

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



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : هندسة معمارية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de :

Doctorat en sciences en Architecture

Spécialité (Option) : Urbanisme bioclimatique

Impact des bâtiments de verre réfléchissant sur le microclimat urbain et la consommation énergétique Cas de la saison estivale à Alger.

Présentée par :

Mme ATIK-MEHAOUED Karima

Soutenue publiquement : le mardi 22 octobre 2019

Devant le jury composé de :

M. BELAKEHAL Azzedine	Professeur	Président	Université de Biskra
Mme. LARTIGUE Bérange	MCA	Rapporteur	Université de Toulouse III
M. BADA Yacine	Professeur	Examineur	Université de Biskra
M. BOUCHAIR Ammar	Professeur	Examineur	Université de Jijel
M. SEMMAR Djaffar	Professeur	Examineur	Université de Blida 1

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la santé et le courage de terminer ce travail.

Je remercie ma famille pour ses encouragements et son soutien.

Ce travail de thèse est le fruit d'une synergie entre les compétences, la disponibilité, les encouragements et l'affection de nombreuses personnes que je désire toutes remercier chaleureusement.

J'exprime tout d'abord ma grande gratitude à la PG de Biskra de nous avoir autorisés à nous réinscrire en doctorat suite à l'interruption de la PG de Tizi-Ouzou.

Toute ma reconnaissance va vers mon ex-encadreur Professeur Rafik BENSALAM, de m'avoir initiée à la thématique de l'objet de ma recherche.

J'adresse mes remerciements les plus forts à ma Directrice de thèse Bérangère LARTIGUE MCF-HDR à l'Université de Toulouse-III, pour ses encouragements, pour son exigence scientifique, pour sa générosité intellectuelle, sa patience et ses nombreux conseils tout au long de l'avancement de ma thèse. Merci encore Bérangère de m'avoir accueillie au sein du laboratoire PHASE de Toulouse et de m'avoir autorisée à y effectuer mes simulations numériques.

Merci aux membres du jury, en l'occurrence Pr. BADA Yacine, Pr. BOUCHAIR Ammar et Pr. SEMMAR Djaffar d'avoir accepté de lire et d'évaluer ma thèse.

J'exprime ma reconnaissance au Pr. Azzedine BELAKEHAL qui a été d'une grande disponibilité à répondre à tous mes questionnements sur Messenger.

J'adresse mes remerciements à Mactar Fae pour ses démarches qui m'ont facilité les étapes du plan d'expériences.

En particulier je souhaite remercier Mme Fazia Ali-Toudert pour son entretien et ses conseils très enrichissants sur les phénomènes microclimatiques.

Un grand merci à la directrice du laboratoire LAE de l'EPAU professeur CHABI-CHEMROUK Naima d'avoir mis à ma disposition les instruments de mesure météorologiques.

Je remercie les occupants du siège social de la SONATRACH à Hydra, de m'avoir chaleureusement accueillie au sein de leur édifice, particulièrement M. Omeiri le responsable de la sécurité de l'immeuble pour m'avoir facilité le déroulement de la campagne de mesures.

Un très grand merci à tous ceux que j'ai omis de citer mais que ma mémoire à long terme garde précieusement.

Dans la ville d'Alger, on observe une prolifération des façades en verre réfléchissant des immeubles de bureaux neufs ou réhabilités. Ces réalisations sont considérées comme une nouvelle mode supposées de donner un souffle de jeunesse à la ville. Pourtant, dans d'autres pays comme la Chine et l'Australie, ce type de verre a fait l'objet d'inquiétudes des chercheurs quant aux effets d'éblouissement occasionnés dans les espaces extérieurs. Sous nos latitudes, le problème se pose également en termes de surchauffe. En effet, le rayonnement solaire réfléchi par ces façades vitrées a un impact significatif, et présente des modifications considérables des conditions thermiques.

Un des objectifs de cette thèse est d'étudier le microclimat urbain autour des bâtiments en verre réfléchissant, ainsi que leurs consommations d'énergie en climatisation. Pour cela, nous avons mené une étude expérimentale et numérique d'un bâtiment en verre. Puis, nous avons généralisé l'investigation du microclimat par une étude rigoureuse de sensibilité multicritères, suivant la méthodologie du plan d'expériences. L'intérêt de cette étude est de chiffrer l'impact de plusieurs facteurs influents sur la consommation de climatisation. Pour cela, nous avons choisi une morphologie urbaine répandue du type canyon, que de nombreux travaux utilisent pour des études sur la consommation d'énergie.

De plus, nous adoptons la méthode de couplage numérique qui associe deux logiciels; ENVI-met pour l'étude du microclimat autour des bâtiments, et un logiciel d'énergétique du bâtiment Ecotect Analysis 2011 pour le calcul des charges de climatisation. L'intérêt de cette démarche est d'approfondir d'avantage notre recherche, en explorant l'impact du réchauffement du microclimat provoqué par les verres réfléchissants sur la consommation énergétique du bâtiment.

Mots clés : Verre réfléchissant, réflectivité solaire, microclimat, mesures *in-situ*, couplage numérique, rue canyon, étude paramétrique, plan d'expériences.

In the urban landscape of Algiers city, a spread of reflective glass façades of new and rehabilitated office buildings is observed. It is seen as a new fashion, and supposed to give a breath of youth to the city. However, in other countries like China and Australia, this type of glass worries scientists about the visual glare caused in outdoor spaces. In our latitudes, the problem arises not only in terms of glare, but more so in terms of thermal discomfort. Indeed, reflected solar radiation has a significant impact and shows considerable change in physical conditions.

One of the objectives of this thesis is to study the urban microclimate around reflective glass buildings, as well as their energy consumption in air conditioning. For this, we carried out an experimental and numerical study of the microclimate around a real building. Then, we generalize the investigation by a rigorous multicriteria sensitivity study, according to the methodology of design of Experiments. The interest of this study is to quantify the impact of several factors, all influencing the consumption of air conditioning. For this, we chose the urban canyon morphology which is a widespread case that a lot of studies use for energy consumption analysis.

In addition, we adopt the numerical coupling method which combines two tools; the ENVI-met software to study the microclimate around buildings, and Ecotect Analysis 2011 software for the calculation of cooling load. The interest of this approach is to deepen our research further by exploring the impact of the microclimate warming caused by reflective glasses on the building's energy consumption.

Key words: Reflecting glass, solar reflectivity, microclimate, *in-situ* measurements, numerical coupling, canyon street, parametric study, design of experiments.

في مدينة الجزائر ، هناك انتشار كبير للواجهات الزجاجية العاكسة للمباني سواء كانت مكاتب جديدة أو معادة. تعتبر هذه الظاهرة موضحة جديدة يفترض أن تعطي نفسا جديدة للمدينة. لكن في بلدان أخرى كالصين و أستراليا، يشكل هذا النوع من الزجاج مصدر تساؤلات للباحثين عن ما يوتر ذلك في المساحات الخارجية والمباني المحيطة بها. في بلدنا، تظهر أيضا مشكلة ارتفاع درجة الحرارة. وبالفعل، فإن أشعة الشمس المنعكسة لها تأثير كبير في تغيير الظروف الحرارية.

الهدف من هذه الرسالة هو دراسة المناخ الحضري حول المباني الزجاجية العاكسة و الطاقة المستهلكة في تكييف الهواء بداخلها. من أجل هذا، أجرينا دراسة تجريبية وعددية حول مبنى حقيقي. ثم قمنا بتعميم التحقيق في دراسة صارمة للحساسية متعددة المعايير ، في أعقاب منهجية التصميم التجريبي. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد تأثير عدة عوامل على استهلاك الطاقة في تكييف الهواء. لهذا، قمنا باختيار مورفولوجية حضرية لطريق ضيق كنوع ، وهي حالة منتشرة على نطاق واسع تستخدمها العديد من الأبحاث لدراسة استهلاك الطاقة.

نعتمد في رسالتنا طريقة على جمع برنامجين اثنين من برامج المحاكاة الرقمية. برنامج المناخ المحلي ENVI-met المستخدم لدراسة المناخ حول المباني ، وبرنامج Ecotect Analysis 2011 لحساب الطاقة المستهلكة للتكييف. وميزة هذا النهج هو تعميق أبحاثنا من خلال استكشاف تأثير احترار المناخ المحلي الناجم عن الواجهات الزجاجية العاكسة على استهلاك الطاقة للمباني.

الكلمات المفتاحية : الزجاج العاكس، انعكاس الطاقة الشمسية، المناخ المحلي، قياسات في الموقع، الاقتران الرقمي، الشارع الضيق، دراسة حدودي، وتصميم التجارب.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....1

Introduction..... 1

Problématique.....5

Hypothèses de l'étude.....5

Objectifs de l'étude.....6

Méthode de recherche.....6

Structure de la thèse.....9

Première partie : REPERES THEORIQUES

CHAPITRE-I- LE BATIMENT ET LE CONTEXTE ENERGETIQUE EN ALGERIE.....10

I- 1. Introduction..... 10

I- 2. Consommation mondiale de l'énergie..... 12

I- 3. Impact des bâtiments sur la consommation énergétique en Algérie..... 14

I- 4. Politique énergétique 15

I- 5. Réglementation thermique..... 16

I- 6. Programmes et projets réalisés..... 17

 I- 6.1. Programme des énergies renouvelables et fossiles..... 17

 I- 6.1.1. Gisement solaire en Algérie 17

 I- 6.1.2. Exploitation des gaz de schiste..... 19

 I- 6.2. Projets réalisés 20

 I- 6.2.1. Siège de l'ARPT à Bab-Ezzouar..... 20

 I- 6.2.2. Centre Hospitalo-Universitaire d'Alger..... 21

 I- 6.2.3. Agence du "Touring Voyages Algérie" à Biskra 22

 I- 6.2.4. Village touristique à Bouzedjar Ain-Temouchent 23

 I- 6.2.5. Projet des 600 et 100 logements à HPE "Eco-bât" 24

 I- 6.2.6. Projet MED-ENEC à Souïdania..... 24

I- 7. Conception bioclimatique et réduction des consommations d'énergie 25

 I- 7.1. Principes de l'architecture bioclimatique..... 27

 I- 7.1.1. Implantation des bâtiments..... 27

 I- 7.1.2. Orientation et forme 27

 I- 7.1.3. Inertie thermique 28

 I- 7.1.4. Isolation thermique 30

 I- 7.1.5. Ventilation naturelle..... 31

I- 7.2.	Dispositifs de l'architecture bioclimatique	32
I- 7.2.1.	Architecture cinétique.....	33
I- 7.2.2.	Façade double-peau.....	33
I- 7.2.3.	Protections solaires et ombrages	35
I- 7.2.4.	Le mur Trombe-Michel	35
I- 7.2.5.	Serres ou vérandas bioclimatiques	36
I- 7.2.6.	Surfaces vitrées	38
I- 8.	Conclusion	44
<u>CHAPITRE-II -LE MICROCLIMAT URBAIN ET SES INTERACTIONS AVEC LE</u>		
<u>BATI.....</u>		45
Introduction		45
I.1 Le climat et ses échelles.....		46
II.2 L'atmosphère et les différentes couches limites		48
II.2.1 La couche limite atmosphérique (CLA) ou planétaire (CLP)		48
II- 1.1.1. La couche limite urbaine (CLU)		49
II- 1.1.2. La canopée urbaine (CU).....		50
II- 2. L'îlot de chaleur urbain.....		51
II- 2.1. Intensité d'ICU.....		53
II- 2.2. Mécanismes d'apparition et d'atténuation de l'ICU		54
II- 2.2.1. Effet du stockage de chaleur sur l'îlot de chaleur (Q_{bat}).....		54
II- 2.2.2. Impact de l'énergie anthropique sur l'îlot de chaleur urbain (Q_a)		56
II- 2.2.3. Effets de l'eau et de la végétation sur l'îlot de chaleur urbain (QI)		56
II- 3. Le bilan radiatif au-dessus d'une ville.....		60
Ces deux indicateurs de la géométrie urbaine (ratio H/W et SVF) sont cités plusieurs fois dans nos références, nous les utiliserons pour notre recherche afin de décrire nos résultats.....		
II- 3.1. Le rayonnement solaire global		62
II- 3.1.1. Le rayonnement direct		63
II- 3.1.2. Le rayonnement diffus		64
II- 3.2. Le rayonnement solaire et le type de ciel		65
II- 3.3. Le rayonnement incident sur les bâtiments		65
II- 3.4. Le domaine de l'infrarouge et le bâtiment.....		66
II- 3.5. L'albédo des surfaces.....		66
II- 3.6. Les températures de surface		69
II- 3.6.1. Les effets de dièdre		70
II- 3.6.2. L'effet des surfaces chaudes.....		72
II- 3.6.3. Effet de l'orientation de l'espace		73
II- 3.6.4. Effet des dimensions et de la géométrie de l'espaces		73
II- 4. Effets aérauliques en milieu urbain		75
II- 4.1. Influence de la rugosité urbaine		75

II- 4.2.	Influence de la volumétrie des bâtiments	77
II- 4.3.	Influence de l'agencement urbain	78
II- 4.3.1.	Les formes isolées.....	78
II- 4.3.2.	Les formes associées.....	78
II- 4.4.	Influence de l'orientation du tissu urbain	79
II- 5.	Concepts du contrôle climatique en milieu urbain	80
II- 5.1.	Conclusion.....	82
<u>CHAPITRE-III-ETAT DE L'ART DE LA RECHERCHE SUR LA PERFORMANCE</u>		
<u>ENERGETIQUE DU BATIMENT.....</u>		
III- 1. Introduction.....		
83		
III- 2. Effets des paramètres urbains sur les consommations énergétiques		
84		
III- 2.1.	Effet de la température d'air.....	84
III- 2.2.	Effet des vents locaux	87
III- 3. Apport des aménagements.....		
92		
III- 3.1.	Apport de la végétation.....	92
III- 3.2.	Apport de l'eau	99
III- 4. Caractéristiques de l'enveloppe bâtie		
105		
III- 4.1.	Bâtiments auto-ombragés à façades inclinées	105
III- 4.2.	Isolation	110
III- 4.3.	Matériaux à changement de phase (MCP).....	112
III- 4.4.	Matériaux réfléchifs sur les toits	115
III- 4.5.	Murs-rideaux de verre.....	116
III- 4.5.1.	Façades double-peau (FDP)	122
III- 5. Interactions entre microclimat et aménagements.....		
123		
III- 6. Conclusion		
134		
<u>Deuxième partie : ETUDE DE CAS</u>		
<u>CHAPITRE-IV -ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE D'UN IMMEUBLE EN</u>		
<u>VERRE REFLECHISSANT.....</u>		
135		
IV- 1. Introduction.....		
135		
IV- 2. Présentation de l'immeuble en verre réfléchissant		
135		
IV- 2.1.	Choix du type de bâtiment.....	135
IV- 2.2.	Situation géographique	135
IV- 2.3.	Configuration formelle et spatiale	137
IV- 2.4.	Taux de vitrage des façades	139

IV- 2.5.	Propriétés énergétiques et lumineuses.....	140
IV- 2.6.	Type de réflexion	142
IV- 2.7.	Système HVAC	142
IV- 3.	Méthodologie de recherche : L'approche in-situ des ambiances	143
IV- 3.1.	Campagne de mesures : Protocole et instrumentation.....	145
IV- 3.2.	Couplage numérique	148
IV- 3.2.1.	Choix du logiciel de simulation microclimatique ENVI-met	149
IV- 3.2.2.	Limites du logiciel ENVI-met.....	150
IV- 3.2.3.	Paramètres des simulations d'ENVI-met pour le bâtiment existant	151
IV- 3.2.4.	Choix du logiciel de simulation énergétique Ecotect.....	154
IV- 3.2.5.	Paramètres des simulations d'Ecotect pour le bâtiment existant.....	157
IV- 4.	Analyse et interprétation des résultats.....	160
IV- 4.1.	Mesures micro-météorologiques	160
IV- 4.1.1.	Température de l'air et humidité relative.....	160
IV- 4.1.2.	Vitesse du vent	161
IV- 4.1.3.	Températures de surfaces des murs-rideaux de verre réfléchissant.....	162
IV- 4.1.4.	Microclimat autour du bâtiment	165
IV- 4.2.	Calcul des consommations d'énergie de climatisation.....	173
IV- 5.	Conclusion	176
CHAPITRE-V-	ETUDE DE SENSIBILITE DES FACTEURS IMPACTANT LE	
MICROCLIMAT ET LA CONSOMMATION ENERGETIQUE.....		177
V- 1.	Introduction.....	177
V- 2.	Présentation de l'étude paramétrique.....	177
V- 2.1.	Méthodologie du plan d'expériences (Design of Experiments-DOE).....	178
V- 2.1.1.	Historique	178
V- 2.1.2.	Les facteurs.....	179
V- 2.1.3.	Méthode du plan Factoriel Fractionné	179
V- 2.1.4.	Choix des paramètres (facteurs).....	180
1)	Modèle urbain : canyon	180
2)	Paramètres.....	180
V- 3.	Les réponses.....	182
V- 4.	Consommation énergétique	184
V- 5.	Paramètres d'entrées des simulations d'ENVI-met.....	185
V- 5.1.	Paramètres météorologiques.....	185
V- 5.2.	Choix de l'emplacement des récepteurs	187

V- 6. Paramètres d'entrées pour la simulation Ecotect	189
V- 7. Analyse du microclimat dans les canyons.....	189
V- 7.1. Températures de l'air.....	189
V- 7.1.1. Simulation n°04 [-1, +1, +1]	189
Figure V-5 : Températures de l'air dans les canyons pour la Simulation n°04 [-1, +1, +1].....	191
Figure V-6 : Ensoleillement et ombrage dans les canyons pour la Simulation n°04 [-1, +1, +1].....	192
V- 7.1.2. Simulation n°02 [-1, -1, +1]	193
Figure V-7 : Températures de l'air dans les canyons à 18h. Simulation n°02 [-1, -1, +1]	194
Figure V-8 : Ensoleillement et ombrage des canyons à 18h. Simulation n°02 [-1, -1, +1]	195
V- 7.1.3. Simulation n°08 [+1, +1, +1]	196
Figure V-9 : Températures de l'air dans les canyons pour la simulation n°08 [+1, +1, +1].	197
V- 7.1.4. Simulation n°06 [+1, -1, +1]	199
V- 7.2. Comparaison des deux verres : Ecart des températures de l'air.....	202
V- 7.2.1. Simulations n°03 [-1, +1, -1] et 04 [-1, +1, +1]	203
V- 7.2.2. Simulations n°01 et 02 [-1, -1, -1] et [-1, -1, +1].....	204
V- 7.2.3. Simulation n°07 et 08 [+1, +1, -1] et [+1, +1, +1].....	206
V- 7.2.4. Simulations n°05 et 06 [+1, -1, -1] et [+1, -1, +1]	207
V- 7.3. Flux de rayonnement à ondes courtes	209
V- 8. Conclusion	213
V- 9. Lien entre les deux études réalisées	213
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	214
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	221
 ANNEXES	
 Annexe-A : Climat de la ville d'Alger.	
Annexe-B : Démarches des simulations d'ENVI-met.	
Annexe-C : Résultats des simulations du récepteur S1.	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de structure de thèse (Partie théorique).....09

Figure 2 : Schéma de structure de thèse (Etude de cas).....10

Figure I-1 : La consommation énergétique mondiale par habitant en 2013, en Tep.(Source : BPstats, 2014).....12

Figure I-2 : Ensoleillement annuel en heures en Algérie. (Source : <http://portail.cder.dz>).....17

Figure I-3 : Les bassins identifiés en Algérie comme potentiels de gaz de schiste, (Source : Chapelle et Petitjean, 2015, p.4).....17

Figure I-4 : Vue extérieure du projet ARPT à Bab-Ezzouar, (Source : www.mcarchitects.it)19

Figure I-5 : Coupe schématique montrant les procédés bioclimatiques utilisés dans le projet ARPT, (Source : www.mcarchitects.it)20

Figure I-6 : Vue extérieure du projet du CHU, (Source : www.mcarchitects.it)20

Figure I-7 : Schémas montrant les principes de conception du CHU, (Source : www.mcarchitects.it)21

Figure I-8 : Agence du Touring Voyages Algérie à Biskra, (Source : mellaoui-smail.com)22

Figure I-9 : Vues extérieures sur le prototype du village touristique de Bouzedjar, (Source : Mekki, 2010, p.1) ...
.....22

Figure I-10 : Vue extérieure du projet des 600 logements à HPE, (Source : www.agencecofin.com)23

Figure I-11 : Vue sur le projet-pilote à Souïdania ; logement efficace en énergie, (Source : Chenak, 2009, p.2).....23

Figure I-12 : Stratégie du chaud, (Source : Liébard et de Herde, 2005, p.31b).....25

Figure I-13 : Stratégie du froid, (Source : Liébard et de Herde, 2005, p.32b).....25

Figure I-14 : Disposition en quinconce des bâtiments pour une meilleure ventilation selon Koenigsberger et al. (1973), (Source : Ali-Toudert, 2000, p.35)26

Figure I-15 : Articles en relation aux MCP publiés chaque année de 2000 à 2014. (Source : Akeiber et al. p.4, 2016)28

Figure I-16 : Répartition des déperditions d’une maison familiale standard non isolée. (Source : Branders et Evrard, 2011, p.13).....30

Figure I-17 : Systèmes de ventilation traditionnels d’après Sørensen, (Source : Widera, 2014, p.2).....31

Figure I-18 : Vues d’une façade double-peau; de l’extérieur à gauche, la cavité à droite: Office 64 à Bayonne, Architecte P. Arotcharen. (Source : Dugue, 2013, p.54)32

Figure I-19 : Protections solaires en textile, Bibliothèque Nationale de Riyadh, Architectes : Gerber et Lücking (Source : Schittich, 2015, p.85).....33

Figure I-20 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, (Source : Dugue, 2013, p.70).....34

Figure I-21 : Différentes intégrations de la serre (en bleu) au bâti (en gris), en épi, en angle ou semi encastrée, et encastrée, de gauche à droite), (Source : AGEDEN, p.3.)35

Figure I-22 : Serre encastrée du Centre de formation et d'examens, à Lille en France. Architecte: J-L Hornez. (Source : archicontemporaine.org).....36

Figure I-23: L'Equitable Saving and Loan Building à Portland, 1947. (Source: Schittich, 2001, p. 39)	37
Figure I-24: Système constructif des murs-rideaux (Source : CERTU, 2003, p. 11)	38
Figure II-25 : Situation de la couche limite planétaire par rapport à la basse atmosphère d'après Oke 1999. (Source : Boucheriba, 2005, p. 53).....	43
Figure I-26 : Le manoir Hardwick Hall en Angleterre, conçu par R. Smythson. (Source : www.google.com).....	39
Figure I-27 : La Chapelle de Kings College Cambridge, fondé par Henri VI (Vues extérieure et intérieure). (Source : www.google.com).....	39
Figure I-28 : Le Cristal Palace (à gauche) et la galerie Victor-Emmanuel-II (à droite). (Source : www.google.com).....	40
Figure I-29 : Hôtel de ville de Londres réalisé 2002, conçu par Norman Foster. (Source : www.google.com).....	41
Figure I-30 : Institut du monde arabe, Paris, France, 1987, Jean Nouvel. (Source : www.google.com).....	42
Figure I-31 : Bâtiments en verre réfléchissant à Alger. (Source : www.google.com).....	43
Figure II-1 : Etendue spatiale des différentes échelles du climat. (Source : Tapadinhas, 2012, p. 18).....	47
Figure II-2 : Situation de la couche limite planétaire par rapport à la basse atmosphère d'après Oke 1999. (Source : Boucheriba, 2005, p. 53).....	48
Figure II-3: Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs et inférieurs à 3 m/s d'après Mestayer et Anquetin, 1995 (Source : Ringenbach, 2003, p.9).....	49
Figure II-4 : Représentation d'un profil de température type d'îlot thermique observé à Paris par vents faibles et ciel clair. (Source: Dubois, 2013, p.12)	50
Figure II-5 : Évolution de la température en deux points de Toulouse, le 25 février 2005 d'après Pigeon et al., 2008, (Source: Bonhomme, 2013, p.49)	52
Figure II.6 : Vues sur les matériaux de revêtement du site étudié: (a) gazon, (b) eau, (c) marbre noir et (d) asphalte (Source : Chatzimitriou et Yannas, 2015, p. 12)	53
Figure II-7: Températures de surface des matériaux couvrant le site étudié, (Source : Chatzimitriou et Yannas, 2015, p. 13).....	54
Figure II-8 : Vue aérienne sur le Jubilee Park sur la toiture de la station métro Jubilee Line underground.....	56
Figure II-8 : Les bienfaits du végétal en ville (Manusset, 2012, p.).....	58
Figure II-10 : Schéma représentant une rue canyon. (Source Ringenbach, 2004, p. 9).....	59
Figure II-11 : Photographies fisheye de différentes rues à Constantine pour le calcul des facteurs de vue du ciel (Source : Bourbia et Boucheriba., 2010).....	60
Figure II-12 : Relation entre la géométrie du canyon urbain H/W et l'intensité maximale de l'ICU chaleur ($\Delta T_{u-r(max)}$), (Source: Oke, 1988, p.7). u : urbain, r : rural.....	60
Figure II-13 : Relation entre le facteur de vue du ciel (SVF) pour 58 rues canyon de Göteborg (Suède) et la	

température de surface (Source : Eliasson, 1990, p.3)	61
Figure II-14 : Distribution spectrale de l'énergie solaire.(Source : Dessus et Pharabod, 2002, p. 16).....	61
Figure II-15 : Le piégeage et les multiréflexions du rayonnement solaire d'après CSTB, 1996. (Source : Adolphe et al., 2002, p. A 1.19)	62
Figure II-16 : Composantes du rayonnement solaire global. (Source Liébard et De Herde, 2005, p. 13b).....	63
Figure II-17 : Evolution des différentes composantes du bilan radiatif au cours d'une période de 24 h Avignon-Montfavet avec un ciel clair et un ciel couvert d'après Guyot, 1997 (Source : Boussoualim, 2002, p. 24)	64
Figure II-18 : Flux directs et diffus au niveau de l'atmosphère et de la paroi, (Source : Chestné, 2013, p.20)	65
Figure II-20 : La réflectance et sa dépendance angulaire. (Button et Pye, 1993, p. 157).....	66
Figure II-21 : Schématisation de l'effet de dièdre d'après Izard et al, 2000. (Source: Sigrid, 2008, p. 10)	69
Figure II-22 : Simple dièdre à 14 :30 : Façade et sol, Boulevard Chave, France. (Source : Lehtihet et Izard, 2002, p.2)	70
Figure II-23 : Double dièdre sud-est à 14 :30 : façades contigües et sol, Place Jean Jaurès, France (source : Lehtihet et Izard, 2002, p. 2)	70
Figure II-24 : Double effet de dièdre de deux façades contigües. (Source : Laboratoire ABC, 2000).....	70
Figure II-25 : Ecart de la température de l'air à l'intérieur d'une rue canyon orientée E-O et au dessus des toits (Source: Pearlmutter, 1998, p.)	71
Figure II-26 : Ecart de température de l'air entre les canyons orientés E-O et N-S, pour 5 prospects H/W de 0.5, 1,2, 3 et 4 (Source : Ali-Toudert, 2005, p.97).....	72
Figure II-27 : Radiation solaire moyenne par jour dans les canyons urbains, Copenhague, calculée en ECOTECH, (Source : Strømman-Andersen et Sattrup, 2011, p.6).....	73
Figure II-28 : Exemple d'une rue canyon asymétrique (photographie fisheye à gauche, schéma à droite), (Source : Boucheriba, 2005, p.128).....	73
Figure II-29 : Angle d'incidence du rayonnement dans une rue Est-Ouest d'une ville placée à une latitude de 45°N, et proportions de façade potentiellement au soleil, en fonction de la largeur L de la rue et de la hauteur H des bâtiments (Source : Oke, 1988, p.8).....	74
Figure II-28 : Écoulement du vent autour d'un bâtiment cubique. A gauche, en coupe verticale selon Thurow (1983), (Source : Robitu, 2005, p. 39) et à droite en coupe horizontale et avec incidence du vent oblique (Source : Liébard et De Herde, 2006, p. 145 b)	76
Figure II-29 : Les effets du vent sur les bâtiments isolés et associés, (Source : Reiter, 2006, p.55)	78
Figure II-30 : Profil de la circulation de l'air dans une rue canyon en fonction du rapport d'aspect H/W de la hauteur et de sa largeur : (a) écoulement à rugosité isolée, (b) un écoulement à interface de sillage, (c) écoulement rasant (Source : Oke, 1987, p.5)	79
Figure III-1 : Distribution des charges de climatisation à Athènes pour le mois d'Août de l'année 1996. (Source : Santamouris et al., 2004, p.100).....	84
Figure III-2 : Variations spatiales du pic de climatisation de l'immeuble de référence pour une température de confort de 27°C. Les valeurs sont en kW. (Source : Santamouris et al., 2004, p.101).....	85

Figure III-3 : Situation de la maison cas d'étude. (Source : Mochida et al, 2006, p.3).....	86
Figure III-4 : Différentes dispositions des arbres autour de la maison étudiée, (Source : Mochida et al., 2006, p.7)	87
Figure III-5 : Vue en plan (à gauche) et coupe verticale (à droite) de la maison étudiée. (Source : Mochida et al., 2006, p.5).....	88
Figure III-6 : Distribution de la vitesse de l'air (m/s) mesurée à une hauteur de 4,5m à 12h10, le 13 Août. (Source : Mochida et al., 2006, p.8).....	88
Figure III-7 : Température de l'air intérieur, PMV et charges de climatisation pour les cas 1-a et 1-b, pour le mois d'Août (Source : Mochida et al., 2006, p.10)	89
Figure III-8 : Bilan des charges de climatisation, (Source : Mochida et al., 2006, p.10)	90
Figure III-9 : Aménagements minéralisé du site d'étude (Source : Bouyer, 2009, p.215).....	91
Figure III-10 : Aménagements végétalisé du site d'étude (Source : Bouyer, 2009, p.216).....	92
Figure III-11 : Repérage des bâtiments simulés. (Bouyer, 2009, p.210).....	93
Figure III-12 : Maillage du modèle bidimensionnel du canyon, (Source : Alexandri et Jones, 2008, p.2).....	95
Figure III-13 : Baisse de la température de l'air du canyon pour les différentes villes étudiées, (Source : Alexandri et Jones, 2008, p.7)	96
Figure III-14 : Taux de réduction des charges de climatisation, avec une température intérieure de 23°C, pour les cas du "tout verdi" (t v) et des "murs verdis" (m v) de tous les climats étudiés. (Source : Alexandri et Jones, 2008, p.12).....	97
Figure III-15 : Vue la configuration des rangées de rues canyons. (Source : Krüger et Pearlmutter, 2008, p.3).....	99
Figure III-16 : Consommations d'énergie en fonction des surfaces des bassins d'eau (Source : Krüger et Pearlmutter, 2008, p.8).....	100
Figure III-17 : Schématisation des constituants d'une toiture-bassin. (Source : Tang et al., 2003, p.2).....	101
Figure III-18 : Le toit évapo-réfléctif ; schéma à gauche et vue photographique à droite. (Source Ben Cheikh et Bouchair, 2008, p.2).....	101
Figure III-19 : Comparaison des températures d'air intérieur sans ventilation à gauche, avec ventilation nocturne à droite. (Ben Cheikh et Bouchair, 2008, pp.4-5).....	102
Figure III-20 : Représentation schématique des unités expérimentales et la salle de contrôle. (Source: Ye et al., 2014, p.5).....	106
Figure III-21 : Comparaison de l'index d'économie d'énergie (ESI) d'une chambre avec MCP et EPS en Eté (a), et sur une année entière (b). (Source: Ye et al., 2014, p.9)	107
Figure III-22 : Température sur les surfaces intérieures de la PCMw et HW pendant (a) le jour d'été ensoleillé (b) le jour d'été pluvieux, ainsi que (c) la température sur les surfaces intérieures des fenêtres avec différents types de verre pour une journée d'été ensoleillée (Source: Zhong et al., 2015, p.6)	108
Figure III-23 : Les solutions potentielles (Source : Lartigue et al., 2014, p.7).....	112
Figure III-24 : Solutions optimales obtenues par la méthode Pareto, (Source : Lartigue et al., 2014, p.8).....	113

Figure III-25 : Consommation finale d'énergie montrant les valeurs maximales, le quartile supérieur, la médiane, le quartile inférieur et les valeurs minimales et coefficient de variation. (Source : Lam et al., 2015, p4).....	115
Figure III-26 : Immeuble de bureaux étudié comme simulé avec TRNSYS 16, (Source : Ali-Toudert, 2009, p.1)	118
Figure III-27 : Charges de chauffage et de climatisation pour la ville de Mannheim, (Source : Ali-Toudert, 2009, p.4)	119
Figure III-28 : L'immeuble étudié entouré par deux rues canyons avec un aspect H/W=1, (Source : Allegrini et al., 2012, p.3).....	121
Figure III-29 : Consommations annuelles de chauffage et refroidissement pour les trois types de bâtiments et les deux configurations (SC et SA), (Source : Allegrini et al., 2012, p.5).....	122
Figure III-30 : Bâtiment étudié et voisinage dans le logiciel ENVI-met, (Source : Yang et al., 2012, p.5).....	119
Figure III-31 : Consommations annuelles de chauffage et refroidissement pour les trois types de bâtiments et les deux configurations (SC et SA), (Source : Allegrini et al., 2012, p.5).....	122
Figure III-32 : Bâtiment étudié et voisinage dans le logiciel ENVI-met. (Source : Yang et al., 2012, p.5).....	124
Figure III-33 : Bâtiment étudié et voisinage dans le logiciel EnergyPlus. (Source : Yang et al., 2012, p.5).....	124
Figure III-33 : Charges horaires sensibles et latentes de climatisation pour les Cas 1–4 à Guangzhou. (lignes continues : Charges sensibles ; lignes discontinues : charges latentes), (Source : Yang et al., 2012, p.7).....	125
Figure III-34 : Charges horaires de chauffage pour les cas 1–4 à Francfort. (Source: Yang et al., 2012, p.7).....	126
Figure IV-1 : Situation de l'immeuble cas d'étude dans le quartier de Hydra (Source : Chabane, 2006, p.73).....	131
Figure IV-2 : Situation de l'immeuble étudié dans son contexte immédiat. (Source : Service technique de La SONATRACH).....	132
Figure IV-3 : Vue extérieure de l'immeuble étudié (Source : Auteur).....	133
Figure IV-4 : Plan de l'étage courant de l'immeuble étudié. (Source : Service technique SONATRACH).....	133
Figure IV-5 : Vue extérieure du bâtiment étudié (Source : Auteur).....	134
Figure IV-6 : Vues intérieures du bâtiment étudié (Source : Chabane, 2006, p.75)	134
Figure IV-7 : Composition du verre réfléchissant. (Source : http://multiglass.be).....	135
Figure IV-8 : Propriétés énergétiques et lumineuses du double vitrage étudié, (Source : Button et Pye, 1993, p.41)	136
Figure IV-9 : Réflexions spéculaires des murs-rideaux	137
Figure IV-10 : Dispositifs de refroidissement ; ventilo-convecteur à gauche, plafonnier à droite. (Source : Chabane, 2006, p.77).....	138
Figure IV-11 : Localisation horizontale des points de mesures	141
Figure IV-12 : Localisation verticale des points de mesures	141

Figure IV-13 : Schéma illustrant l'approche méthodologique utilisée. (Source : Auteur).....	144
Figure IV-14 : Calculateur d'humidité spécifique Climate Calculator. (Source : www.mm-systeme.de).....	146
Figure IV-15 : Vue en plan montrant la disposition horizontale des récepteurs. (Source : Auteur).....	149
Figure V-16 : Coupe montrant la disposition verticale des récepteurs. (Source : Auteur).....	149
Figure IV-17 : Zones thermiques représentées dans Ecotect.....	154
Figure IV-18 : Evolution des températures de l'air et de l'humidité relative mesurées sur le toit de l'immeuble.....	156
Figure IV-19 : Evolution des vitesses du vent durant mesurées sur le toit de l'immeuble.....	157
Figure V-20 : Températures de surface des murs-rideaux de verre réfléchissant	158
Figure IV-21 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées.....	161
Figure IV-22 : Microclimat autour de l'immeuble à 9h du matin, aux trois niveaux considérés.....	163
Figure IV-22 : Microclimat autour de l'immeuble à 12h du matin, aux trois niveaux considérés.....	164
Figure IV-22 : Microclimat autour de l'immeuble à 15h du matin, aux trois niveaux considérés.....	165
Figure IV-22 : Microclimat autour de l'immeuble à 18h du matin, aux trois niveaux considérés.....	166
Figure IV-23 : Charges de Climatisation pour les Cas-1, Cas-2 et Cas- 3.....	167
Figure V-1 : Charges totales de climatisation pour tous les cas simulés.....	176
Figure V-2 : Situation de la station météorologique Dar-El-Beida. (Source : Google Earth réadapté par l'auteur).....	177
Figure V-3 : Vue en plan indiquant le positionnement des récepteurs.....	179
Figure V-4 : Coupe verticale indiquant le positionnement des récepteurs et les zones thermique simulées.....	179
Figure V-5 : Zones thermique représentées dans Ecotect.....	180
Figure V-6 : Températures de l'air dans les canyons pour la Simulation n°04 [-1, +1, +1].....	182
Figure V-7 : Ensoleillement et ombrage dans les canyons pour la Simulation n°04.....	183
Figure V-8 : Températures de l'air dans les canyons pour la Simulation n°02 [-1, -1, +1].....	185
Figure V-9 : Ensoleillement et ombrage dans les canyons pour la Simulation n°02.....	186
Figure V-10 : Températures de l'air dans les canyons pour la Simulation n°08 [+1, +1, +1].....	188
Figure V-11 : Ensoleillement et ombrage dans les canyons pour la Simulation n°08.....	189
Figure V-12 : Températures de l'air dans les canyons pour la Simulation n°06 [+1, -1, +1].....	191
Figure V-13 : Ensoleillement et ombrage dans les canyons pour la Simulation n°06.....	192
Figure V-14 : Températures de l'air des récepteurs au point N1, pour trois niveaux (Canyon large E/O).....	194
Figure V-15 : Températures de l'air des récepteurs au point S1, pour trois niveaux (Canyon large E/O).....	195
Figure V-16 : Températures de l'air des récepteurs au point N1, pour trois niveaux (Canyon large N/S).....	196
Figure V-17 : Températures de l'air des récepteurs au point S1 (Canyon large N/S).....	196
Figure V-18 : Températures de l'air des récepteurs au point N1 (Canyon étroit E/O).....	197
Figure V-19 : Températures de l'air des récepteurs au point S1 (Canyon étroit E/O).....	198
Figure V-20 : Températures de l'air des récepteurs au point N1 (Canyon étroit N/S).....	199

Figure V-21 : Températures de l'air des récepteurs au point S1 (Canyon étroit N/S).....199

Figure V-22 : Evolution du rayonnement solaire direct S au point "S1" 202

Figure V-23 : Evolution du rayonnement solaire diffus D au point "S1" 202

Figure V-24 : Rayonnement solaire global G au point "S1" 203

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Répartition par branche des consommations d'énergie finale du secteur tertiaire en 2012 (Source : Aprue, 2014).....	13
Tableau II-1 : Facteurs environnementaux définissant les différentes échelles du climat d'après Markus et Morris, 1980. (Source : Ali Toudert, 2000, p. 30).....	46
Tableau II-2 : Caractères dimensionnels définissant les différentes échelles du climat d'après Markus et Morris, 1980. (Source : Ali Toudert, 2000, p. 31).....	46
Tableau II-3 : Variation de l'albédo et de la température de surface de quelques milieux choisis dans l'agglomération parisienne. (Source : Escourrou, 1991, p. 52).....	68
Tableau II-4 : Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat local, d'après Oke, 2006 (Source : Bouyer, 2009, p. 19).....	75
Tableau II-5 : Classification simplifiée de rugosités urbaine d'après Davenport, (Bouyer, 2009, p. 19).....	76
Tableau II-6 : Concepts du contrôle climatique urbain. (Source : Ali-Toudert et Bensalem, 2001, p.5).....	80
Tableau III-1 : Cas de simulation par TRNSYS. (Source : Mochida et al., 2006, p.9).....	89
Tableau III-2 : Climat des villes étudiées (Source : Alexandri et Jones, 2008, p.4).....	96
Tableau III-3 : Données de simulation et comparaison des charges de climatisation des deux cas de toit bassin et toit nu (Kharrufa et Adil, 2012, p.6).....	103
Tableau III-4 : Les différents types de verre utilisés dans la simulation (Source : Bouden, 2007, p.9).....	110
Tableau III-5 : Propriétés des verres étudiés. (Source : Lartigue et al. 2014, p. 3).....	111
Tableau III-6 : Paramètres utilisés pour la simulation des modèles TEB et TRNSYS. (Source : Ali-Toudert, 2009, p.2).....	118
Tableau IV-1 : Evaluation globale du reflet du rayonnement solaire et du degré de gêne (Source : Mehaoued, 2009).....	139
Tableau IV-2 : Caractéristiques des capteurs utilisés lors de la campagne de mesures.....	142
Tableau IV-3 : Coefficient S de la vitesse du vent en fonction de la hauteur. (Source : Nikolopoulou et al., 2004).....	147
Tableau IV-4 : Inputs d'ENVI-met pour le bâtiment existant en verre réfléchissant.....	148
Tableau IV-5 : Inputs d'Ecotect pour le bâtiment existant en verre réfléchissant.....	154
Tableau IV-6 : Moyenne des températures de l'air en fonction de la hauteur.....	161
Tableau V-1 : Modèle urbain utilisé dans l'étude paramétrique.....	173
Tableau V-2 : Matrice d'expériences.....	173
Tableau V-3 : Matrice des effets principaux et des interactions des facteurs.....	175
Tableau V-3 : Inputs des simulations d'ENVI-met pour l'étude paramétrique.....	178
Tableau V-4 : Relations entre le rapport d'aspect de la rue canyon et les conditions thermiques d'après Tiraoui, (2000), (Source : Athamena, 2012, p. 33).....	187

LETTRES LATINES

a : albédo qui caractérise la part du rayonnement solaire réfléchi par une surface.

Aprue : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

ARPT : Autorité de Régulation de la Poste et des Télécommunications.

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.

BSI : Building Syndrome Index

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

CES : Chauffe Eau Solaire

CSTB: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

CU : Canopée Urbaine

CFD : Computational Fluid Dynamics

CLA : Couche Limite Atmosphérique

CLU : Couche Limite Urbaine

CME : Conseil Mondial de l'Energie

CNERIB : Centre National des Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment

COP: Coefficient Of Performance

CU: Canyon Urbain

D : Rayonnement Diffus

DTR : Documents Techniques Réglementaires

E : Est

EnR : Energies Renouvelables

FNME : Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie

GRBES : Group Building Environmental Studies, de l'Université d'Athènes

H : Hauteur du canyon (m).

HPE : Haute Performance Energétique

HVAC System: Heating Ventilating and Air-Conditioning System

H/W : Prospect du canyon.

HR : Humidité Relative (%).

ICU : Ilot de Chaleur Urbain (°C)

In : Intensité d'ICU

IRS : Indice de Réflectance Solaire

ITS: Index of Thermal Stress

G: rayonnement solaire Global

LBNL: Lawrence Berkeley National Laboratory

MCP : Matériaux à Changement de Phase

N: Nord.

O : Ouest.

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

ONM : Office National de Météorologie

ONU : Organisation des Nations Unies

OP : Operative Temperature

OPGI : Office de Promotion et de Gestion Immobilière

PMA : Puissance Maximale Appelée

PMV : Predicted Mean Vote

Q_E : Flux de chaleur latente (W/m²).

Q_F : Energie anthropique (W/m²).

Q_H : Flux de chaleur sensible (W/m²).

S: Sud

S: rayonnement solaire Direct

SBS: Sick Building Syndrome

SONATRACH : Société Nationale de TRANsport et de Commercialisation des Hydrocarbures

SVF : Sky View Factor

T_a: Température de l'air (°C)

T_{mrt}: Température radiante moyenne (°C)

T_r: Température rurale (°C)

T_s : Température de surface (°C)

T_u: Température au centre de la ville (°C)

TCAM : Taux de Consommation Annuel Moyen

Tep : Tonnes équivalent pétrole

W : Largeur du canyon ou espacement entre deux bâtiments formant les parois du canyon (m)

z_o : Paramètre de rugosité.

LETTRES GRECQUES

ΔT : Ecart de température de l'air

ε : émissivité

θ : Angle défini par la largeur de la rue W et la hauteur du bâtiment H ($^\circ$).

