakkaz Nawel, Université de Constantine.**

Ilots de chaleur urbain à Alger a fait l'objet d'un mémoire de magister d'Achur Bouakkez N, (2006). Pour son étude, traitant de l'évolution climatique et urbaine de la ville d'Alger, au moyen de variations de température et de densité du plan bâti pour trois stations météorologiques : Alger port, Dar el Beida et Bouzaréah.

Achour-Bouakkez N. a comparé les variations des moyennes de températures annuelles disponibles et enregistrées pour chaque stations de mesure de l'ONM¹¹.

L'étude a été faite tout en considérant les caractéristiques urbaines des sites accueillant les stations de mesure, afin de mieux comprendre le phénomène et pour expliquer les résultats obtenus :

- **Alger port** : La station se situe au niveau de la capitainerie dans le centre-ville, la zone du site est urbanisée par des immeubles de l'Epoque coloniale composés sous forme d'îlot à forte densité en plan, quant à la végétation sa présence est plutôt faible. Les résultats ont affirmé qu'en été, les températures minimales restent élevées en comparaison avec les deux autres stations, ce qui pourrait s'expliquer par l'important pourcentage d'occupation au sol, donc des surfaces de toitures réceptives des rayons solaires, qui emmagasinent cette chaleur pendant le jour et la restitue pendant la nuit. En hiver, cette dernière ne connaît pas les mêmes baisses de températures que les deux autres stations. Ce qui confirme l'influence de la proximité de la mer dans l'adoucissement des conditions climatiques.
- **Station Dar El Beida** : C'est la station principale à Alger, son emplacement est caractérisé par l'existence d'un ensemble d'habitat collectif, de l'habitat individuel et très peu de végétation.

¹¹ ONM : Office National de la Météorologie en Algérie.

Les résultats obtenus ont démontré que les températures moyennes ont un écart de 2°C par rapport à la station Alger port malgré la proximité de la mer. L'influence de la mer est sensée rafraîchir ces températures, mais ce n'est pas le cas. Il apparaît que c'est la chaleur journalière emmagasinée par les surfaces ouvertes au ciel (toitures et rues) qui est à l'origine de cette différence au niveau d'Alger port.

- **Bouzaréah** : La troisième station se trouve au sein du GRAAG¹² à une 354m. La densité du bâti de cet emplacement y est moyenne, alors que la surface du couvert végétal est important.

Les températures maximales sont moins élevées dans la station de Bouzaréah en comparant avec la station de Dar El Beida avec un écart de 5,3°C. Ceci est parce que le site de Bouzaréah bénéficie d'un important pourcentage de couvert végétal, influençant directement la température.

Les principaux résultats :

- Le climat en milieu urbain est influencé par un ensemble de paramètres ; le terrain, le milieu bâti dans sa complexité (densité du plan bâti, géométrie des constructions, nature des matériaux, activités anthropiques...)
- L'existence du phénomène d'îlot de chaleur urbain au niveau de la ville d'Alger ;
- Il existe une relation entre les variations de températures d'un site donné et la densité du plan bâti de ce dernier ;
- Dans les aires urbaines, la végétation affecte directement les éléments du climat (la température, le vent, l'humidité,...)

La comparaison des résultats à démontrer l'existence d'îlots de chaleur urbaine à Alger port en relation avec l'intensité du bâti, ainsi que les températures annuelles sont importante au niveau de la ville d'Alger centre, suivi par les stations périphériques de Dar el Beida avec un écart de 0.69°C et de Bouzaréah avec une différence de 2.04°C.

¹² GRAAG : Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique

Annexe 02 :

- **Les toitures végétalisées à Alger, pour une contribution à l'amélioration du microclimat urbain méditerranéen, cas de l'hôpital Mustapha Pacha à Alger, mené par ATIK Tarik, EPAU.**

Cette étude a pour objet d'étudier les toitures vertes afin d'estimer leur contribution dans l'amélioration du microclimat et le confort thermique pour la ville d'Alger en période estivale. Atik T, a conduit sa recherche au niveau de la partie sud-est de l'hôpital Mustapha Pacha, d'après (Atik, 2011) l'hôpital Mustapha a connu une urbanisation récente et présente un certain nombre de caractéristiques favorisant le réchauffement de l'espace urbain : situation au centre-ville, peu de surface réservée à la végétation et importance du trafic routier prêt du site. D'ailleurs, la comparaison des paramètres climatiques enregistrés au niveau de cette infrastructure sanitaire par rapport à ceux de la périphérie d'Alger a confirmé une surchauffe des températures au niveau du centre-ville de la capitale.

L'évaluation de l'impact de la végétalisation des toitures dans l'amélioration du microclimat et du confort thermique est réalisée grâce au logiciel tridimensionnel ENVI-met qui permet de simuler le microclimat tout en comprenant dans ses calculs l'effet de la végétation sur la transpiration, l'albédo et la réduction de la vitesse du vent.