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

Introduction générale

Introduction générale

Accusant un retard incontestable dans le domaine du logement, des infrastructures et des équipements, l'Algérie des années deux mille a connu une forte croissance du secteur du bâtiment. Ce dernier occupe la première place en termes de consommation d'énergie par rapport à d'autres secteurs économiques au niveau national. Cette consommation énergétique ne cesse aujourd'hui de croître et rejoint la tendance mondiale où plus de 30% d'augmentation est remarquée ces trente dernières années (MEM, 2016). Plusieurs facteurs sont responsables de cette hausse, comme la charge de climatisation dans les bâtiments enregistrant en été des pics qui dépassent, depuis 2009, ceux de l'hiver de plus de 5.1% (Rebah, 2012). Parmi les bâtiments à fort besoin en climatisation, on peut citer les bâtiments à enveloppes transparentes ou plus précisément à murs-rideaux de verre, en expansion. Si une telle typologie du bâtiment améliore incontestablement l'image de la ville d'un point de vue esthétique, la performance énergétique est plus problématique. Non seulement, ces bâtiments se caractérisent par des déperditions thermiques élevées, mais leur réflectance, si elle diminue la charge de climatisation des espaces intérieurs pendant la période estivale (Button et Pye, 1993), elle réduit également les niveaux d'éclairage intérieur nécessitant de l'éclairage artificiel, et ajoute une charge thermique supplémentaire à l'environnement extérieur (Yang et al., 2013 et Danks et al., 2016).

Plusieurs travaux de recherche liés à l'effet de l'enveloppe vitrée sur les performances énergétiques des bâtiments ont été menés. Ils se sont principalement basés sur le taux de vitrage en façade (rapport entre la surface de l'ouverture et la surface totale de la façade, de l'anglais Window to Wall Ratio-WWR), ainsi que sur les propriétés thermoradiatives du verre. Barbosa et Ip (2014) et Pomponi et al. (2016) ont montré que les façades entièrement vitrées, si elles sont conçues de manière judicieuse, comme les façades double-peau, elles peuvent présenter un meilleur comportement thermique par rapport aux fenêtres classiques. En effet, les murs extérieurs répondent dynamiquement aux variations des conditions d'ambiances, et peuvent intégrer des brise-soleils, de la ventilation naturelle et des stratégies d'isolation thermique. Pourtant, si elles sont mal conçues, elles augmentent non seulement la consommation d'énergie du bâtiment, mais aussi l'inconfort thermique des occupants, en raison du rayonnement thermique provenant des surfaces de vitrage. Certains chercheurs se sont intéressés aux effets des types de verre et son ratio WWR sur la performance énergétique des espaces intérieurs. Dans ce sens Lartigue et al. (2014) proposent une méthode d'optimisation multi-objectifs des charges de chauffage et climatisation et de la durée de lumière du jour annuelle intérieure. Les variables à optimiser sont les caractéristiques de l'enveloppe. Cette méthode donne rapidement les solutions optimales d'un problème, et fournit des lignes directrices d'aide à la décision. Le procédé peut être utilisé pour de nombreuses autres études d'optimisation. De la même manière, l'étude de Lam et al. (2015) a pour objectif de quantifier l'influence de différents types de murs-rideaux de verre sur leur performance

énergétique dans le cas des immeubles de bureaux. L'influence de ces paramètres sur le chauffage, la climatisation, l'éclairage et la consommation annuelle totale est quantifiée par deux méthodes : étude d'incertitude et étude de sensibilité multicritères. Le coefficient de variation obtenu à partir de l'analyse d'incertitude indique la sensibilité de la consommation finale d'énergie par rapport à la variation des configurations des murs-rideaux. L'indice de sensibilité total obtenu par l'analyse de sensibilité globale quantifie l'effet total de chaque propriété sur la consommation d'énergie. Toutefois, ces études ne prennent pas en compte le microclimat autour d'un bâtiment qui est un facteur important dans la consommation d'énergie du bâtiment, notamment, dans le cas de verres réfléchissants.

A l'échelle urbaine, le microclimat est influencé par le phénomène d'îlot de chaleur urbain-ICU ayant un impact direct non seulement sur le confort thermique de l'occupant, mais également sur la consommation énergétique du bâtiment vitré. Si en hiver l'effet peut être positif grâce à la réduction de la consommation en termes de chauffage, en été en revanche les bâtiments vitrés doivent être fortement climatisés induisant ainsi une surconsommation d'énergie. Certaines études mettent en évidence l'impact important de l'ICU sur les différences de températures entre les zones urbaines et les zones rurales, ainsi que ses effets sur les performances énergétiques des bâtiments (Stewart et Oke, 2010 et Ignatius et al., 2016). Santamouris et al. (2001) utilisent trente stations météorologiques de climats urbains à Athènes, afin de simuler les charges thermiques de chauffage et de climatisation d'un bâtiment de référence. Ils notent que l'impact de la température élevée de l'air dans la ville est extrêmement important et peut doubler le pic des charges de climatisation du bâtiment considéré. Bozonnet et al. (2005) décrivent une étude dont l'objectif est de calculer par des simulations numériques CFD, l'interaction entre microclimat urbain et consommation d'énergie pour la climatisation dans un cas typique d'une rue canyon, compte tenu de la dissipation anthropique des climatiseurs en façades. Ils montrent que la consommation d'énergie du bâtiment calculée en été pourrait être différente de plus de 30% de la température de l'air extérieur dans le canyon par rapport à une station météorologique de référence. Bouyer et al. (2011) évaluent la demande d'énergie d'un bâtiment dans un nouveau quartier à Lyon, pendant une semaine d'hiver et une semaine d'été. Cette approche est utilisée pour comparer deux types d'aménagements urbains, un aménagement minéralisé et un aménagement végétalisé. Pour y parvenir, les auteurs réalisent un couplage numérique complet entre un logiciel de calcul du rayonnement sur une scène urbaine incorporé à un logiciel de bâtiment. L'aménagement végétalisé conduit à une réduction de 9% de la demande d'énergie de climatisation par rapport à l'aménagement minéralisé, ce qui confirme le phénomène d'îlot de chaleur.

Ainsi, la composition en termes de matériau des surfaces urbaines est un paramètre crucial dans le développement de microclimats urbains, ce qui affecte également la consommation d'énergie dans les bâtiments (Park et Krarti, 2016). L'environnement bâti modifie l'incidence solaire, tandis que les propriétés des matériaux affectent l'équilibre énergétique des surfaces. De nombreux chercheurs tels que Santamouris et al. (2011) et Gros et al. (2014) ont étudié en profondeur ces aspects, dont l'utilisation de pavages réfléchissants et leur contribution aux bilans énergétiques des bâtiments. Ces dernières années, ce sont les enveloppes entièrement en verre réfléchissant qui ont fait l'objet d'inquiétudes de la part des chercheurs sur les effets d'éblouissement occasionnés dans les espaces extérieurs, ainsi qu'à l'intérieur des bâtiments voisins. L'étude de Shin et Huang (2001) à Taiwan, présente une simulation numérique des rayons solaires réfléchis par les immeubles à murs-rideaux pour limiter les effets d'éblouissement dans les espaces extérieurs, une autre étude de Rofail et Dowlde (2004) à Sidney, Australie, propose une nouvelle méthode d'évaluation de l'impact de l'éblouissement sur les occupants des immeubles voisins. Une étude plus récente de Yang et al. (2013) en Suisse, met en œuvre une plateforme de conception paramétrique pour examiner les zones critiques autour d'un bâtiment de verre réfléchissant à savoir les routes, les trottoirs les façades des bâtiments voisins selon la distribution de la lumière du jour réfléchi. Actuellement, Danks et al., (2016) présentent une revue bibliographique sur cette problématique d'impact du verre réfléchissant de façades de bâtiments et proposent des critères limitant la gêne occasionnée par ce type de verre en façades.

Néanmoins, les sources documentaires disponibles ne traitent pas de l'énergie thermique réfléchi par les enveloppes vitrées des bâtiments (mur-rideau), mais nous interpellent quant à la pertinence de ce type d'enveloppes utilisées par nos designers, quand on sait que sous nos latitudes, le gisement solaire est l'un des plus élevés au monde et qu'une tendance de propagation de ce type d'immeubles est très remarquée dans le paysage urbain de la ville d'Alger. C'est dans ce contexte que vient s'inscrire notre recherche en vue de traiter les bâtiments à enveloppes de verre réfléchissant à travers les microclimats urbains qu'ils génèrent, ainsi que leur impact sur la consommation énergétique pendant la période estivale où la climatisation est fortement sollicitée. Pour essayer de résoudre le problème de la consommation énergétique, des outils de simulation numérique sont le plus souvent utilisés. Que ce soit pour le microclimat, la thermique du bâtiment, l'extension urbaine, ou le trafic routier...une multitude de modèles existe, mais aucun outil n'est dédié spécifiquement à l'évaluation directe de l'influence du microclimat sur la consommation d'énergie du bâtiment (Bonhomme, 2013). De nouvelles approches complémentaires proposent une intégration de deux outils de simulation numérique du microclimat et de l'énergétique avec la technique de couplage (Yang et al., 2012). C'est cette approche de couplage numérique que nous souhaitons développer dans notre recherche en combinant deux logiciels : l'outil

tridimensionnel du microclimat ENVI-met, basé sur la dynamique et la thermodynamique des fluides (Bruse, 1999) permettant de simuler l'environnement extérieur proche du bâtiment étudié, et le logiciel de simulation thermique des bâtiments Ecotect Analysis pour calculer les charges de chauffage et de refroidissement pour les zones d'un bâtiment donné (Tagliabue et al., 2012).

Notre travail de recherche s'est basé sur deux études :

- une étude expérimentale menée dans le but de mettre en évidence, sur un cas réel, l'impact du microclimat sur la charge de climatisation au moyen d'une campagne de mesures in-situ, sur un bâtiment entièrement en verre réfléchissant ;
- une étude paramétrique plus générale, afin de mettre en évidence les interdépendances bâti-microclimat-énergie. Pour cela, nous avons plus particulièrement étudié l'influence de 3 paramètres (type de géométrie urbaine, orientation, propriétés thermoradiatives du verre de l'enveloppe) sur la charge de climatisation et sur le microclimat urbain.

Problématique

Notre question de recherche se pose comme suit:

Le paysage urbain en Algérie a subi un changement radical ces deux dernières décennies. En effet, nous constatons l'émergence d'une nouvelle typologie de bâtiments dont l'enveloppe est entièrement en verre réfléchissant. Conçus essentiellement pour réduire les consommations énergétiques pendant la période estivale grâce à la réflexion du rayonnement solaire, les bâtiments en verre réfléchissant procurent, en revanche, une augmentation de la température d'air extérieur et modifient sensiblement le microclimat autour de ces derniers. Eu égard à cela, quel est le degré d'importance des modifications générées par la réflectivité des murs-rideaux de verre réfléchissant ? Et quelles méthodes de simulations multi-scalaires choisir pour la modélisation microclimatique et énergétique des bâtiments à murs-rideaux de verre réfléchissant ?

Hypothèses de l'étude

Nous avons mis en place deux hypothèses :

1. La méthode de couplage numérique intégrant deux outils de simulation microclimatique et énergétique permettrait non seulement de simuler l'environnement extérieur proche du bâtiment en verre réfléchissant, mais elle donnerait également ses consommations d'énergie, pendant la période estivale.

2. En période estivale, les bâtiments à murs-rideaux de verre réfléchissant, pourraient entraîner des conditions thermiques particulières sur leurs environnements extérieurs proches qui pourraient engendrer des modifications des ambiances thermiques intérieures des bâtiments et une amplification des charges de climatisation ;

Objectifs de l'étude

Les objectifs ci-dessous orientent naturellement notre travail de thèse :

1. l'objectif premier de notre recherche est de proposer une méthode de couplage de logiciels pour énoncer et déterminer les causes de l'apparition des conditions microclimatiques particulières autour des bâtiments de verre réfléchissant, ainsi que leur impact sur la consommation énergétique des bâtiments dans le cas du climat chaud d'Alger ;
2. notre second objectif est de mener une étude paramétrique plus généralisable en considérant une morphologie urbaine de type canyon avec le climat chaud d'Alger ; cette étude permet d'examiner plusieurs facteurs urbains (rapport hauteur / largeur d'un canyon, orientation cardinale) et des propriétés de l'enveloppe (vitrage réfléchissant et vitrage transparent) sur les charges de climatisations du bâtiment étudié.

Méthode de recherche

Notre étude est une recherche qui nécessite dans un premier temps, la compréhension des différents concepts et notions-clés, liés aux ressources énergétiques, à la consommation d'énergie dans le bâtiment, au climat, et aux microclimats urbains. Cette première étape théorique essentielle nous permet de mieux appréhender la relation entre l'environnement physique extérieur et les conditions intérieures du cadre bâti.

Dans un second temps, nous abordons l'état des connaissances sur les interdépendances bâti-climat vis-à-vis de la performance énergétique. Une revue bibliographique permettra d'illustrer la grande pertinence des effets microclimatiques de l'environnement urbain sur la performance énergétique des bâtiments, ainsi que les afférentes méthodes utilisées pour leur évaluation. Cette étape nous permet essentiellement d'étayer nos hypothèses d'études, d'arrêter l'approche la mieux appropriée à l'appréciation de notre environnement d'étude, et d'analyser et interpréter les résultats des simulations numériques.

Nous examinerons les relations entre les résultats des simulations énergétiques ainsi que leur relation avec le type de verre. Ainsi, nous pouvons vérifier le comportement énergétique du bâtiment étudié en fonction des choix de verres utilisés.

Structure de la thèse

Notre travail de thèse comporte une introduction générale, cinq chapitres, et une conclusion générale. L'introduction générale comprend la problématique, les hypothèses, les objectifs, et ainsi que la méthodologie de recherche.

Une première partie est consacrée au corpus théorique et sera structurée en trois chapitres (Figure-1):

- dans le premier chapitre, nous abordons la consommation mondiale de l'énergie, la place du bâtiment dans la consommation globale, le contexte algérien et les consommations par secteur et par produit, la politique énergétique incluant les opérations et programmes des énergies renouvelables entrepris, et les perspectives énergétiques dans le secteur du bâtiment ;
- dans le second chapitre, nous précisons les différents phénomènes microclimatiques afin de mieux définir notre objet d'étude. Dans un premier temps, nous abordons les échelles du climat, le phénomène d'ICU, les mécanismes de sa création et son atténuation. Dans un second temps, nous détaillons le rayonnement solaire, source importante d'apport thermique, participant à la complexité de détermination des conditions microclimatiques en site urbain. Les inter-réflexions entre les bâtiments et les propriétés thermoradiatives des surfaces urbaines notamment la réflectance ;
- le troisième chapitre présente un état de l'art non exhaustif des connaissances concernant les acquis actuels en exposant des études antérieures menées dans cet axe de recherche à savoir microclimats et performance énergétique des bâtiments.

La deuxième partie est structurée en deux chapitres (Figure-2):

- le premier chapitre présente notre cas d'étude réel et définit notre propre approche méthodologique. En nous appuyant sur l'ensemble des informations récoltées, nous consacrons cette partie à étudier un bâtiment existant entièrement couvert de verre réfléchissant pour évaluer le microclimat autour et son impact sur les consommations énergétiques en particulier les charges de climatisation pour une journée type d'été ;
- dans le deuxième chapitre de cette partie, nous menons une étude paramétrique où la géométrie représentative du canyon urbain servira de support. Cette étude permet de quantifier l'impact de

plusieurs facteurs urbains et d'enveloppe sur les charges de climatisation du bâtiment étudié. Notre approche méthodologique tient compte du couplage numérique, qui est une co-simulation combinant deux logiciels faisant dialoguer deux échelles spatiales différentes à savoir l'échelle urbaine et l'échelle architecturale. Nous discuterons et analyserons les données obtenues et synthétiserons les résultats. Ceux-ci seront capitalisés sous forme d'éléments pouvant servir à établir un guide utilisable dans les premières phases de la conception des dispositifs de contrôle de la consommation énergétique.

La conclusion générale expose les conclusions tirées de ce travail, les difficultés de validation de notre méthode et ses perspectives.

INTRODUCTION GENERALE

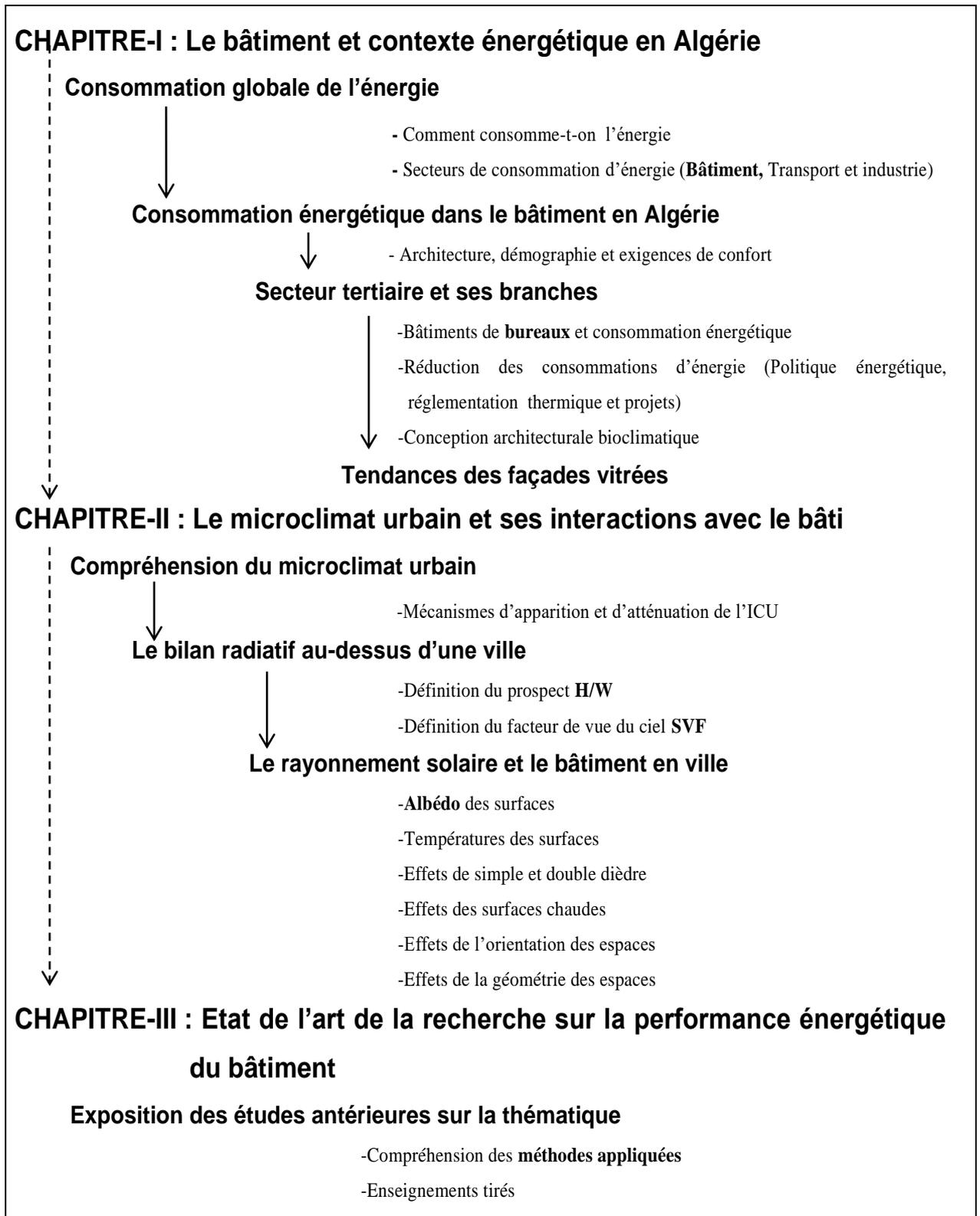


Figure-1 : Schéma de structure de la thèse (première partie).

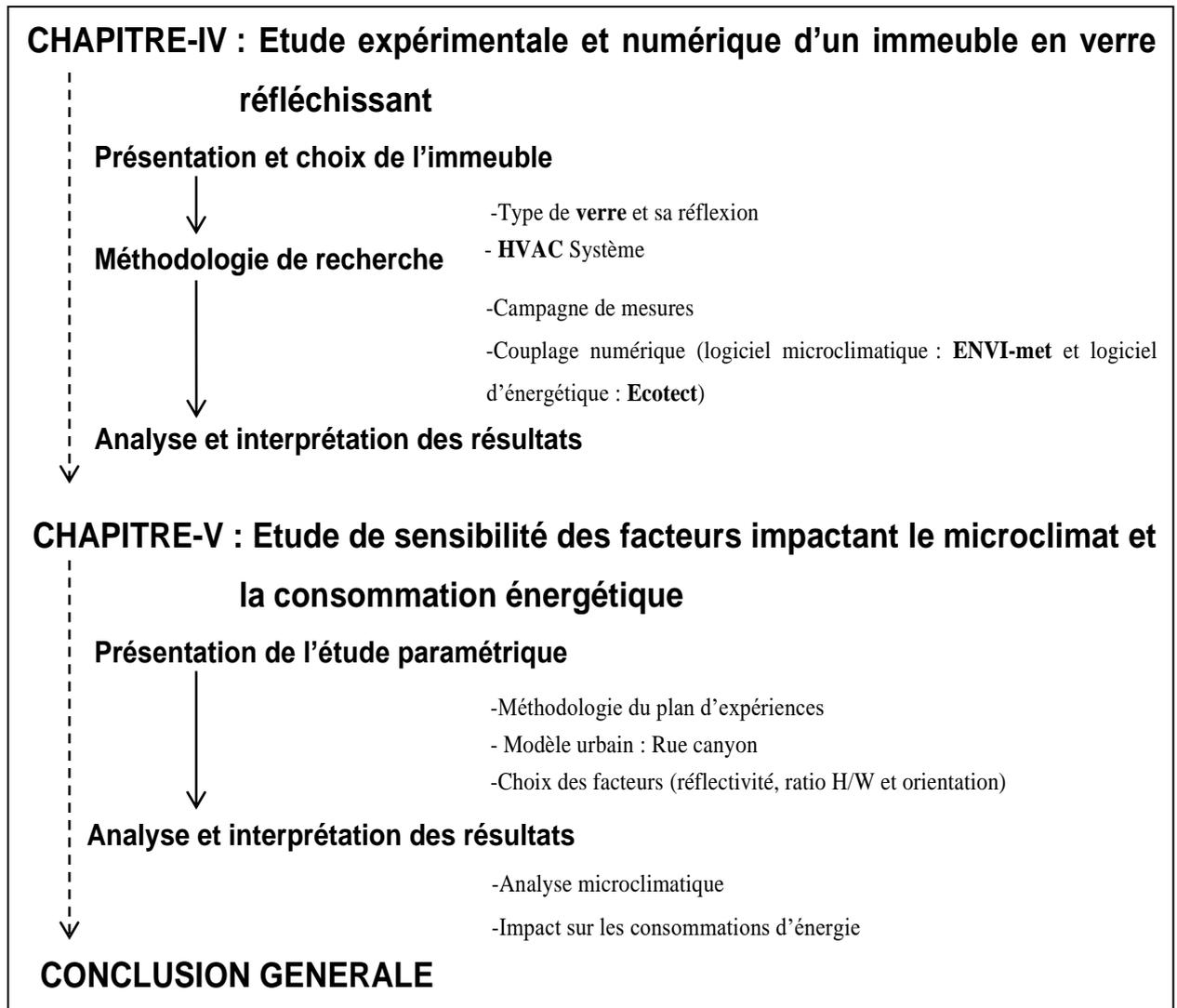


Figure-2 : Schéma de structure de la thèse (deuxième partie).

Première partie

Repères théoriques

I. Le bâtiment et le contexte énergétique en Algérie

I- 1. Introduction

Le contexte énergétique et environnemental de ce début du XXI^e siècle est marqué par la question de la pérennité à tous les niveaux : ressources minérales et énergétiques, cadre de vie, santé, et biodiversité. Sur le plan énergétique, le déséquilibre entre une production énergétique fondée sur des ressources minérales limitées issues de l'écorce terrestre et une consommation en forte croissance favorise les tensions de tous ordres (économique, géographique, social etc.). De plus, la consommation mondiale d'énergie est assurée par des énergies d'origine fossile à un taux dépassant les 80 % (ONU, 2012). Une meilleure maîtrise de la consommation d'énergie, en particulier dans le bâtiment, et le développement des énergies renouvelables, sont deux orientations prioritaires afin d'inverser cette tendance. De ce fait, des démarches prospectives sont lancées dans tous les secteurs pour faire face aux défis énergétiques du futur.

Le monde a besoin d'approvisionnement énergétique toujours plus important pour accompagner la croissance et le développement économique. Cependant, nous devons envisager des solutions pour changer de cap pour que notre avenir soit fondé sur des énergies plus propres et plus efficaces, et mettre en œuvre des politiques nouvelles à cet effet. Pour cela, nous devons agir dès maintenant si nous voulons mettre en œuvre le potentiel des technologies actuelles émergentes ainsi que réduire notre dépendance à l'égard des énergies fossiles, et ce dans le but d'assurer une meilleure sécurité en approvisionnement énergétique.

Réduire cette consommation dans le secteur du bâtiment revient en premier lieu au respect des principes d'une conception architecturale bioclimatique et ce à travers une meilleure orientation de l'édifice, une meilleure compacité à l'échelle architecturale et urbaine..., améliorer également les performances énergétiques de l'enveloppe d'un bâtiment ainsi son inertie thermique participeront sans aucun doute à la réduction des déperditions thermiques et à l'amélioration du confort thermique des occupants.

I- 2. Consommation mondiale de l'énergie

D'ici à 2040, la consommation mondiale d'énergie pourrait fortement croître et atteindre une hausse de 48 % par rapport à celle de 2012 (AIE, 2016). Ceci pourrait engendrer des tensions géopolitiques et des impacts environnementaux périlleux du fait que plus des trois quarts de la demande mondiale revient aux énergies fossiles en 2040 (AIE, 2016), et dont les réserves ne cessent de diminuer. En 2012, la consommation mondiale d'énergie s'est établie à 549 milliards de MBtu (British thermal units), elle pourrait passer à 629 milliards de MBtu en 2020 et 815 milliards de MBtu en 2040 (AIE, 2016).

Cette consommation d'énergie est inégalement répartie sur le globe en raison d'une grande variation du développement économique, du taux d'équipement, d'exigence du confort d'usage et des conditions climatiques. Ainsi la consommation finale d'énergie par habitant montre des écarts énormes entre les différentes zones économiques de la planète avec environ 7,15 Tep (Tonnes équivalent pétrole) aux USA, 1,28 Tep en Amérique Latine, 4,39 Tep dans les pays OCDE¹, 0,67 Tep en Afrique, 2,96 Tep au Moyen Orient, et 0,68 Tep en Asie. En moyenne mondiale un habitant a consommé 1,86 Tep en 2013 (BPstats, 2014). La figure I-1 nous montre clairement un déséquilibre en termes de consommation d'énergie par habitant en 2013 à l'échelle planétaire.

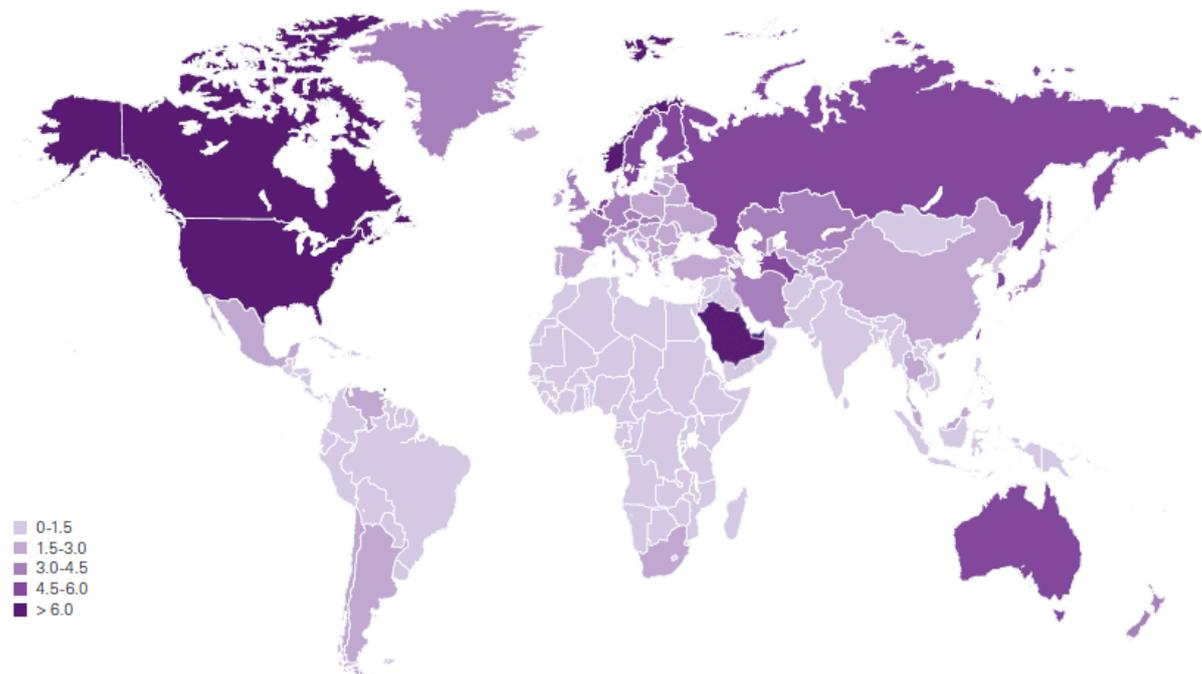


Figure I-1 : La consommation énergétique mondiale par habitant en 2013, en Tep.

(Source : BPstats, 2014).

Une meilleure maîtrise de la consommation d'énergie en particulier dans le bâtiment et le développement des énergies renouvelables sont des orientations prioritaires afin d'inverser la tendance de surconsommation et de gaspillage énergétique à l'échelle planétaire. Une part importante de la consommation énergétique mondiale revient principalement au secteur du bâtiment avec la régulation des espaces intérieurs par la climatisation et le chauffage (Medjlekh, 2006).

¹ **OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), les Etats membres sont : Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Chili, Corée du Sud, Danemark, Espagne, Estonie, États-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Israël, Italie, Japon, Luxembourg, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, République tchèque et Turquie, (Source : BPstats, 2014).

I- 3. Impact des bâtiments sur la consommation énergétique en Algérie

Le secteur du bâtiment est reconnu pour être le plus gros consommateur d'énergie en comparaison à d'autres secteurs économiques, avec 42 % de l'énergie finale totale (Nait, 2009). Sur la période 1980-2009 les niveaux de consommation ont augmenté de 3.5 %, ils sont passés de 3,3 millions de Tep (Tonnes Equivalent Pétrole) en 1980 à 13,1 millions de Tep en 2009, (Berrached, 2011). Chenak (2009) rapporte que d'après les prospectives de l'Observatoire Méditerranéen de l'Énergie (OME), la consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de plus de 30 % au cours des 30 dernières années et continuera d'augmenter jusqu'à 2025.

Tout comme à l'échelle planétaire, cette augmentation est due à l'accroissement du parc des bâtiments (plus 41 % de logements en 30 ans), à l'accroissement de la surface moyenne des logements, à l'augmentation du confort et l'apparition de nouveaux besoins. Ces différents facteurs ont participé à une amplification de la consommation d'électricité utilisée pour l'électroménager, l'éclairage, la bureautique, le refroidissement, le renouvellement et le traitement de l'air, la cuisson, le séchage...etc. (Aprue, 2014).

Pour le secteur tertiaire, la consommation d'énergie totale finale s'est établie à 2 million de Tep en 2012. Ce secteur se décompose en sept branches principales avec des activités de service très diversifiées. Le Tableau 1-1 indique la répartition par branches des consommations d'énergie finale du secteur tertiaire pour l'année 2012 avec une consommation énergétique moyenne par rapport à l'emploi de 0.453 Tep pour 5 486 376 emplois (Aprue, 2014). Les deux premières branches par la taille, les commerces et les bureaux, sont les plus grands consommateurs d'énergie et représentent 40% de la consommation totale.

Tableau I-1 : Répartition par branche des consommations d'énergie finale du secteur tertiaire en 2012.

(Source : Aprue, 2014).

Activités	%
Administration	24
Commerce	16
Tourisme	3
Santé	12
Education	8
Bureaux privés	14
Eclairage public	6
Autres	18

Pour le secteur résidentiel, avec 6 500 000 logements dont une partie urbaine 70 %, la consommation totale d'énergie finale a atteint en 2012 la valeur de 8.5 millions de Tep, (Aprue, 2014). Il est à noter que les niveaux de consommation d'énergie finale par habitant est passé de 0.48 Tep en 1990 à 1.35 Tep en 2010 et qui serait de 1.88Tep en 2020 (Medjlekh, 2006). Sur la période 2000-2012, par secteur d'activité, la consommation finale a augmenté avec un TCAM (Taux de Consommation Annuel Moyen) de 6.5 %/an. Pour le secteur résidentiel, la consommation d'énergie s'amplifie le plus rapidement pour atteindre un TCAM 7.4 %/an, suivie par celles des secteurs tertiaire à 7.1 %/an, transport à 7 %, de l'ensemble (btp+mines+eau) à 6.6 %/an, agriculture à 5.9 %/an, et enfin celle de l'industrie manufacturière à 3.8 %/an, (Aprue, 2014).

La climatisation représente plus de 5 % de la consommation totale du secteur du bâtiment (Medjlekh, 2006). En 2015, une vague de chaleur a accablé le pays avec un pic similaire à celui de 2012 en raison des températures dépassant 47°C à l'ombre et 54°C sous le soleil. Selon l'ONM (Office National de la Météorologie), la hausse des températures a eu lieu sur toutes les régions du nord et de l'intérieur du pays. Cette ascension des températures a concerné la plupart des pays même ceux qui ne l'ont jamais connu depuis le début des enregistrements des stations météo en 1880. Ces températures élevées augmentent le pic des charges électriques pour la climatisation et induisent à des baisses éventuelles de tension sur les réseaux électriques. Ceci a suscité notre intérêt à explorer les charges de consommation de climatisation dans les immeubles de bureaux hermétiques à murs-rideaux de verre.

Le chauffage s'affiche avec près de deux tiers (2/3) de cette consommation d'énergie (Medjlekh, 2006). Suite à la vague de froid de l'hiver 2012, la consommation nationale en énergie électrique pour le chauffage enregistre un record historique à 8.666 MW, continuant une hausse de 11,6 % par rapport à la pointe de la même période de l'année 2011. Cette PMA (Puissance Maximale Appelée) a dépassé le premier record de consommation de 8.305 MW et du second pic de 8.526 MW, du mois de Février (R.A, 2012). Pour l'ensemble des branches du tertiaire, comme dans le résidentiel, l'usage du chauffage occupe, le premier poste de consommation avec 54 % de la consommation totale. Le second poste recouvre les usages spécifiques de l'électricité à 26 %.

I- 4. Politique énergétique

En matière énergétique, l'Algérie est un pays relativement bien classée. Ses réserves en hydrocarbures, et les bilans actuels de consommation indispensables à couvrir ses besoins, lui permettent d'être insoucieux d'un manque en ressources énergétiques pour quelque temps encore. Actuellement, le problème énergétique de l'Algérie se pose en terme de : définition d'une stratégie de valorisation de ses ressources pour les besoins du développement, choix d'une politique énergétique efficace et décisive à

long terme, et définition d'un modèle cohérent de consommation énergétique pour le court et le moyen terme, avant l'épuisement de ses ressources fossiles stratégiques. C'est dans ce contexte que la loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie 99-09 du 28 juillet 1999 (J.O.R.A, 1999), et les textes réglementaires² viennent établir le modèle national de consommation énergétique, et déterminer les multiples opérations à mener, afin d'arriver à une rationalisation et une meilleure maîtrise de l'usage des énergies disponibles. Celle-ci émet trois dimensions dans la maîtrise de l'énergie : l'emploi rationnel de l'énergie, l'épanouissement des énergies renouvelables et la préservation de l'environnement des conséquences périlleuses du système énergétique. De ce fait, plusieurs fondements stratégiques ont été arrêtés, (ONU, 2002), à savoir :

- **Les options du modèle de consommation énergétique nationale:** l'utilisation prioritaire du gaz naturel, la promotion des énergies renouvelables, l'économie d'énergie ;
- **La contribution au défi du développement durable:** la loi attribue le caractère d'utilité publique de la maîtrise de l'énergie, en vu de ses résultats positifs considérables sur la préservation des ressources énergétiques, la protection de l'environnement, le progrès technologique et l'amélioration de la productivité économique nationale ;
- **L'enjeu de la maîtrise de la technologie:** introduction de textes réglementaires particuliers pour la mise en place des exigences et des normes nationales d'efficacité énergétique appliquées aux bâtiments neufs;
- **Les mesures de contrôle:** Application de taxes spécifiques aux équipements "énergivores" neufs en vente, et interdiction d'importation des équipements non conformes.

I- 5. Réglementation thermique

En Algérie, l'amplification des niveaux de consommation d'énergie et l'inconfort thermique des bâtiments sont le résultat d'un caractère thermique inadapté de ces derniers aux sollicitations climatiques. En effet, depuis les années 1990, l'Algérie développe diverses méthodes normalisant l'efficacité énergétique dans l'habitat. Le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme met en place des Documents Techniques Réglementaires (DTR) en 1997 et 1998 qui définissent spécialement les valeurs de référence relatives aux calculs des déperditions calorifiques (CNERIB, 1997), et aux apports calorifiques concernant les bâtiments neufs à usage d'habitation et tertiaire (CNERIB, 1998). L'année 2000 connaît la promulgation du décret exécutif N°2000-90 du 24 Avril 2000, étayant la réglementation thermique dans les bâtiments neufs (J.O.R.A, 2000), celle-ci vise la diminution de ces consommations

² **La loi n°02-01 du 5 février 2002** : Relative à l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisations; et la loi n° 04-09 du 14 août 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

d'énergie excessives, ainsi que l'amélioration du confort thermique. Elle porte à la fois sur les bâtiments neufs résidentiels et tertiaires. Elle ordonne des besoins à satisfaire sur la consommation d'énergie, la température atteinte et les performances pour un nombre d'éléments (isolation, ventilation, système de chauffage et climatisation).

I- 6. Programmes et projets réalisés

I- 6.1. Programme des énergies renouvelables et fossiles

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux...etc. On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Elles occupent une part de 20 % de la production mondiale d'énergie dans le monde, avec un taux de croissance annuel moyen de 1,7 % depuis 1990. Notons que la part de cette énergie dans la consommation d'énergie finale est variable d'une région à une autre dans le monde. D'ailleurs, en Afrique, son taux est environ 50 %, alors qu'elle est de 1 % au Moyen Orient, et près de 32 % pour l'Europe (EurObserv'ER, 2018).

En ce qui concerne l'Algérie, le pays débute des actions actives d'énergie verte, en prévoyant un programme ambitieux de promotion des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette dynamique est axée sur une stratégie de mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire, et leur utilisation pour varier les sources d'énergie pour le court terme. Ce programme privilégie l'usage des énergies renouvelables qui occupent un grand intérêt dans les politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie. A titre indicatif, d'ici à 2030, environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. Cependant, le potentiel national en énergies renouvelables est fortement dominé par le solaire considéré comme une opportunité de développement économique et social. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas leur intégration dans de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie.

I- 6.1.1. Gisement solaire en Algérie

En Algérie, les conditions climatiques sont favorables pour le développement de cette énergie en raison de la longue durée d'insolation durant toute l'année, en particulier dans la région du Sahara,

largement confirmé par le Conseil Mondial de l'Énergie (CME) (WEC, 2011). La durée d'insolation pour tout le territoire national excède 3000 h/an et atteint 3900 h/an en hauts plateaux et au Sahara (Figure I-2). Près de 10 % du désert du Sahara algérien pourrait couvrir les besoins en énergie de l'Union Européenne (Himri & al., 2009).

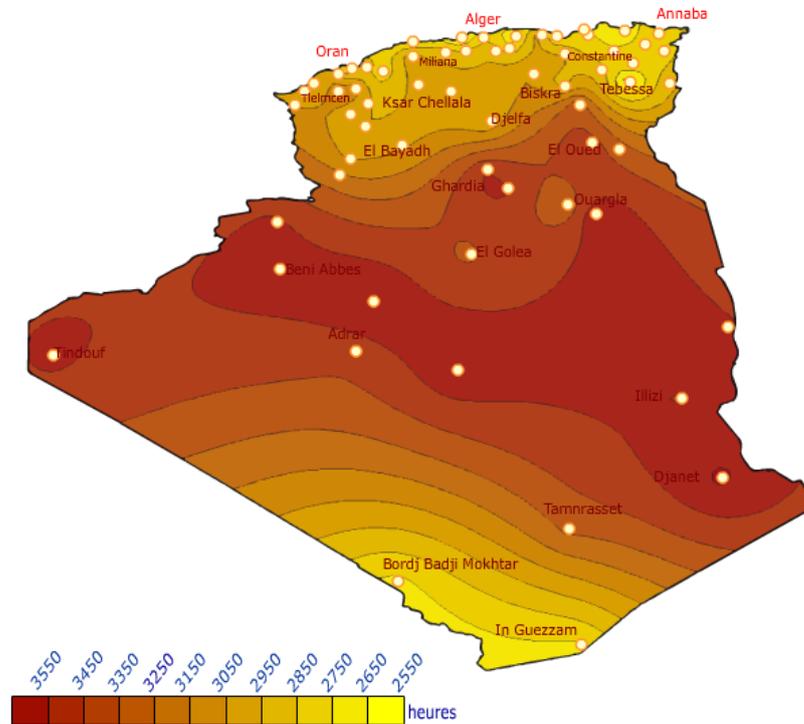


Figure I-2 : Ensoleillement annuel en heures en Algérie.

(Source : <http://portail.cder.dz>)

L'Algérie lance des projets importants en solaire thermique. Pour cela, deux centrales thermiques à concentration avec un stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW ont été lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale électrique de Hassi R'Mel d'une puissance de 120 MW. Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1 200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030 (Ait-Mekideche, 2013). La pénétration du chauffe-eau solaire (CES) en Algérie reste embryonnaire mais le potentiel est important. Il est prévu, dans ce sens, le développement du chauffe-eau solaire en le substituant progressivement au chauffe-eau traditionnel. L'acquisition d'un chauffe-eau solaire est soutenue par le fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME). Par ailleurs, comme les systèmes photovoltaïques PV sont très onéreux, étant donné qu'ils sont importés de pays étrangers comme l'Allemagne, l'Espagne et le Japon, les premiers modules à haut rendement ont été produits en 2014 à l'usine construite à Rouiba, située à 30 km à l'est de la capitale Alger. Ces modules sont principalement destinés à alimenter le marché intérieur (Boudghene Stambouli & al., 2012).

I- 6.1.2. Exploitation des gaz de schiste

Bien que des lois sur la maîtrise de l'énergie et l'exploitation des énergies renouvelables soient mises en place, la production de l'énergie fossile reste toujours dominante. D'ailleurs, plusieurs projets récents d'exploitation de ce type d'énergie sont accordés en mai 2014. Ils concernent la production du gaz de schiste dans sept bassins du sud algérien (Tindouf, Reggane, Timimoun, Ahnet, Mouydir, Ghadames Berkine et Illizi), (Figure I-3), (Chapelle et Petitjean, 2015).

L'exploitation des gaz de schiste en Algérie est devenue envisageable par la loi 2013 sur les hydrocarbures³. En juillet 2014, la SONATRACH, (Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures) affirme qu'elle envisage d'entamer l'exploitation des gisements de gaz de schiste de l'Algérie à partir de 2020, avec une capacité de production de 30 milliards de m³ par an dans une première période, soit l'équivalent de la consommation nationale actuelle. Cependant, une campagne de forages pilotes est lancée afin d'évaluer les réserves exploitables. L'extraction de gaz de schiste a des conséquences nuisibles sur la nappe phréatique et l'eau, sur l'air, sur le paysage, sur la santé...Malgré cela, les industriels voient cette nouvelle ressource comme une solution face à la crise énergétique.

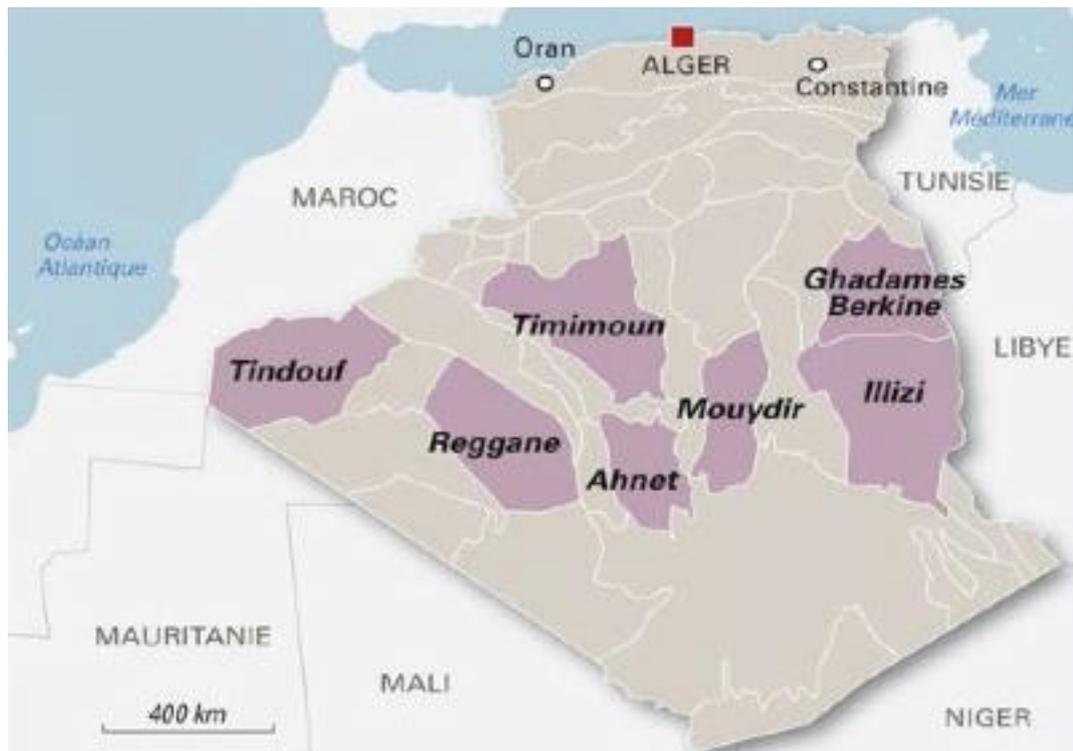


Figure I-3 : Les bassins identifiés en Algérie comme potentiels de gaz de schiste.