Il a comparé l'effet des toits verts sur différents paramètres (températures de l'air, l'humidité, vitesse de l'air, et le confort thermique) entre deux scénarios de simulations.

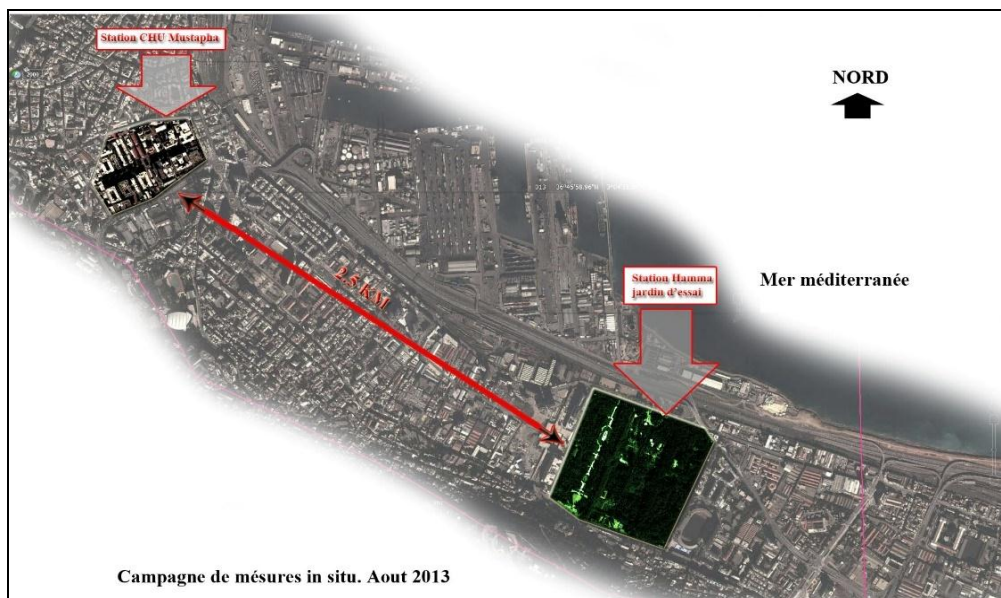
Selon Atik. T (2011), les toitures vertes ont un léger effet pour l'amélioration du microclimat et du confort thermique, il a relevé que «les toits verts ne peuvent pas être considérés comme une alternative aux espaces verts et à la nature, mais plutôt comme une solution palpable qui contribuerait au développement durable dans un microclimat urbain offrant peu d'espace à la végétation. »

Les résultats ont démontré que les toitures végétalisées ne peuvent pas améliorer le confort thermique en raison de l'importance du rayonnement solaire durant la journée. Mais elles peuvent contribuer dans l'amélioration des paramètres microclimatiques et de réduire un certain nombre de nuisances causées par la croissance rapide et insoucieuse des espaces urbains. De ce fait, les toitures vertes pourraient participer au développement durable grâce ses nombreux avantages pour l'environnement et la qualité de vie des citoyens.

Annexe 03 :

➤ CNEPRU ; *Ilots de fraîcheur comme stratégies de réduction des ilots de chaleur urbains : Cas d'Alger*

Projet de recherche élaboré par l'équipe du laboratoire Architecture et Environnement composée de N. Daoudi, S. Lamraoui et D. Mestoul dans le cadre d'un CNEPRU. consiste à caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain et son corollaire l'îlot de fraîcheur urbain et son rôle dans le rafraîchissement de la ville. Portant sur deux sites à Alger ; le premier est un site fortement minéralisé qui se situe au niveau de l'hôpital Mustapha Bacha à Sidi M'hamed, le deuxième est caractérisé par une dense végétation correspondant au Jardin d'Essai à Hamma.