(Source : Chapelle et Petitjean, 2015, p.4).

³ **La loi n° 13-01 du 20 février 2013** : Relative aux hydrocarbures a été publiée au Journal Officiel n° 11 du 24 février 2013. Ce nouveau texte vient compléter et modifier l'ancienne loi n° 05-07 de 2005 (Source : http://www.mem-algeria.org/francais/uploads/Loi_13-01_modifiant_loi_hydro_05-07-2013.pdf).

I- 6.2. Projets réalisés

Vu sa forte part de consommation totale d'énergie et ses impacts environnementaux d'origine anthropique, le secteur du bâtiment présente un fort potentiel d'amélioration à la fois sur les plans énergétiques et environnementaux. Ce potentiel est estimé de 10 à 15 % ce qui justifie la mise en place de programmes et labels efficaces de maîtrise d'énergie dans ce secteur (CNERIB, 1998). L'Algérie a connu plusieurs expériences telles que le village solaire de Boussaâda, Ain El-Hdjer, réalisé dans les années 80, le ksar de Tafilelt à Béni-Isguen, le projet MED-ENEC de Souïdania et celui de l'habitat écologique à Tlemcen, le programme "Ecobât" des 600 logements à HPE (APRUE 2010-2011), ainsi que la maison solaire réalisée par le Centre National des Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) destinée aux régions sahariennes de l'Algérie. Nous examinerons dans ce qui suit les tendances et les attentes dans leurs applications et les aspects de mise en œuvre dans le bâtiment. Quelques exemples de projets pilotes sont cités avec leur impact sur la réduction des consommations énergétiques.

I- 6.2.1. Siège de l'ARPT à Bab-Ezzouar

Pour le secteur tertiaire, eu égard à l'étude prospective élaborée par l'APRUE à l'horizon 2020 et au budget alloué par le Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie (FNME) qui représente plus de 42%, il ressort que ce secteur revêt une grande importance dans la politique énergétique de l'Algérie et représenterait une cible prioritaire. Pour cela, deux grands projets sont en cours de réalisation conçus par l'architecte italien Mario Cucinella. Le premier est le siège de l'ARPT (Autorité de Régulation de la Poste et des Télécommunications) qui se situe dans l'agglomération de Bab-Ezzouar à Alger. La forme du projet est inspirée des dunes du désert algérien pour être un bâtiment naturel (Figure I-4).



Figure I-4 : Vue extérieure du projet de l'ARPT à Bab-Ezzouar.

(Source : www.mcarchitects.it)

Ce bâtiment est conçu selon les principes de l'architecture bioclimatique, plus particulièrement par le système de ventilation naturelle qui dicte la forme aérodynamique convexe au nord et concave au sud pour capturer les brises de terre pendant la nuit (Figure I-5).

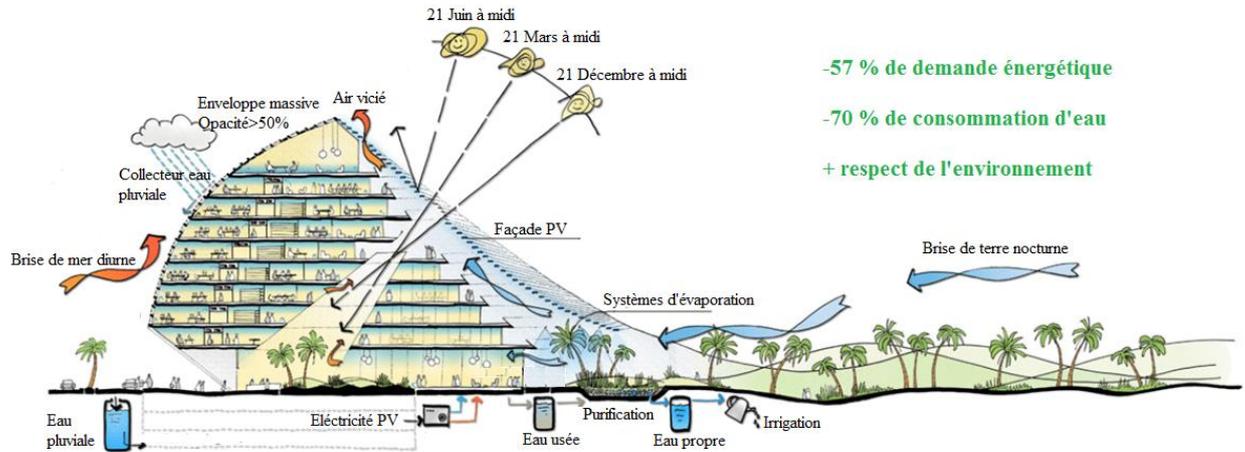


Figure I-5 : Coupe schématique montrant les procédés bioclimatiques utilisés dans le projet ARPT.

(Source : www.mcarchitects.it)

I- 6.2.2. Centre Hospitalo-Universitaire d'Alger

Le second projet du même architecte est le Centre Hospitalo-Universitaire de Staoueli à Alger (Figure I-6). Ce projet s'avère parfaitement intégré dans son site naturel qui est un élément clé dans la conception architecturale pour des fins thérapeutiques.



Figure I-6 : Vue extérieure sur le projet du CHU.

(Source : www.mcarchitects.it)

L'insertion du projet dans son assiette est concrétisée par une grande cour plantée d'arbres pour permettre la transition entre deux espaces naturel et artificiel et aussi pour une relation visuelle directe vers la mer (Figure I-7). Le projet est doté d'un double toit permettant une meilleure protection solaire.

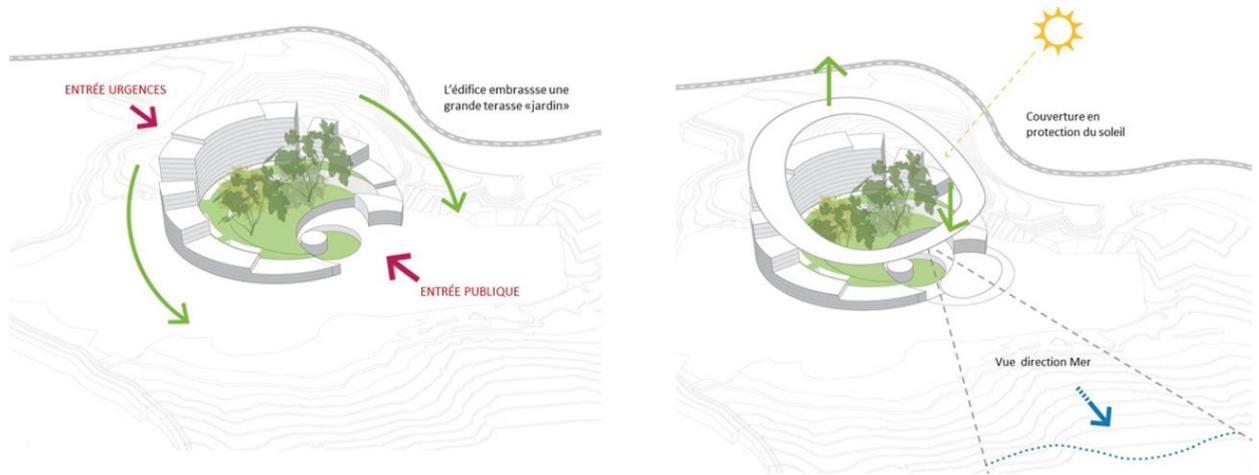


Figure I-7: Schémas montrant les principes de conception du CHU.

(Source : www.mcarchitects.it)

I- 6.2.3. Agence du "Touring Voyages Algérie" à Biskra

L'architecte Smail Mellaoui a conçu en 2014 un projet moderne en fonction du climat semi-aride de Biskra. Pour ce faire, il a proposé des moucharabiehs⁴ confectionnés par les artisans locaux, en s'inspirant du palmier pour protéger la façade sud du soleil. De plus, ces éléments servent à redonner une identité au bâtiment dans la région. L'architecte a également réalisé une étude solaire pour assurer un confort thermique et un éclairage naturel satisfaisant dans les espaces intérieurs du bâtiment tout au long de l'année (Figure I-8), (Mellaoui, 2015).

⁴ **Le moucharabieh** : "une sorte de claustras ou lattis finement tressé, ménageant de petits orifices qui permettent de filtrer le rayonnement solaire tout en recevant une lumière suffisante et en assurant la vue vers l'extérieur, et qui diminue la pression du vent tout en continuant de bénéficier d'une ventilation. Le moucharabieh se présente souvent en saillie pour augmenter la surface en contact avec le vent pour ventiler plus efficacement l'intérieur". (Source : Izard et Guyot, 1997)



Figure I-8 : Agence du Touring Voyages Algérie à Biskra.
(Source : mellaoui-smail.com)

I- 6.2.4. Village touristique à Bouzedjar Ain-Temouchent

Ce village touristique est achevé en 2013, il est bâti sur une assiette de 20 hectares de la plage de Bouzedjar dans la wilaya d'Ain-Temouchent, à environ 440 km à l'ouest d'Alger. La conception de ce village est faite par l'architecte suisse Daniel Grataloup, il est constitué de 118 bungalows sous forme de dômes peints totalement en blanc pour réfléchir le maximum du rayonnement solaire (Figure I-9). Ces bungalows sont construits avec des matériaux locaux, et les fenêtres sont conçues en conformité aux principes bioclimatiques. Ils sont réalisés pour une capacité de 590 personnes. Ils comprennent chacun une surface habitable de 82 m² avec mezzanine et terrasse donnant sur la mer.



Figure I-9 : Vue extérieure sur le prototype du village touristique de Bouzedjar.
(Source : Mekki, 2010, p.1).

I- 6.2.5. Projet des 600 et 100 logements à HPE "Eco-bât"

Le projet Eco-Bât initié par l'APRUE dans le cadre du PNME⁵ 2007-2011 en collaboration avec les offices de promotion et de gestion immobilière (OPGI) contient deux projets pilotes (Aprue, 2009):

- projet de réalisation de 600 logements à haute performance énergétique (HPE) sur tout le territoire national (Figure I-10) ;
- projet de rénovation thermique de 100 logements.



Figure I-10: Projet de 30 logements à HPE, à Chlef.

(Source : www.agencecofin.com)

I- 6.2.6. Projet MED-ENEC à Souïdania

C'est dans le même contexte que le projet Med-Enec, a été réalisé pour la période 2005-2009. Ces projets pilotes sont cofinancés par l'Union Européenne, et auxquels le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) et le Centre National d'Etude et de Recherche Intégrés en Bâtiment (CNERIB) ont été retenus pour leur étude (Figure I-11).



Figure I-11: Vue sur le projet-pilote à Souïdania ; logement efficace en énergie.

(Source : Chenak, 2009, p.2).

⁵ **PNME** : Programme National de Maitrise de l'Energie.

Parmi les mesures d'efficacité énergétique utilisées dans ce projet, nous citons l'utilisation des matériaux locaux, BTS (Béton de Terre Stabilisé), une climatisation passive, un plancher chauffant, une isolation horizontale et verticale, une orientation adéquate de l'ouvrage, un double vitrage, ainsi qu'un plancher solaire direct (PSD) : 8m² de capteurs solaires plans. L'étude énergétique préliminaire a fait ressortir des économies d'énergie de l'ordre de 60% en faveur du projet pilote comparé à une habitation classique. Sur le plan environnemental, la réduction des rejets de CO₂ est estimée à environ 5 000 kg/an.

I- 7. Conception bioclimatique et réduction des consommations d'énergie

L'étude du climat (climatologie) et son lien aux êtres humains est pris en considération par la bioclimatologie. Cette approche vise à travers la conception bioclimatique, à mettre au profit le climat, en contrôlant le processus de transfert de chaleur, par une utilisation décisive des éléments de la technologie du bâtiment. Ce qui favorise par conséquent des économies en énergie tout en garantissant des conditions de confort dans les bâtiments (Albuquerque Maciel, 2007). De ce fait, la compréhension des caractéristiques climatiques locales et l'application des stratégies passives de confort sont fortement liées au bioclimatisme. Pour Givoni (1994), le terme «passif» n'exclut pas d'avoir recours à des équipements mécaniques en cas de nécessité, si c'est utilisé pour la performance du système, ce qui fait qu'une conception bioclimatique se distingue du "design durable".

L'approche durable prend en considération l'impact de l'édifice sur l'environnement local tout en considérant le matériau par rapport à l'énergie de fabrication, sa durabilité, et l'utilisation de l'eau. Pour l'approche bioclimatique, réussir des économies d'énergie et un faible impact environnemental en intégrant la conception aux conditions climatiques locales pour un meilleur confort, n'est pas nécessairement limité par le matériau de construction. Le concept de l'architecture solaire a également son impact en proposant et en réalisant des solutions de chauffage thermique. L'apparition de ce terme date juste après la crise pétrolière des années 70. Pour Wines (2000), cette tendance propose les composantes des technologies environnementales traitées comme éléments "installés" plutôt que des "éléments exprimés" de conception.

Réunir ces concepts dès les premières phases de conception du bâti peut donner naissance à d'importantes économies d'énergie tout en assurant le confort des usagers. Mettre en œuvre une conception bioclimatique nécessite la prise en considération des contraintes affectant le problème thermique, ce qui implique de prendre en compte simultanément la consommation d'énergie et le confort. Cette architecture tire parti de la nature et limite les problèmes d'accès à l'énergie ainsi que l'impact global sur l'environnement. Elle adopte deux stratégies suivant les besoins (Cruz et al., 2011):

– **La stratégie du chaud en hiver** consiste à capter l'énergie solaire et la stocker dans la masse pour un déphasage et un écrêtage des pics de température. La redistribution de cette chaleur se fait lorsque les températures extérieures sont plus faibles que les températures intérieures désirées (Figure I-12).

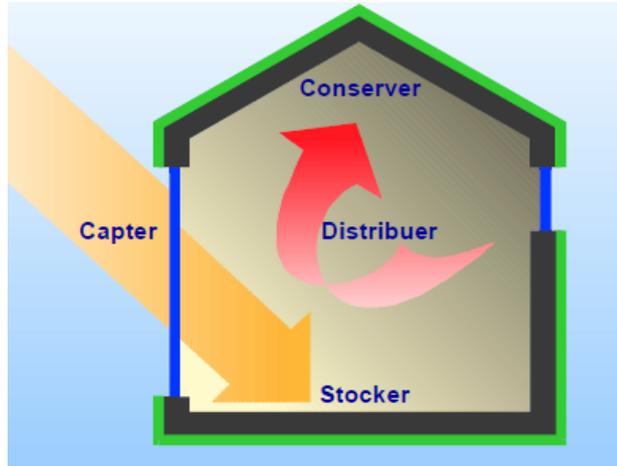


Figure I-12 : Stratégie du chaud en hiver.
(Source : Liébard et de Herde, 2005, p.31b)

– **La stratégie du froid en été** consiste à se protéger des apports solaires, adopter des solutions passives de refroidissement par humidification ou ventilation naturelle et limiter les charges internes (Figure I-13).

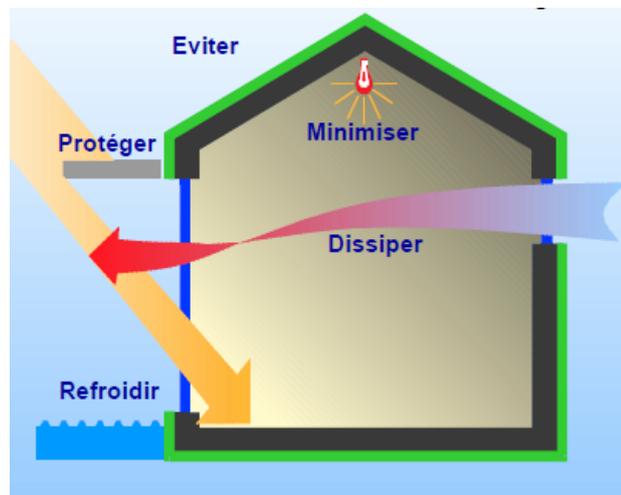


Figure I-13 : Stratégie du froid en été.
(Source : Liébard et de Herde, 2005, p.32b).

I- 7.1. Principes de l'architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique impose également des bases de conception à savoir:

I- 7.1.1. Implantation des bâtiments

- Le bâtiment doit être implanté de façon à réduire les consommations d'énergie relatives au refroidissement mécanique et à l'éclairage artificiel, et à contrôler l'accès à l'énergie solaire pour l'éclairage naturel (Gonzalo et Habermann, 2012) ;
- il doit favoriser une bonne ventilation naturelle pour le rafraîchissement, cela peut être maîtrisé en créant des dépressions pour engendrer des mouvements d'air (Ali-Toudert, 2000), (Figure I-14).

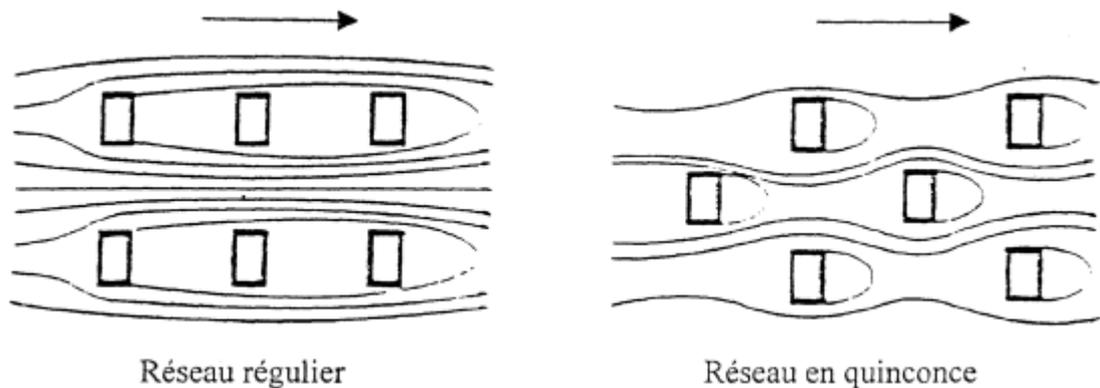


Figure I-14: Disposition en quinconce des bâtiments pour une meilleure ventilation selon

(Source : Ali-Toudert, 2000, p.35)

I- 7.1.2. Orientation et forme

En étudiant l'orientation du bâtiment, les divers concepts constituent souvent une confusion à laquelle nous devons faire face. Ce qui fait que nous sommes tenus de bien différencier et de spécifier les termes "éclairage", "énergie solaire" utilisés pour le chauffage d'un espace, et "ensoleillement" en tant que concept définissant la qualité spatiale, (Stauskis, 2014). Concernant l'éclairage, il est possible de le faire pour toutes les orientations, d'ailleurs la direction nord est même souhaitée dans certains cas (bureaux, ateliers d'artiste) pour plusieurs raisons : régularité de la répartition lumineuse, et absence de surchauffe ou d'éblouissement obtenu par l'ensoleillement direct, (Stauskis, 2014).

Pour avoir un apport énergétique dans le chauffage en utilisant l'énergie solaire comme solution passive, il est nécessaire de considérer le rayonnement solaire direct en raison de son intensité, dont la valeur maximale est obtenue vers le sud, cette dernière est rapidement atténuée dès que l'on s'éloigne vers les autres sens. En ce qui concerne l'ensoleillement d'une pièce en tant que qualité spatiale, le facteur de position du soleil au cours de la journée est à prendre en considération. Ainsi, vers midi, le rayonnement solaire sur les façades est et ouest diminue de plus en plus par un angle laissant pénétrer moins de soleil dans la profondeur d'une pièce. Arrivant à un angle inférieur à 15° , le vitrage renvoie en

grande partie le rayonnement solaire, mais en s'éloignant de la mi-journée, le soleil est plus bas, et l'angle d'incidence devient important (Gonzalo et Habermann, 2012).

L'orientation est également réfléchiée en fonction de la direction du vent. En effet, l'aération des espaces intérieurs d'un bâtiment est liée à la différence de pression causée par l'exposition ou non des façades (Ali-Toudert, 2000). La ventilation sert à évacuer des locaux la chaleur interne ou les gains solaires. La vitesse et la direction du vent influencent essentiellement le microclimat et la demande énergétique des bâtiments. L'orientation d'un bâtiment dépend principalement de l'axe dans lequel souffle le vent et surtout de la nécessité ou non de profiter des apports solaires. Une orientation soignée et une forme compacte peuvent limiter les apports solaires et réduire les charges thermiques (Ali-Toudert et Bensalem, 2001).

I- 7.1.3. Inertie thermique

C'est la capacité thermique d'un matériau qui détermine son inertie. Plus la capacité thermique est élevée, plus le matériau est capable de stocker et de restituer des quantités de chaleur. Ainsi, un mur en pierre ou en brique ensoleillés reste chaud longtemps après le coucher du soleil et pour les mêmes raisons, une cave reste fraîche même en plein été. C'est la forte inertie thermique du mur qui permet ce phénomène. La capacité thermique dépend de trois paramètres propres à chaque matériau (IBGE, 2010) : La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique. Dans la littérature, on parle souvent des notions "d'effusivité" et de "diffusivité" qui permettent d'interpréter plus aisément le rôle de l'inertie thermique. Ces notions se calculent sur la base de la masse volumique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique des matériaux composants les parois (IBGE, 2010). Elles se définissent comme suit :

- **La diffusivité thermique** "représente l'accélération avec laquelle la température du matériau va évoluer en fonction des sollicitations thermiques extérieures. Plus la diffusivité est faible, plus le front de chaleur met du temps à traverser l'épaisseur du matériau, (déphasage important entre le moment où la chaleur arrive sur une face du mur et le moment où elle atteint l'autre face)", (IBGE, 2010). Elle s'exprime selon l'équation suivante :

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{en m}^2/\text{s}) \quad \text{I-1}$$

Où : λ : conductivité thermique en $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, ρ : masse volumique en kg/m^3 , et c : chaleur spécifique en $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

- **L'effusivité thermique** "représente la capacité du matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. L'effusivité caractérise la sensation de «chaud» (faible effusivité) ou de «froid» (grande effusivité) que donne le contact avec un matériau. A côté des solutions traditionnelles des murs "lourds" (béton, pisé, brique...), de nouvelles technologies sont redécouvertes et adaptées, comme l'utilisation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe", (IBGE, 2010). Elle s'exprime selon l'équation suivante :

$$E_f = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (\text{en m}^2/\text{s}) \quad \text{I - 2}$$

Où : λ : conductivité thermique en W/m.°C, ρ : masse volumique en kg/m³, et c : chaleur spécifique en kJ/kg. °C.

Cette dernière décennie, l'application des matériaux à changement de phase (MCP) dans les façades des constructions a acquis une grande attention dans le monde. Les MCP permettent de stocker et de relâcher l'énergie provenant des apports solaires ou internes. Ils sont considérés comme une solution intéressante pour réduire les consommations énergétiques et améliorer le confort thermique au sein d'un bâtiment (Lewandowski, 2012). Les MCP sont utilisés dans le bâtiment, soit pour le chauffage, soit pour le rafraîchissement :

- **Rafrâichissement** : en période de forte chaleur, lorsque la température intérieure dépasse leur point de fusion, les MCP absorbent de l'énergie en fondant. Ce stockage d'énergie par changement de phase permet de limiter l'augmentation de la température intérieure en vue de maintenir un certain niveau de confort. Cette énergie est restituée au local ultérieurement lorsque la température intérieure diminue en dessous du point de solidification. Une surventilation nocturne est souvent mise en place pour accélérer le processus de solidification.
- **Chauffage** : en période hivernale, les MCP peuvent être utilisées pour le chauffage en stockant de l'énergie solaire pendant la journée et en la restituant au bâtiment la nuit.

Au cours de ces vingt dernières années, l'application des MCP a augmenté de manière considérable dans différents domaines. Aussi, différents auteurs ont menés des travaux d'investigation des MCP, et de nombreux articles ont été publiés dans ce sens (Figure I-15), (Akeiber et al., 2016). Nous allons explorer quelques études récentes ayant appliqué les MCP dans différents éléments de l'enveloppe bâtie (murs, fenêtres, plafonds, sols) pour le rafraîchissement passif dans le chapitre III § 3.3.2.

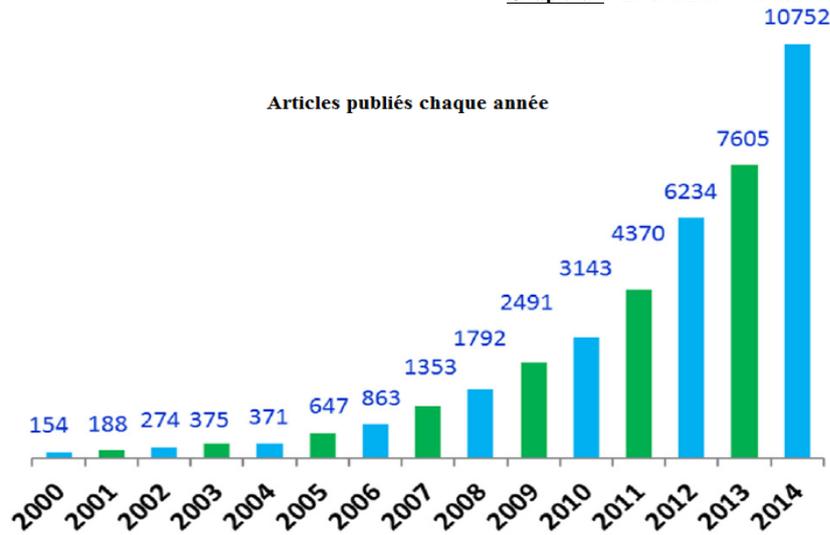


Figure I-15: Articles en relation aux MCP publiés chaque année de 2000 à 2014.

(Source : Akeiber et al. p.4, 2016).

Les changements de phase de ces matériaux peuvent être classés en quatre états: Solide-liquide, solide-solide, gaz-solide et gaz-liquide. En pratique, seule la variété solide-liquide peut être utilisée pour le refroidissement ou le chauffage des constructions parce que les autres variétés ont des limitations techniques (Sun et al., 2016). Les MCP peuvent être des produits organiques fabriqués à partir de paraffines pétrosourcées, ou de matières biosourcées obtenues à base de résidus végétaux ou animaux. Comme ils peuvent être inorganiques, produits par des sels hydratés, ou une mixture de ces deux types (Mathis, 2019). Le plus souvent, les MCP sont encapsulés, cette technique permet d'éviter la dispersion du produit encapsulé lors du changement de phase, d'améliorer les échanges thermiques avec l'environnement avoisinant, de limiter le contact entre la matière active encapsulée et la poche enveloppante, et de protéger les MCP. Il existe deux procédés d'encapsulation des MCP : la macro-encapsulation et la micro-encapsulation (Drissi, 2015).

- **La macro-encapsulation :** Les MCP sont conditionnés dans des conteneurs dont le volume varie de 1 ml à plusieurs litres. Ces conteneurs peuvent être des nodules, des sacs ou des parallélépipèdes en plastique.
- **La micro-encapsulation :** La taille des particules micro-encapsulées varie entre 1 μm et 1 mm. Elles sont enrobées par un polymère imperméable afin d'éviter leur fuite durant la liquéfaction.

Les MCP sont intégrés dans les structures qui sont : les plaques de plâtre, les enduits, les murs Trombe à base de MCP, les blocs de béton. D'autres compartiments du bâtiment sont utilisés pour l'intégration des MCP. Néanmoins, la plupart sont encore au stade expérimental. Les travaux les plus avancés sont l'intégration des MCP dans les fenêtres, les rideaux de fenêtres, le plancher et le plafond (Sadineni et al., 2011).

I- 7.1.4. Isolation thermique

Les règles et usages actuels de conception des bâtiments sont essentiellement basés sur la minimisation des déperditions thermiques. Dans les bâtiments mitoyens, la plus grande part des pertes de chaleur se fait généralement au niveau des toitures. En revanche, dans les bâtiments de trois ou quatre façades, les murs extérieurs sont habituellement responsables de la majorité des déperditions (Figure I-16). L'isolation thermique de l'enveloppe permet donc d'augmenter le confort des habitants tout en réduisant les consommations d'énergie et les émissions de polluants (Branders et Evrard, 2011).

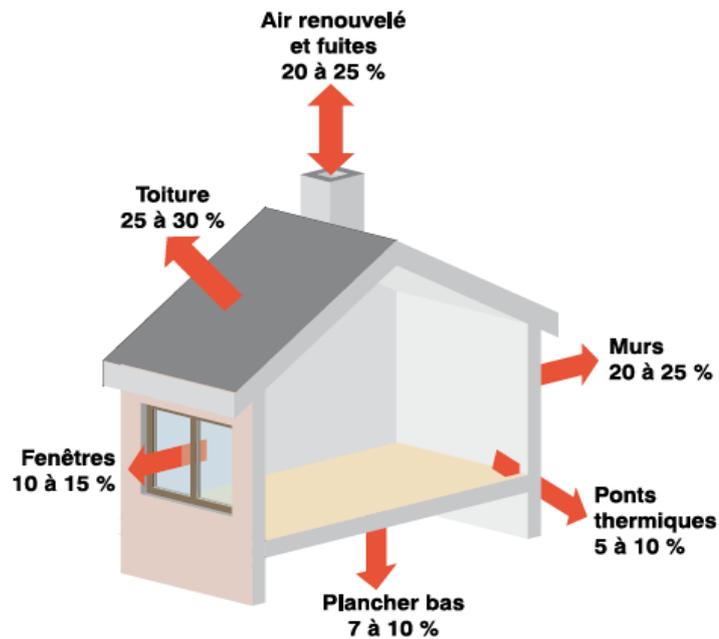


Figure I-16 : Répartition des déperditions d'une maison familiale standard non isolée.

(Source : Branders et Evrard, 2011, p.13).

Pour traiter les déperditions linéiques des ponts thermiques, trois procédés se distinguent : l'isolation thermique par l'extérieur, l'utilisation de rupteurs de ponts thermiques et les structures à ossature bois, surtout utilisées pour les maisons individuelles. Le point critique reste la rénovation dans les cas où l'isolation par l'extérieur n'est pas possible. Pour répondre à ce défi, un effort important est fait, Comme en Suisse et en Allemagne, pour développer des isolants "sous-vide" à très haute performance et de faible épaisseur (Chlela et al, 2005). Ces "super isolants" utilisent les principes de basse pression et de confinement pour réduire le nombre et la mobilité des molécules de gaz. Les conductivités thermiques obtenues sont de l'ordre de 5.10^{-3} W/mK.

I- 7.1.5. Ventilation naturelle

D'après Sørensen cité par Widera (2014), les systèmes de refroidissement utilisés dans l'architecture vernaculaire dans les zones chaudes sont basés sur la ventilation naturelle. Parmi les différents systèmes

observés dans les habitations traditionnelles, trois modèles de base se distinguent, et qui peuvent être appliquées à l'architecture bioclimatique contemporaine :

- la ventilation transversale sur la base de la différence de pression autour de la construction représentée en la figure I-17-a ;
- cheminée de ventilation basée sur l'effet de dépression provoquée par l'air chaud ascendant montré dans la figure I-17-b ;
- les capteurs et tours à vent sur la base de surpression et de dépression présenté dans la figure I-17-c.

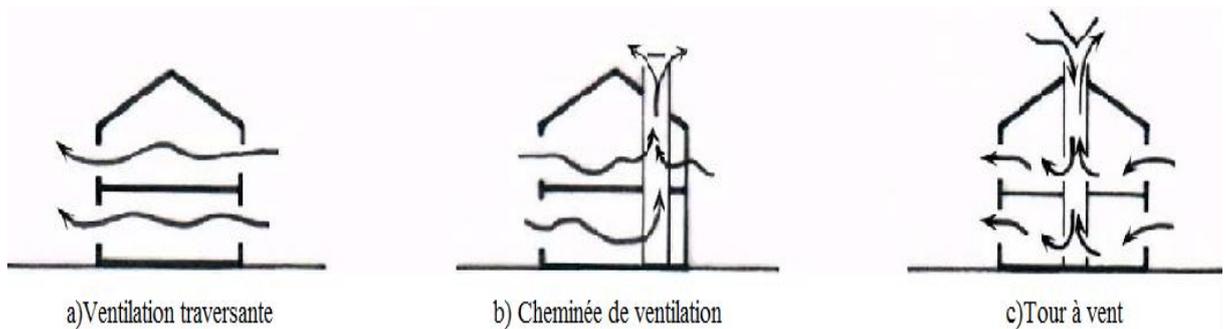


Figure I-17: Systèmes de ventilation traditionnels d'après Sørensen.

(Source : Widera, 2014, p.2).

D'autres systèmes mécaniques de ventilation sont actuellement utilisés (Mulé, 2011), tels que la ventilation mécanique simple flux dont le principe est la création d'un flux d'air dans le bâtiment de telle sorte que l'air neuf entre par les locaux "propres" (salon, bureau, chambres,...) et que l'air vicié sorte par les locaux "humides" (sanitaires, buanderies,...) ou "viciés" (WC, cuisines,...), grâce à des passages sous les portes, des grilles de transfert dans les portes ou les cloisons. Un conduit permet la sortie de l'air vicié, la plupart du temps en toiture. Quant à la ventilation à double flux, elle est organisée grâce à la pulsion mécanique d'air neuf, dans les locaux, et l'extraction mécanique d'air vicié des locaux. La pulsion se distribue via un réseau de conduites verticales et horizontales dans les vides utilisables (faux plafonds). Les conduites verticales d'évacuation d'air sont semblables aux conduites des systèmes "simple flux" et peuvent être disposés parallèlement aux conduites verticales.

Le puits canadien permet le préchauffage ou au contraire le rafraîchissement de l'air neuf d'un système de ventilation par l'intermédiaire d'un conduit d'amenée d'air enfoui dans le sol. En hiver, le sol, à la profondeur de 2 m, est plus chaud que la température extérieure : l'air froid est donc préchauffé lors de son passage dans les conduites. En été, le sol est plus froid que la température extérieure : l'air entrant dans le bâtiment, sera tempéré naturellement par la température fraîche du sol. Le puits canadien permet une économie de l'ordre de 20 à 25 % de la consommation liée au chauffage de l'air neuf et 5 à 10 % de la consommation totale de chauffage (Powel, 2005).

I- 7.2. Dispositifs de l'architecture bioclimatique

I- 7.2.1. Architecture cinétique

Willian Zuk et Roger Clark ont défini l'architecture cinétique comme "la forme architecturale pouvant être intrinsèquement déplaçable, déformable, expansible ou capable de mouvement cinétique ". Ils ont décrit l'architecture cinétique comme étant un "processus continu" qui "ne s'arrêtera pas lorsque le bâtiment est érigé " (Stiny, 2011). Les parties cinétiques d'un bâtiment concernent les façades, les persiennes et les plafonds. Le bâtiment peut également avoir une structure entièrement cinétique, comme une structure tendue et les tours entièrement tournantes.

Le Musée d'art Milwaukee conçu par Santiago Calatrava aux USA, en 2001, est un très bon exemple d'architecture cinétique. Le musée est conçu avec un brise-soleil en forme d'aile déplaçable au-dessus du musée lui-même. Le brise soleil en acier de 115 tonnes se compose de deux éléments d'aile égaux formés de 36 ailettes d'une longueur comprise entre 8 et 32 mètres. La structure voûtée en acier et en verre est devenue l'élément de signature du pavillon Wuadracci et un symbole de la ville, (Figure I-18), (Calatrava 2001).



Figure 1-18 : Le Musée d'art Milwaukee conçu aux USA : Architecte Santiago Calatrava..

(Source : <http://inhabitat.com>).

I- 7.2.2. Façade double-peau

Les façades de type double-peau sont composées d'un vitrage intérieur et d'un vitrage extérieur séparés par un canal d'air de 20 à 80 cm de largeur (Hannawi, 2006). En général, la vitre intérieure est un double vitrage, et la vitre extérieure est un simple vitrage. La convection dans la cavité d'air peut être soit naturelle (tirage thermique), soit forcée (ventilation mécanique), soit hybride (naturelle + forcée). L'épaisseur de la cavité d'air est choisie en fonction de nombreux paramètres; à savoir, le type de

ventilation, les conditions climatiques et les performances thermiques visées. La cavité contient aussi une protection solaire et doit être accessible pour des raisons de maintenance et de nettoyage (Chlela, 2008), (Figure I-19).

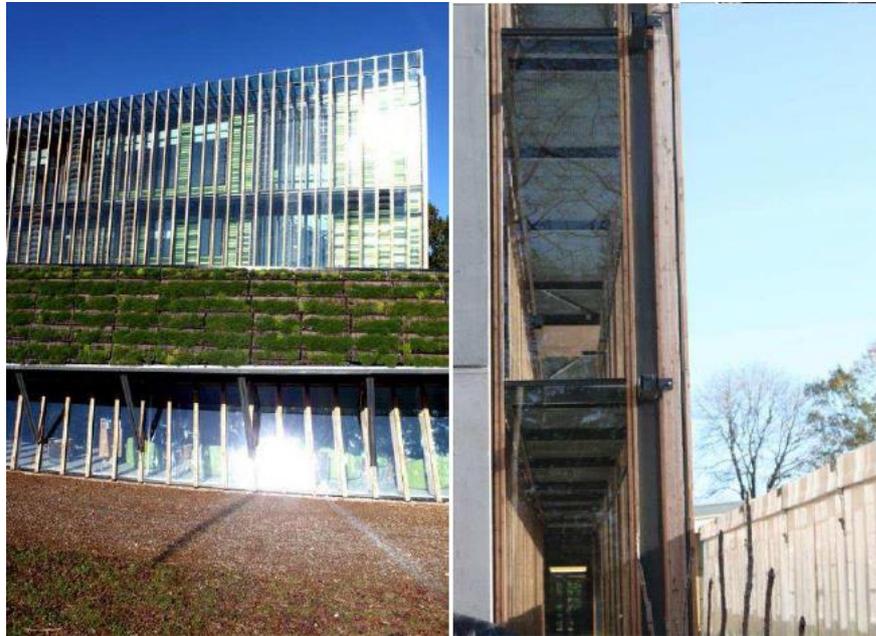


Figure I-19 : Vues d'une façade double-peau; de l'extérieur à gauche, la cavité à droite: Office 64 à Bayonne, Architecte P. Arotcharen. (Source : Dugue, 2013, p.54).

L'utilisation d'une façade double-peau est réservée aux bâtiments tertiaires totalement vitrés. Ses principaux avantages sont l'isolation acoustique et thermique. Ces façades double-peau peuvent être équipées de panneaux photovoltaïques autonomes en énergie, constitués de modules préfabriqués qui intègrent toutes les fonctionnalités nécessaires au confort des usagers. Son efficacité est d'autant plus importante que le bâtiment est grand (Chahab, 1994). La technologie photovoltaïque joue un rôle très important dans la réduction de la consommation de l'énergie fossile. Elle permet de convertir 10 à 20 % du rayonnement solaire incident en énergie électrique (Cyberarchi, 2005).

Les façades double-peaux peuvent également être végétalisées comme un jardin vertical pouvant être aménagées aussi bien à l'extérieur d'un bâtiment (contre une façade) qu'à l'intérieur des deux faces de la façade double-peau (Shewaka et Magdy, 2012). Grâce à l'évapotranspiration des plantes, la façade végétalisée contribue à réduire l'effet de l'îlot de chaleur urbain et l'ensoleillement de la façade (Alexandri, 2004). De plus, la diversité des plantes constituant le mur végétal favorise la biodiversité en créant de nouveaux refuges ou garde-manger pour les oiseaux et insectes. La végétalisation des façades participe ainsi à l'amélioration de la qualité de l'air et à l'épuration des eaux pluviales, ainsi qu'au confort visuel (Atik, 2011 et Bruse, 1999).

I- 7.2.3. Protections solaires et ombrages

Les apports dus à l'ensoleillement des vitrages sont les plus importants, ils peuvent représenter 50 à 80 % des charges totales des locaux climatisés (Bougriou et al., 2000). Ce qui montre leur intérêt considérable. L'obtention du confort en climatisation passive ou active dépend des protections solaires, de leur gestion et du type des fenêtres. De nombreux types de protections solaires existent : permanents (vitrages spéciaux, films autocollants), fixes (auvents, avancées architecturales), mobiles (stores extérieurs, volets). Le choix d'une protection solaire doit se faire en fonction de l'orientation de la fenêtre. L'un des inconvénients de l'utilisation des dispositifs d'ombrage est le risque de réduction du niveau de lumière du jour en obstruant la vue vers l'extérieur (Joarder et al., 2009). Les plantes sont également utilisées comme protections solaires, Dugue (2013) mentionne deux solutions de leur utilisation : les "**living walls**" : ces systèmes sont directement posés sur un mur, et accueillent des plantes variées ; et les "**green façades**" : pour ce cas, les plantes grimpantes sont placées sur des supports devant des façades vitrées. Les protections solaires peuvent être réalisées en structure tendue (textile) à l'exemple de la façade de la bibliothèque nationale à Riyadh en Arabie Saoudite (Figure I-20).

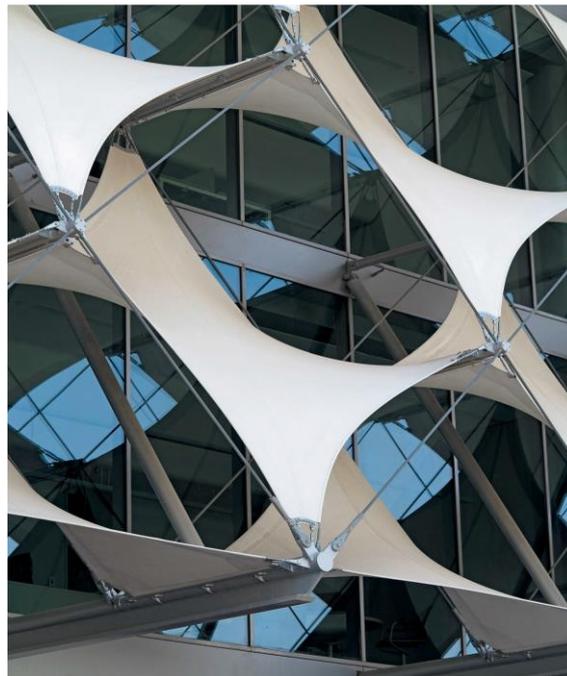


Figure I-20 : Protections solaires en textile, Bibliothèque Nationale de Riyadh, Architectes : Gerber et Lücking (Source : Schittich, 2015, p.85).

I- 7.2.4. Le mur Trombe-Michel

Proposé dans les années 1950, ce mur porte le nom de ses inventeurs, Félix Trombe et Jacques Michel. Pour son fonctionnement, l'espace est chauffé en exploitant le phénomène de tirage thermique, qui consiste à canaliser l'énergie solaire incidente et la redistribuer dans la bâtisse associée. Le mur

Trombe se compose d'une paroi vitrée placée devant un mur épais à forte inertie et faiblement isolé, la surface extérieure du mur est généralement peinte en noir. Des ouvertures en parties hautes et basses des vitrages sont réalisées pour fermer les entrées et sorties d'air (Izard et Guyot, 1979), (Figure I-21).



Figure 1-21 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis,
(Source : Dugue, 2013, p.70).

Durant la saison d'été, ces clapets sont fermés en présence de soleil afin de délimiter les apports de chaleur. En hiver, la surface extérieure du mur absorbe le rayonnement solaire incident, ce qui permet d'accumuler de la chaleur par l'effet de serre, et de favoriser la circulation naturelle de l'air chauffé et dilaté depuis l'ouverture haute. Le mouvement de l'air permet de reprendre la chaleur stockée, de chauffer passivement l'espace et de réduire par conséquent l'énergie consommée pour le chauffage. D'ailleurs, il est estimé qu'un mur Trombe assure annuellement un apport en moyenne de 50 kWh/m² (Izard et Guyot, 1979).

I- 7.2.5. Serres ou vérandas bioclimatiques

La véranda, ou serre bioclimatique fonctionne de la même manière que le Trombe-Michel, sauf que pour là la lame d'air devient un espace de vie. Selon les deux saisons d'hiver et d'été, la serre bioclimatique dispose d'après Izard et Guyot (1979) d'un double fonctionnement à savoir :

- **en hiver**, il s'agit de stocker de la chaleur solaire qui pénètre dans la véranda et entre en conséquence dans la maison, à travers des ouvertures qui s'ouvrent vers la serre. Simultanément, les parties massives (dalle, mur capteur) emmagasinent les calories pour les restituer graduellement dès que la température redescend le soir. Dans ce cas, il convient de fermer les ouvertures, afin de ne pas laisser la chaleur partir vers la véranda ;

- **en été**, le rayonnement solaire qui atteint le vitrage doit être minimisé par des protections solaires (store, auvent, végétation...). Par ailleurs, une ventilation naturelle peut être mise en place grâce à des ouvertures spécifiques en partie haute et partie basse de la véranda.

La serre doit impérativement être orientée vers le sud, toutefois un décalage de plus ou moins 20° diminue de très peu (-5%) la performance de captage (capacité de la serre à intercepter le rayonnement solaire), (AGEDEN, 2010). Son intégration au bâti se fait de trois (03) manières (Figure I-21):

- **En épi** : le type le plus habituel est le moins approprié. Ses trois facettes exposées au soleil engendrent, de plus importantes déperditions et des échanges réduits avec le logement. En été, ce type de serre est source de fortes surchauffes.
- **En angle ou semi encastrée** : ces deux options présentent des performances intermédiaires. Pour la véranda d'angle, on veillera à éviter l'exposition ouest pour prévenir les surchauffes en fin de journée.
- **Encastrée** : ce type de serre est le plus performant. Les surfaces de captage et de contact avec la bâtisse sont optimisées (Figure I-22).

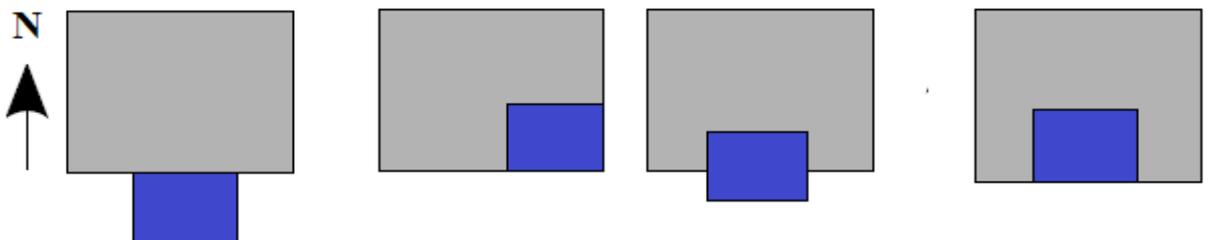


Figure I-22: Différentes intégrations de la serre (en bleu) au bâti (en gris), en épi, en angle ou semi encastrée, et encastrée, de gauche à droite), (Source : AGEDEN, p.3.)

La serre bioclimatique dans le projet du centre de formation et d'examens de Lille en France, construit en 2013, est intégrée au centre du projet (Figure I-23). Elle joue le rôle d'un "jardin d'hiver"⁶ vers lequel donnent les bureaux et la cafétéria. Lieu de passage, de détente, et de rencontre elle permet également par son orientation (Sud-Est) de capter l'énergie. Des brises soleils couvrent les façades de la serre afin de gérer les confort d'été et d'hiver. De part leur dimension et leur emplacements optimisés, les lames brises soleils protègent des rayons solaires d'été tandis qu'ils laissent passer ceux d'hiver (Hornez, 2017).

⁶ **Un jardin d'hiver** : Est jardin d'agrément en serre, généralement associé à une demeure. (Source : data.culture.fr)



Figure I-23: Serre encastrée du centre de formation et d'examens, à Lille en France.

Architecte : J-L Hornez. (Source : archicontemporaine.org)

I- 7.2.6. Surfaces vitrées

Les propriétés constructives et le génie climatique des bâtiments connaissent quelques progrès permettant de réduire la consommation en énergie. Il faut dire que les façades totalement vitrées sont rarement considérées comme la meilleure solution pour la consommation énergétique, ce type de façade peut également créer la surchauffe de la température de l'air intérieur en période estivale. Nous nous intéressons dans notre travail au mur-rideau de verre que nous présenterons dans ce qui suit :

Le mur-rideau de verre

Le mur-rideau de verre est un habillage extérieur léger sous un aspect de plusieurs modules de verre associés par une structure uniforme métallique ou en béton, le tout fixé en fond de plancher. Selon Schittich (2001), le premier mur-rideau de verre est réalisé en 1947 par Bellushi P. à Portland/Oregon sur un building administratif. Il abrite "l'Equitable Saving and Loan Building" d'apparence lisse, en verre réfléchissant teinté en vert (Figure I-24), (Chabane, 2006). A cette époque, le mur-rideau de verre était une nouvelle inspiration, il représentait l'image universelle du gratte-ciel exprimant la dominance, la modernité et le progrès. Cette technique se répand très rapidement dans tous les pays, et s'applique pour tous les bâtiments neufs ou réhabilités, ce style architectural atteint son apogée aux années 50 et 60, (Benevolo, 1998).



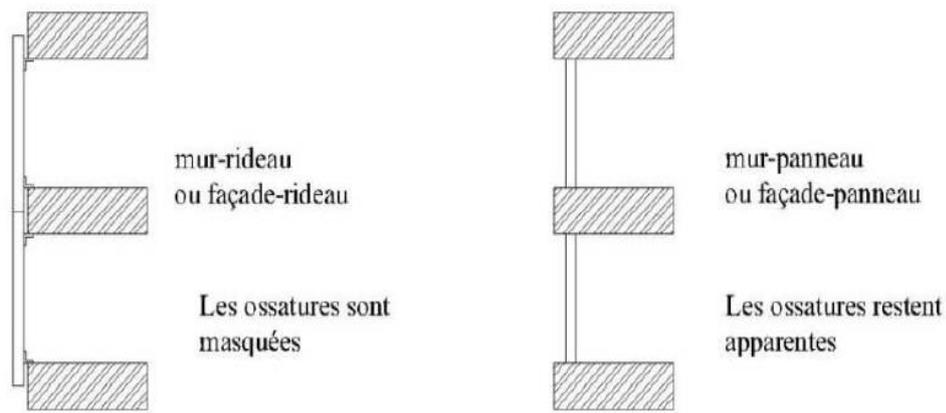
Figure I-24: L'Equitable Saving and Loan Building à Portland, 1947.

(Source: Schittich, 2001, p. 39).

Le développement de l'enveloppe de verre donne naissance aux dispositifs mécaniques et électriques de régulation des ambiances intérieures, ce qui a fait disparaître l'usage manuel et les fonctions classiques de la fenêtre. Conséquemment, dans les immeubles de bureaux, avec des configurations profondes, la ventilation naturelle à travers les fenêtres ouvrantes des murs-rideaux (murs-rideaux non hermétiques) ne suffit plus pour répondre aux besoins ergonomiques. De ce fait, les systèmes combinés de chauffage, ventilation et refroidissement des espaces, appelés "HVAC system" (Heating Ventilating and Air-Conditioning System), sont développés pour maintenir des conditions thermiques confortables dans les espaces de travail, sans l'usage des fenêtres. Les fenêtres sont scellées ou conçues de façon qu'elles ne s'ouvrent qu'en cas de danger (murs-rideaux hermétiques). De ce fait, d'autres bienfaits sont alloués aux murs-rideaux hermétiques (fenêtres fixes), tels que la sécurité, notamment dans les immeubles très élevés, et la réduction de poussière dans les espaces (Arnoff et Kaplan, 1995 et Vischer, 1989).

Principe constructif du mur-rideau de verre

Quant à son principe constructif, le mur-rideau de verre est partagé en deux modèles selon l'emplacement de l'ouvrage par rapport au nez des planchers, sous deux appellations : "façade rideau", lorsque les parois passent devant la structure du bâtiment et les nez des planchers ne sont plus visibles; "façade panneau" lorsque ces parois s'insèrent entre les planchers (Figure I-25), (CERTU, 2003).

**Figure I-25** : Système constructif des murs-rideaux

(Source : CERTU, 2003, p.11).

I- 7.2.2.1 Le verre dans l'histoire de l'architecture

Selon Wigginton, (2002) l'apparition du mur-rideau de verre dans l'histoire de l'architecture est l'aboutissement de quatre grandes étapes à savoir :

I- 7.2.2.2 De l'artisanat romain à la lumière gothique

Les romains⁷ utilisaient des feuilles minces et transparentes pour fabriquer des vitres, mais c'est à partir du XII^e siècle que les architectes gothiques⁸ font apparaître les premières réalisations de verre en utilisant de larges baies pour permettre à la lumière de passer et emplir les espaces intérieurs des cathédrales et faire sentir aux croyants quiétude et spiritualité. Ceci a donné de belles réalisations telles que les rosaces des cathédrales françaises, les larges baies des nefs des églises anglaises, les bâtisses telles que le manoir "Hardwick Hall" (que ses contemporains disaient faite "plus de verre que de mur"), conçu par Robert Smythson en 1591-1593, (Figure I-26), (Wigginton, 2002).

⁷ **L'architecture romaine** : Se développe en Italie durant la Rome antique, du V^e siècle av. J.-C. au IV^e siècle apr. J.-C. Elle est influencée principalement par deux civilisations : les Grecs et les Étrusques (peuple de l'Italie ancienne). (Source : Deltruel, 2017 disponible sur : <http://www.clg-hugo-sete.ac-montpellier.fr>, consulté le 28-06-2017).

⁸ **L'architecture gothique ou art français** : Est un style architectural qui apparaît en Île-de-France et en Haute-Picardie au XII^e siècle sous la dénomination Opus Francigenum, signifiant œuvre française. Le style évolue à travers quatre périodes du gothique primitif ou de transition (1140-1190), succèdent le gothique classique ou lancéolé (1190-1250), au gothique rayonnant (1250-1375) et enfin au gothique flamboyant (1375-1500). (Source : Antoine, 2017, disponible sur : <http://www.info.univ-tours.fr>, consulté le 28-06-2017).



Figure I-26 : Le manoir Hardwick Hall en Angleterre, conçu par R. Smythson.

(Source : www.google.com)

L'Europe du Nord a connu une arrivée tardive de la renaissance et un besoin en lumière dans les bâtisses, ce qui a donné naissance à des réalisations telles les travaux de vitrerie de la Chapelle de Kings College Cambridge, en Grande Bretagne, fondé en 1547 par Henri VI, (Figure I-27), (Wigginton, 2002).



Figure I-27 : La Chapelle de Kings College Cambridge, fondé par Henri VI (Vues extérieure et intérieure).

(Source : www.google.com)

I- 7.2.2.3 Le deuxième âge du verre

Durant cette époque, la révolution industrielle a permis de faire de grands progrès dans le domaine du bâtiment en général et celle du verre dans la construction en particulier, à l'exemple du Crystal Palace (Figure I-28) réalisé pour l'exposition universelle à Londres en 1851.



Figure I-28 : Le Cristal Palace.

(Source : www.google.com)

Aux Etats Unis d'Amérique, ce type d'architecture a connu son essor avec la reconstruction de Chicago, suite à l'incendie de 1871. Ce déclic a pris forme avec la construction de gratte-ciels comportant une structure en métal et des façades recouvertes en verre tel que Gage Building Holabrid et Roche construite en 1898 Par Louis Sullivan. Cette nouvelle tendance s'est exporté en Europe par la réalisation de quelques exemples tel que le Gardner's store, de John Bird, à Glasgow en 1855-1856, et l'Orel Chambers de Peter Ellis à Liverpool en 1864-1865, ce qui a permis de définir les nouveaux concepts de "transparences" et "multicellularité" repris par les architectes durant les années 40 et 50 (Massu, 1982).

I- 7.2.2.4 Le troisième âge du verre : matériau symbole de modernité

Durant cette période, l'architecture de verre a continué d'évoluer notamment en Europe, suite à l'intérêt suscité par le verre, perçu par les architectes et théoriciens durant la deuxième décennie du XX^e siècle comme un matériau de l'architecture contemporaine, à l'exemple des gratte-ciels de Bruno Taut, et ceux de Walter Gropius et Mies Van der Rohe, réalisées à Berlin respectivement en 1919 et 1922.

L'engouement pour l'architecture de verre persista après la deuxième guerre mondiale, notamment aux Etats-Unis d'Amérique à travers "le style international". Par la suite, ce type d'architecture s'exporta en Europe par l'usage de ce nouveau revêtement de façade. Toutefois, ce dernier était peu performant, et imposait l'installation des climatiseurs pour assurer un meilleur confort à l'intérieur des espaces, ce qui a dévalorisé l'image de ce type d'architecture, jusqu'à la création aux Etats-Unis des façades à système solaire passif.

I- 7.2.2.5 Le quatrième âge du verre

Aux années quatre vingt et quatre-vingt dix, le verre est devenu un matériau très utilisé dans la construction. Grâce à sa transparence, la façade de verre ou le mur-rideau, met en avant le progrès technologique et la modernité. De nombreux procédés liés au revêtement et au traitement du verre sont apparus depuis, et plusieurs architectes célèbres marquent cette époque avec leurs réalisations, et parmi eux :

- Norman Foster, à travers le style architectural "High Tech" qu'on retrouve dans le projet d'Hôtel de ville à Londres, construit en 2002 (Figure I-29) ;
- Jean Nouvel, avec des enveloppes vitrées régulant les ambiances lumineuses, telles que celle de l'Institut du Monde Arabe à Paris, inauguré en 1987, dont la façade sud est dotée de moucharabiehs munis de diaphragmes réglables d'une manière automatique en fonction de l'intensité du rayonnement solaire (Figure I-30) ;
- Massimiliano Fuksas avec plusieurs projets conçus par les concepts de transparence, légèreté et transition, tels que le Centre de Recherches en Italie construit en 2004.



Figure I-29 : Hôtel de ville de Londres réalisé 2002, conçu par Norman Foster.

(Source : www.google.com)



Figure I-30 : Institut du monde arabe, Paris, France, 1987, Jean Nouvel.

(Source : www.google.com)

I- 7.2.2.6 Le mur-rideau de verre à Alger

Au cours de ces dernières années, les bâtiments en verre se sont rapidement répandus en Algérie, en général, et à Alger, en particulier. Ces derniers sont intégrés soit dans des quartiers urbains compacts, soit à la périphérie de la ville dans des configurations éparses (Figure I-31). Les bureaux d'études architecturales ont défendu l'utilisation de ce matériau en affirmant ses avantages psychologiques tels que la lumière du jour, la vue, et les gains en énergie. Toutefois, de nombreux problèmes environnementaux ont accompagné cet usage excessif du verre en affectant la santé publique et l'économie d'énergie. Plusieurs travaux de recherche comme ceux de Lam et al. (2015), Lartigue et al. (2014), Mehaoued et Bensalem (2011), Chabane et Bensalem (2006), suggèrent une utilisation rationnelle du verre et un choix responsable de ses propriétés. Malheureusement, ce n'est pas le cas à Alger où l'on constate sa prolifération dans le paysage urbain de la ville à travers plusieurs projets de construction depuis les années 1990.

Configurations urbaines éparées	Configurations urbaines compactes
	
Ministère des Finances à Ben Aknoun, Alger	Immeuble de bureaux à Kouba, Alger
	
Siège de la SONATRACH à Hydra, Alger	Hôtel à Ben Aknoun, Alger
	
Tours d'OPGI à Bab-Ezzouar, Alger	Hôtel à Kouba, Alger

Figure I-31 : Quelques bâtiments en verre réfléchissant à Alger.

(Source : www.google.com)

I- 8. Conclusion

Etant donné que la consommation mondiale est en constante évolution, les spécialistes prédisent l'épuisement des ressources fossiles, ce qui impose de se tourner vers d'autres solutions durables telles que l'exploitation des énergies renouvelables. L'Algérie, pays en voie de développement, étant touchée directement par ce problème, s'est elle aussi intéressée à leur développement. En effet, depuis la crise pétrolière de 1973, et à l'instar des autres pays dans le monde, l'Algérie a pris conscience du caractère vital de cette matière, bien qu'elle soit un pays producteur de pétrole, vu la nécessité de lutter contre le gaspillage et de développer d'autres ressources afin de répondre aux besoins toujours croissants. Depuis,

on assiste à un regain d'intérêt sans précédent pour les énergies renouvelables qui se traduit par d'importants efforts de recherche et de développement.

L'état est arrivé en 1998 à promulguer la loi de la maîtrise de l'énergie. Cette loi, avec des surcoûts raisonnables devrait aboutir à l'objectif de promotion des constructions économes en énergie, pour les bâtiments équipés d'installations de chauffage et de climatisation, ainsi qu'à celui de l'amélioration de la qualité thermique des bâtiments non équipés, assurant ainsi un confort naturel minimal et optimisant les consommations énergétiques possibles dans le futur. Ce projet de réglementation technique en Algérie et dans les pays du Maghreb est soutenu par la Commission Européenne. Il a des effets à moyen et à long termes et consistent en:

- La préservation des ressources énergétiques conventionnelles ;
- la réduction des coûts d'investissements énergétiques, notamment de chauffage et climatisation ;
- la réduction de l'impact des énergies fossiles sur l'environnement ;
- et enfin la promotion des énergies nouvelles et renouvelables.

II - Le microclimat urbain et ses interactions avec le bâti

Introduction

Nous commencerons ce chapitre par une explication du climat et de ses caractéristiques à différentes échelles, suivie d'une description des paramètres influents sur le microclimat. Les différentes valeurs climatiques et une présentation des paramètres liés au microclimat y sont énoncées et expliquées afin d'arriver à la définition des différents éléments ayant des effets sur le climat de la ville.

Ce chapitre précise les différents phénomènes microclimatiques afin de mieux définir la problématique de notre recherche. Dans un premier temps, l'ensoleillement, source importante d'apport thermique qui participe à la complexité de détermination des conditions microclimatiques en site urbain, est abordé. L'hétérogénéité des surfaces urbaines, ainsi que la grande variabilité de leur répartition géométrique, ont une grande influence sur le microclimat urbain. Une conception urbaine non adaptée à son contexte microclimatique entraîne souvent la modification des environnements physiques. L'étude des modifications physiques que connaissent les paramètres du climat, amène donc à rechercher les conséquences des effets globaux de l'urbanisation. La circulation d'air en milieu extérieur est étudiée ; elle peut être abordée à différentes échelles et elle devient complexe à l'échelle urbaine. Enfin, les études récentes du microclimat urbain nous permettent d'envisager la confrontation de nos résultats de simulation.

Dans ce chapitre, nous exposerons également la question de l'intégration des énergies renouvelables au cadre bâti dans un contexte urbain. Cette échelle urbaine d'implantation des énergies renouvelables est une préoccupation nouvelle.

I.1 Le climat et ses échelles

D'après Péchoin et Demay (1988), le climat représente l'ensemble des phénomènes météorologiques comme les températures, la pression atmosphérique, les vitesses des vents et les taux de précipitations, qui déterminent l'état moyen de l'atmosphère ainsi que son évolution en un lieu donné. Plus précisément, le climat est l'intégration dans le temps des états physiques de l'atmosphère, caractéristiques d'une certaine localisation géographique (Koenigsberger et al, 1973). Cette localisation est d'étendue variable selon l'échelle considérée, à chaque échelle correspond des facteurs qui affectent les différents éléments du climat. Ces facteurs sont plus nombreux à mesure que l'espace concerné est réduit et la définition du climat devient alors plus précise. Selon Escourrou, (1983), le climat d'un lieu dépend de sa position en latitude, de sa circulation atmosphérique générale (pôles et tropiques) et enfin des conditions de l'environnement et du site (relief, végétation, eau, ville...). Cette dépendance permet de définir les niveaux successifs suivants : climat global, climat régional, climat local et microclimat.

D'après Schreck chaque échelle de climat hérite des caractéristiques générales de l'échelle qui l'englobe (Tableau II-1).

Tableau II.1 : Facteurs environnementaux définissant les différentes échelles du climat.
(Source : Ali-Toudert, 2000, p. 30).

Echelle du climat	Facteurs affectant le climat
Climat global	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Latitude ▪ Altitude ▪ Relation à la mer
Climat régional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Latitude/Altitude ▪ Situation continentale ▪ Relation aux autres eaux ▪ Reliefs ▪ Relation aux régimes de vent majeurs (temps, côté sous le vent)
Climat local	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altitude relative ▪ Relation aux eaux ▪ Végétation ▪ Développement/ densité/ trafic
Microclimat	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Topographie ▪ Conditions des sols ▪ Type de végétation ▪ Forme des constructions ▪ Type des eaux

Le climat global et le climat régional relèvent de l'intérêt de la géographie ou de l'aménagement du territoire, car les espaces qu'ils couvrent sont importants et les données climatiques à ces échelles sont relativement sommaires. L'échelle locale couvre une étendue correspondant à un établissement urbain ou une ville. Ce territoire est de l'ordre d'une dizaine de kilomètres au plus horizontalement et une dizaine de mètres verticalement (Tableau II-2 et Figure II-1). Les variations dans le temps peuvent être journalières (Tapadinhas, 2012).

Tableau II-2: Caractères dimensionnels définissant les différentes échelles du climat d'après Markus et Morris, 1980. (Source : Ali Toudert, 2000, p. 31)

Echelle du climat	Caractères dimensionnels		
	Horizontal (km)	Vertical (km)	Temporel
Global	2000	3 à 10	1 à 6 mois
Régional	500 à 1000	1 à 10	1 à 6 mois
Local	1 à 10	0,01 à 0,1	24 heures
Microclimat	0,1	3×10^{-3} à 10×10^{-3}	1 à 24 heures

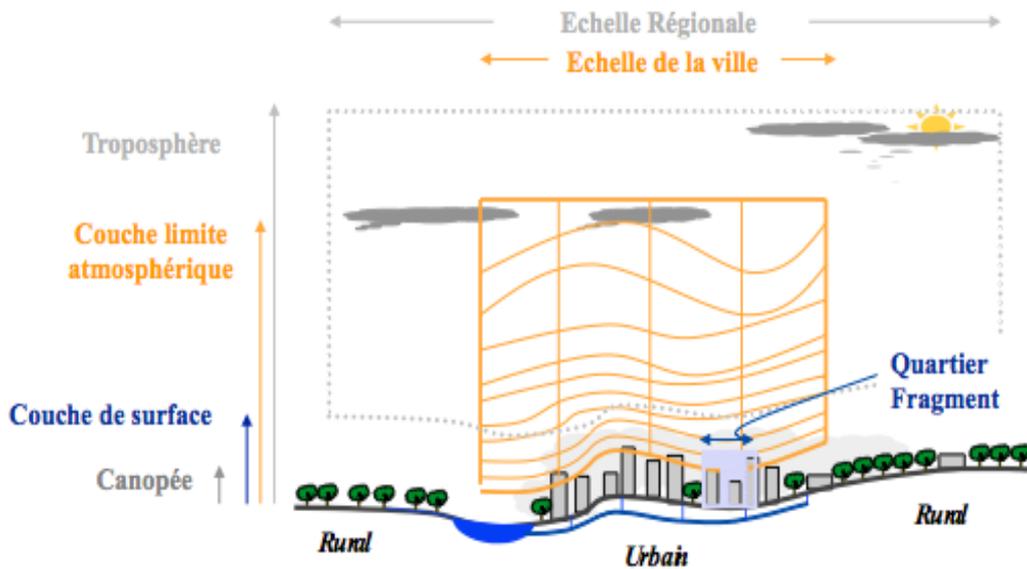


Figure II-1 : Etendue spatiale des différentes échelles du climat

(Source : Tapadinhas, 2012, p. 18)

La compréhension des différentes strates de l'atmosphère permet d'aboutir à deux différentes couches d'air. De la plus homogène, dans les hautes sphères, appelée couche limite atmosphérique (CLA) ou planétaire (CLP) à la moins homogène, au voisinage des constructions. Nous distinguons alors pour la deuxième variante, deux couches de mélanges qu'Oke (1987) avait réparties en fonction de l'état de stabilité qu'elles présentent. Il distingue la couche limite urbaine (CLU) et la canopée urbaine (CU). Les trois différentes couches sont présentées ci-dessous:

II.2 L'atmosphère et les différentes couches limites

D'après Guyot, l'atmosphère représente la couche gazeuse qui entoure la terre, elle est maintenue en place par le champ gravitationnel. Son épaisseur varie de temps à autre, plus grande en été qu'en hiver et varie en fonction de la latitude. La chaleur rayonnante du soleil cause l'expansion des gaz atmosphériques dans l'espace, et c'est l'interaction entre cette force cinétique et la force d'attraction de la terre qui détermine les limites de l'atmosphère (Guyot, 1999).

II.2.1 La couche limite atmosphérique (CLA) ou planétaire (CLP)

D'un point de vue dynamique, la couche limite atmosphérique (*Planetary Boundary Layer-PBL*) est la zone de l'atmosphère au voisinage du sol dans laquelle se répercute directement par rugosité l'adhérence au sol de l'écoulement (Figure II-2). D'un point de vue thermique, c'est la zone de l'atmosphère au voisinage de la surface terrestre dans laquelle, la variation diurne du rayonnement solaire est directement perceptible. La hauteur de la couche limite atmosphérique, qui varie en permanence dans le temps et dans l'espace, est comprise en moyenne entre 1 et 2 km pendant le jour, à 100 m au moins la nuit

(Boucheriba, 2005). Cependant, l'atmosphère au-dessus de la ville est loin d'être homogène. Dans la couche limite générée, on distingue deux parties; la couche limite urbaine (CLU) et la canopée urbaine (CU) :

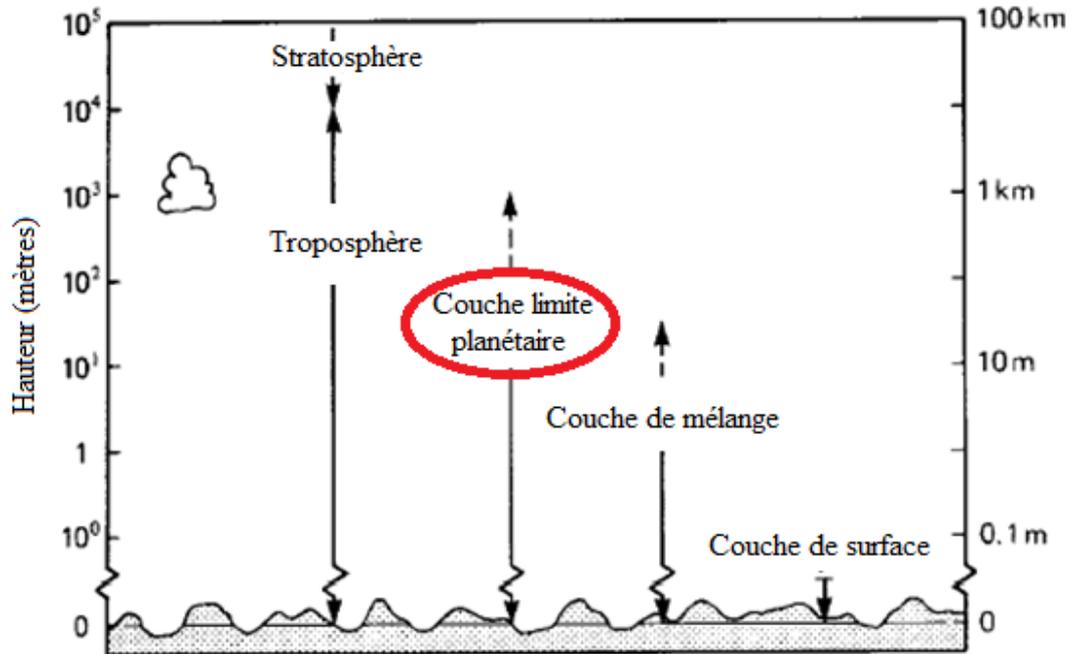


Figure II-2 : Situation de la couche limite planétaire par rapport à la basse atmosphère d'après Oke 1999. (Source : Boucheriba, 2005, p. 53).

II- 1.1.1. La couche limite urbaine (CLU)

La couche limite urbaine (*Urban Boundary Layer-UBL*) est un cas particulier de la couche limite atmosphérique. Ce qui la différencie nettement de la CLA est l'existence au-dessus des villes d'un îlot de chaleur. Donc, l'ensemble de la structure de l'atmosphère urbaine apparaît comme un large dôme courbé sur l'ensemble de la masse urbaine. Cette masse est appelée « couche limite urbaine » dont les caractéristiques sont régies par la nature de la surface urbaine générale (Figure II-3-a), (Glockner, 2000). Elle correspond à une couche de mélange distribuée à l'échelle d'un groupement de parcelles. Dans un centre urbain moyen, elle est voisine de 400 mètres de hauteur avec une base limitée à la hauteur moyenne des toits (Delaunay, 1986). D'un point de vue morphologique, nous pouvons associer cette couche limite à l'échelle du tissu urbain. Elle englobe la structure générale du tissu, son mode d'agencement ainsi que la distribution et l'orientation de ses mailles. Elle couvre un quartier ou une portion de ville ou tout un ensemble de bâtiments liés ou épars formant un corpus significatif.

Les modifications climatiques relatives à la CLU sont enregistrées à une échelle mésoclimatique (globale). Cette échelle s'étend sur une partie de la ville, d'une agglomération, d'une vallée ou d'une forêt et correspond à une couche d'air peu perturbée au dessus des toits. Les variations climatiques

pouvant être enregistrées à ce niveau dépendent de la structure générale de la portion urbaine couverte, et de ses propriétés physiques qui modifient la composition générale du climat, entraînant une instabilité partielle de la masse d'air (Ringebach, 2003). Cette dernière subit des effets de contact avec les surfaces de toits et de terrasses, mais sa structure ne se modifie que de façon globale, d'où cette apparence générale peu perturbée. En effet, quelle que soit la nature des surfaces en contact, les variations physiques sont globalement identiques en tout point de la zone urbaine considérée, elles ne varient qu'en fonction des changements de typologie urbaine.

II- 1.1.2. La canopée urbaine (CU)

La canopée urbaine (*Urban Canopy Layer-UCL*) correspond à une couche d'air définie à l'échelle de l'espace urbain ou du bâtiment construit à proximité. Disposée sous la couche limite urbaine, elle est assimilée à une masse d'air se propageant entre les constructions et les aménagements urbains (Figure II-3). Elle est souvent de nature très perturbée en raison des mouvements turbulents et des changements climatiques brutaux, dus aux interactions physiques entre les paramètres climatiques et les composantes urbaines. Les variations climatiques qui s'y produisent perturbent l'équilibre thermique et favorisent les processus radiatifs au sol (Glockner, 2000).

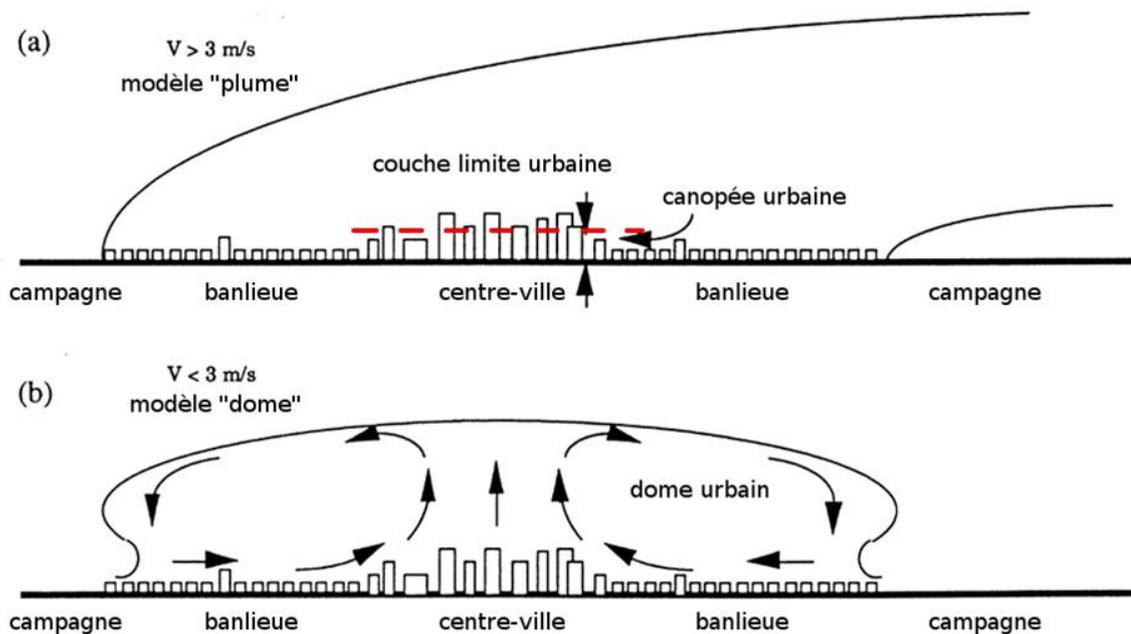


Figure II-3: Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs et inférieurs à 3 m/s d'après Mestayer et Anquetin, 1995 (Source : Ringebach, 2003, p.9).

Dans le découpage classique des échelles climatiques, la canopée urbaine correspond à l'échelle microclimatique. Elle se dessine géographiquement à ras du sol et s'étend sur une zone urbaine peu vaste. Cette échelle fait référence à la parcelle bâtie, c'est-à-dire l'édifice ancré dans le site, intégrant des espaces ouverts (cours, jardins, fond de parcelle...). Cette échelle constitue ainsi le support de nombreuses hétérogénéités physiques dues aux spécificités à la fois urbaines et environnementales.

II- 2. L'îlot de chaleur urbain

L'accélération du rythme de l'urbanisation dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle a ouvert à la climatologie un champ de recherche nouveau, celui des modifications climatiques induites par la ville. La climatologie urbaine s'insère dans les préoccupations de la climatologie locale, qui étudie la relation entre le climat et l'environnement et se différencie ainsi de la climatologie synoptique. La manifestation la plus évidente du climat urbain est l'existence d'un îlot de chaleur urbain-ICU (*Urban Heat Island-UHI*). Un ensemble urbain modifie profondément la structure des différentes couches atmosphériques tant d'un point de vue dynamique que d'un point de vue thermique. Ces facteurs déterminent alors un climat typique de l'environnement urbain où les températures montrent la plus évidente des altérations (de Hatten, 2002).

L'ICU étant ce phénomène microclimatique relatif aux zones urbanisées caractérisées par des températures estivales plus élevées que l'environnement immédiat, ces écarts de température peuvent aller de 2°C pour une ville de 1000 habitants à 12°C pour une mégapole de plusieurs millions d'habitants (écarts maxima estivaux) (Oke, 1988). L'îlot de chaleur urbain est ainsi défini comme l'écart de température entre une ville et la campagne environnante (Figure II-4). Ces écarts sont mesurés essentiellement la nuit, ce qui signifie que les tissus urbains emmagasinent de la chaleur durant la journée mais ne la libèrent que très peu durant la nuit contrairement aux zones rurales qui restituent rapidement leur stock d'énergie (Dubois, 2013).

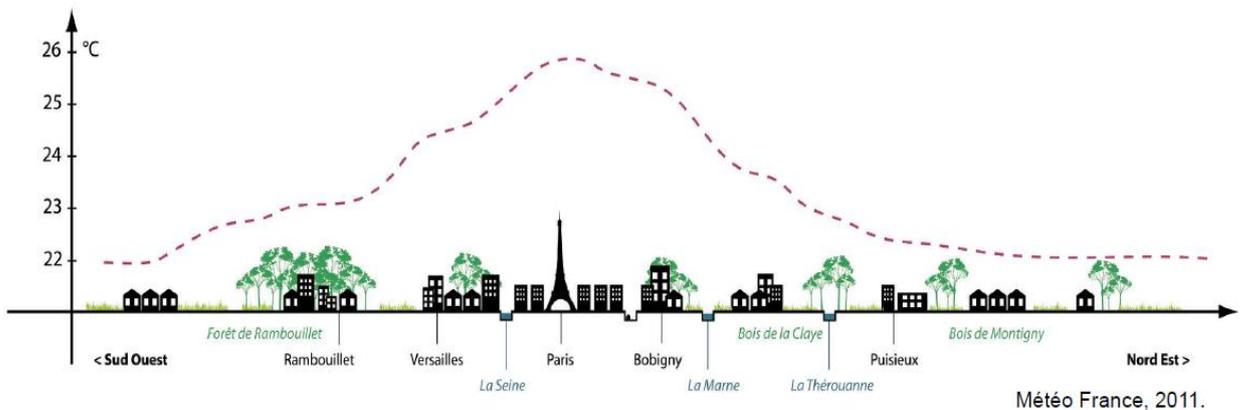


Figure II-4: Représentation d'un profil de température type d'îlot thermique observé à Paris par vents faibles et ciel clair. (Source: Dubois, 2013, p.12)

L'îlot de chaleur urbain n'affecte pas seulement la température de l'air à faible altitude, mais ses effets peuvent être ressentis jusqu'à 2 km au-dessus de la zone urbaine (Gartland, 2008). En effet, si la zone urbaine est suffisamment chaude, la remontée de l'air réchauffé en contact avec le sol pourrait conduire à une inversion thermique. L'inversion thermique se produit lorsqu'une masse d'air chaude se trouve, dans la couche limite atmosphérique, entre deux atmosphères plus fraîches. Ce phénomène est d'autant plus probable que le phénomène de l'îlot de chaleur est marqué (Djedjig, 2013). Par ailleurs, différents types d'îlots de chaleur urbains possédant chacun son échelle spatiale et temporelle, son mécanisme physique et sa méthode de mesure (Leconte, 2014) :

- L'ICU souterrain est le type d'ICU le moins étudié dans la littérature, il se définit par l'élévation de la température du sol urbain par conduction. Ainsi les températures du sous-sol urbain sont plus élevées que celles du sous-sol de la campagne environnante ;
- L'ICU de surface désigne la différence de températures des surfaces urbaines et rurales. La création de ce type d'ICU est liée aux propriétés des matériaux urbains et ruraux. En effet, les surfaces minérales urbaines, ont tendance à être plus chaudes que les surfaces végétales rurales ;
- Enfin, l'ICU atmosphérique concerne la température de l'air, il est possible de distinguer au sein de celui-ci l'ICU de couche limite urbaine et l'ICU de couche limite de canopée urbaine.

Le premier type d'ICU s'explique par la présence d'une masse d'air chaud au dessus des agglomérations. Lorsque le vent régional est faible, l'ICU de la couche limite urbaine (CLU) prend la forme d'un dôme d'air chaud situé au dessus de la zone urbaine. Sinon, lorsque le vent régional est plus important, cet ICU correspond au panache urbain qui s'étend à partir de la zone urbanisée vers les zones avoisinantes (Chapitre II § 2.1.1.2). Le second type d'ICU atmosphérique, l'ICU de couche limite de canopée urbaine (CU), correspond aux différences de température d'air observables au sein de la couche limite de canopée urbaine. Son amplitude s'exprime comme une différence de température d'air (Figure II-5). L'ensemble de ces différents types d'ICU interagissent entre eux via des phénomènes d'échanges de chaleur et de masse.

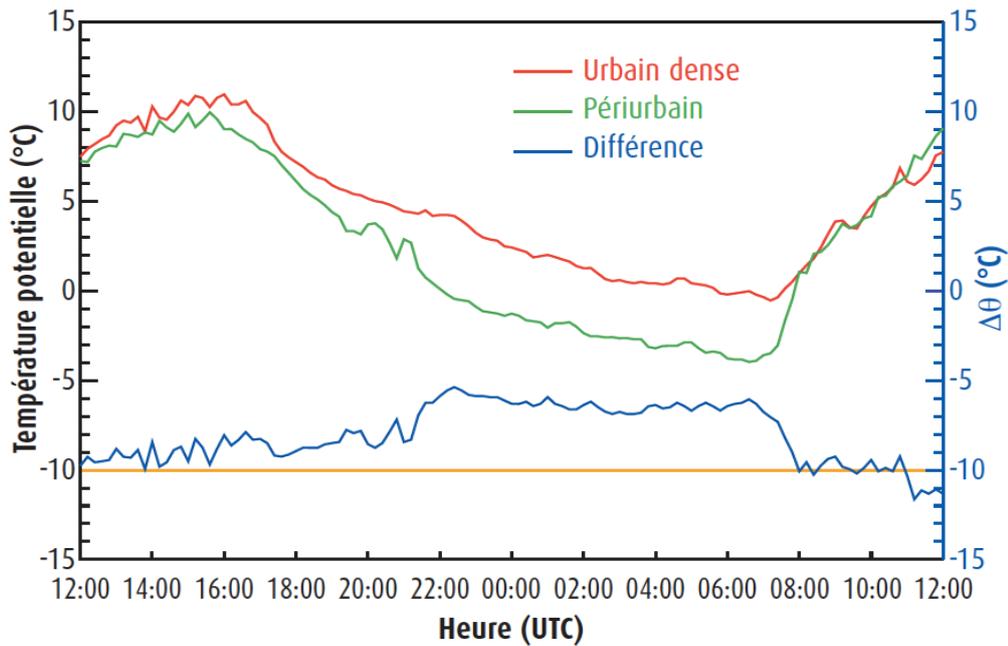


Figure II-5 : Évolution de la température en deux endroits de Toulouse, le 25 février 2005 d'après Pigeon et al., 2008, (Source : Bonhomme, 2013, p.49)

II- 2.1. Intensité d'ICU

L'intensité de l'ICU peut avoir de multiples explications : Dettwiller (1970) l'exprime par la différence entre la température maximale et la température minimale. Quant à Oke (1972) il l'a défini par la différence entre la température urbaine à un instant t et milieu rural avoisinant au même instant. Dans tous les cas, l'intensité de l'ICU est liée à la taille de la ville et sa morphologie. L'augmentation de l'intensité est particulièrement rapide juste après le coucher du soleil du fait des différences importantes entre gradients de refroidissement du rural et de l'urbain. Plus tard dans la nuit, les deux gradients vont s'harmoniser et l'intensité va décliner, et même après le lever du soleil, le voisinage rural se réchauffe plus rapidement que les zones urbaines faisant baisser l'intensité de l'îlot (Colombert, 2010). L'intensité de l'ICU est aussi fonction des paramètres météorologiques tels que la vitesse du vent, la couverture nuageuse et l'évapotranspiration. A titre d'exemple, l'augmentation de la vitesse du vent peut diminuer l'intensité de l'ICU, cette intensité change d'une année à l'autre, d'un jour à l'autre. Elle peut être deux fois plus grande en hiver qu'en été à cause de toute la chaleur dégagée par les immeubles chauffés. Il a aussi été observé à Tokyo, que l'intensité de l'ICU est réduite pendant les vacances et les week-ends. (Djedjig, 2013).

Pour pouvoir modifier l'îlot de chaleur, il faut d'abord appréhender les mécanismes qui l'engendrent. Ceci réintègre la considération du bilan radiatif et énergétique de la ville à savoir :

II- 2.2. Mécanismes d'apparition et d'atténuation de l'ICU

II- 2.2.1. Effet du stockage de chaleur sur l'îlot de chaleur (Q_{bat})

La forte minéralisation des espaces urbains est synonyme d'une part, d'une forte absorption du rayonnement solaire durant la journée par le bâti, amplifiée par les multiples réflexions du rayonnement, proportionnelles à l'importance des profils urbains. D'autre part, d'une réduction de l'irradiation de grande longueur d'onde durant la nuit. Par conséquent le refroidissement des bâtiments se fait très lentement, vu la faible vue du ciel des différentes surfaces urbaines, comparativement bien sur au milieu rural (Todhunter, 1990). La géométrie urbaine et la nature des matériaux de surfaces (couleur, texture, caractéristiques thermo-physiques...) sont des facteurs déterminants pour expliquer l'îlot de chaleur urbain à travers ces processus de stockage et de diffusion d'énergie.

Dans cette optique, Chatzimitriou et Yannas (2015) ont présenté une étude de microclimats dans six sites urbains tels que les parcs, les places et les cours comportant divers matériaux de revêtement au sol, dans la ville de Thessalonique, dans le nord de la Grèce. La figure II-6 comprend les matériaux de revêtement d'un parc avec fontaine, un des sites étudiés. Ses surfaces sont couvertes de gazon, d'eau qui coule, de marbre noir et de bitume.



Figure II-6 : Vues sur les matériaux de revêtement du site étudié: (a) gazon, (b) eau, (c) marbre noir et (d) asphalte
(Source : Chatzimitriou et Yannas, 2015, p. 12).

Les mesures ponctuelles de températures de surface ont été prises afin d'estimer l'effet des différents albédos¹ sur l'environnement. La figure II-7 montre les températures de surface des matériaux recouvrant le site. Les résultats montrent que les températures les plus basses sont celles des surfaces gazonnées, ce qui est attribué à la masse thermique élevée du sol, l'évaporation de l'humidité du sol et l'ombre fournie par la végétation.

¹ **Albédo** : (du latin « blancheur ») un terme qui a été introduit au 19^{ème} siècle par l'astronome américain George Philipps Bond (1825/1865) dans l'étude des planètes, et correspond au rapport du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement solaire reçu sans tenir compte de la surface réelle de l'objet. On l'utilise dans les études solaires pour caractériser la réflexion d'une surface. (Bozonnet, 2005, p. 45).