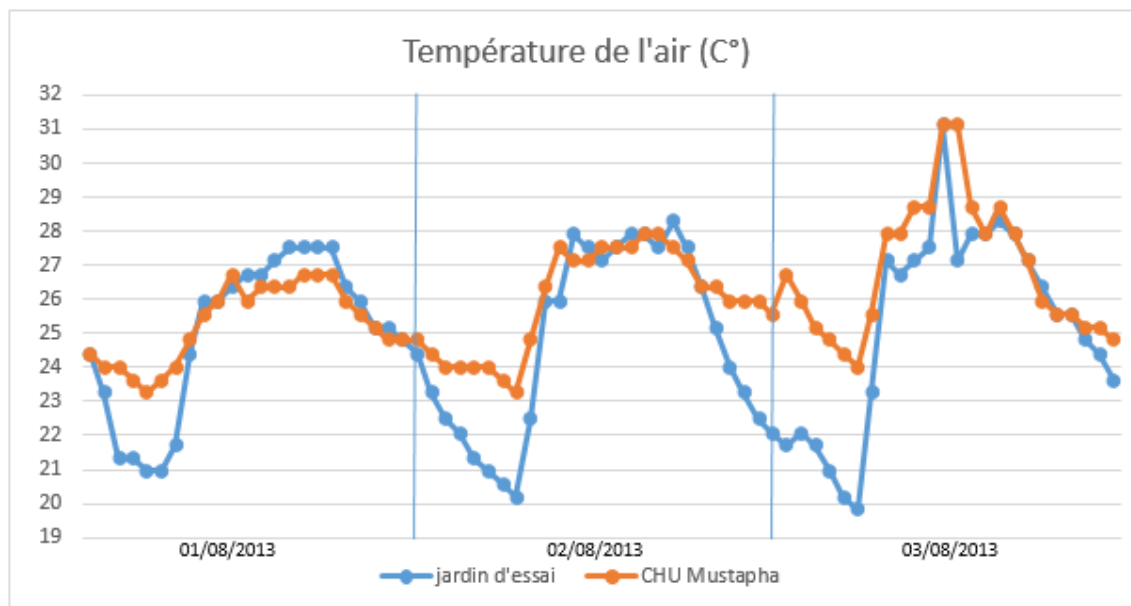


La méthodologie suivie est une approche qui combine les mesures sur site et la simulation numérique, cette dernière est effectuée à l'aide du logiciel ENVI-met 2004, qui permet de simuler le microclimat urbain.

Les différences entre les microclimats des deux sites a été faites par une lecture comparative des deux zones pour permettre l'évolution temporelle des phénomènes ICU/IFU ainsi que repérer les éventuels facteurs aggravant l'ICU (l'asphalte et les revêtements) ainsi que le rôle de la végétation dans le rafraîchissement de la ville.

La première partie de la recherche confirme que les phénomènes ICU et IFU sont issuent de l'Homme et de ses pratiques urbaines. L'aggravation de ces phénomènes a un impact sur la santé de l'Homme ainsi que sur son environnement et son écosystème. La nécessité d'intégrer

des solutions d'atténuation et de mitigation dans les actions de planification et d'aménagement urbain sont préconisées.



Graphique : variation de température mesurée à l'hôpital Mustapha et au jardin d'essai

Source : Daoudi et al (2016)

Par une lecture de graphique, il est remarqué que l'ICU est un phénomène nocturne, qu'il est enregistré d'une manière régulière entre 22h et 08h du matin. Et est en fonction de l'apport de la végétation où l'ombrage et l'évapotranspiration qui contribuent à rafraîchir l'air.

Les simulations sont résumées dans le tableau qui suit :

N°	Date/heure	Durée de simulation	Site	Vitesse du vent m.s ⁻¹	Direction du vent	Température initiale K	Humidité spécifique g/kg	Humidité relative %
S1	30-31/07/2013 06 :00	24H	CHU Mustapha	1.3	101.1	297.79	17.85	92.75
			Jardin d'essai	0.74	7	297.79	17.56	91.25
S2	01-02/08/2013 06 :00	24H	CHU Mustapha	1.11	81.4	297.01	15.26	82.75
			Jardin d'essai	0.2	262.5	294.71	14.63	91.25
S3	05-06/08/2013 06 :00	24H	CHU Mustapha	0.2	137.6	297.01	17.32	93.75
			Jardin d'essai	0.2	255.5	295.48	16.55	98.25
S4	01-02/07/2015 06 :00	24H	CHU Mustapha	1.5	115	298	13.77	70.22

Tableau : détails des simulations

Source : Daoudi et al (201)

Discussion des résultats :

La première simulation (S1) a été effectuée pour les dates du 30 et 31 juillet 2013 à partir de 06h du matin, cette journée était marquée par un ICU de moyenne intensité, 6.5°C d'écart enregistré, avec une variation moyenne de la vitesse du vent.

La deuxième simulation (S2) a eu lieu les 01 et 02 juillet 2013 à partir de 06h du matin. Cette période a été marquée par une forte intensité d'ICU et d'IFU et une faible variation de la vitesse du vent.

La troisième simulation (S3) a eu lieu les 05 et 06 Aout 2013 à partir de 6h du matin, cette période était marquée par une faible intensité d'ICU et une moyenne variation de la vitesse du vent.

La quatrième simulation (S4) réalisée les 01 et 02 juillet 2013 à 6h du matin, était marquée par une canicule où les températures maximales ont atteint les 39 °C, enregistrée par ONM Dar El Beida. De 00h à 06h nous avons enregistré un ICU au niveau de l'hôpital Mustapha de moyenne intensité avec un écart de température d'air de 5°C par rapport à celles enregistrés à Dar El Beida.