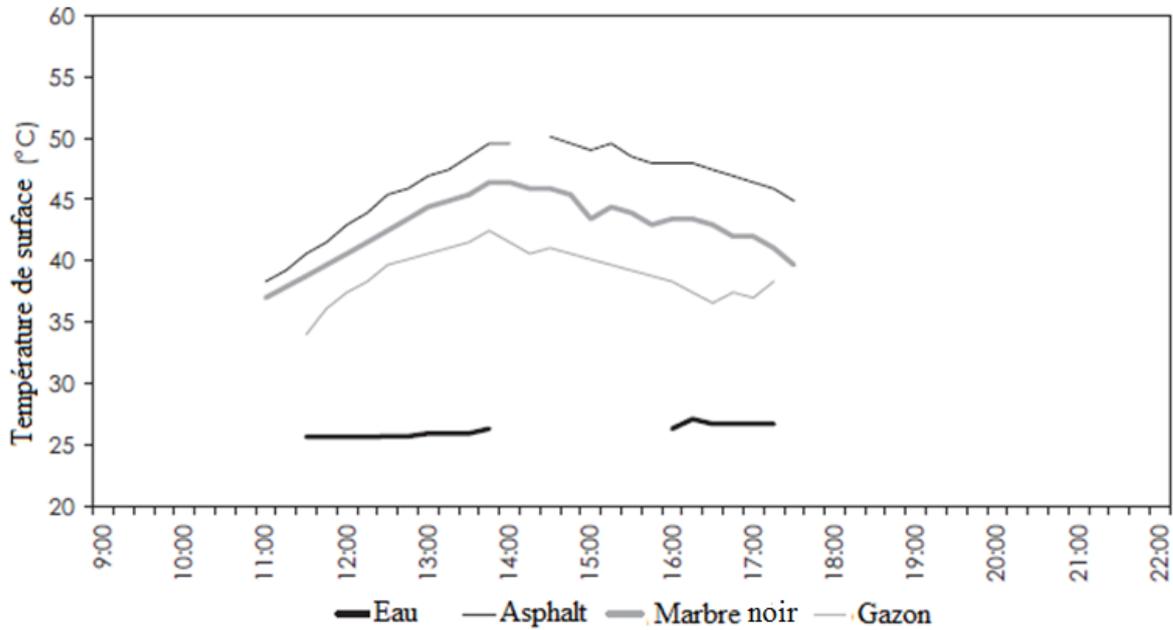


Figure II-7: Températures de surface des matériaux couvrant le site étudié.

(Source : Chatzimitriou et Yannas, 2015, p. 13).

L'asphalte, avec un albédo de 0.15, a toujours été la surface la plus chaude avec une température moyenne de surface de 46.2°C. Le marbre noir avec un albédo de 0,16, était moins chaud à 42.8°C, l'herbe était la moins chaude à 39.1°C et l'eau considérablement fraîche à 26.2°C. La température de l'eau reste stable et faible en permanence en raison de sa grande inertie thermique et de son flux continu à partir de la fontaine. Les températures les plus élevées sont enregistrées entre 14h et 16h lorsque l'écoulement d'eau est arrêté temporairement. La différence de température de surface des revêtements noirs (marbre et asphalte) est due à d'autres propriétés telles que la conductivité thermique et la capacité thermique. La capacité thermique volumique d'asphalte (2100 kJ/m³ K) est inférieure à celle du marbre (2800 kJ/m³K) et sa conductivité thermique (0,7 W/m k) est nettement inférieure à celle du marbre (3,5 W/m k). L'asphalte a également une émissivité inférieure à celle du marbre (0.90 et 0,95 respectivement) et ces différences de propriétés expliquent les différences des températures de surface. Ce phénomène de stockage peut être contrôlé particulièrement par la densité urbaine.

En effet, l'augmentation des températures est proportionnelle à la densité horizontale d'occupation du bâti au sol ; les conséquences d'un aménagement dense sur le bilan énergétique sont plus importantes au-dessus des tissus urbains denses qu'au-dessus des tissus urbains lâches et campagnes environnantes. Des campagnes de mesures de la température de l'air ont recensé des influences microclimatiques variées en passant d'un quartier dense à un quartier épars dans la ville. Des variations de températures allant de 1°C à 4°C d'un lieu à l'autre, selon le type d'habitat, ont pu être enregistrées (Hamel et Mazouz, 2005).

Quelque soit le moment d'une journée entière, l'accumulation thermique se fait mieux au-dessus d'un centre urbain dense qu'au dessus d'une banlieue étendue. La densité des profils urbains agit sur la chaleur stockée dans les bâtiments, et par conséquent sur le bilan thermique global. Ces aspects sont déterminés principalement à l'échelle de la composition urbaine par rapport à des impératifs de contrôle climatique.

II- 2.2.2. Impact de l'énergie anthropique sur l'îlot de chaleur urbain (Q_a)

La chaleur anthropique à l'échelle urbaine représente toute chaleur émise par les véhicules, les bâtiments et les industries, ainsi qu'au métabolisme humain. Généralement, sur une ville, cette production de chaleur anthropique est inférieure à 100 W/m^2 , mais elle peut varier de manière significative selon la densité urbaine et avoir des valeurs beaucoup plus élevées. Ce paramètre peut engendrer une modification de l'écart de température dû à l'ICU de l'ordre de 1°C , cette influence devient plus ample pendant l'hiver ou le soir vu la diminution de la durée et de l'intensité d'ensoleillement (Bozonnet, 2005). En effet, les transferts de chaleur, de l'intérieur vers l'extérieur d'un bâtiment, induits par le chauffage en hiver, favorisent l'accroissement de la chaleur sensible des ambiances extérieures et participent ainsi à l'effet de l'ICU (Adolph, 2005). Ces transferts occasionnent, généralement, une situation d'inconfort thermique. En été, la production anthropique peut donc avoir des valeurs négligeables vu l'ensoleillement en journée qui est l'un des paramètres essentiels d'apparition d'ICU.

Ce surplus d'énergie des activités urbaines peut être modifié par une meilleure conception géométrique du tissu urbain. Il s'agit donc de déterminer les critères géométriques destinés à satisfaire les objectifs d'accès au soleil et à la ventilation qui permettent de remplacer dans une large mesure les moyens actifs de chauffage, de climatisation et d'éclairage des espaces intérieurs. Comme il peut être également réduit en favorisant l'exploitation et la valorisation des énergies renouvelables (solaire, l'éolienne, la biomasse, etc.).

II- 2.2.3. Effets de l'eau et de la végétation sur l'îlot de chaleur urbain (QI)

Le changement d'état physique de l'eau par évaporation et l'évapotranspiration des plantes participent sensiblement à la diminution des températures de l'air ambiant, et par conséquent l'intensité d'îlot de chaleur. Ces éléments jouent un rôle particulier dans des espaces urbains fortement minéralisés, à la fois en terme de modération d'énergie solaire stockée dans les surfaces (horizontales et verticales), par la modification des échanges hygrothermiques et par la modification de l'imperméabilisation du substrat, avec des impacts sur l'humidité, l'îlot de chaleur, comme sur le confinement et la dilution des

polluants (Adolphe, 2005). Les dispositifs liés à l'eau et aux aménagements végétaux sont largement présents en ville sous de multiples formes.

Les interactions eau-végétation-ville visent avant tout à démontrer la capacité d'action régulatrice de ces deux éléments naturels pour le microclimat urbain. A titre d'exemple, pour répondre à la problématique de l'ICU londonien, le projet du "Jubilee Park" est réalisé en 2012 (Figure II-8). Il est implanté par-dessus la ligne du métro "Jubilee Line underground station and Jubilee Place Retail Mall". Le toit de la station de métro est aménagé par un écran végétal et une cascade d'eau qui participent à l'affaiblissement de l'îlot de chaleur du quartier d'affaires londonien (Bosquet, 2014).



Figure II-8 : Vue aérienne sur le "Jubilee Park", (Source: Bosquet, 2014).

L'eau se caractérise par une très grande capacité thermique² qui la rend peu sensible aux variations des températures ambiantes, d'où son influence considérable sur le climat et le microclimat. Des techniques de micronisation (pulvérisation de gouttelettes d'eau de l'ordre du micromètre en suspension dans l'air) permettent de rafraîchir localement les températures de quelques degrés, l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est retirée des masses d'air. Ainsi, l'utilisation de fontaines couplées au flux d'air crée des îlots de fraîcheur urbains, mais aussi amplifie considérablement leurs effets rafraichissant dans les zones non exposées au vent. Une réduction des températures de l'air allant jusqu'à 6°C est obtenue par A. L. Martins et al. (2016) en prenant des mesures autour des plans d'eau et les comparent à un plan initial sans bassins d'eau à Toulouse.

² **Capacité thermique** : est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. (Source: www.techno-science.net).

La végétation, quant à elle, contribue à l'établissement du microclimat en milieu naturel comme en milieu urbain voir, de même qu'elle participe dans l'amélioration du confort thermique des espaces extérieurs et intérieurs, et réduit par conséquence, les consommations d'énergie dues au refroidissement (climatisation) actif. D'après Vinet (2000), la qualité architecturale et paysagère de la ville peut être reliée à la disposition de ses arbres qui apportent le volume et la verticalité complémentaire à l'horizontalité des voies. En effet, les végétaux même sans feuilles peuvent constituer des volumes comparables aux structures architecturales, et la diversité des formes permet de sculpter l'espace urbain (Vinet, 2000).

La contribution importante de la végétation pour baisser les températures en ville est évidente, si on prend en compte qu'un arbre qui transpire 450 litres d'eau a un effet de rafraîchissement égal à celui de cinq climatiseurs qui fonctionnent au total 20 heures par jour (Johnston et Newton, 2004). L'apport de la végétation en milieu urbain est multiple (Figure II-9), elle contribue à l'établissement du microclimat et du confort des piétons comme le citent Ali-Toudert et Mayer (2005). Ces derniers notent que l'implantation de rangées d'arbres contribue considérablement à l'amélioration du confort thermique extérieur, notamment dans les canyons urbains. L'ombrage est l'apport principal de la végétation en ville. Il mène à l'atténuation du stress thermique³ d'été, plutôt que l'évapotranspiration. Cette dernière est faible en raison de la quantité d'eau peu importante d'eau dans le sol des régions à climats chauds et secs. Ce qui fait que pour bénéficier de cette propriété, l'irrigation doit être fournie.

Les auteurs notent également que les arbres sont des outils d'aménagement précieux. Ainsi, à l'échelle urbaine, il peut y avoir continuité entre le végétal et le bâti dans la composition d'ensemble. Toutefois, les dimensions des arbres sont des paramètres importants à contrôler aussi bien en tant qu'impact sur l'occupation d'espace que sur l'ombre générée par ceux-ci. De ce fait, il est nécessaire de prendre en considération ce point lorsque l'on souhaite intégrer des arbres en espace urbain.

³ **Stress thermique** : Le stress thermique est une accumulation de chaleur dans l'organisme l'empêchant de maintenir une température corporelle normale. Le travail à des températures élevées constitue un risque pour la santé et la sécurité et peut mener à un coup de chaleur destructif (Source : <https://scfp.ca/le-stress-thermique>). Son indice : ITS (Index of Thermal stress : Indice de Stress thermique) suppose que dans la gamme de conditions dans lesquelles il est possible de maintenir l'équilibre thermique, de la sueur est sécrétée à une vitesse suffisante pour obtenir le refroidissement par évaporation (Ali-Toudert, 2005, p.42).



Figure II-9 : Les bienfaits du végétal en ville (Manusset, 2012, p.4).

Conséquemment, la température de l'air dans les parcs urbains est basse par rapport à son voisinage minéralisé, et dans ce cas certains auteurs emploient le terme "îlot de fraîcheur", et en allant du parc vers le centre des agglomérations, la température change de quelques dixièmes de degrés par hectomètre (Bouyer, 2009). En fonction de leurs aménagements, le potentiel rafraichissant des parcs urbains peut être très différencié. Un parc présentant une végétation dense et irriguée sera un îlot de fraîcheur diurne - grâce à l'évapotranspiration et aux ombres portées, cependant un parc présentant une végétation clairsemée sera un îlot de fraîcheur nocturne (Leconte, 2014). Ainsi, en étant planifiée de façon judicieuse, la végétation et les sources d'eau peuvent être utilisées pour atténuer quelques-uns des effets négatifs générés par le développement urbain et matérialisés par l'ICU.

L'influence de l'îlot de chaleur urbain dépasse les seules températures, son impact sur les autres éléments du climat est important et parfois spectaculaire (Dubois, 2013) :

- L'humidité relative dépendante de la chaleur décroît, la relation est donc inverse et le minimum d'humidité relative correspond au maximum d'ICU ;
- Précipitations : l'ICU entraîne la création de vents thermiques allant des parties froides vers les parties chaudes et agit sur l'importance des averses et des épisodes orageux ;
- Diminution des besoins de chauffage et augmentation des besoins de climatisation ;
- Augmentation des malaises, maladies et mortalité.

Enfin, les exigences liées au type du climat permettent de connaître lesquels de ces éléments ont plus d'impact et donc sont plus importants à considérer. A titre d'exemple, le stockage d'énergie est plus important pour des climats chauds d'où la nécessité d'intervenir en priorité sur les aspects qui permettent de réduire ce stockage d'énergie.

II- 3. Le bilan radiatif au-dessus d'une ville

La compréhension des processus d'échanges thermoradiatifs et leurs interactions passe par la décomposition de la forme urbaine complexe en composants basiques, le plus connu d'entre eux, est la rue canyon. Limitée par les bâtiments qui la bordent, représentés sous forme de parallélépipèdes (Doya, 2010), elle est devenue la géométrie typique des études relatives à l'îlot de chaleur urbain. La géométrie est décrite par le rapport d'aspect H/W entre la hauteur H des bâtiments et la largeur W (de l'anglais width) du fond du canyon (Figure II-10). C'est l'un des indicateurs le plus souvent utilisé pour décrire la géométrie d'un canyon (Patriarche, 2014). La valeur du ratio H/W est utilisée pour la classification des rues canyons (Vardoulakis et al., 2003) :

- Canyon régulier - ratio = 1 ;
- Avenue canyon - ratio < 0.5 ;
- Canyon profond - ratio ~2 ;

Le facteur de vue du ciel noté SVF (Sky View Factor) correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée selon une projection stéréographique. Cet indicateur est également souvent utilisé pour décrire les canyons urbains (Patriarche, 2014). Il s'agit d'une valeur sans unité

variant de 0 (vue du ciel totalement obstruée) à 1 (vue du ciel totalement dégagée). En l'absence d'obstruction, une surface plane verticale possède un SVF de 0,5, une surface plane horizontale possède un SVF de 1 (Figure II-11). Plus la ville est dense, plus le facteur de vue du ciel est faible, et plus l'ensoleillement est réduit (Adolphe et al., 2002). Il est calculé par l'équation II-1, de telle sorte que α est l'angle vertical déterminé par un obstacle à l'angle azimut π (Ali-Toudert et al., 2006).

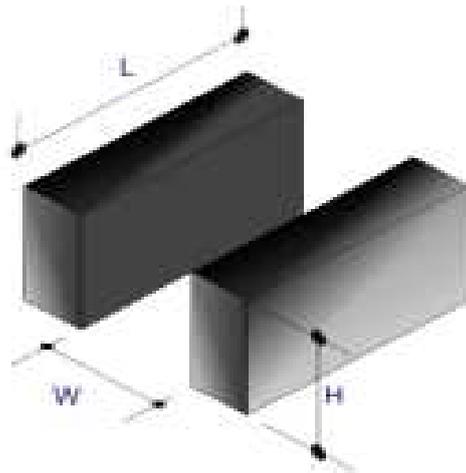
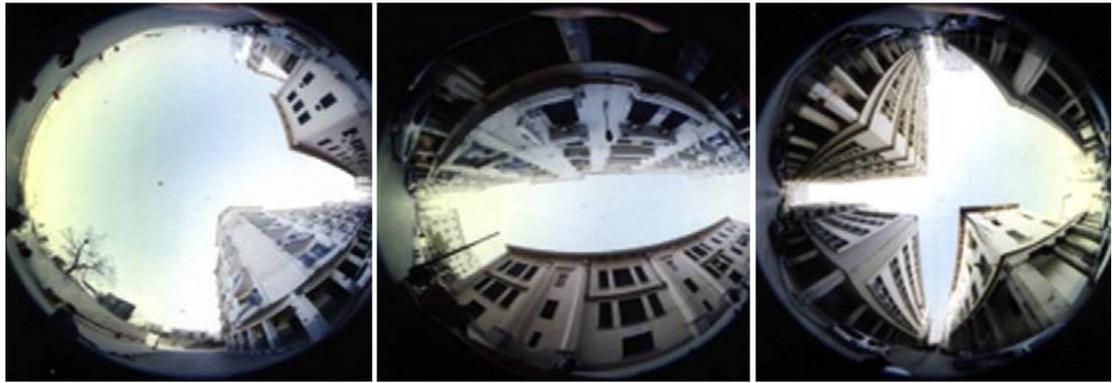


Figure II-10 : Schéma représentant une rue canyon.

(Source Ringenbach, 2004, p. 9)

$$SVF = \frac{1}{360} \sum_{\alpha=0}^{360} \cos \alpha (\pi)$$

II – 1



SVF= 0.58

SVF= 0.12

SVF=0.21

Figure II-11 : Photographies fisheye de différentes rues à Constantine pour le calcul des facteurs de vue du ciel (Source : Bourbia et Boucheriba., 2010).

En étudiant trente villes de moyenne latitude, Oke (1988) montre une relation proportionnelle entre l'intensité (I_n) maximale de l'îlot de chaleur urbain ($\Delta T_{u-r(max)}$) et le prospect H/W du canyon urbain dans le centre-ville (Figure II-12). Cette relation est décrite par l'équation II-2 ci-dessous (Oke, 1988).

$\Delta T_{u-r(max)} = 7,54 + 3,97 \ln(H/W)$	II-2
--	------

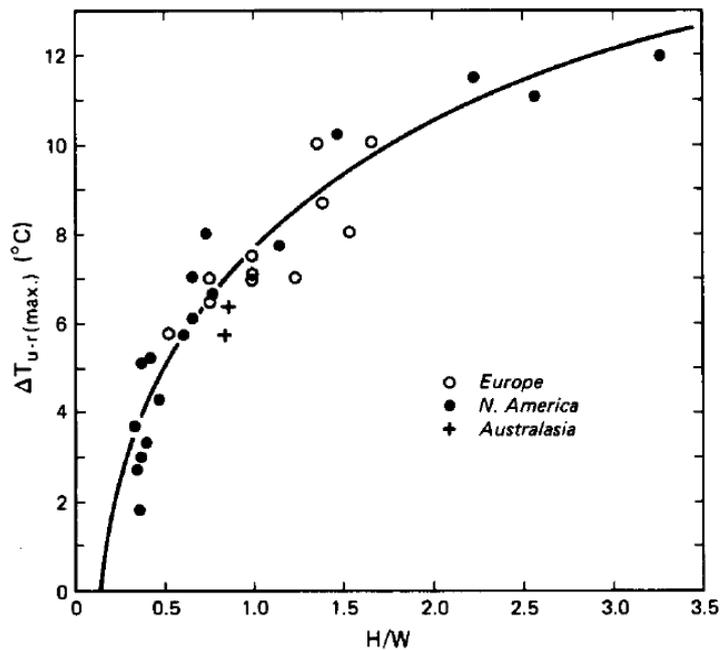


Figure II-12 : Relation entre la géométrie du canyon urbain H/W et l'intensité maximale de l'ICU chaleur ($\Delta T_{u-r(max)}$), (Source : Oke, 1988, p.7). u : urbain, r : rural.

Eliasson (1990) a également mis en avant pour cinquante huit rues canyons de Göteborg (Suède) le fait que le facteur de vue du ciel (SVF) est un indicateur pertinent pour qualifier l'effet de l'urbanisation

sur l'intensité de l'îlot de chaleur. Cette dernière a ainsi tendance à croître, plus ou moins fortement, avec la diminution du facteur de vue du ciel (Figure II-13).

Ces deux indicateurs de la géométrie urbaine (ratio H/W et SVF) sont cités plusieurs fois dans nos références, nous les utiliserons pour notre recherche afin de décrire nos résultats.

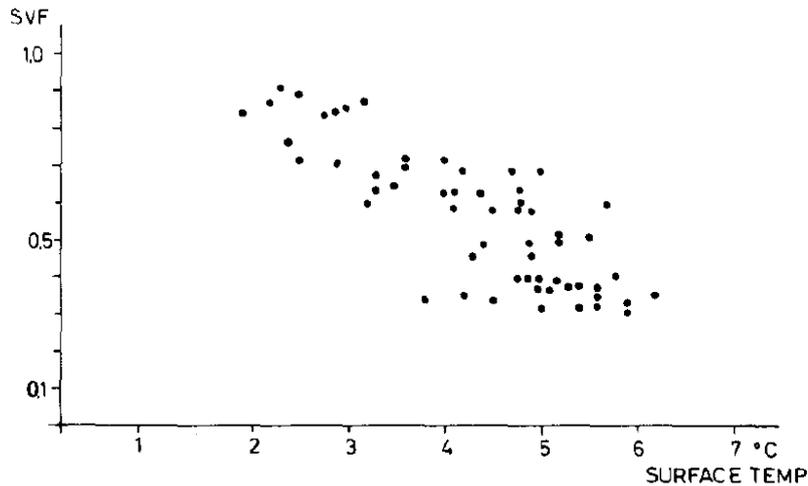


Figure II-13 : Relation entre le facteur de vue du ciel (SVF) pour 58 rues canyon de Göteborg (Suède) et la température de surface (Source : Eliasson, 1990, p.3).

II- 3.1. Le rayonnement solaire global

La Terre ne reçoit qu'une toute petite partie du rayonnement émis par le soleil, ce qui fait quand même 178 milliards de MW (mégawatts ou million de watts) en permanence sur l'hémisphère éclairée. La nature de ce rayonnement est électromagnétique. Sa particularité tient au fait que l'essentiel du rayonnement est composé de lumière visible (Figure II-14) de longueur d'onde de 0,38 à 0,78 μm , de rayonnement infrarouge $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ et de rayonnement ultraviolet $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$, (Dessus et Pharabod, 2002).

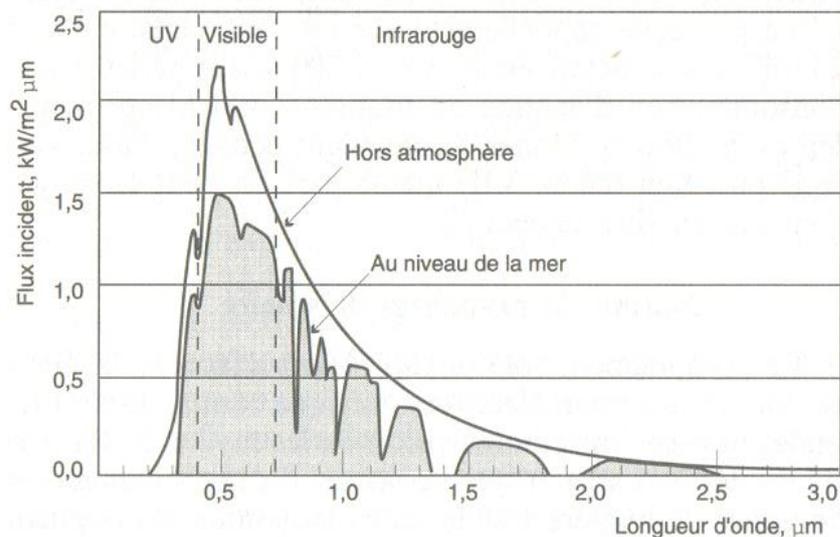


Figure II-14 : Distribution spectrale de l'énergie solaire.
(Source : Dessus et Pharabod, 2002, p. 16).

Ce rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère est en partie transmis, réfléchi et absorbé par celle-ci et par les nuages. La plus grande partie du rayonnement qui atteint le sol y est absorbée, mais une petite partie est réfléchie vers l'atmosphère. Cette réflexion dépend de la nature du sol (eau, terre, villes, forêt, neige). En effet, dans les villes, la disposition et les types d'aménagements bâtis permettent de piéger le rayonnement global, et entraînent l'affaiblissement ou l'accroissement du rayonnement, soit par les mécanismes d'absorption, soit par des mécanismes de réflexion par les façades ou par toute autre composante de l'espace, selon les caractéristiques et les propriétés thermiques des surfaces présentes (Figure II-15), (Adolphe et al., 2002).

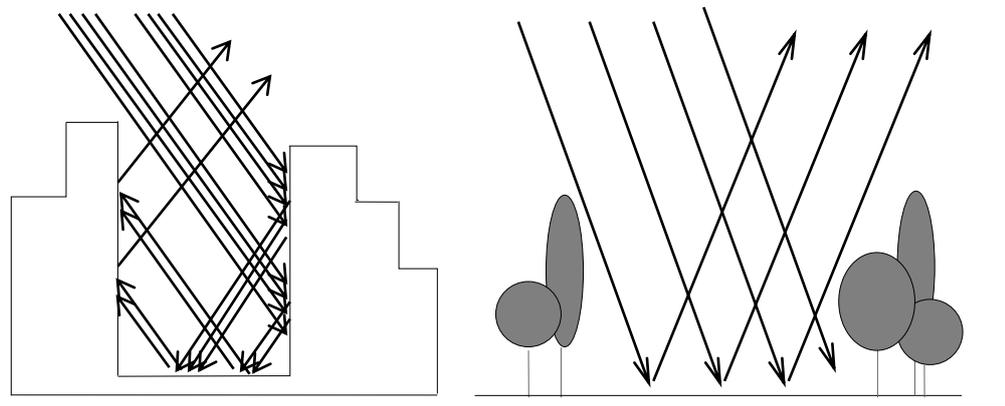


Figure II-15 : Le piégeage et les multiréflexions du rayonnement solaire d'après CSTB, 1996.

(Source : Adolphe et al., 2002, p. A 1.19).

Bien que les atténuations atmosphériques soient nombreuses, et malgré les modifications encore plus prononcées qu'elles rencontrent à proximité des bâtiments, une fois au sol, la quantité de l'énergie solaire est suffisamment importante pour réchauffer les basses couches. A ce niveau, il existe deux composantes du rayonnement solaire, distribuées selon des proportions variées : le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

II- 3.1.1. Le rayonnement direct

Hors atmosphère, le rayonnement solaire direct est un flux d'énergie quasi constant, dont la puissance est de $1\,367\text{ W/m}^2$ de surface exposée perpendiculairement à la direction du rayonnement incident (surface normale). Au sol, l'intensité du rayonnement direct dépend de l'affaiblissement que ce dernier subit lors de la traversée de l'atmosphère. Elle dépend également de l'épaisseur atmosphérique traversée, et donc de la hauteur du soleil (Patriarche, 2014). Ce rayonnement est plus intense en altitude (d'environ 7% par 1000 m) où l'air est plus sec et pur. A l'inverse, il est généralement affaibli de près de

20% en zone urbaine, ou même de 40% dans les grandes villes en bord de mer. Le rayonnement direct s'atténue fortement, ou même s'annule, en cas de passage nuageux (Givoni, 1978).

II- 3.1.2. Le rayonnement diffus

Provenant de toute la voûte céleste hors disque solaire, le rayonnement diffus est plus important dans les villes en raison de l'abondance des particules dans l'atmosphère urbaine, et le rayonnement direct décroît fortement. Il en résulte une diminution du rayonnement global de 15% en moyenne annuelle, le déficit pouvant atteindre 30% au centre des grandes agglomérations urbaines (et jusqu'à 50% pour le rayonnement ultraviolet en hiver). La diffusion, associée aux aérosols en suspension dans l'air, est plus forte lorsque l'angle d'incidence des rayons solaires est plus faible : l'effet est donc plus sensible en fin d'automne et en hiver. Le rayonnement global est la somme de ces deux composantes, voir figure II.14, (Merlin, 1996).

II-3.1.2. Le rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi provient de la réflexion sur l'environnement et par l'environnement des deux rayonnements direct et diffus. Sa valeur dépend de ces deux rayonnements et des propriétés réfléchives des particules. En moyenne, le rayonnement parvenu dans les basses limites de l'atmosphère par ciel clair, peut se distribuer de la façon suivante (Figure II-16), (Liébard et De Herde, 2005) :

- 32% du rayonnement est renvoyé vers l'espace par diffusion;
- 15% du rayonnement est absorbé par l'atmosphère;
- 53% du rayonnement arrive au sol, dont 6% est renvoyé par réflexion et les 47% restant sont absorbés par la surface du sol.

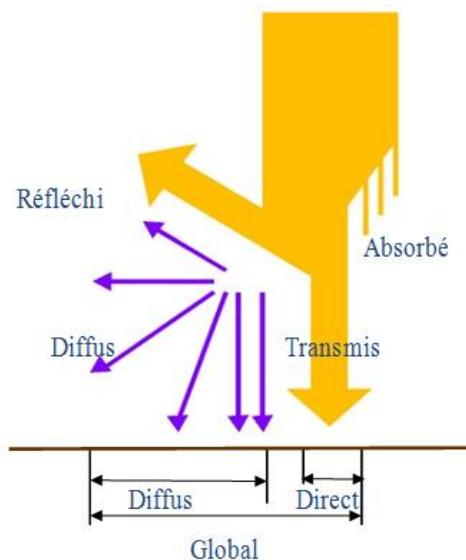


Figure II-16 : Composantes du rayonnement solaire global.

(Source : Liébard et De Herde, 2005, p. 13b).

II- 3.2. Le rayonnement solaire et le type de ciel

"Le rayonnement net correspond au rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde « capturé » (terme positif) ou « perdu » (terme négatif) par la surface étudiée. Il est le « résultat » du bilan radiatif" (Colombert, 2010). La figure II-17 montre un exemple de l'évolution du rayonnement net et de ses composantes, avec un ciel clair et un ciel couvert au cours d'un cycle de 24 heures. Par ciel couvert, en revanche, le rayonnement net (E^*) présente des modifications beaucoup plus importantes durant le jour en raison des variations du rayonnement global descendant E_g . Les valeurs matinales par ciel couvert sont plus faibles que les valeurs de l'après-midi. La surface terrestre étant en effet plus chaude l'après-midi, le rayonnement est alors plus élevé (Boussoulim, 2002).

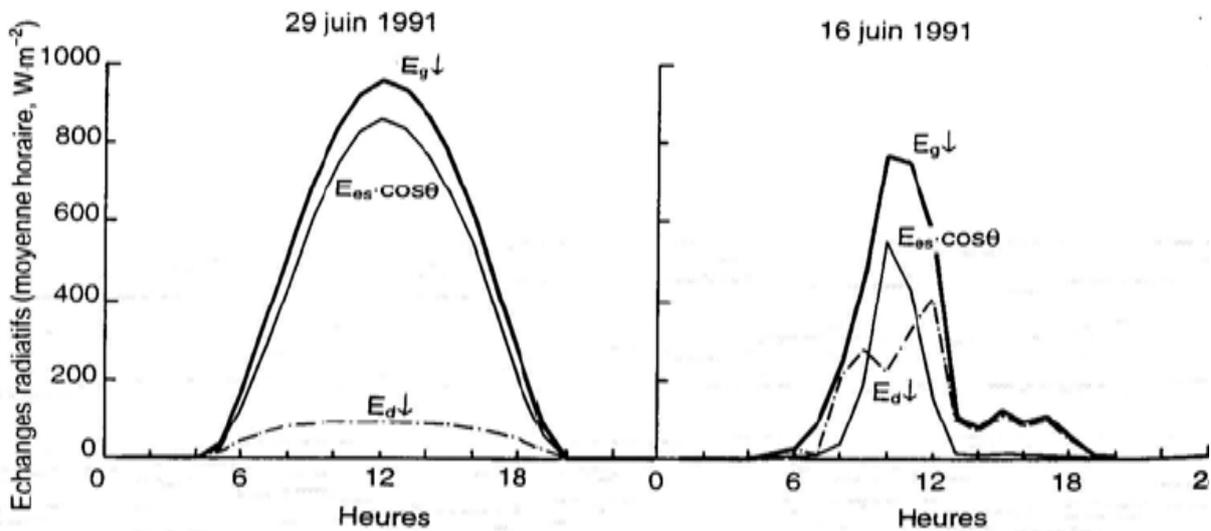


Figure II-17 : Evolution des différentes composantes du bilan radiatif au cours d'une période de 24 h Avignon-Montfavet avec un ciel clair et un ciel couvert d'après Guyot, 1997, (Source : Boussoulim, 2002, p. 24).

II- 3.3. Le rayonnement incident sur les bâtiments

Le flux solaire incident sur un objet à la surface terrestre est la combinaison de trois composantes (Figure II-18), (Chestné, 2013) :

- le flux direct transmis par l'atmosphère;
- le flux diffusé par l'atmosphère;
- le flux global transmis par l'atmosphère et réfléchi (de manière diffuse et isotrope) par les objets environnants (le sol, la végétation...).

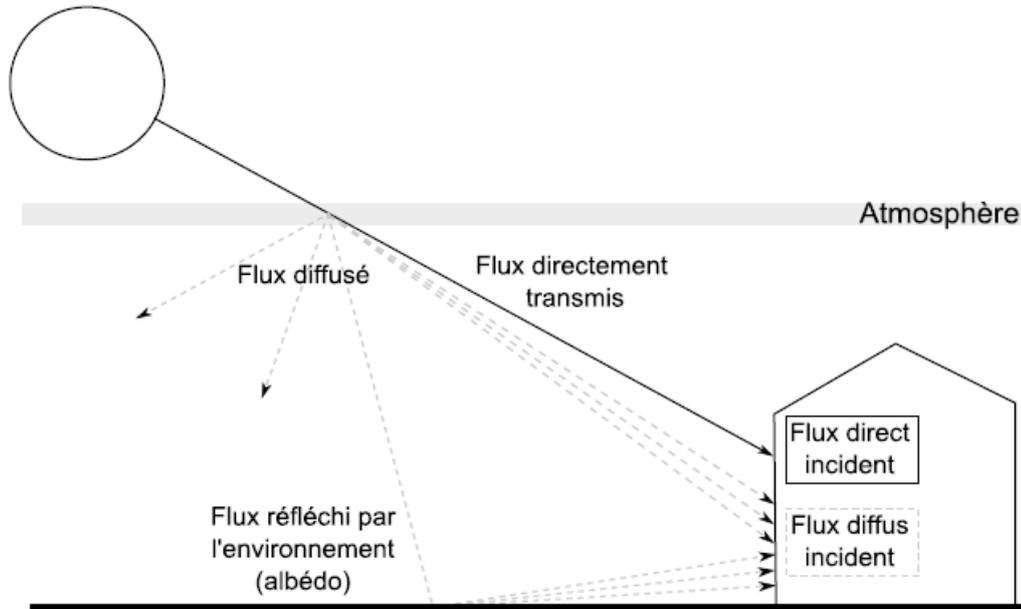


Figure II-18 : Flux directs et diffus au niveau de l'atmosphère et de la paroi.

(Source : Chestné, 2013, p.20)

II- 3.4. Le domaine de l'infrarouge et le bâtiment

Les températures des surfaces urbaines sont plus élevées que celles de l'environnement rural, ce qui conduit à une émission importante de rayonnement de grandes longueurs d'ondes. Cette énergie irradiée essentiellement dans le domaine infrarouge d'après la loi de Wien, est proportionnelle à la puissance 4 de sa température absolue, comme le montre la loi de Stefan-Boltzmann par l'équation II-3, (Ringebach, 2004) :

$$E = \varepsilon\sigma T^4$$

II-3

E- l'énergie émise par unité de surface ;

ε - l'émissivité ;

σ - la constante de Stefan-Boltzmann = $5,670367 \times 10^{-8} \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$;

T- la température en Kelvin.

II- 3.5. L'albédo des surfaces

L'albédo définit la fraction de flux renvoyée par la surface réceptrice dans toutes les directions, il est toujours compris entre 0 et 1 et varie suivant la longueur d'onde. Un albédo nul à une longueur d'onde donnée caractérise un corps qui absorbe parfaitement tout ce rayonnement. Une valeur de 1 caractérise un réflecteur parfait pour cette longueur d'onde (Lilensten, 2006).

A l'échelle de l'espace urbain, la réflexion dépend de la nature et de la géométrie des surfaces de captage. Par un apport de lumière supplémentaire, ces surfaces pourraient augmenter le taux d'éclairement énergétique déjà procuré dans l'espace par le rayonnement solaire direct. Dans des configurations de type rue canyon, l'albédo varie aussi, en fonction du rapport entre la largeur de la rue et la hauteur des façades (le prospect), (Santamouris et al., 2011).

En plus de dépendre des caractéristiques du matériau, l'albédo dépend principalement de la couleur. Il est d'autant plus important que les couleurs sont claires. Pour un sol recouvert de neige, il est de 80% (Penicaud, 1978). L'albédo varie également selon la quantité d'eau contenue dans le matériau, celle-ci absorbe le rayonnement solaire et diminue les pouvoirs de réflexion de la matière, un sable sec a une valeur d'albédo de 35%, alors qu'en étant humide sa valeur diminue jusqu'à 25% (Péguy, 1970). De plus, pour des surfaces très réfléchissantes (eau, neige, vitre, etc.), il varie selon l'angle d'incidence du rayonnement solaire : plus cet angle est élevé, plus les valeurs de l'albédo diminuent (Button et Pye, 1993). La figure II-20 montre les variations d'albédo d'un double vitrage réfléchissant d'une couleur bronze, selon l'angle d'incidence du rayonnement solaire. La valeur d'albédo atteint son maximum (albédo > 0.80) avec un angle d'incidence se situant entre 0° et 40°.

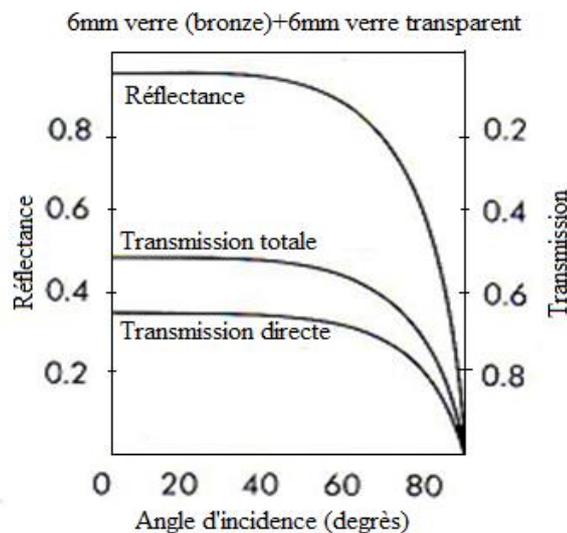


Figure II-20 : La réflectance et sa dépendance angulaire.

(Button et Pye, 1993, p. 157).

L'utilisation de matériaux à fort albédo réduit la quantité d'énergie solaire absorbée par une surface, et de ce fait sa température est réduite. Plus les températures de surface sont faibles, moins l'effet d'îlot de chaleur est important. Toutefois, les matériaux à fort albédo exposés à la lumière solaire, peuvent entraîner une brillance excessive, et de ce fait causer des contrastes dans la lumière réfléchie et induire des situations d'éblouissement extérieur (Olgyay, 2000). Face à cette situation, il convient de trouver la

bonne incidence de matériaux réellement opératoires en termes de couleur et texture, et ne causant aucun effet d'éblouissement.

La recherche intensive réalisée au cours de ces dernières années sur les mécanismes d'atténuation des ICU a conduit à la naissance de nouveaux matériaux appelés « matériaux froids » ou « cool materials ». C'est une technique qui contribue à la réalisation de l'efficacité énergétique dans les bâtiments en réduisant la demande d'énergie pour le refroidissement et l'amélioration du microclimat urbain en abaissant les températures de surface et de l'air (Georgakis et al., 2014), ces matériaux froids se caractérisent par une réflectance solaire RS^4 élevée et une haute émissivité infrarouge e^5 . Si la surface froide couvre l'enveloppe d'un bâtiment, il en résulterait une diminution de la chaleur pénétrant dans le bâtiment, ce qui contribuerait à diminuer la température de l'air ambiant et l'intensité de convection.

Une autre manière d'évaluer la façon dont un matériau est "froid", est de calculer son indice de réflectance solaire (IRS). Cet indice intègre à la fois la réflectance solaire et l'émissivité infrarouge en une seule valeur. L'IRS d'une surface plane chaude et opaque est obtenu par rapport à un corps noir standard (réflectance 5%, émissivité 90%) et une surface blanche (à un pouvoir réfléchissant de 80%, émissivité 90%). L'IRS a une valeur de zéro pour une surface noire standard et de 100 pour une surface blanche standard, et il est calculé comme suit par l'équation II-4, (Santamouris et al., 2011) :

$$IRS = \left(\frac{T_{\text{noire}} + T_{\text{standard}}}{T_{\text{noire}} - T_{\text{blanche}}} \right) \cdot 100 \quad \text{II - 4}$$

Où T_{noire} , T_{blanche} et T_{standard} sont les températures à l'état d'équilibre des surfaces noires, blanche et matériau standard respectivement. A partir de la définition de l'IRS, il est prévu que des matériaux très chauds peuvent en fait avoir des valeurs négatives et que des matériaux très froids peuvent avoir des valeurs supérieures à 100. Ces matériaux peuvent être appliqués à l'échelle du bâtiment en façade et en toiture et à l'échelle urbaine, aux revêtements de routes, places de parking, parcs, etc.

Néanmoins, l'augmentation de la réflectance solaire peut occasionner des effets d'éblouissement et de sérieuses gênes visuelles par l'application de surfaces blanches. Pour cette raison, certains laboratoires comme LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) et GRBES (Group Building Environmental

⁴ **Réflectance solaire** : est la capacité d'un matériau de surface à réfléchir le rayonnement solaire et désigne le facteur de réflexion total d'une surface, en considérant le facteur de réflexion hémisphérique de rayonnement intégré dans le spectre solaire, y compris la réflexion spéculaire et diffuse. Elle est mesurée sur une échelle de 0 à 1 (ou 0 à 100%).

⁵ **L'émissivité infrarouge** : est la capacité d'une surface à libérer la chaleur absorbée. Elle précise comment une surface rayonne de l'énergie d'elle-même comparativement à un corps noir subissant la même température. Elle est mesurée sur une échelle allant de 0 à 1.

Studies, de l'Université d'Athènes) ont développé des matériaux froids noirs ou colorés qui absorbent en partie le rayonnement visible du spectre solaire afin d'être sombre en apparence, mais présentent une grande réflexion dans la partie proche infrarouge du spectre solaire (Doya et al., 2012).

II- 3.6. Les températures de surface

A l'échelle du tissu urbain, ces températures dépendent de (s), (Scudo et Elsa, 2001) :

- l'intensité du rayonnement incident ;
- la forme générale (ratio H/L) et l'orientation de la façade du bâtiment ;
- propriétés physiques des surfaces (albédo, émissivité, rétention en eau, etc.) ;
- la conductivité et l'inertie thermiques de la masse solide derrière la surface exposée ;
- échanges convectifs avec l'air, et donc de la vitesse, de la température et du degré de turbulence de l'air, de la forme ainsi que de la rugosité de la surface exposée.

Le Tableau II-3 donne quelques variations des températures de surfaces de différents milieux en fonction de leur albédo. Ce tableau indique que des surfaces très réfléchissantes n'induisent pas forcément de plus faibles températures de surfaces. Il indique aussi que les plus fortes températures de surfaces sont localisées dans les centres urbains denses.

Tableau II-3 : Variation de l'albédo et de la température de surface de quelques milieux choisis dans l'agglomération parisienne. (Source : Escourrou, 1991, p. 52)

Milieux	Albédo	Température de surface
Forêt et feuillus	0.168	13.5°C
Herbe	0.235	22.5°C
Urbain dense	0.159	23°C
Urbain grand ensemble dense	0.194	21.5°C
Urbain collectif bas	0.185	19.5°C
Urbain pavillonnaire	0.185	20.5°C

II- 3.6.1. Les effets de dièdre

A l'échelle de l'interface du bâti et son environnement le plus proche, les écarts entre les températures de surface permettent des échanges de chaleur entre deux surfaces adjacents. Ces échanges interviennent grandement et jouent un rôle primordial dans le réchauffement de l'air. Différents cas peuvent être rencontrés : effet de dièdre ou de double dièdre (Lehtihet et Izard, 2002).

Cependant, les conséquences de l'effet de dièdre pour l'utilisateur se traduisent par la combinaison de deux champs radiatifs distincts : un champ de rayonnement solaire et un champ de rayonnement thermique, tous deux absorbés et réfléchis par la paroi verticale et la paroi horizontale. Les températures des surfaces augmentent au fur et à mesure que l'individu s'approche de l'arrête du dièdre. En parallèle, les échanges convectifs avec l'air élèvent la température ambiante. Ces échanges dépendent de la quantité de rayonnement, mais aussi des propriétés d'émission, d'absorption et de réflexion de la paroi, ainsi que des répartitions spatiales entre les zones ensoleillées et les zones ombrées (Figure II-21), (Izard, 2000).

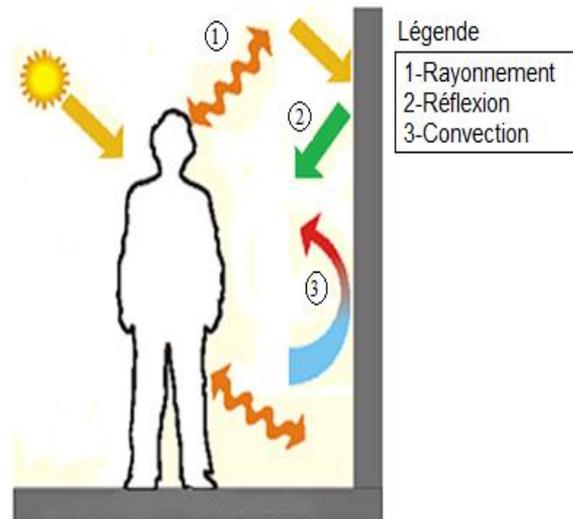


Figure II-21 : Schématisation de l'effet de dièdre d'après Izard et al, 2000. (Source: Sigrid, 2008, p. 10).

En prenant le cas de deux surfaces verticales ou l'ensemble d'une verticale et l'autre horizontale, les apports thermiques près de ces surfaces sont considérablement élevés par les multiréflexions du rayonnement solaire (Figure II-22), (Lehtihet et Izard, 2002). Lorsque deux façades sont contiguës, il y a "effet de double dièdre". Les températures de l'air sont plus élevées dans le cas du double dièdre, ce qui confirme l'effet des multiréflexions qui apparaissent dans cette situation (Figure II-23), (Lehtihet, 2002). Lorsque ces deux façades contiguës sont vitrées, il y a donc deux réflexions solaires matérialisées par la double image du soleil, comme le montre cette image de l'une des tours de la Bibliothèque Nationale de France (Figure II-24), (Izard, 2000).



Figure II-22 : Simple dièdre façade et sol, Boulevard Chave, Marseille, France. (Source : Lehtihet et Izard, 2002, p.2).

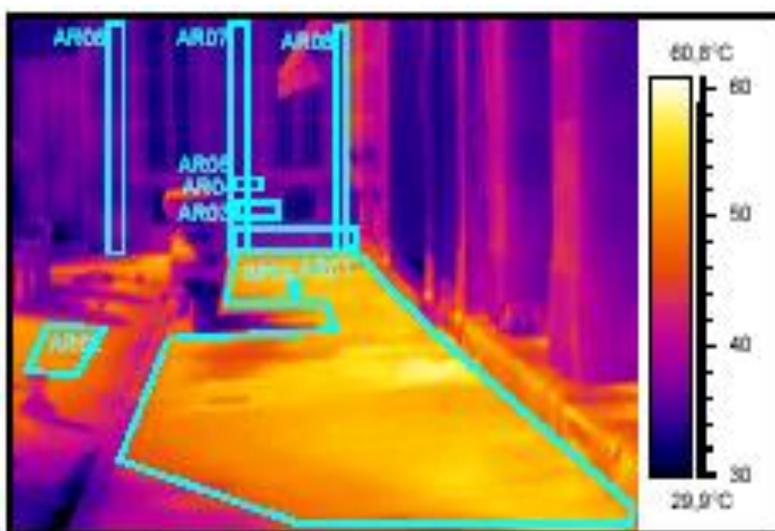
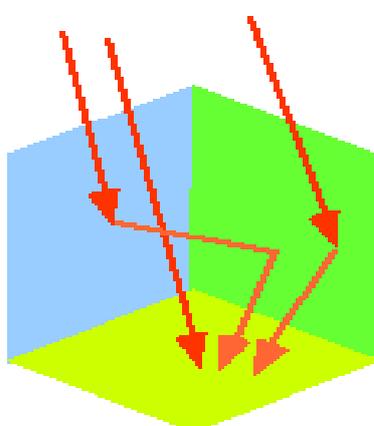
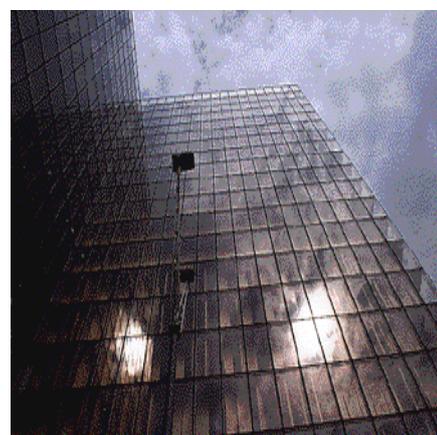


Figure II-23 : Double dièdre façades contigües et sol, Place Jean Jaurès, Marseille, France. (Source : Lehtihet et Izard, 2002, p. 2).



Multiréflexions sur un double dièdre



Effet de double dièdre

Figure II-24 : Effet de double dièdre de deux façades contigües.

(Source : Laboratoire ABC, 2000).

Les effets de simple et de double dièdre jouent un rôle primordial dans le réchauffement de l'air aux coins des bâtiments où l'on enregistre des valeurs très élevées des températures. Ce qui est étroitement lié aux multiréflexions qui apparaissent dans ces situations. Ces effets sont d'une importance moindre dans le cas du simple dièdre comparativement au double dièdre.

II- 3.6.2. L'effet des surfaces chaudes

La complexité des matériaux en ville fait varier les échanges thermiques au voisinage des façades des immeubles. L'apport de chaque matériau dépend d'un côté, de ses propriétés réfléchives, émissives et d'absorptivité, et d'un autre côté de sa disposition vis-à-vis du soleil et des autres surfaces (Ait-Ameur, 2002). L'étude d'une rue canyon orientée Est-Ouest, faite par Pearlmutter (1998), rapporte une différence de 1 à 3°C entre les températures de l'air relevées à la hauteur d'une personne moyenne et celle relevée au-dessus des toits, de 12h jusqu'en fin d'après-midi 18h (Figure II-25).

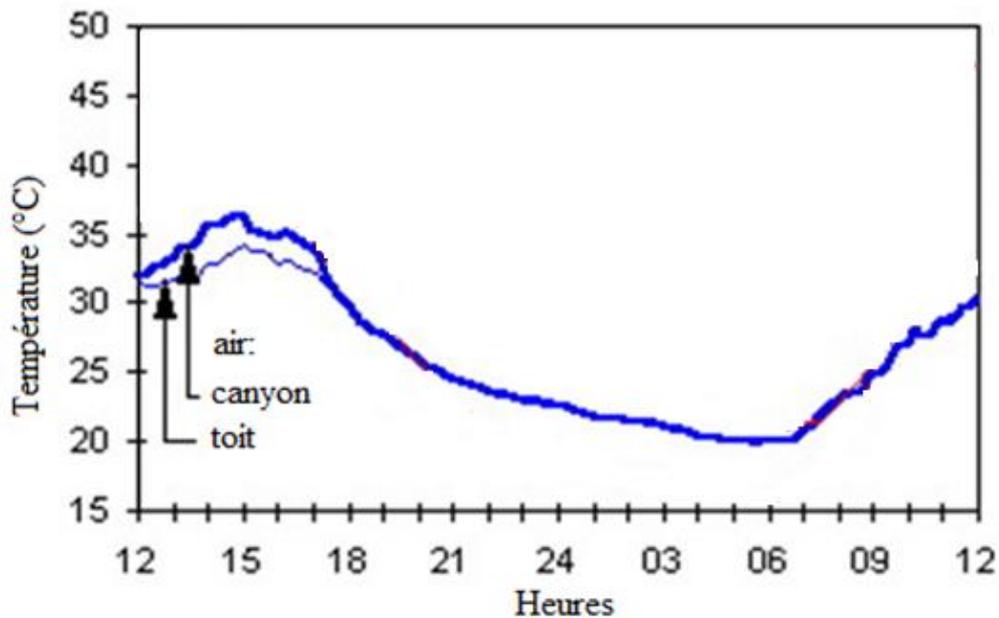


Figure II-25 : Ecart de la température de l'air à l'intérieur d'une rue canyon orientée E-O et au dessus des toits (Source: Pearlmutter, 1998, p.).

Dans des espaces plus dégagés, les températures les plus élevées sont toujours relevées au voisinage des surfaces thermiques, notamment celles exposées au soleil. L'augmentation des températures se poursuit jusqu'à une distance de 10 m des murs. La variation peut excéder 4°C entre un point situé à 2 m et un autre situé à 20 m d'une façade ensoleillée (Noilhan, 1980). Adolphe et al., (2002) notent que l'accroissement de la température de l'air, à proximité des façades, est aussi le résultat des pertes de chaleur de l'enveloppe bâtie. De ce fait, l'apport de chaleur externe au voisinage d'une surface est augmenté par la chaleur émise, réfléchiée ou diffusée par l'enveloppe.

II- 3.6.3. Effet de l'orientation de l'espace

Ali-Toudert (2005) a mené une étude de rues canyons avec cinq rapports d'aspect H/W (0.5, 1, 2, 3 et 4) et deux orientations cardinales E-O et N-S, dans la zone aride de Ghardaïa, en Algérie. La figure II-26 compare les écarts de température de l'air (ΔT_a) entre les différents cas considérés. Les écarts sont modérés dans tous les cas et n'excèdent pas 1,3 K. La température de l'air reste plus sensible à l'augmentation du rapport d'aspect qu'à l'orientation. Généralement, les rues E-O sont plus chaudes que les rues N-S, sauf vers midi pour des rapports d'aspect plus élevés où les rues E-O deviennent légèrement plus fraîches. En effet, le réchauffement de l'air dans le canyon est directement lié à l'exposition solaire des surfaces du canyon. Cela correspond aux heures allant de 10h du matin à 17h d'après-midi pour les rues E-O et vers midi pour les rues N-S (Ali-Toudert, 2005).

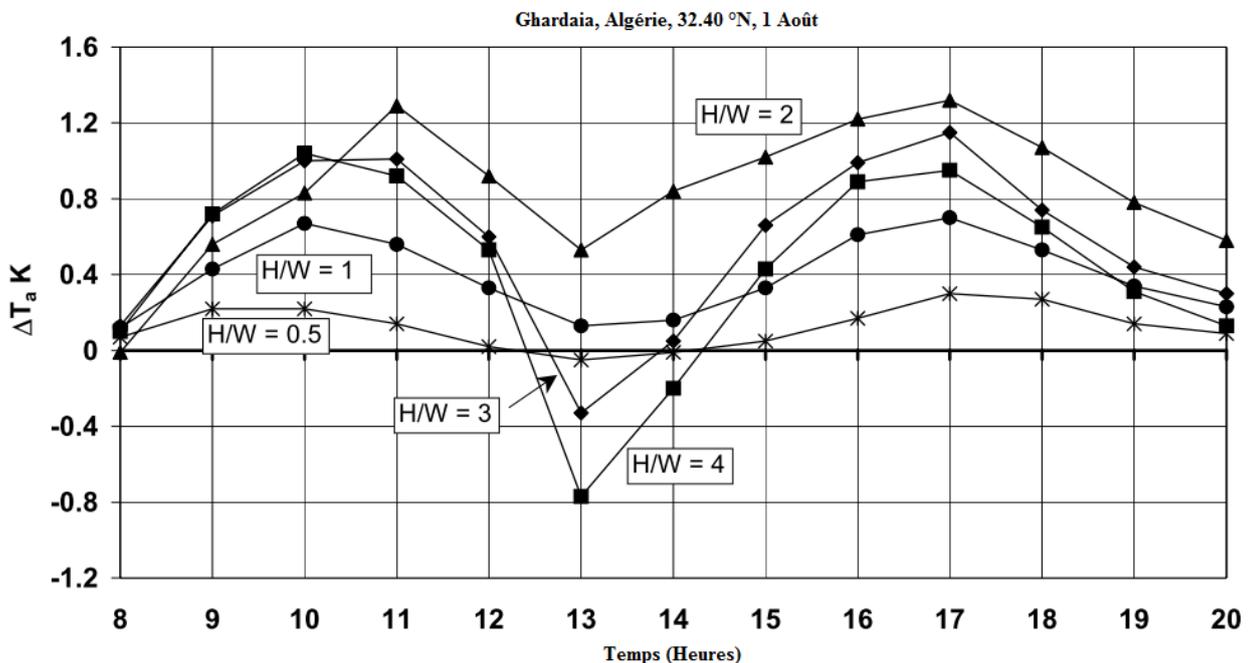


Figure II-26 : Ecarts de température de l'air entre les canyons orientés E-O et N-S, pour 5 prospects H/W de 0.5, 1, 2, 3 et 4 (Source : Ali-Toudert, 2005, p.97).

II- 3.6.4. Effet des dimensions et de la géométrie de l'espaces

Strømman-Andersen et Sattrup (2011) ont mené une étude de rues canyons avec cinq rapports d'aspect H/W (0.5, 0.75, 1, 2 et 3) orientées N-S, à Copenhague, Danemark. La figure II-27 montre la radiation solaire moyenne journalière dans ces canyons urbains. Lorsque les distances entre les bâtiments le permettent, le rayonnement peut atteindre le sol avec des taux variables en fonction de l'ouverture de l'espace. Dans les espaces les plus fermés, l'introduction du rayonnement solaire n'est efficace que lorsque le soleil est très haut sur l'horizon (Strømman-Andersen et Sattrup, 2011). Sachant qu'à

Copenhague, l'inclinaison solaire est plutôt faible. Cela signifie que le rayonnement solaire direct atteint uniquement les étages supérieurs et les toits des quartiers urbains denses particulièrement en hiver.

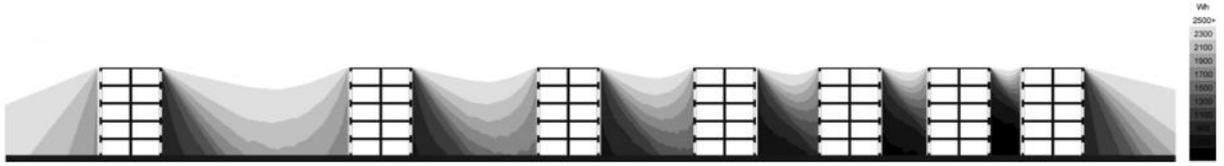


Figure II-27 : Radiation solaire moyenne par jour dans les canyons urbains, Copenhague, calculée par ECOTECT, (Source : Strømman-Andersen et Sattrup, 2011, p.6).

La rue asymétrique (Figure II-28) avec une plus grande ouverture au ciel, favorise un potentiel plus élevé d'accès solaire en hiver. Elle permet également un refroidissement nocturne plus rapide (Oke, 1988). Dans le cas d'une rue canyon étroite, la géométrie des façades peut compenser le manque d'enseillement dû à l'étroitesse de cette rue (Aït-Ameur, 2002).

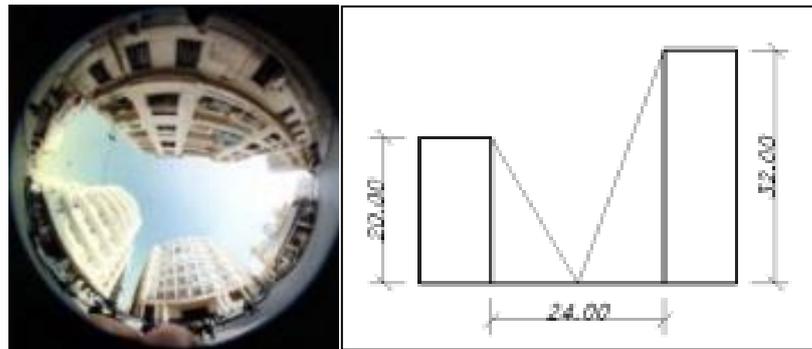


Figure II-28 : Exemple d'une rue canyon asymétrique (photographie fisheye à gauche, schéma à droite), (Source : Boucheriba, 2005, p.128)

En outre, pour qu'un bâtiment ne soit pas en forte exposition, et pour que les espaces intérieurs soient confortables, Oke (1998) propose de qualifier l'accès solaire direct des espaces urbains par le degré de pénétration du soleil au solstice d'hiver, à midi, exprimé comme une proportion de surface potentiellement exposée au soleil. Dans une rue orientée Est-Ouest d'une ville placée à la latitude 45° N, Oke a montré que pour un prospect de 1, seulement 39 % de la façade Sud est potentiellement ensoleillée ; pour un prospect de 66 %, et pour un prospect de 40 %, toute la façade est ensoleillée (Figure II-29).

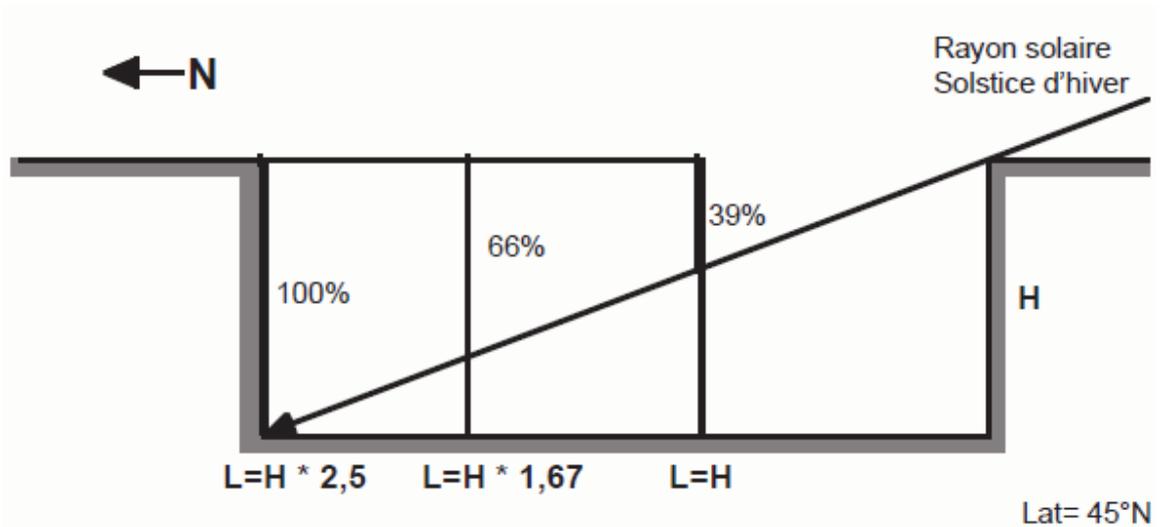


Figure II-29 : Angle d'incidence du rayonnement dans une rue Est-Ouest d'une ville placée à une latitude de 45°N, et proportions de façade potentiellement au soleil, en fonction de la largeur L de la rue et de la hauteur H des bâtiments (Source : Oke, 1988, p.8)

Ceci dit, la densité urbaine réduit considérablement l'ensoleillement incident sur les façades selon deux phénomènes. D'une part, le trouble atmosphérique, ou turbidité (quantité de poussières, aérosols et gouttelettes d'eau dans l'air) qui est le résultat de la pollution urbaine, réduit l'ensoleillement de 10 à 30 % dans des villes très polluées (le rayonnement diffus augmente en contrepartie mais sans compenser les pertes), (Ringebach, 2004 et Bonhomme, 2013). D'autre part, les bâtiments forment des masques solaires diminuant l'ensoleillement diffus et direct (Robinson et Stone, 2004).

II- 4. Effets aérauliques en milieu urbain

II- 4.1. Influence de la rugosité urbaine

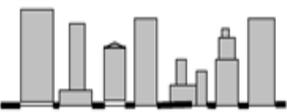
Sur de vastes étendues, le profil reste sans altérations si la rugosité du terrain est cohérente et que ce dernier ne présente pas une pente rude. Néanmoins, en ville, la forte rugosité des agencements urbains produit des résistances et des forces de frottements qui ralentissent ou accélèrent la vitesse du vent qui accroît la turbulence locale. Ces mouvements tourbillonnaires sont issus des différences de pression entre les différentes parties exposées ou non des bâtiments. Ainsi, la vitesse du vent dans les agglomérations urbaines peut être réduite de 50 % comparativement à celle qui est mesurée au niveau des surfaces d'eau libre (Bouyer, 2009, Athamena, 2013).

L'état des connaissances ne permet pas pour l'instant de distinguer les formes selon leurs effets climatiques à l'échelle locale, mais des essais ont tout de même été réalisés. Parmi lesquelles, nous pouvons citer celui d'Oke, s'appuyant sur un travail de base d'Ellefsen. Il a procédé à une classification

des zones urbaines (Bouyer, 2009). Cette classification, présentée par le Tableau II-4 associe les effets climatiques à l'échelle locale et une description sommaire de l'aménagement de la zone en fonction de trois données de terrain :

- la classe de rugosité : elle est basée sur celle faite par Davenport (Tableau II-5), elle peut être liée à la hauteur de rugosité Z_0 ;
- le prospect H/W des rues canyons : Ce facteur a un impact direct sur la direction et la vitesse des vents et les transferts de chaleur ;
- la fraction de surface bâtie : cette valeur représente la proportion de surface couverte par les éléments construits (bâtiments, rues, pavage et autres revêtements imperméables). Le reste de la surface urbaine est considéré recouvert par des éléments perméables (espaces verts, eau, et autres surfaces). La perméabilité a un effet sur l'humidité de l'air et sur le potentiel d'humidification et d'évaporation provenant du sol.

Tableau II-4 : Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat local, d'après Oke, 2006 (Source : Bouyer, 2009, p. 19).

Zone climatiques urbaines	Image	Classe de rugosité	Rapport d'aspect du canyon	% construit (imperméable)
Croissance urbaine intense avec des variations importantes des hauteurs de bâtiments (présence de tours)		8	>2	>90
Croissance intense à forte densité avec hauteurs homogènes et bâtiments proches (Utilisation de la brique et de la pierre)		7	1.0-2.5	>85
Croissance importante, densité moyenne, Bâtiments espacés (habitations urbaines...)		7	0.5-1.5	70-85
Croissance importante, densité moyenne, bâtiments bas, sols pavé (centres commerciaux...)		5	0.05-0.2	70-95
Croissance moyenne, densité faible avec 01 à 02 rangées de maisons (périphérie urbaine)		6	0.2-0.6 (plus de 1 avec arbres)	35-65
Paysage ouvert, succession d'espaces verts et de bâtiments étendus, usages divers (aéroports, universités...)		5	0.1-0.5 dépend des arbres	<40
Site semi-rural avec des habitations éparpillés sur un sol agricole (fermes...)		4	>0.05 dépend des arbres	<10

 Bâtiments  Arbres  Sol imperméable  Sol perméable

Tableau II-5 : Classification simplifiée de rugosité urbaine d'après Davenport, (Bouyer, 2009, p. 19).

Catégorie rugosité	Z0 (m)	Description du paysage correspondant
4 Rugueux ouvert	0.10	Territoire modérément ouvert avec des obstacles occasionnels (bâtiments bas isolés ou arbres) avec une distance entre obstacles égale à 20 fois leur hauteur
5 Rugueux	0.25	Obstacles réguliers avec des distances égales entre 8 à 12 fois leur hauteur pour des objets assez bas (exp. Bâtiments) (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
6 Très rugueux	0.5	Surface modérément couverte par des bâtiments bas séparés par une distance égale entre 3 à 7 fois le leur hauteur et sans arbres hauts (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
7 Rugueux régulier	1.0	Surface bâtie dense sans grande variation de hauteur (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
8. Chaotique	2.0	Centres villes composés de bâtiments avec une forte variation de hauteur

II- 4.2. Influence de la volumétrie des bâtiments

Lorsqu'un vent vient heurter un bâtiment, trois zones principales de perturbation apparaissent : à l'avant, "un vortex" turbulent (zone de recirculation) dû à l'écoulement descendant sur la face au vent, sur les côtés et la partie supérieure un "décollement", et à l'arrière une zone de "turbulence" ou bulle de "sillage" qui s'étire dans la cavité de basse pression. Plus loin, le sillage du bâtiment est caractérisé par une turbulence élevée et des vitesses horizontales inférieures à celles de l'écoulement non perturbé (Figure II-30), (Vinet, 2000).

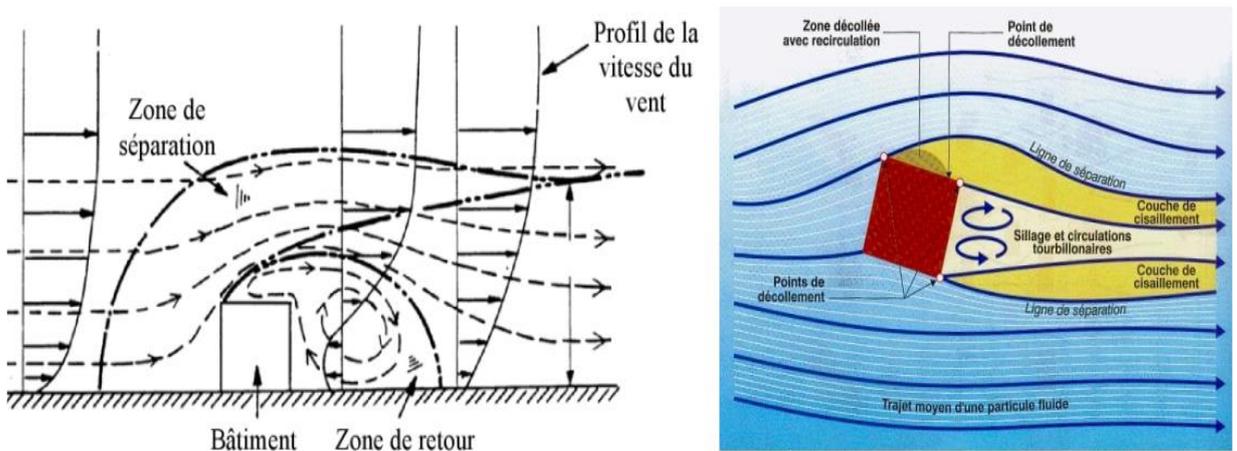


Figure II-30 : Écoulement du vent autour d'un bâtiment cubique. A gauche, en coupe verticale selon Thurow (1983), (Source : Robitu, 2005, p. 39) et à droite en coupe horizontale et avec incidence du vent oblique (Source : Liébard et De Herde, 2006, p. 145b).

II- 4.3. Influence de l'agencement urbain

II- 4.3.1. Les formes isolées

- **L'effet rouleau tourbillonnaire** : Lorsqu'une façade est exposée au vent, des mouvements tourbillonnaires de l'air se manifestent verticalement au niveau de cette dernière, et leur vitesse devient plus importante avec l'augmentation de la hauteur des bâtiments.
- **L'effet de coin** : Cet effet se manifeste lors de la rencontre de deux façades dont l'une est exposée au vent et l'autre en est à l'abri. Il en résulte alors un champ de pression et de dépression au coin d'un bâtiment qui devient plus important dans le cas de tours à plusieurs niveaux allant à R+30.
- **L'effet de barre** : Lorsque le vent intercepte un bâtiment de forme parallélépipédique à un angle de 45°, il subit une rotation au niveau du sol avec une survitesse à une distance d'environ deux fois la hauteur construite.
- **L'effet de sillage et de rouleau aval** : Il s'agit de l'apparition d'un tourbillon à la façade arrière d'un bâtiment, ainsi qu'aux deux cotés latéraux qui sont dans une zone de dépression comparativement à la façade en pression qui est directement exposée au vent incident.
- **L'effet de trous ou de passage sous immeuble** : Il s'agit d'une survitesse du vent à des endroits d'un bâtiment en contact avec le sol, entre deux façades dont l'une exposée et l'autre à l'abri. La vitesse du vent augmente de 1.2 à 1.5 m/s pour une hauteur bâtie de 20 à 50 m, (Figure II-31).

II- 4.3.2. Les formes associées

- **L'effet venturi** : C'est le passage en survitesse du vent par un angle ouvert et étroit formé par la disposition de deux bâtiments.
- **L'effet Wise** : Lorsque deux bâtiments sont parallèles et que celui qui est moins élevé est exposé au vent, il en résulte une accentuation du tourbillon entre les deux constructions.
- **Effet de liaison des zones de pressions différentes entre immeubles** : Lorsque deux bâtiments sont implantés en quinconce, leurs deux façades exposées au vent créent un lien entre les différentes zones en surpression, (Figure II-31).

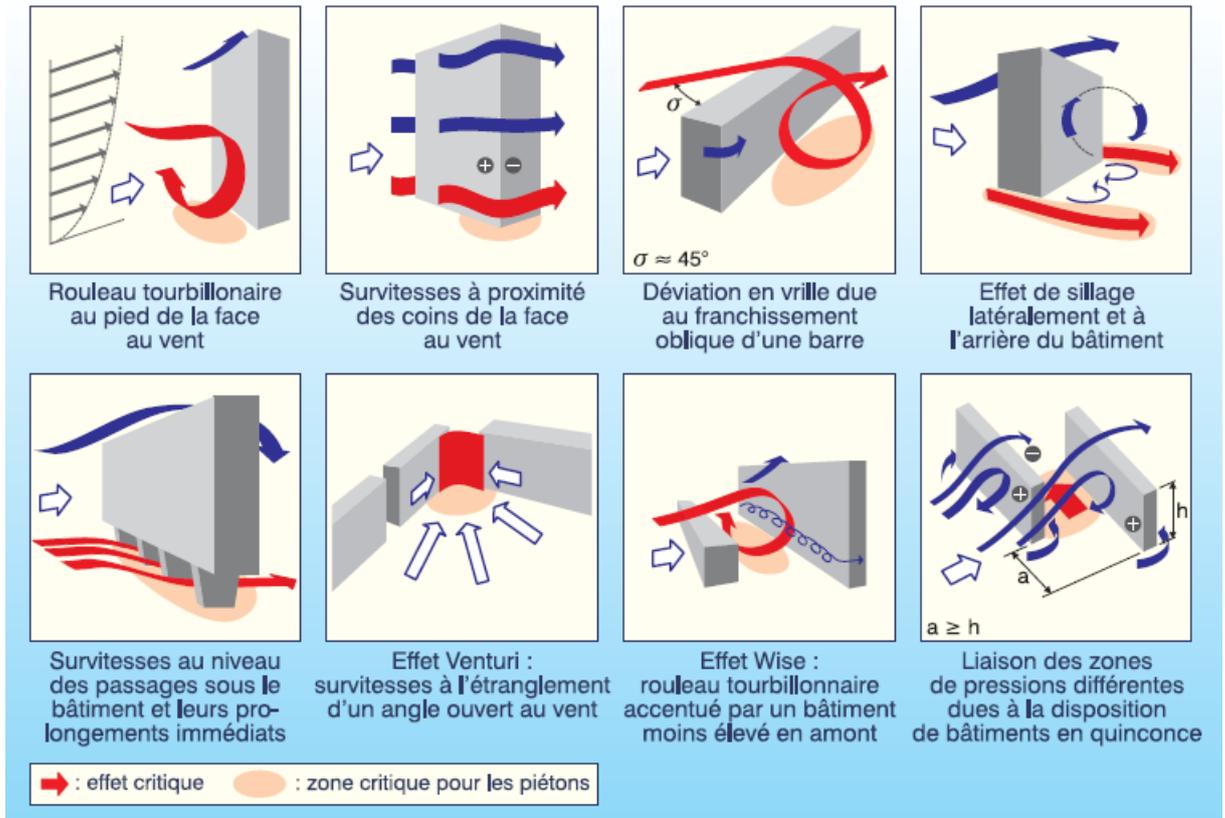


Figure II-31: Les effets du vent sur les bâtiments isolés et associés.

(Source : Reiter, 2006, p.55).

II- 4.4. Influence de l'orientation du tissu urbain

Cela correspond aux écoulements dans différents types de rues, dont l'usage du quotient des hauteurs moyennes des bâtiments sur la largeur de la rue est utilisé pour les analyser. On le note H/W . Si les bâtiments sont bien séparés ($H/W > 0.05$) les écoulements n'interagissent pas. A des espacements plus réduits, les sillages sont perturbés. Lorsque la hauteur, l'espacement, et la densité de la rangée se combinent, le régime de l'écoulement de rugosité isolé (isolated roughness) se transforme en un écoulement à interférence des sillages (wake interferences). Ce dernier est caractérisé par des écoulements secondaires dans l'espace du canyon. A des rapports d'aspects et des densités plus élevées un vortex stable s'établit dans le canyon, et un régime d'écoulement rasant (skimming) apparaît où l'enveloppe de l'écoulement ne pénètre plus dans le canyon (Fig. II-32), (Vinet, 2000).

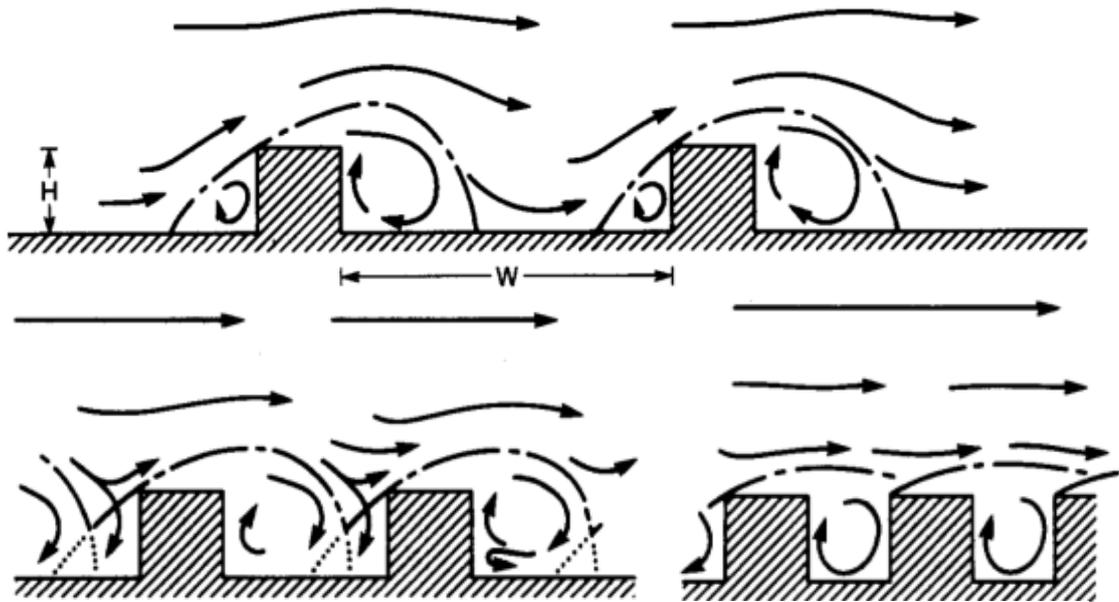


Figure II-32 : Profil de la circulation de l'air dans une rue canyon en fonction du rapport d'aspect H/W de la hauteur et de sa largeur : (a) écoulement à rugosité isolée, (b) un écoulement à interface de sillage, (c) écoulement rasant (Source : Oke, 1987, p.5).

II- 5. Concepts du contrôle climatique en milieu urbain

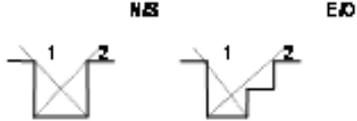
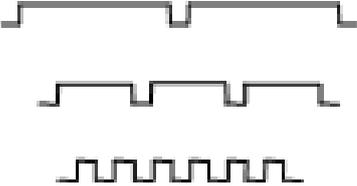
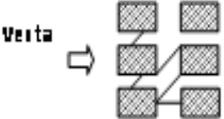
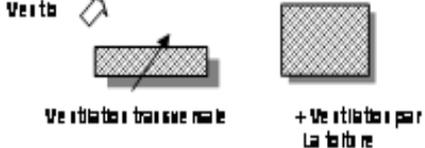
Pour la création d'un microclimat urbain appréciable et une amélioration du confort physique global de la ville, Ali-Toudert et Bensalem (2001) considèrent les concepts suivants donnés en Tableau II-6.

- **L'ouverture au ciel** : C'est un concept qui permet le contrôle de l'accès du soleil dans les espaces intérieurs et extérieurs tout comme le refroidissement nocturne. L'ouverture au ciel est principalement liée au ratio H/L et à l'orientation cardinale.
- **La réflectance urbaine** : C'est un concept qui s'associe à la notion citée en premier (ouverture au ciel), et contrôle la quantité d'énergie. Ce critère est principalement affecté par la densité du plan et la surface des matériaux.
- **La perméabilité urbaine** : Dans les espaces extérieurs et entre les bâtiments, la qualité de l'air et le confort thermique sont réalisés par ce concept. La pénétration du vent dans les rues dépend principalement de la géométrie des espaces extérieurs ainsi que de l'incidence du vent.
- **La directionnalité** : Ce concept décide de la structure urbaine pour satisfaire son orientation et l'incidence du vent.

- **L'enveloppe bâtie** : Cet élément combine les choix architecturaux et urbains de la géométrie du bâtiment (taille et forme) par rapport à sa performance climatique et son impact sur l'accès au soleil et sur le contrôle du vent.
- **Le paysagisme** : Cette notion explique le rôle de la végétation et fournit les conditions pouvant satisfaire l'ombrage, la réduction de la vitesse du vent, l'accès au soleil, la ventilation, la filtration des polluants, etc.

Tableau II-6 : Concepts du contrôle climatique urbain.

(Source : Ali-Toudert et Bensalem, 2001, p.5)

Concepts	Objectifs	Paramètres urbains et environnementaux	
Ouverture au ciel	Accès au soleil	Ration H/L Orientation/ Soleil	
	Refroidissement nocturne	Ration H/L	
Réfectance urbaine	Contrôle du rayonnement solaire	Densité du plan (Surf. Toiture)	
Perméabilité urbaine	Contrôle de la ventilation extérieure	Densité du plan Prospects H/L Incidence du vent	
	Contrôle de la ventilation intérieure	Géométrie du bâtiment	

Directionnalité	Orientation de la trame urbaine (compromis entre contrôle solaire et vent)	Orientation/Soleil Incidence du vent/ Bâti	
Enveloppe bâtie	Contrôle bilan énergétique	Géométrie du bâtiment : Hauteur Largeur Epaisseur	
Paysagisme	Ombrage Evapotranspiration et réduction du vent	Localisation Type (cycle foliaire, forme, densité, dimensions...)	

II- 5.1. Conclusion

Nous constatons donc, à travers ce chapitre, que parallèlement aux facteurs d’ordre cosmique et aux conséquences de la croissance urbaine (pollution automobile, activités domestiques, industrie, etc.), les éléments de l’environnement construit (façades bâties) font également varier les températures de l’air à l’échelle locale. Ces variations dépendent des caractéristiques thermiques des parois et des rapports de voisinage qu’elles entreprennent. Pour mieux comprendre ces phénomènes, nous avons entamé ce chapitre par une présentation des paramètres du climat en général, puis nous avons exposé les différentes échelles du climat, ce qui nous a permis de déterminer les caractéristiques du microclimat étant donné que c’est la dimension la plus évidente à utiliser pour la réduction des consommations énergétiques.

L’altération du climat en ville est due à plusieurs paramètres tels que l’activité anthropogénique, la pollution, l’imperméabilisation du sol et la réduction des espaces végétalisés. Le climat urbain se voit ainsi être sujet aux différents phénomènes locaux sources d’inconfort et de nuisances : les vents, la pollution et l’îlot de chaleur créé par la surchauffe des espaces extérieurs, et causant malaises, inconfort et autres nuisances au niveau local. Cette dernière échelle est également l’objet de l’interaction de plusieurs éléments pouvant l’influencer tels que le relief, les constructions, l’eau et la végétation. Par conséquence, ce sont ces derniers paramètres qui sont utilisés pour l’amélioration du confort thermique.

Dans ce chapitre, nous nous sommes essentiellement basés sur les effets radiatifs du rayonnement solaire, qui est le principal élément constituant les microclimats au sol. En abordant les différents impacts que peut avoir le rayonnement solaire dans un climat urbain, nous nous sommes aperçus que son apport est vaste, car il touche plusieurs points ressentis comme sources de malaises en ville tels que l'augmentation de la température ambiante.

Par la suite, nous avons cherché à illustrer les effets aérauliques en ville, et ainsi que leurs différentes manières d'utilisation bénéfique en ville, servant à réduire la consommation de l'énergie dépensée pour l'amélioration du confort. Aussi, avons-nous souligné les bienfaits régulateurs de la végétation et de l'eau en ville. Enfin, nous avons donné, des concepts de régulations des environnements microclimatiques urbains, cités par des chercheurs algériens (Ali-Toudert et Bensalem, 2001) après avoir réalisé de profondes études et recherches sur site. Nous concluons alors que "microclimat" et "morphologie urbaine" sont deux notions complémentaires, et que leur complémentarité est utile à la recherche de l'agrément d'un espace.

III-Etat de l'art de la recherche sur la performance énergétique du bâtiment

III- 1. Introduction

La consommation d'énergie des bâtiments urbains est affectée par le microclimat environnant qui diffère des données météorologiques, ainsi que par les obstructions entre les bâtiments, qui diminuent les gains solaires et la vitesse d'écoulement des vents. Les caractéristiques du bâtiment lui-même affectent à la fois le microclimat extérieur et intérieur. Ce chapitre aborde ces interdépendances à l'égard de la performance énergétique. Une revue bibliographique permettra d'illustrer la grande pertinence des effets microclimatiques de l'environnement urbain sur la consommation énergétique des bâtiments, ainsi que les méthodes afférentes utilisées pour leur évaluation. En effet, plusieurs études numériques et expérimentales ont été réalisées pour estimer les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation, dont certaines se sont intéressées à l'influence des paramètres microclimatiques, et d'autres à l'influence des composants de l'enveloppe. Les recherches qui nous paraissent les plus significatives sont les suivantes :

III- 2. Effets des paramètres urbains sur les consommations énergétiques

III- 2.1. Effet de la température d'air

La chaleur anthropique en zone urbaine est due essentiellement au transport, à la production d'énergie et aux bâtiments. Cette chaleur émise par l'activité humaine peut modifier de manière significative la température ambiante car elle devient parfois égale aux apports radiatifs globaux. Les niveaux de chaleur anthropique peuvent varier de manière importante. Le rejet anthropique de la chaleur dans les villes importantes peut créer des écarts de températures de 2 à 3 K entre le centre ville et la périphérie, de nuit comme de jour (Musy, 2008). Cette énergie a des conséquences directes sur les charges climatiques des bâtiments, donc sur le confort thermique à l'intérieur de ceux-ci, mais aussi sur leur consommation d'énergie. En hiver, l'effet sur les consommations des systèmes de chauffage est positif. En été, les bâtiments climatisés ont en revanche une consommation énergétique accrue.

Santamouris et al. (2004) ont réalisé des calculs, à l'aide du logiciel TRNSYS¹, pour évaluer les charges de chauffage et de climatisation d'un bâtiment de référence au centre-ville d'Athènes. Les

¹ **TRNSYS** : TRAnsient SYstem Simulation est un logiciel dédié à la simulation thermique dynamique des systèmes, développé par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) de l'Université de Madison aux Etats- Unis. A travers son interface graphique, la prise en main du logiciel TRNSYS est relativement aisée. La force de TRNSYS réside dans sa structure modulaire. Chaque module de TRNSYS (ou TYPE) correspondant à des éléments de systèmes physiques ou autres. L'assemblage de ces modules permet de construire le système à étudier. Chaque module a des « entrées » qui dépendent en général du temps, des paramètres qui sont les valeurs constantes de l'élément. Les modules correspondent à des modèles numériques qui vont calculer les sorties. Le couplage des modules permet la modélisation de l'évolution du système au cours du temps (SEL, 2004).

auteurs se sont basés sur les données de trente de stations météorologiques du climat urbain de cette ville. Les résultats de cette étude ont montré une diminution des charges de chauffage de 30 à 50 % au centre ville par rapport à celles de la banlieue.

Par ailleurs, les exigences de confort d'été dans ce bâtiment, et donc la climatisation, se développent fortement. Ses charges sont calculées pour une température de confort de 27°C. La figure III-1 donne les iso-courbes des charges de climatisation (en kWh/m² par mois) pour le mois d'août de l'année 1996. Elle montre les charges de climatisation multipliées par deux au centre d'Athènes par rapport à celles de la banlieue (de 14,22 kWh/m² contre 6,58 kWh/m²). La charge maximale correspondait à une station de mesures très enfermée où le trafic routier était très dense. Tandis que les valeurs minimales ont été calculées au Sud-Est de la ville, qui est caractérisée par une densité moyenne du bâti, et la présence d'une forêt. Aussi, d'autres valeurs minimales élevées ont-elles été enregistrées à l'ouest de la ville, dotée d'un tissu urbain très dense, d'un manque d'espaces verts, d'activités industrielles très importantes et où le trafic routier était plus dense que celui de la région Est.

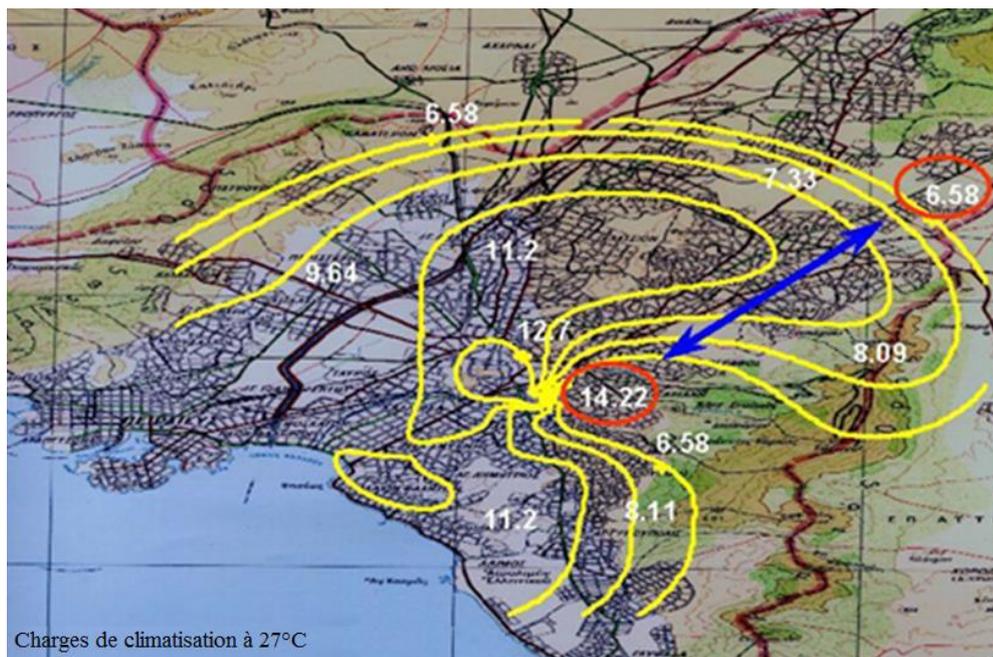


Figure 0III-1 : Distribution des charges de climatisation à Athènes pour le mois d'Août de l'année 1996. (Source : Santamouris et al., 2004, p.100).