Une étude paramétrique a été établie, qui porte sur trois paramètres essentiels qui sont la végétation, l'albédo et le vent, dont les résultats ont illustré l'impact de ces derniers sur l'intensité des flots de chaleur/fraicheur urbains.

Les résultats confirment que la présence de végétation en milieu urbain, l'utilisation des matériaux avec albédo élevé ainsi qu'une bonne aération du milieu urbain participent largement à la diminution de l'intensité d'ICU, ce qui rend indispensable d'adopter ces paramètres comme solutions d'atténuation et de mitigation du phénomène d'ICU, et de les intégrer dans la planification et les aménagements urbains.

Annexe 04 : Simulation 1 : site d'étude comprenant des toitures minérales

Date	Time	Wind Speed (m/s)	Wind Direction (deg)	Potential Air Temperature (°C)	Relative Humidity (%)
03.08.2013	07.00.01	0,61	102,49	25,06	67,41
03.08.2013	08.00.01	0,60	102,55	26,08	66,86
03.08.2013	09.00.01	0,60	102,73	27,19	66,30
03.08.2013	10.00.01	0,59	103,21	28,11	65,77
03.08.2013	11.00.01	0,57	103,4	28,56	65,19
03.08.2013	12.00.01	0,57	103,13	28,83	65,69
03.08.2013	13.00.01	0,57	103,38	29,30	66,75
03.08.2013	14.00.01	0,57	103,9	29,64	67,62
03.08.2013	15.00.01	0,56	104,41	29,74	68,55
03.08.2013	16.00.01	0,56	104,81	29,68	69,66
03.08.2013	17.00.01	0,56	105,09	29,54	70,98
03.08.2013	18.00.01	0,55	105,2	29,17	72,67
03.08.2013	19.00.01	0,55	105,15	28,59	75,26
03.08.2013	20.00.01	0,55	104,85	28,12	76,30
03.08.2013	21.00.01	0,55	104,67	27,77	75,86
03.08.2013	22.00.01	0,56	104,55	27,45	74,79
03.08.2013	23.00.01	0,55	104,46	27,15	73,36
03.08.2013	00.00.01	0,55	104,38	26,86	71,71
03.08.2013	01.00.01	0,55	104,32	26,58	69,94
03.08.2013	02.00.01	0,55	104,28	26,30	68,07
03.08.2013	03.00.01	0,55	104,24	26,04	67,54
03.08.2013	04.00.01	0,55	104,22	25,78	67,88
03.08.2013	05.00.01	0,55	104,21	25,53	68,48
03.08.2013	05.59.59	0,54	104,2	25,27	69,22

Annexe 05 : Simulation 2 : site d'étude comprenant des toitures végétalisées

Date	Time	Wind Speed (m/s)	Wind Direction (deg)	Potential Air Temperature (°C)	Relative Humidity (%)
03.08.2013	07.00.01	0,75671	162,9	23,85	73,607
03.08.2013	08.00.01	0,75262	162,98	24,981	75,125
03.08.2013	09.00.01	0,74939	163,14	26,362	75,208
03.08.2013	10.00.01	0,74794	163,5	27,482	73,684
03.08.2013	11.00.01	0,74475	163,85	28,318	70,94
03.08.2013	12.00.01	0,73569	163,94	28,859	69,555
03.08.2013	13.00.01	0,72465	164,01	29,347	69,924
03.08.2013	14.00.01	0,71351	164,07	29,736	70,497
03.08.2013	15.00.01	0,70349	164,12	29,809	71,604
03.08.2013	16.00.01	0,6944	164,17	29,699	72,996
03.08.2013	17.00.01	0,68605	164,21	29,464	74,837
03.08.2013	18.00.01	0,67843	164,23	28,918	77,179
03.08.2013	19.00.01	0,67089	164,19	28,2	79,525
03.08.2013	20.00.01	0,66337	164,05	27,65	80,473
03.08.2013	21.00.01	0,6576	163,96	27,206	80,004
03.08.2013	22.00.01	0,65281	163,91	26,804	78,801
03.08.2013	23.00.01	0,64866	163,87	26,427	77,189
03.08.2013	00.00.01	0,64494	163,84	26,067	75,328
03.08.2013	01.00.01	0,64158	163,81	25,718	73,304
03.08.2013	02.00.01	0,63851	163,79	25,379	71,16
03.08.2013	03.00.01	0,6357	163,78	25,06	70,872
03.08.2013	04.00.01	0,63312	163,77	24,76	71,528
03.08.2013	05.00.01	0,63075	163,77	24,467	72,42
03.08.2013	05.59.59	0,62909	163,77	24,18	73,431