Ces températures élevées au centre-ville augmentent le pic des charges électriques, ce qui entraîne des baisses éventuelles de tension sur les réseaux électriques. Ce pic est calculé pour le même bâtiment de référence à une température de confort de 27°C au centre ville d'Athènes (Figure III-2). Comme

attendu, les pics les plus élevés sont obtenus au centre ville avec un maximum de 27,5 kW, tandis que la valeur minimale enregistrée est de 13,7 kW. Ainsi, l'impact des températures élevées en ville est extrêmement important et peut même doubler le pic de charge de climatisation de l'immeuble considéré.

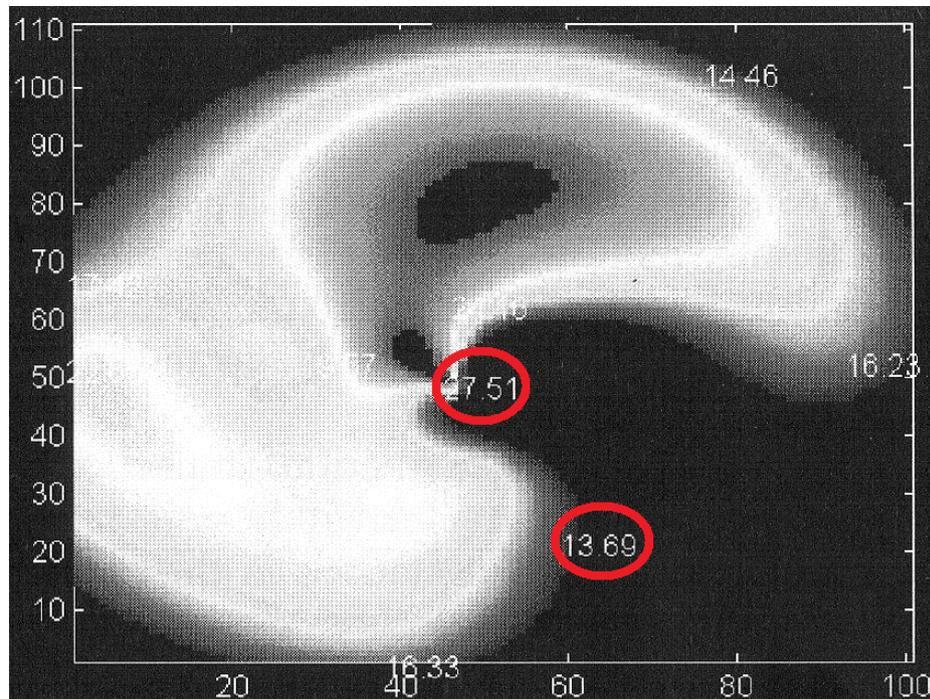


Figure III-2 : Variations spatiales du pic de climatisation de l'immeuble de référence pour une température de confort de 27°C. Les valeurs sont en kW.

(Source : Santamouris et al., 2004, p.101).

De ce fait, on ne peut pas négliger ce phénomène de rebouclage perpétuel puisque la hausse des températures ambiantes en ville est très liée à la faible efficacité des climatiseurs. Les systèmes au COP² les plus faibles nécessitent une augmentation de la taille et de la puissance électrique de fonctionnement; l'effet indirect du redimensionnement de ces systèmes est l'augmentation de la demande d'électricité et de la charge de climatisation du fait de l'augmentation des rejets thermiques (Santamouris, 2004). La distribution des valeurs du COP est calculée pour le bâtiment de référence, et leurs minima se situent au centre d'Athènes COP=75%, ce qui est dû aux températures élevées et au taux important d'humidité (ville côtière). La valeur maximal du COP est de 102% pour le Sud-Est de la ville d'Athènes. Ces résultats montrent clairement que l'effet d'îlot de chaleur cause une réduction significative du COP des systèmes d'air conditionné pouvant atteindre jusqu'à 25%. Parallèlement aux températures moyennes, les maxima des températures augmentent eux aussi, entraînant une augmentation des niveaux de puissance de crête. La puissance crête des systèmes d'air conditionné peut être directement corrélée aux charges climatiques et donc à cette augmentation.

² Coefficient Of Performance.

Ainsi, Gracik et al. (2015) quantifient l'influence du voisinage urbain sur la dégradation du COP, dans le cas de climatisation des bâtiments, et montrent que la réduction de la performance des systèmes de climatisation peut atteindre un maximum de 17%. Ces pics d'appel de puissance ont différentes conséquences négatives dont des baisses éventuelles de tension sur les réseaux électriques et surtout la nécessité de surdimensionner les systèmes de production par rapport aux consommations courantes.

Synthèse

Finalement, le choix d'une température extérieure fixée peut donner des résultats fortement sous-estimé (cas de référence) ou fortement surestimés (cas de la température en toiture). Ce cas d'étude de prise en considération du couplage des phénomènes pour l'estimation de la demande énergétique démontre l'importance de l'interaction entre microclimat, système de conditionnement des ambiances habitées et demande énergétique.

III- 2.2. Effet des vents locaux

La demande énergétique de climatisation d'un espace est sensiblement élevée dans les pays à climat chaud et humide. Afin d'éviter une telle situation les méthodes traditionnelles de refroidissement passif telle que la ventilation transversale peut améliorer significativement l'ambiance thermique intérieure (de Dear et Brager, 2002). C'est dans ce contexte que Mochida et al. (2006) ont réalisé une étude sur l'évaluation des effets de refroidissement passif sur les consommations énergétiques sous l'influence de la distribution spatiale de l'environnement proche (bâtiments adjacents, arbres, etc.) d'un bâtiment (cité par Bouyer, 2009). Le bâtiment étudié se situe à coté du campus de l'Université de Tohoku au Japon (Figure III-3).



Figure III-3 : Situation de la maison cas d'étude.

(Source : Mochida et al, 2006, p.3)

Seules les consommations énergétiques de climatisation d'une chambre à l'étage sont données ici. Le protocole de simulation repose sur deux outils :

- un outil CFD disposant d'un modèle d'écoulement couplé avec un modèle de conduction et rayonnement ;
- un outil pour le bilan thermique du bâtiment (TRNSYS) qui se base sur un module de rayonnement et un module de traitement de bâtiment multizone ; celui de l'étude est découpé en 10 zones relatives aux différents espaces de la maison.

La Figure III-4 illustre les arrangements des arbres autour de la maison étudiée dans trois cas d'investigation. Le cas 1 représente la situation actuelle avec la position des arbres existants. Le cas 2 indique un positionnement modifié des arbres. A titre comparatif, une situation sans arbres est aussi considérée cas 0.

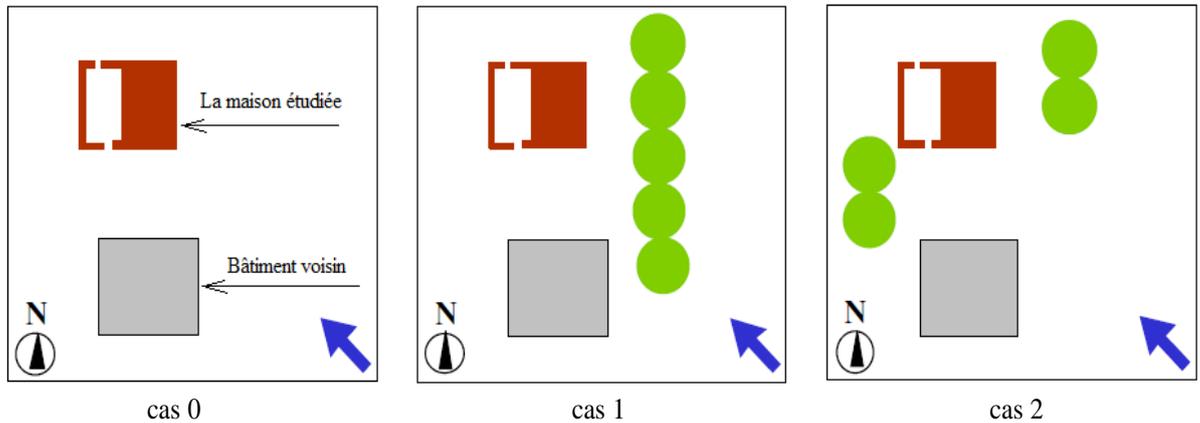


Figure III-4 : Différentes dispositions des arbres autour de la maison étudiée.

(Source : Mochida et al., 2006, p.7).

Les caractéristiques de la chambre 1 étudiée sont représentées en figure III-5. La distribution horizontale de la vitesse de l'air au voisinage de la maison et dans la chambre 1 est significativement élevée pour le cas 2, ce qui n'était pas le cas pour le cas 1, en changeant la position des arbres qui laisse l'air s'infiltrer plus facilement à l'intérieur et tourbillonner à l'extérieur en ne trouvant pas d'obstacle (Figure III-6).

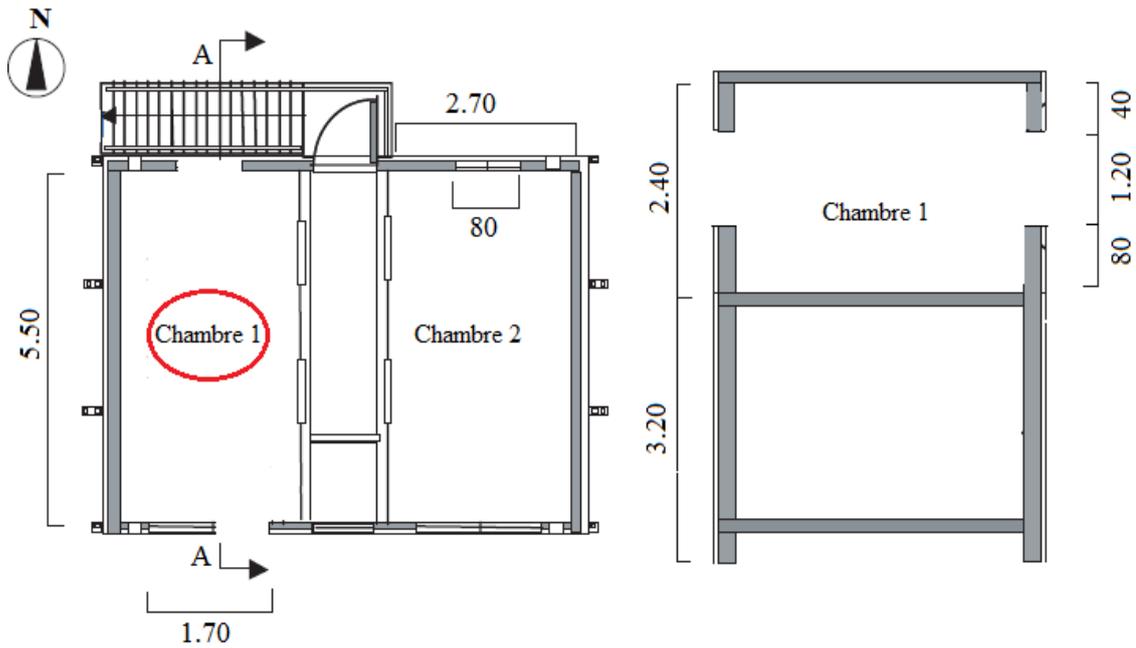


Figure III-5 : Vue en plan (à gauche) et coupe verticale (à droite) de la maison étudiée.

(Source : Mochida et al., 2006, p.5)

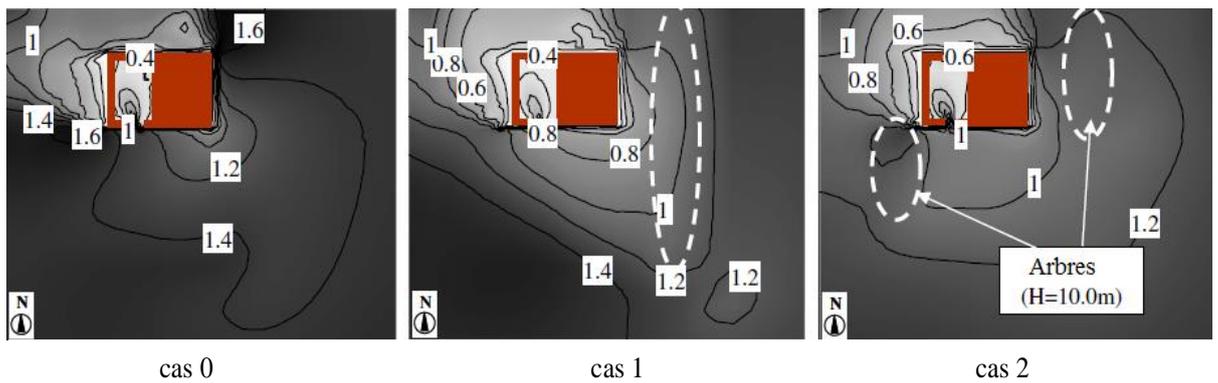


Figure III-6 : Distribution de la vitesse de l'air (m/s) mesurée à une hauteur de 4,5m à 12h10, le 13 Août.

(Source : Mochida et al., 2006, p.8)

L'influence de la ventilation transversale sur les charges de climatisation est évaluée à l'aide du logiciel TRNSYS, et ce, pour tout le mois d'Août et pour différents cas (Tableau III-1). Lorsque la ventilation transversale est activée, son taux a été calculé par des simulations CFD. Lorsque la climatisation fonctionne, le taux de ventilation, la température d'air ainsi que l'humidité relative sont fixés respectivement aux valeurs suivantes : $0.5h^{-1}$, $26^{\circ}C$, 60%.

Tableau III-1: Cas de simulation par TRNSYS. (Source : Mochida et al., 2006, p.9)

Cas	Climatisation	Ventilation transversale
Cas 0-c	Non activée	Activée toute la journée
Cas 0-d	Activée lorsque $PMV > 0.5$	Activée lorsque la climatisation n'est pas activée
Cas 1-a	Non activée	Non activée
Cas 1-b	Activée lorsque $PMV > 0.5$	Non activée
Cas 1-c	Non activée	Activée toute la journée
Cas 1-d	Activée lorsque $PMV > 0.5$	Activée lorsque la climatisation n'est pas activée
Cas 2-c	Non activée	Activée toute la journée
Cas 2-d	Activée lorsque $PMV > 0.5$	Activée lorsque la climatisation n'est pas activée

La Figure III-7 montre l'évolution des températures de l'air et des valeurs de l'indice PMV^3 pour le mois d'Août pour les Cas 1-a et 1-b, ainsi que les charges de climatisation pour le cas 1-b. Dans le cas 1-a, les valeurs PMV excèdent le plus souvent le seuil supérieur de confort ($PMV > 0.5$). La charge de climatisation pour le mois d'Août est d'environ 570 MJ dans le cas 1-b, lorsque les valeurs PMV sont inférieures à 0.5, et en activant la climatisation uniquement.

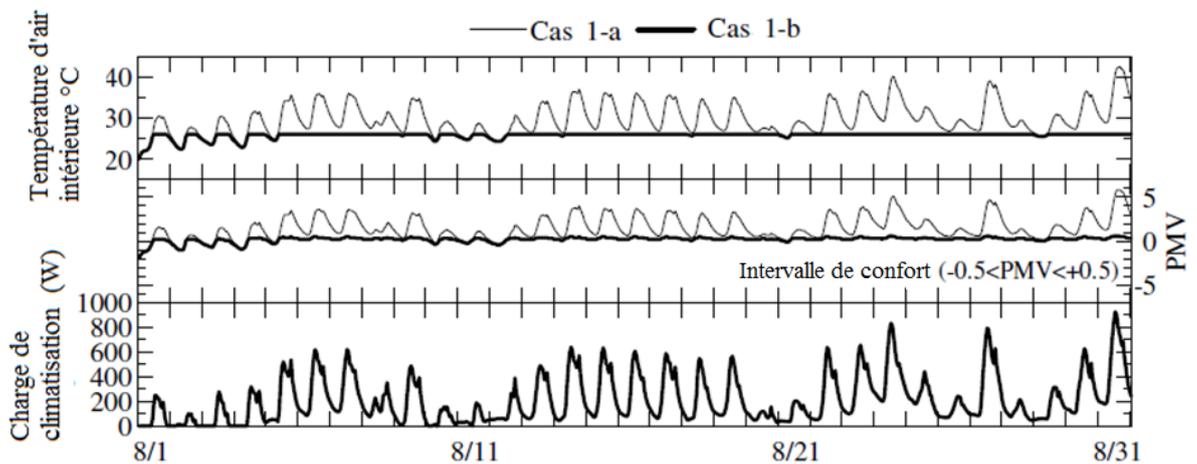


Figure III-7 : Température de l'air intérieur, PMV et charges de climatisation pour les cas 1-a et 1-b, pour le mois d'Août (Source : Mochida et al., 2006, p.10)

³ **PMV** : Predicted Mean Vote ou vote moyen prévisible est parmi les indices les plus utilisés pour l'évaluation de la sensation thermique, il est fondé sur le bilan thermique du corps humain à l'intérieur de l'espace bâti. Cet indice sert d'après Nikolopoulou et al (2004) à prédire " la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes sur une échelle de sensation thermique comprenant sept niveaux (Froid, frais, légèrement frais, confortable, légèrement chaud, chaud, très chaud). Il est basé sur des paramètres environnementaux comme la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, l'humidité de l'air, ainsi que sur le taux de métabolisme et l'isolation des vêtements (ISO 7730, 1994)".

La Figure III-8 compare les charges de climatisation du mois d'Août et le ratio de réduction de la climatisation pour chaque scénario en prenant comme référence le Cas 1-b. Pour le Cas 1-d, la ventilation transversale est fondamentalement activée, sans modification de l'emplacement des arbres, et la climatisation est activée lorsque $PMV > 0.5$. La charge de climatisation dans ce Cas 1-d est approximativement la moitié du Cas 1-b. En outre, lorsque la remise en ordre des arbres est effectuée pour augmenter la vitesse de l'air intérieur, la charge de climatisation diminue jusqu'à 41 % pour le Cas 2-d.

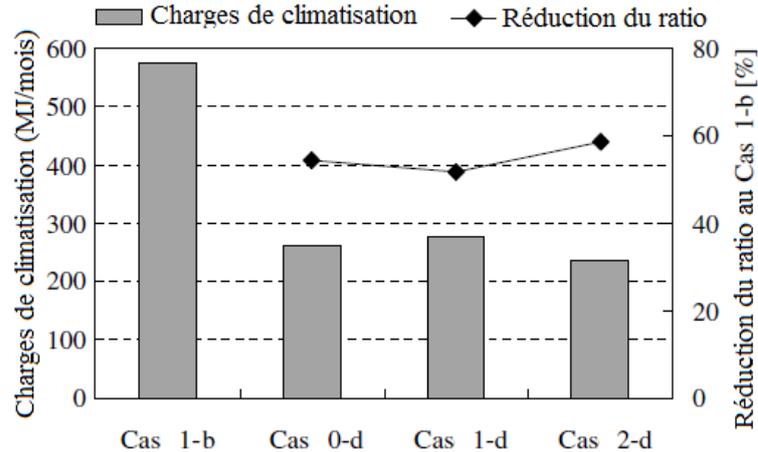


Figure III-8 : Bilan des charges de climatisation.

(Source : Mochida et al., 2006, p.10)

Synthèse

Pour tirer profit du vent dans la réduction des charges de climatisation des bâtiments pendant la période estivale, il faut rappeler que :

- une ventilation naturelle transversale est souhaitable à l'intérieur des locaux ;
- la ventilation naturelle transversale des bâtiments est associée à la direction et à la vitesse du vent urbain ;
- le vent urbain saisonnier est fortement lié au voisinage immédiat des bâtiments ;
- pour le canaliser et augmenter sa vitesse, il est nécessaire de considérer l'agencement des plantations se trouvant autour des bâtiments.

III- 3. Apport des aménagements

III- 3.1. Apport de la végétation

En plus du rôle esthétique et de la sensation de bien être éprouvée à proximité des arbres et de la végétation, l'implantation de cette dernière produit divers effets sur l'environnement urbain en modifiant les ambiances physiques et microclimatiques. Ceci dit, les arbres ont un effet bénéfique direct et indirect (ombrage d'édifices et rafraîchissement d'ambiances) sur la consommation énergétique des bâtiments par l'écran qu'ils constituent au rayonnement solaire et au vent, quand ils sont placés devant. A l'inverse, ils peuvent augmenter la charge latente des systèmes d'air conditionné par leur production d'humidité par évapotranspiration. En effet, plusieurs expériences et simulations ont en montré les conséquences.

L'étude de Bouyer (2009) à Lyon, en France traite l'impact de deux modes d'aménagement d'îlots: un aménagement minéral où les surfaces urbaines sont largement minéralisées, censées favoriser l'apparition de l'ICU (Figure III-9), et un aménagement végétal où les parcelles non bâties (parcs, cœurs d'îlots...) étaient végétalisées et plantées d'arbres, et où les voies piétonnières étaient également bordées d'arbres, ce qui est censé favoriser le rafraîchissement passif en été (Figure III-10).

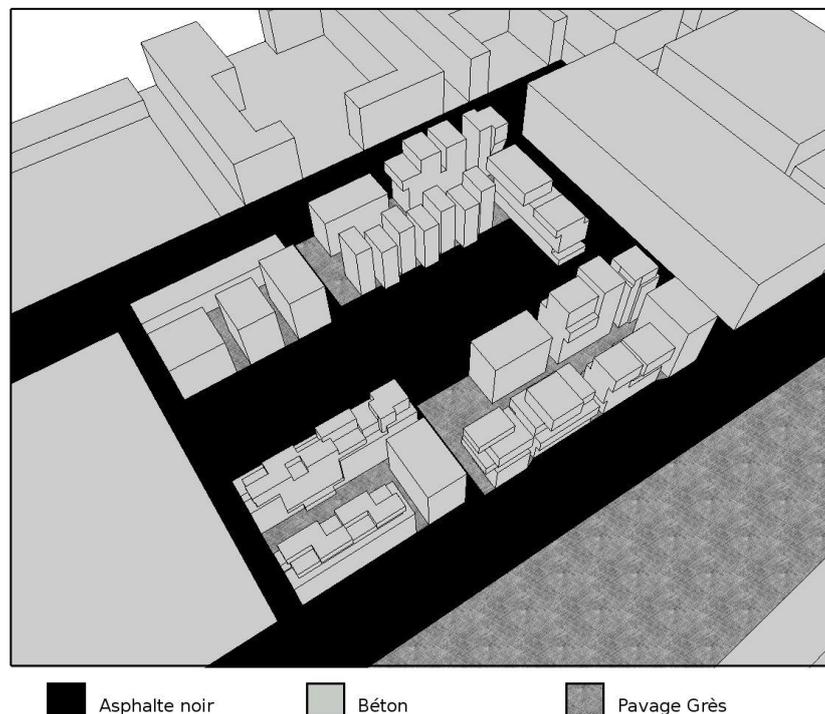


Figure III-9 : Aménagements minéralisés du site d'étude

(Source : Bouyer, 2009, p.215)

**Figure III-10** : Aménagements végétalisés du site d'étude

(Source : Bouyer, 2009, p.216)

Pour y parvenir, l'auteur réalise un couplage dynamique complet entre un logiciel thermoradiatif Solene⁴, et le logiciel thermoaéroulrique Fluent⁵ (code commercial de CFD⁶) pour la résolution des

⁴ **Solene** : développé par le laboratoire CERMA (Centre d'Etudes et de Recherches Méthodologiques en Architecture). Ce logiciel utilise un modèle de voûte céleste décomposé en facettes, dont les facteurs de forme d'échange avec la surface considérée sont déterminés pour obtenir la radiance solaire diffuse selon différents modèles de ciel intégrés. Les calculs réalisés sur l'ensoleillement incident en zone urbaine avec ce type de logiciel se sont révélés précis dans le cas de l'étude expérimentale d'une rue de type canyon à Nantes (Bozonnet, 2005).

⁵ **Fluent** : est un logiciel numérique permettant de simuler l'écoulement des fluides et les transferts de chaleur associés dans des géométries complexes. Il offre l'avantage d'une grande flexibilité au niveau des maillages, avec notamment la possibilité de résoudre avec beaucoup de facilité des problèmes d'écoulement dans des cas de maillages non structurés. Il permet de travailler sur des maillages 2D triangulaires ou quadrangulaires et 3D tétraédriques, hexaédriques, pyramidaux ou hybrides qui peuvent être réalisés dans l'outil complémentaire Gambit (modeleur-mailleur) proposant des facilités pour préparer une géométrie à la simulation Fluent. Il est également possible de raffiner ou de dilater le maillage à partir des résultats de simulation obtenus directement dans Fluent. L'outil permet de simuler les écoulements dans diverses situations physiques comme les écoulements compressibles ou incompressibles, laminaires ou turbulents, en régime permanent ou transitoire avec la possibilité de faire appel à des méthodes de résolution adaptées à la physique du phénomène étudié (Fluent, 2009).

⁶ **CFD** : Computational Fluid Dynamics, terme anglo-saxon désignant la mécanique des fluides numérique.

équations de bilan de masse (air, humidité), de mouvement et d'énergie sur des volumes élémentaires de contrôle.

Dans une deuxième partie, l'auteur définit le comportement thermique d'un bâtiment de référence en site isolé et le décrit par des paramètres variables, en établissant des classes de consommations énergétiques à partir d'une méthode statistique d'étude de sensibilité multicritères. Enfin, il réutilise ces classes de bâtiments dans un contexte urbain réel, le projet "Lyon Confluence", pour étudier l'impact des deux modes d'aménagement minéral et végétal. Ces classes sont déterminées comme suit : CL1 (Bâtiment performant toute saison), CL2 (Bâtiment seulement performant l'été), CL3 (Bâtiment seulement performant l'hiver), CL4 (Bâtiment non-performant), (Figure III-11). La présélection des quatre bâtiments a été faite selon les critères de simplicité, de compacité de leurs volumes ainsi que les différentes orientations possibles (Bouyer, 2009).

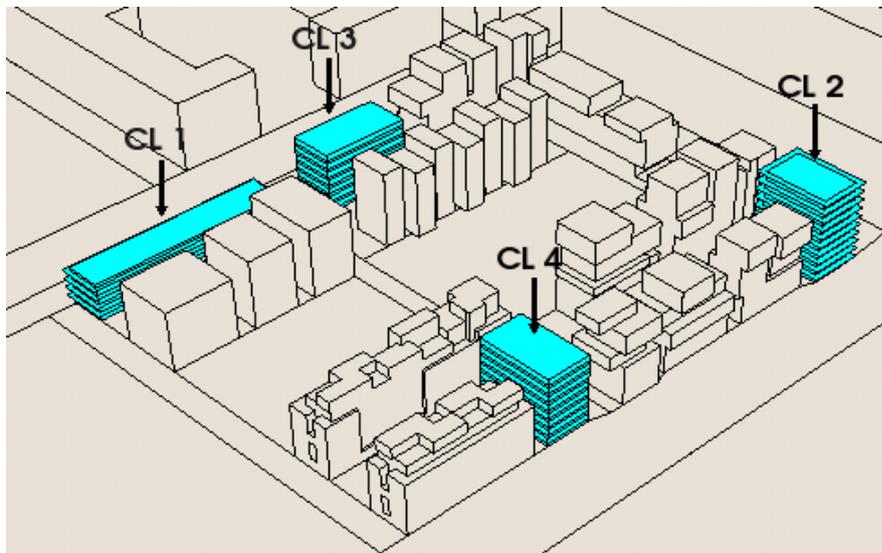


Figure III-11: Repérage des bâtiments simulés.

(Bouyer, 2009, p.210).

Deux points de conclusion peuvent être tirés de cette étude concernant les bâtiments de bureaux et leurs consommations d'énergie :

- Pour les quatre cas, le passage de l'aménagement minéral à l'aménagement végétal diminue les charges sensibles et augmente toujours les charges latentes. Trois des quatre bâtiments bénéficient d'une réduction de consommations. Seul le bâtiment de CL2, peuvent approximativement garantir le confort sans contribution de climatisation dans les deux cas d'aménagement.
- Les charges de climatisations des bâtiments des CL1 et CL2 sont respectées. Celles des CL3 et CL4 ont augmenté. Toutefois, les charges de chauffage pour toutes les classes, à part la 4, sont amplifiées.

Ainsi, le bâtiment de CL4 prétendu être le plus vulnérable au climat d'hiver, annonce les plus basses charges de chauffage. De même, les bâtiments de CL1 et CL3, sont finalement moins performants que le bâtiment de CL2.

Entre aménagement minéral et aménagement végétal, il a été montré que la température d'air peut varier en moyenne sur toute l'enveloppe de 1,4°C et peut atteindre 10°C au niveau de certains emplacements. Quant aux écarts de température de surface en été, ils ont atteint 3°C pour toute une journée.

Synthèse

En végétalisant les aménagements, les charges de climatisation ont systématiquement baissé en période estivale pour les bâtiments les moins performants en été. Néanmoins, les puissances latentes sont plus importantes en végétalisant l'environnement limitrophe d'un bâtiment, car la baisse de température d'air a mené à un taux élevé d'humidité relative, et aussi les plantes reproduisent un taux d'humidité additionnelle dans l'air en la présupposant bien arrosée. Pour la période hivernale, il est difficile d'énoncer des conclusions globales puisque deux bâtiments demeurent insensibles aux réaménagements végétaux. Les deux autres classes de bâtiments étaient influencées par les modifications urbaines ; ainsi pour le bâtiment de CL1 l'aménagement végétal diminue les consommations de chauffage, tandis que pour le bâtiment de CL4, l'ICU favorable en hiver donne raison à l'aménagement urbain minéral.

Par ailleurs, étant donné l'espace limité disponible pour la végétation dans les villes, de nombreuses solutions sont utilisées pour augmenter l'offre en surfaces en habillant l'enveloppe des bâtiments (toitures, façades et balcons). L'étude menée par Alexandri et Jones (2008) a pour objet l'évaluation de l'effet des toitures et murs végétalisés sur le microclimat, le confort thermique et la consommation énergétique pour le cas d'un canyon urbain méditerranéen à Athènes.

Les auteurs utilisent un modèle bidimensionnel développé dans le langage de programmation C++, pour simuler l'impact thermique de la végétalisation des trois faces d'une rue canyon.

Le modèle a été mis en œuvre conjointement avec Ecotect⁷ pour les calculs radiatifs et un code CFD WinAir4⁸ pour la simulation du transport aéraulique. Une étude paramétrique faisant varier l'emplacement géographique, le rapport d'aspect et l'orientation de la rue ainsi que la direction du vent a été effectuée.

Le modèle considère que les flux verticaux de chaleur et d'humidité sont proportionnels aux différences verticales de température et d'humidité dans la canopée végétale. Ainsi le couvert végétal dont l'homogénéité spatiale n'est qu'horizontale, est discrétisé selon la verticale. La précipitation et l'irrigation ne sont pas tenues en compte. Le modèle est validé par des mesures expérimentales. La géométrie typique d'un canyon urbain est étudiée selon trois ratios H/W, deux orientations, et deux directions du vent (Figure III-12). Cette importante étude est conduite pour neuf villes (Tableau III-2).

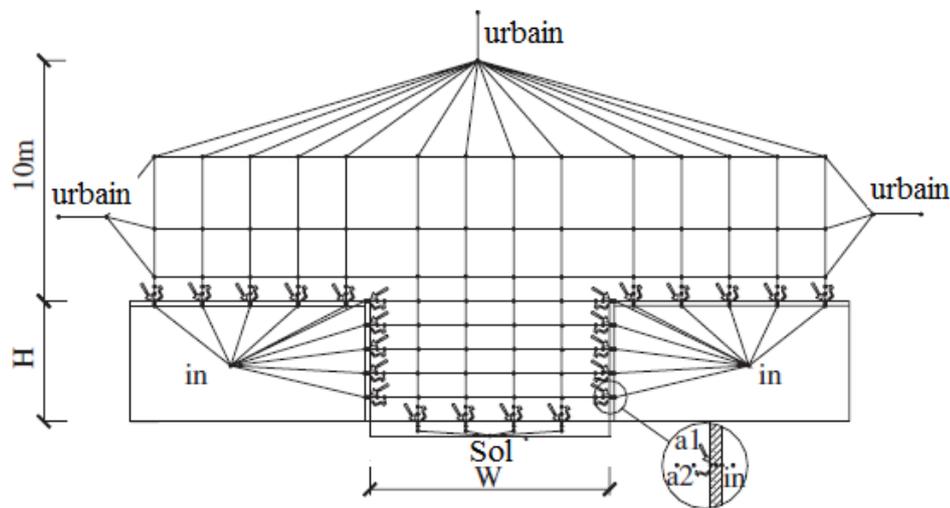


Figure III-12 : Maillage du modèle bidimensionnel du canyon.

(Source : Alexandri et Jones, 2008, p.2)

⁷ **Ecotect** : est un outil d'analyse de conception conçu par le Dr. Andrew Marsh de la compagnie Square One Research. Ce logiciel offre un large éventail de fonctionnalités; le tracé de l'ombrage, l'éclairage, l'acoustique et l'analyse du vent, ainsi que la thermique. Il utilise CIBSE Admittance Method (Chartered Institution of Building Services Engineers) en Irlande pour calculer les charges de chauffage et de refroidissement pour les zones d'un bâtiment donné. Les facteurs des charges sont des gains solaires directs et indirects, les gains internes, les gains inter-zonaux, et le flux de chaleur inter-zonal (Gezer, 2003). Il peut afficher des températures horaires internes et ainsi que des distributions annuelles de température. Les fonctionnalités d'analyse de consommation d'énergie, d'eau et d'émission de carbone intègrent des outils permettant de visualiser et de simuler les performances d'un bâtiment (<http://www.squ1.com>).

⁸ **WinAir4** : est un logiciel 3D de simulation CFD développé par le CRIBE (The Centre for Research in the Built Environment) de l'Ecole d'Architecture Galloise à l'Université de Cardiff-Pays de Galles. Il utilise les modèles de viscosité fixe, avec une variation sur un schéma de solution simple (WinAir4, 2003).

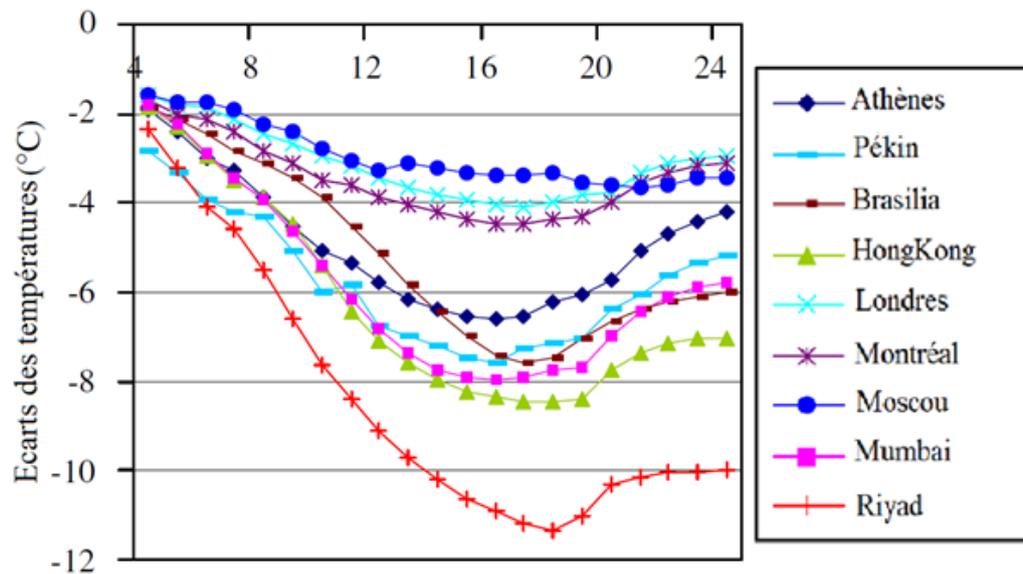
Tableau III-2 : Climat des villes étudiées (Source : Alexandri et Jones, 2008, p.4)

Villes	Climat
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Londres, Royaume uni ▪ Montréal, Canada ▪ Moscou, Russie ▪ Athènes, Grèce ▪ Pékin, Chine ▪ Riyad, Arabie saoudite ▪ Hong kong, Chine ▪ Mumbai Inde ▪ Brasilia, Brésil 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempéré ▪ Subarctique ▪ Continental été frais ▪ Méditerranéen ▪ Steppe ▪ Désertique ▪ Humide subtropical ▪ Foret pluvieux ▪ Savane

De plus, quatre scénarios de végétalisation de l'enveloppe des bâtiments sont pris en considération :

- **Modèle de base** : les toitures et les murs sont minéraux.
- **Toitures vertes** : les toitures sont végétalisées.
- **Murs verts** : les murs à l'intérieur du canyon sont végétalisés.
- **Le tout vert** : pour ce dernier cas, les toitures et murs sont végétalisés.

La Figure III-13 montre la baisse des températures de l'air d'une toiture verte pour les neuf villes étudiées, et pour le cas du tout vert. La simulation des réductions de température d'air dans une rue canyon, par la végétalisation des façades et des toitures par lierre grimpant, est menée pour les différents climats avec des résultats allant de 9,1 °C à 1,7°C sur la moyenne journalière respectivement pour Riyad et Londres. Les meilleures performances étant réalisées pour les climats arides et pour une configuration où toits et façades sont recouverts (Alexandri et al. 2008) avec une nette diminution pour l'air au dessus des toits.

**Figure III-13 :** Baisse de la température de l'air du canyon pour les différentes villes étudiées

(Source : Alexandri et Jones, 2008, p.7)

Il a été démontré que plusieurs paramètres pouvaient influencer la réduction de la température exercée par la végétalisation de l'enveloppe à l'intérieur du canyon et au-dessus des toitures :

- **La quantité de verdure :** l'ajout des toits verts a un effet significatif sur la réduction des températures de l'air au-dessus des bâtiments et également à l'intérieur du canyon grâce au déplacement de la masse d'air rafraîchi.
- **L'orientation du canyon :** elle a un rôle comptable dans des réductions de la température dues à la végétation en fonction des quantités du rayonnement solaires reçues par les plans verticaux. Ainsi, la diminution maximale enregistrée est de 2.6°C pour les canyons orientés "est-ouest" alors qu'elle est de 3.2 °C pour l'orientation "nord-sud", ceci est justifié par le fait que la quantité du rayonnement solaire reçu par les façades orientées vers l'est et l'ouest est plus importante par rapport à celles qui sont orientées vers le nord et le sud.
- **La largeur du canyon :** la géométrie d'un canyon a de l'effet sur la température; plus il est large, plus l'effet des toits et des murs verts sur sa température diminue.
- **La direction du vent :** tout en étant lié à la végétation, ce facteur est important pour la distribution de la température dans le canyon.

La Figure III-14 montre les taux de réduction des charges de climatisation, avec une température intérieure de 23°C, pour les cas du "tout verdi" (t v) et des "murs verdis" (m v) de tous les climats étudiés.

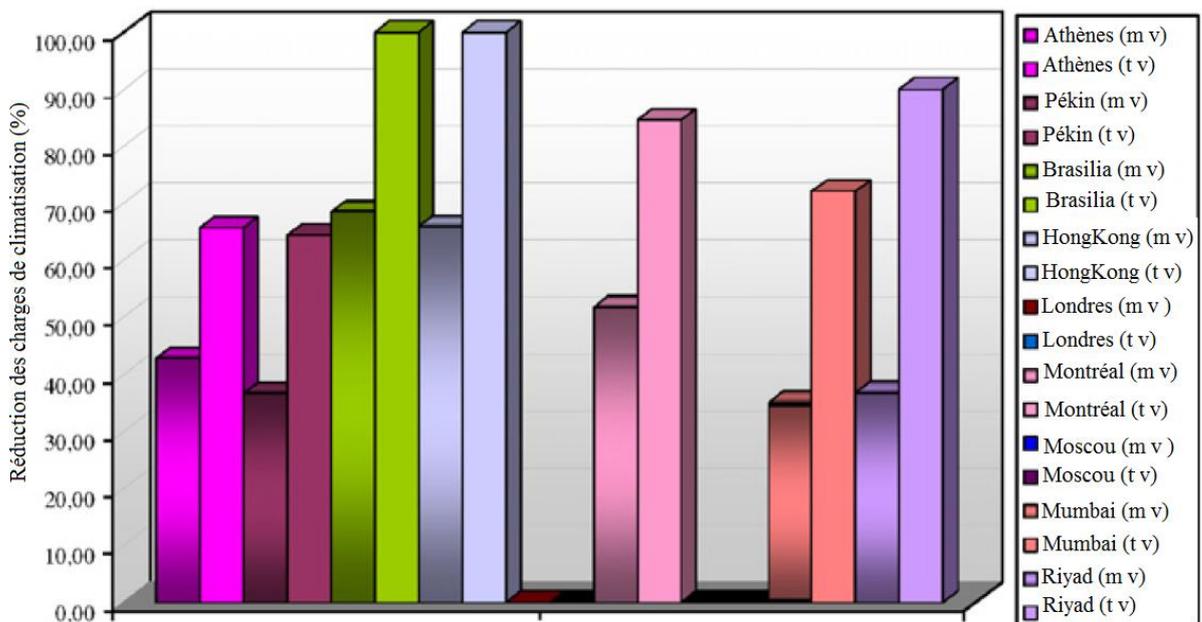


Figure III-14 : Taux de réduction des charges de climatisation, avec une température intérieure de 23°C, pour les cas du "tout verdi" (t v) et des "murs verdis" (m v) de tous les climats étudiés.

(Source : Alexandri et Jones, 2008, p.12).

Les résultats de cette étude montrent que les charges de climatisation diminuent pour tous les climats, notamment dans le cas du "tout vert". Pour les cas des villes de Brasilia et Hongkong, la diminution atteint les 100%. En végétalisant les toits et les murs, on n'a pas recours à la climatisation, tandis que pour le cas de l'absence de végétalisation, on climatise les espaces pendant et en fin d'après-midi. Londres et Moscou ne sont pas affectées par les charges de climatisation même avant l'emplacement de la végétation pour la journée étudiée. Pour les villes de Riyad et Montréal leurs charges respectivement diminuent à 90% et 85%. Mumbai a atteint 72% de réduction de charges de climatisation, au moment ou à Athènes et à Pékin, la réduction est respectivement de l'ordre de 66% et 64%. Pour le cas des "murs verdis", les réductions ont été moins importantes dont la plus élevée est de 68% à Brasilia.

Synthèse

Il a été conclu que les climats chauds et secs favorisent un plus grand rafraîchissement de l'environnement confiné en période estivale. Une ville comme Riyad est susceptible d'avoir une réduction moyenne de température de 9,1°C d'après les résultats présentés (Alexandri and Jones, 2008). Cette étude nous a démontré que la différence entre les économies d'énergie réalisées pour les deux cas (le tout vert et des murs verdis) n'est pas assez importante pour les climats humides (32-37%), alors qu'elle est considérable pour les climats arides (53% pour Riyad). Ces économies peuvent, selon les auteurs, atteindre 37 % pour des bâtiments non isolés, à 48 % avec l'utilisation en sus de la ventilation nocturne. Dans le cas de bâtiments moyennement isolés, cette économie varie de 4% à 7%. Par contre, dans le cas de bâtiments fortement isolés, l'impact est inférieur à 2% (Bouyer, 2009).

Dans le cadre de notre recherche nous nous sommes référés à la méthodologie d'Alexandri et Jones (2008) pour mener une étude paramétrique à l'échelle d'une rue canyon. Le couplage des deux logiciels d'énergétique Ecotect et du logiciel microclimatique ENVI-met fera l'objet de la deuxième partie, au chapitre-IV.

III- 3.2. Apport de l'eau

L'eau contribue au rafraîchissement de la température extérieure de plusieurs manières : fontaines, bassins, étangs, jets d'eau, bassins d'eau vive et même en étant stockée dans la terre végétalisée. L'évaporation est proportionnelle à la surface de contact air/eau. Ainsi, les fontaines et les pulvérisateurs de gouttes diminuent efficacement la température de l'air. Plus les gouttes d'eau sont petites, plus la surface de contact de l'air-eau est grande, ce qui favoriserait l'augmentation d'évaporation. Avec un débit constant, la surface de contact produite par un jet d'eau est 100 fois plus grande qu'avec un pulvérisateur (Lopes et al., 2001).

Une autre étude de Krüger et Pearlmutter (2008) analyse l'impact de l'humidité par évaporation extérieure sur la demande en énergie des bâtiments en ajoutant aux rues entre les bâtiments des bacs d'eau. Ils ont suivi un protocole expérimental en disposant des briques de béton pleines sur un espace plat du désert du Negev, en Palestine, au cours du mois d'Août 2006 (conditions sèches avec échanges négligeables de chaleur latente), (Figure III-15).

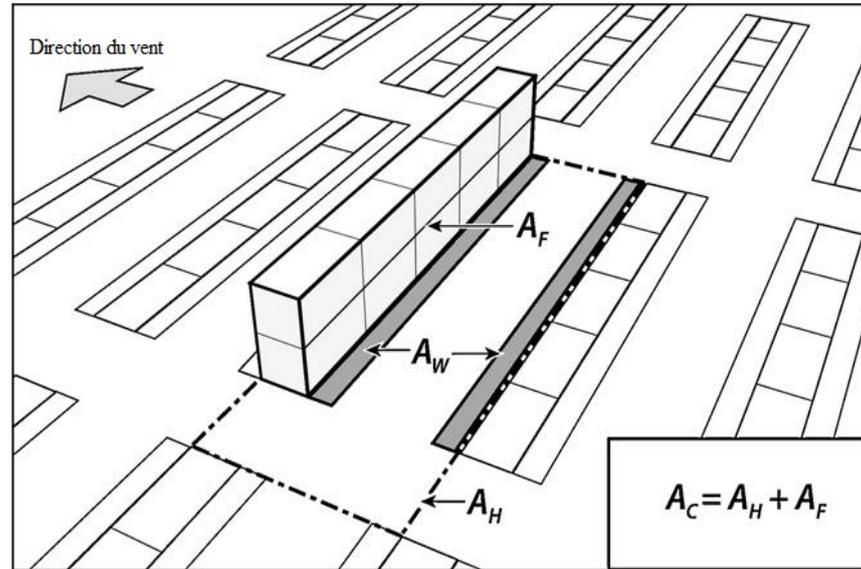


Figure III-15 : Vue la configuration des rangées de rues canyons.

(Source : Krüger et Pearlmutter, 2008, p.3).

La Figure III-16 montre les consommations d'énergie en fonction des surfaces des bassins d'eau. Nous remarquons une diminution significative de la charge de climatisation est obtenue lorsque les bacs d'eau sont ajoutés, et atteint son maximum lorsque l'eau couvre 20 % du plan de masse. Toutefois, cette diminution dépend énormément de la géométrie des canyons urbains ; par exemple, l'addition initiale de 10 % de bacs d'eau réduit la charge de climatisation de 225 kWh à environ 75k Wh dans le cas d'une orientation favorisant l'écoulement du vent (cas 1). Lorsque la hauteur des immeubles est doublée (cas 2), la diminution est plus modeste ($A_W / A_H = 0,1$). Quant au scénario où la surface des bacs d'eau est optimisée ($A_W / A_H = 0,2$), la demande de refroidissement est restée très faible quel que soit la hauteur des immeubles.

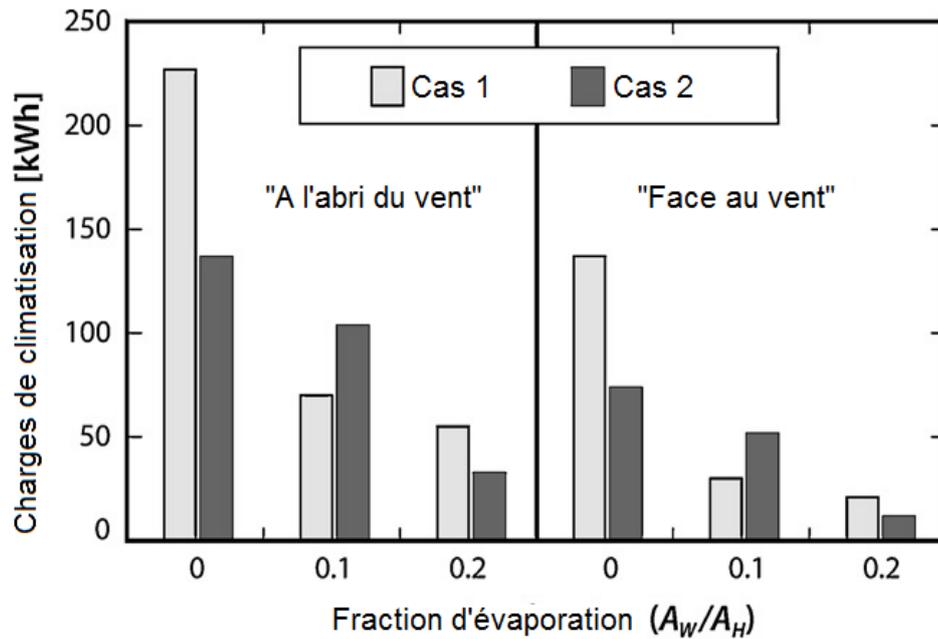


Figure III-16 : Consommations d'énergie en fonction des surfaces des bassins d'eau (Source : Krüger et Pearlmutter, 2008, p.8).

Synthèse

Cette étude propose une maquette de rues canyons, axée sur le comportement de l'ambiance du bâtiment en réponse à un environnement bâti. Ce modèle réduit, est utile pour la reproduction systématique des relations entre l'agencement d'une scène urbaine et les phénomènes physiques interagissant en-dessous et au-dessus de la canopée urbaine. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les indices de confort relatifs à l'orientation et au ratio géométrique des canyons urbains selon les effets du rayonnement solaire et de la convection liée aux vents dominants, dans les espaces extérieurs des zones arides.

Connaissant les expériences déjà menées, nous nous proposons de réaliser une étude paramétrique de rues canyons plus axée sur le comportement de l'ambiance du bâtiment en réponse à un environnement bâti. Le ratio géométrique de l'espacement des rues par rapport à la hauteur des bâtiments H/W devra être égale à 1, de cette manière nous maximisons les apports solaires dus aux inter-réflexions entre les façades du canyon. Cette configuration sera comparée à une autre dont le ratio sera égal à 3 pour assurer des masques solaires importants.

A l'échelle architecturale, Tang et al. (2003) ont proposé un dispositif de bassin en toiture constitué de sacs de toile sur une grille de polystyrène qui flotte sur l'eau (Figure III-17). Les sacs interceptent les apports solaires qu'ils dissipent, ainsi que les flux provenant du bâtiment, en chaleur latente due à l'évaporation de l'eau, convection et rayonnement infrarouge. Ce système est plus performant qu'un

bassin avec une isolation amovible, du fait de la stratification thermique qui se produit dans l'eau. Pour les bâtiments étudiés, les auteurs trouvent une épaisseur d'eau optimale de 20cm. Le dispositif permet d'améliorer la stabilité des températures intérieures.

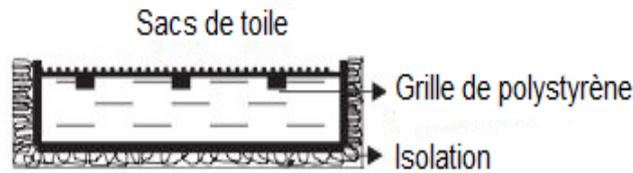


Figure III-17 : Schématisation des constituants d'une toiture-bassin. (Source : Tang et al., 2003, p.2)

Ben Cheikh et Bouchair (2008) ont, quant à eux, conçu un système de rafraîchissement passif destiné pour les climats chauds et arides du sud algérien dans la ville de Laghouat, dont la conception proposée est un toit évapo-réfléctif constitué d'un lit de galets rempli d'eau, le tout recouvert d'une feuille d'aluminium peinte en Titanium blanc pour maximiser la réflectance du rayonnement solaire direct (Figure III-18).

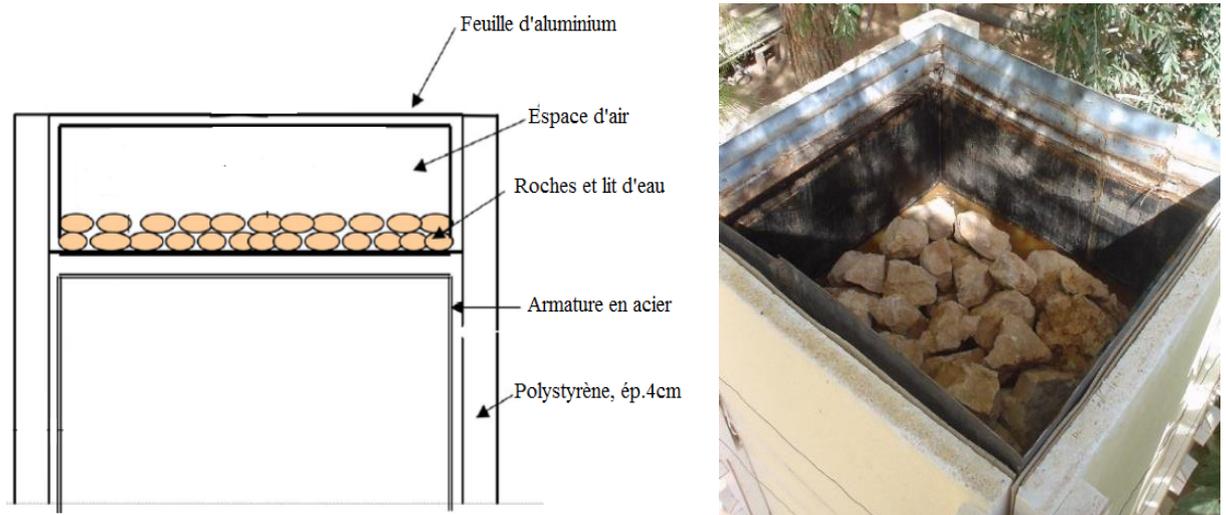


Figure III-18: Le toit évapo-réfléctif ; schéma à gauche et vue photographique à droite. (Source Ben Cheikh et Bouchair, 2008, p.2)

Après une journée d'investigation expérimentale, les résultats donnés en figure III-19, montrent que la température de l'air à l'intérieur de la chambre a diminué de 6 à 10°C, avec une épaisseur optimale de 22 cm pour l'espace d'air. Cette diminution atteint 2 à 3°C lors de la ventilation naturelle nocturne.

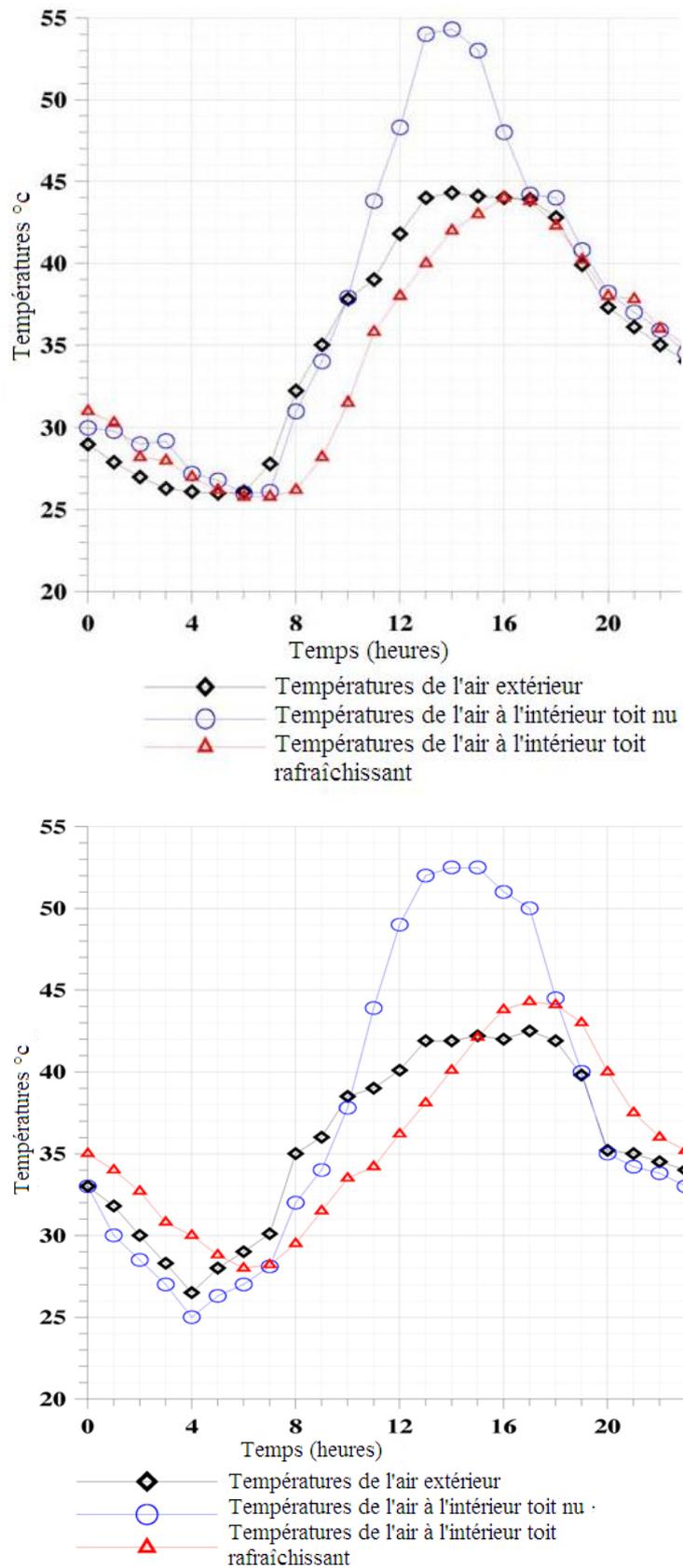


Figure III-19 : Comparaison des températures d'air intérieur sans ventilation en haut, avec ventilation nocturne en bas.

(Source : Ben Cheikh et Bouchair, 2008, pp.4-5)

Ce dispositif permet d'améliorer la stabilité des températures intérieures et la réalisation d'économies d'énergie concernant les charges de climatisation. Une étude plus récente de Kharrufa et Adil (2012) s'est intéressée à la quantification de ces économies en utilisant le logiciel Ecotect V5.2 pour un exemple de toiture bassin réalisé en Irak, pendant la saison chaude pour une durée de six mois allant de mai à octobre, (Tableau III-3). Les résultats obtenus montrent que les charges de climatisation diminuent fortement dans le cas de toiture bassin notamment pour les deux mois de Juillet et Août, où les températures d'air maximales atteignent 48-50°C et où le toit bassin était le plus efficace pour abaisser la température. La pièce sans toit bassin a nécessité 2133 kW de refroidissement par an. Avec le compartiment de toit-bassin, la charge de refroidissement chute considérablement pour atteindre 265 kW.

Tableau III-3 : Données de simulation et comparaison des charges de climatisation des deux cas de toit bassin et toit nu (Source : Kharrufa et Adil, 2012, p.6).

Mois	T°C du toit bassin	Charges de climatisation [kW]	
		Toit bassin	Toit nu
Mai	22.2	18.22	175.53
Juin	29.2	41.63	282.74
Juillet	25	91.39	685.18
Août	25.4	80.08	586.35
Septembre	23.6	29.98	331.84
Octobre	20	2.87	42.79
Total		265.65	2133.10

Synthèse

Les études précédentes ont montré que l'utilisation d'un tel système dans les régions chaudes et arides présentent des avantages certains. Le toit bassin est souvent décrit comme étant "vert" ou "respectueux de l'environnement". Malgré l'importance de ce procédé, les limites de cette étude ne nous permettent de s'étaler plus que ça. Ceci étant dit, pour obtenir une liste exhaustive de toits-bassins, nous pouvons consulter le rapport de Sharifi et Yamagata (2015) qui fournit une mise à jour et une étude comparative de douze configurations de toits-bassins, et l'efficacité de ces derniers est comparée et évaluée avec d'autres systèmes de conception passive tels que les toits réfléchissants, et les toits ventilés. Aussi, les

facteurs affectant la performance de ces toits-bassins sont-ils explorés à savoir : les conditions climatiques, la profondeur d'eau, les matériaux du toit, ainsi que l'épaisseur et l'émissivité de leur couverture.

III- 4. Caractéristiques de l'enveloppe bâtie

III- 4.1. Bâtiments auto-ombragés à façades inclinées

L'ombrage obtenu par l'inclinaison des façades d'un bâtiment (self-shading building) est l'une des stratégies de conception passive adoptée pour minimiser l'impact du rayonnement incident sur les façades d'un bâtiment. C'est un moyen permettant de réduire les gains de chaleur solaire et de réduire la consommation d'énergie pour le refroidissement ainsi que son impact sur l'environnement.

C'est dans ce contexte que Kandar et al., (2019) avaient mené une étude sur l'influence des façades inclinées d'un immeuble de bureaux sur les gains de chaleur solaire et la performance énergétique. Le Bâtiment est situé à Putrajaya en Malaisie caractérisé par son climat chaud et humide. La conception du bâtiment « Diamond » ressemble à une pyramide renversée et avait son sommet enterré. Le bâtiment a huit étages (Figure III-20) dont les façades sont totalement habillées de verre réfléchissant.

Le vitrage du bâtiment a un coefficient de transmission thermique de 0,37 avec une émissivité de 0,16 et un coefficient d'ombrage de 43%, ce qui réduit considérablement les gains de chaleur pour les orientations est/ouest. Le vitrage a également un facteur de transmission de la lumière 52% et une valeur U de 0,072 W/m²K. Le bâtiment Diamond a un coefficient d'ombrage (shading coefficient-SC) de 0,53 pour les orientations nord et sud, un facteur de transmission de la lumière de 55,9%, un coefficient de transmission thermique de 0,46 et une valeur U de 0,956 W/m²K. Il a un ratio de fenêtre/paroi (Window to wall ration-WWR) de 60%.Le bâtiment semblait être entièrement vitré; Cependant, il est recouvert de métal au premier mètre de chaque étage. Ceci est dû au fait que la partie inférieure du bâtiment n'a aucun impact en termes de performance thermique et d'éclairage naturel.



Figure III-20 : Vue extérieure de l'immeuble Diamond en Malaisie.

(Source : Kandar et al., 2019, p.3)

Les auteurs mènent une campagne de mesures *in-situ* durant sept jours du 4 novembre au 16 décembre 2014, pour la collecte des données telle que la température ambiante, l'humidité relative, la rosé et température du bulbe humide. Seul un bureau situé au 4ème étage de l'immeuble, avec une orientation ouest, était équipé d'instruments de mesure placés comme indiqué sur la (Figure III-21 a et b).

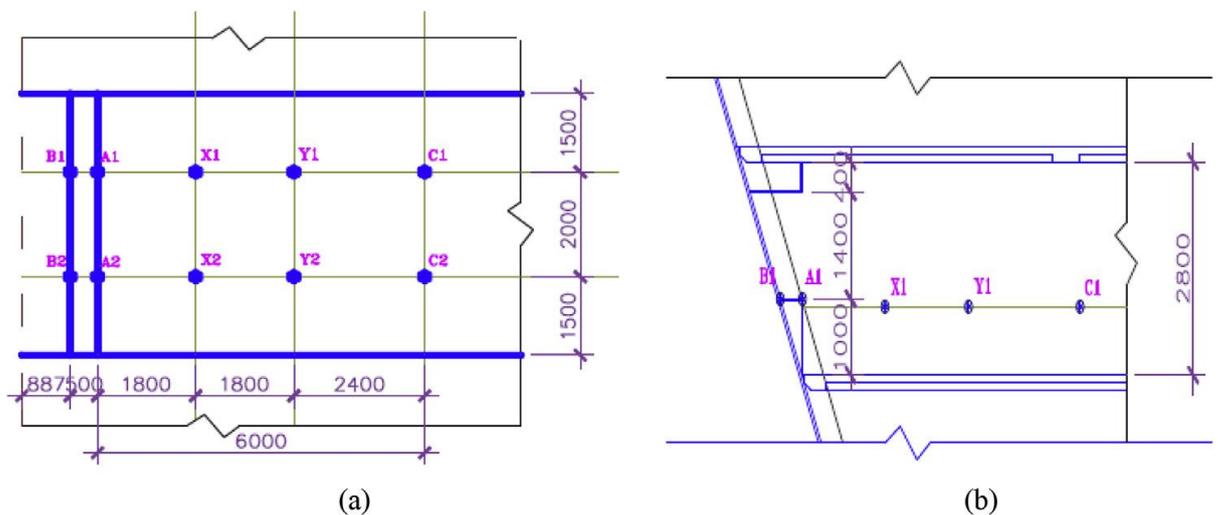


Figure III-21 : Vue en plan (a) et coupe verticale (b) du bureau montrant la position des appareils de mesure.

(Source : Kandar et al., 2019, p.4)

Les auteurs ont également effectué des simulations numériques à l'aide du logiciel ApacheSim pour évaluer les consommations d'énergie impactée par l'inclinaison de la façade. Les simulations sont établies pour quatre angles d'inclinaisons de la façade ; 90°, 75°, 65° et 55° (Figure III-22).

Le bâtiment étudié a une hauteur d'étage de 3.20 m et une projection d'ombrage de 1.50 m inclinée à 65°. La projection auto-ombragée (Self-shading projection-SSP) est donc calculée comme le pourcentage d'un rapport entre les projections ombrées du mur incliné par rapport à la hauteur d'étage. La projection auto-ombragée (SSP) modifiée est obtenue en augmentant et en diminuant l'angle du mur incliné du bâtiment de référence, comme indiqué dans la figure III-22 et le tableau 1, afin de déterminer les performances des façades auto-ombragées pour murs inclinés en vue de réduire les gains de chaleur et la charge de refroidissement.

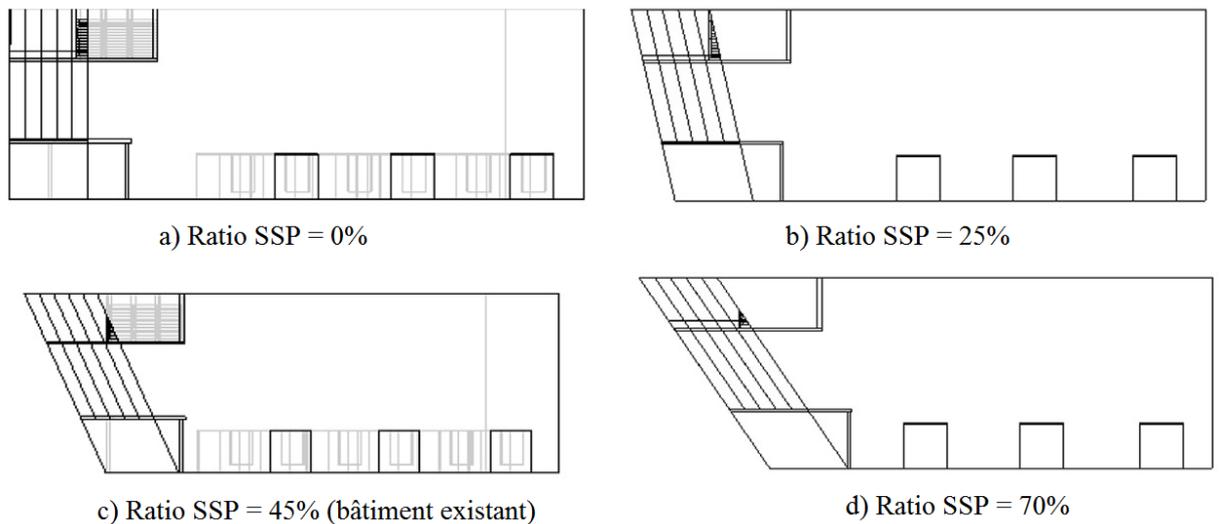


Figure III-22 : Les différentes inclinaisons de la façade étudiée.

(Source : Kandar et al., 2019, p.5)

Tableau III-4 : Les différentes inclinaisons de la façade étudiée.

(Source : Kandar et al., 2019, p.6).

SSP (%)	Projection (m)	Hauteur (m)	Angle d'inclinaison
0	0	3.2	90
25	0.8	3.2	75
45	1.5	3.2	65
70	2.25	3.2	55

ApacheSim est un logiciel de simulation thermique basé sur une modélisation soigneusement élaborée de la conduction thermique à l'intérieur et à l'extérieur des espaces. La simulation ApacheSim fournit une plate-forme pour l'évaluation complète d'un bâtiment, ce qui permet d'optimiser les critères de confort et de la consommation d'énergie.

La figure III-23 donne les valeurs des gains de chaleur moyens à travers les fenêtres et les murs, le transfert du gain de chaleur à travers la fenêtre et le transfert thermique globale pour toutes les projections auto-ombragées. Les gains de chaleur à travers la fenêtre étaient les plus faibles dans le cas du bâtiment existant (SSP-45) et les plus élevés pour le SSP-0 entre 9 h et 16 h. La conduction thermique maximale à travers le vitrage est de 0,47 kW enregistrée pour le SSP-0 à 14h05, tandis que la plus faible est de 0,08 kW pour le SSP-45 à 7h05.

La conduction thermique à travers le vitrage était plus élevée pour le SSP-45 et le SSP-70 que pour le SSP-0 et le SSP-25 entre 7 h et 9 h. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de conduction thermique à travers le mur, ni de gain de chaleur solaire à travers la fenêtre pour SSP-45 et SSP-70, le gain de chaleur enregistré étant égal à zéro. Ceci révèle la capacité des murs inclinés à éliminer les gains de chaleur solaire dans un espace de bâtiment. SSP-0 en revanche a enregistré la conduction thermique la plus élevée. Ce résultat indique que les bâtiments auto-ombragés permettent de réduire les gains de chaleur à la fois par les murs et les fenêtres.

Il est également évident qu'une augmentation de la projection à auto-ombrage (SSP) entraîne une réduction du gain de chaleur, cependant, le bâtiment existant (SSP-45), même si sa projection à auto-ombrage est moins importante mais il présente de meilleures performances que SSP-70 en réduisant le gain de chaleur.

Les résultats montrent une tendance similaire pour SSP-0 et SSP-25 entre 7h05 et 13h05. Une valeur de gain de chaleur négative est enregistrée pour le SSP-0 et le SSP-25 avant 7h30. Il y avait une différence dans la réduction de chaleur d'environ 0,39 kW entre le bâtiment existant (SSP-45) et le modèle mur classique (SSP-0). Il n'y a pas beaucoup de différence entre SSP-45 et SSP-70, qui étaient tous deux nettement inférieurs à SSP-0 et SSP-25. Une faible valeur des transfert de chaleur dans les bâtiments est responsable de la réduction de la consommation d'énergie. Le bâtiment existant (SSP-45) est considéré comme une construction à faible consommation d'énergie.

Comme le montre cette étude, il a été prouvé que le bâtiment Diamond, avec une façade inclinée à 65 ° par rapport au plan horizontal, constitue une stratégie de conception passive idéale pour atteindre une efficacité énergétique.

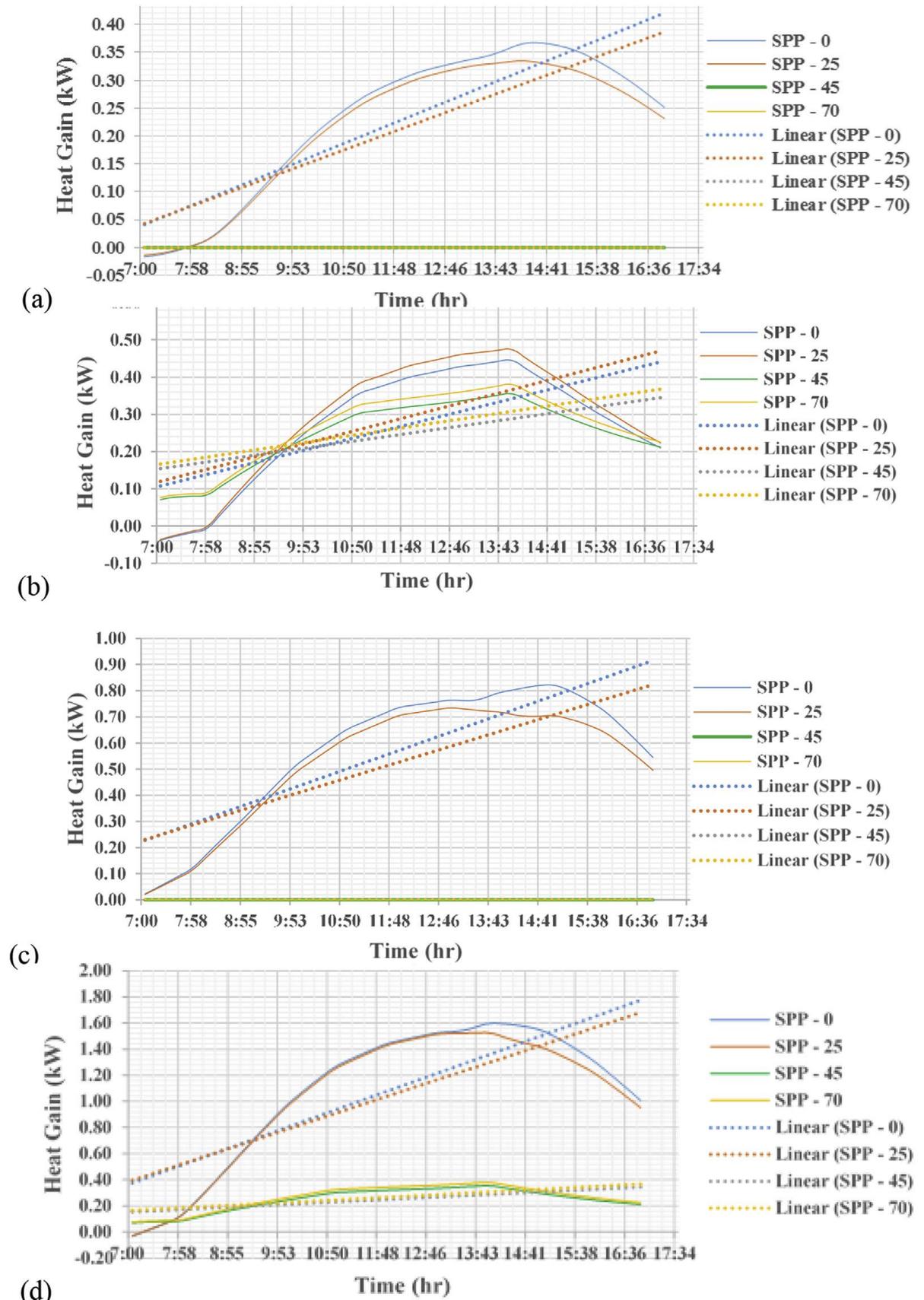


Figure III-23 : Variation du gain de chaleur avec différentes projections d'auto-ombrage. a) Conduction thermique à travers les murs; b) Conduction thermique à travers le vitrage des fenêtres; (c) Gain de chaleur solaire à travers la fenêtre; (d) Valeur globale du transfert thermique. (Source : Kandar et al., 2019, p.9)

Synthèse

Les résultats obtenus par cette étude peuvent être résumés comme suit:

Il existe une relation entre les gains de chaleur dans un espace de bâtiment et la stratégie d'auto-ombrage, car le gain de chaleur tend à diminuer avec l'augmentation de l'inclinaison des façades

Les gains de chaleur sont minima dans le modèle de base (inclinaison à 25°) par rapport aux autres façades auto-ombragées. Cela peut être considéré comme la meilleure solution à adopter pour la stratégie de mur incliné.

III- 4.2. Isolation

La performance thermique de l'enveloppe d'un bâtiment est le facteur principal affectant sa consommation d'énergie (Li, 2010). Ainsi, les murs qui contiennent de l'isolation thermique extérieure peuvent non seulement créer un environnement thermique intérieur confortable (Keboer, 1999 et Chun et Yu Yu, 2004), mais aussi réduire la consommation d'énergie liée au chauffage ou à la climatisation (Chowdhury et al. 2008 et Kazim, 2007).

Kossecka et Kosny (2002) examinent la performance thermique de six configurations de placements de l'isolation des murs dans le programme DOE-2⁹. La consommation d'énergie d'une maison dans six régions climatiques des États-Unis est simulée. Les auteurs ont conclu que les murs avec isolation extérieure ont le meilleur rendement. En revanche, la maison avec isolation intérieure seulement a réalisé le minimum d'économie. Niccolo et al. (2009) analysent l'influence de l'inertie thermique des murs extérieurs sur la performance énergétique des bâtiments isolés. Leurs résultats montrent que les effets d'inertie thermique sont améliorés s'ils sont couplés à d'autres mesures d'économie d'énergie et une utilisation efficace des bâtiments. Wilhelm et al. (2012) étudient l'utilisation de l'isolation des murs dans des villas résidentielles à Dubaï et constatent que la bonne isolation de la paroi extérieure peut atteindre une économie d'énergie de 30%. Wang et Wu (2008) signalent que l'épaisseur de l'isolant économiquement optimale dépend du climat local du bâtiment, du temps de fonctionnement de la climatisation, et du prix de la matière d'isolation.

En effet, notamment dans les régions chaudes, cette mesure (isolation des murs) a tendance à réduire le confort thermique estival, conduisant à une surchauffe durant cette saison. Pour résoudre ce problème, on a recours à l'utilisation des matériaux avec une cavité partitionnée tridimensionnelle. Ces éléments

⁹ **DOE-2** : un programme développé par le Lawrence Berkeley Laboratory à l'Université de Californie aux USA. Il calcule le transfert de chaleur instationnaire, les charges de chauffage et de climatisation, ainsi que les charges de pointe se produisant dans le but de dimensionner les composants à l'aide d'une méthode d'approximation par pas d'une heure, sur la base de données météorologiques réelles (LBL, 1981).

offrent deux principaux avantages: ils ont une isolation élevée et une forte capacité thermique qui augmente l'inertie thermique du bâtiment. Dans ce contexte, Gossard et Lartigue (2013) proposent une méthode, dite « nouvelle approche », qui consiste à déterminer les propriétés thermophysiques idéales des matériaux de l'enveloppe du bâtiment. Le caractère idéal traduit la capacité d'un tel matériau à utiliser efficacement les variations de la température ambiante et du rayonnement solaire pour maintenir la température d'air intérieure dans l'intervalle de confort thermique sans chauffage ni refroidissement.

A l'échelle de l'élément, les auteurs élaborent un modèle de transferts thermiques permettant de les résoudre en régime permanent et instationnaire au sein d'une cavité partitionnée tridimensionnelle. Après validation expérimentale, une étude paramétrique a été menée afin de mettre en évidence les paramètres influents des transferts thermiques. A l'échelle du bâtiment, une méthodologie d'optimisation de parois a été élaborée pour une maison individuelle. Basée sur un couplage entre TRNSYS et GenOpt¹⁰, cette méthodologie permet de calculer les propriétés thermophysiques optimales de parois extérieures. Enfin, une méthode inverse basée sur une optimisation multi-objectifs est proposée afin de trouver les caractéristiques thermodynamiques et géométriques d'un élément en trois dimensions correspondant à toute résistance thermique et chaleur spécifique volumétrique désirées.

Synthèse

Il y a quelques années, une première approche est utilisée et dite, « approche traditionnelle » qui consiste, à partir de la connaissance des propriétés thermophysiques des matériaux constitutifs de l'enveloppe du bâtiment, à calculer les besoins en chauffage et en froid, puis à déterminer l'équipement de chauffage et le type de conditionnement d'air, et enfin, optimiser les modes opératifs du système HVAC afin de minimiser leur consommation énergétique. Actuellement, la deuxième approche dite "approche nouvelle" et très utilisée par la communauté des chercheurs en sciences de l'ingénieur, en particulier pour les modélisateurs-simulateurs. C'est une méthode statistique d'études paramétriques basée sur une optimisation multi-objectifs de variables définies.

¹⁰ **GenOpt** : Generic Optimization est un programme d'optimisation destiné à la minimisation d'une fonction-objectif évaluée par un logiciel de simulation externe tel que TRNSYS. Il assure la détermination des valeurs de variables choisies qui minimisent une fonction-objectif. Pour ce faire, GenOpt génère automatiquement des fichiers d'entrées pour TRNSYS. Ces fichiers sont basés sur des modèles préétablis (Template) de fichier d'entrées de TRNSYS. GenOpt exécute TRNSYS, récupère la valeur de la fonction-objectif à partir du fichier de résultats de TRNSYS et détermine une nouvelle série de variables d'entrée pour la prochaine itération. Ce processus est assuré par un algorithme d'optimisation. GenOpt propose une librairie d'algorithmes laissant à l'utilisateur la liberté de choisir celui qui convient le mieux à son problème (Wetter, 2009).

III- 4.3. Matériaux à changement de phase (MCP)

Nous avons vu dans le Chapitre-I- la définition des matériaux à changement de phase, ainsi que leur utilisation importante à l'heure actuelle. Nous avons même donné une figure comportant le nombre d'article publiés dans ce sens, ce qui est en ascension permanente. Pour cette partie, nous analysons quelques études portant sur l'efficacité de ces matériaux. Pour commencer, Chan (2011) a réalisé une étude dans laquelle il modélise un appartement d'habitation dans la ville subtropicale de Hong Kong. Les murs extérieurs de cet appartement sont dotés de MCP dans le but de comparer les consommations énergétiques avant et après ce procédé. Pour y parvenir, il incorpore un nouvel algorithme au logiciel EnergyPlus pour tenir compte du changement de phase de l'énergie. L'effet de l'orientation des parois avec MCP intégré est également évalué. La paroi externe est composée d'une mosaïque de 5 mm (couche extérieure), 10 mm de ciment, 5 mm couche MCP, 100 mm de béton armé et 10 mm de plâtre (couche interne). Les résultats de l'étude indiquent que l'effet des MCP devient plus important dans le cas des façades Est et Ouest. Une économie d'énergie de climatisation de 2.9% est atteinte dans le cas de la façade orientée Ouest, suivie par 2.2 %, 1.9 % et 1.4 % pour les façades Est, Sud et Nord respectivement.

Ye et al. (2014) évaluent la performance énergétique des MCP en menant une étude expérimentale et numérique. Ils utilisent deux chambres d'expérimentation similaires et une cabine de contrôle pour analyser l'efficacité des MCP dans la réduction des fluctuations des températures intérieures (Figure III-24).

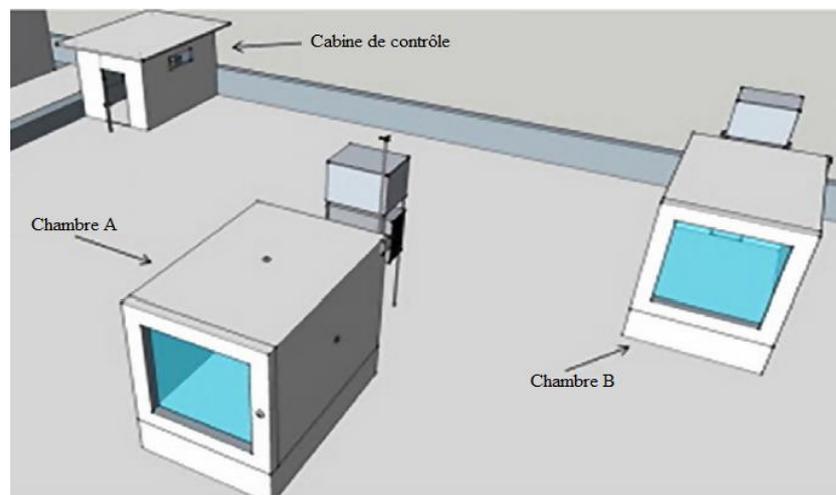


Figure III-24 : Représentation schématique des unités expérimentales et la salle de contrôle. (Source: Ye et al., 2014, p.5).

Sur la base des définitions de l'indice d'économie d'énergie (Energy saving index-ESI) et de l'économie d'énergie équivalente, ils comparent les MCP et le polystyrène expansé (Expanded Polystyrene-EPS) en tant que matériau isolant. La performance des MCP est réalisée pour trois villes ayant des climats différents (Pékin, Shanghai et Guangzhou).

Les ESI des MCP placés du côté intérieur du mur extérieur, nord, et sur la surface supérieure du plancher bas sont représentés en figure III-25 (a) et (b) pour la saison d'été et pour une année entière. Comme on le voit, en été, les ESI des MCP intégrés dans les murs extérieurs étaient inférieurs aux deux autres emplacements (moins de 0,002). Même si les MCP pourraient améliorer les ESI de plus de 0,03 à Pékin et à Shanghai pour une année entière, l'économie d'énergie à Guangzhou n'a pas été sensible et le paramètre ESI pour l'emplacement aux murs extérieurs était négatif. Nous pouvons conclure que l'étude a prouvé l'amélioration du confort thermique par l'intégration des MCP dans le bâtiment.

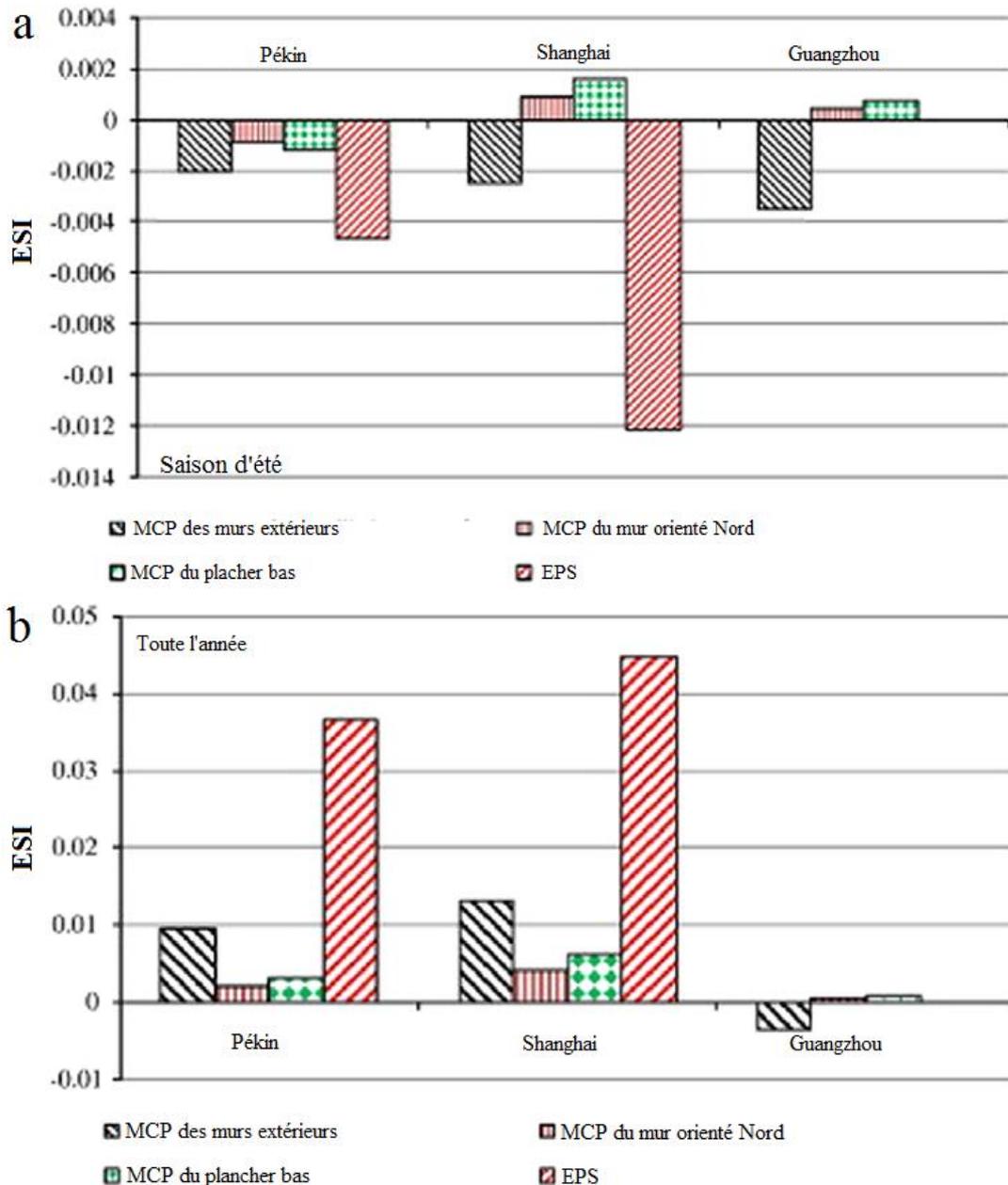


Figure III-25 : Comparaison de l'index d'économie d'énergie (ESI) d'une chambre avec MCP et EPS en Été (a), et sur une année entière (b). (Source: Ye et al., 2014, p.9)

Zhong et al. (2015) mènent une étude expérimentale pour évaluer la performance du transfert thermique dynamique du verre d'une fenêtre (MCPW) pendant deux jours d'été en Chine; un jour ensoleillé et un jour pluvieux. Le flux de chaleur et la température des surfaces intérieures de la fenêtre en verre creux (Hallow glass Window-HW) et la MCPW sont mesurés. En outre, différents MCPWs sont analysés par des simulations numériques CFD pour étudier l'influence des paramètres des MCP, à savoir la température de fusion et la chaleur latente de fusion, sur la performance des MCPW. Les résultats expérimentaux sont présentés en figure III-26 (a) et (b). Les pics de températures sur la surface intérieure de la HW sont de 2,6°C et 2°C plus élevés que les MCPW, les pics de changements de phase de refroidissement sont respectivement de 2 h et 3 h pour les journées d'été ensoleillées et pluvieuses. Les MCPW diminuent la chaleur entrant dans le bâtiment de 18,3 %. La température de fusion comprise dans l'intervalle de 25-31 °C augmente la chaleur latente de fusion des MCP, ce qui entraîne l'amélioration de l'isolation thermique et des effets de changement de phase des PCM (Figure III-26-c).

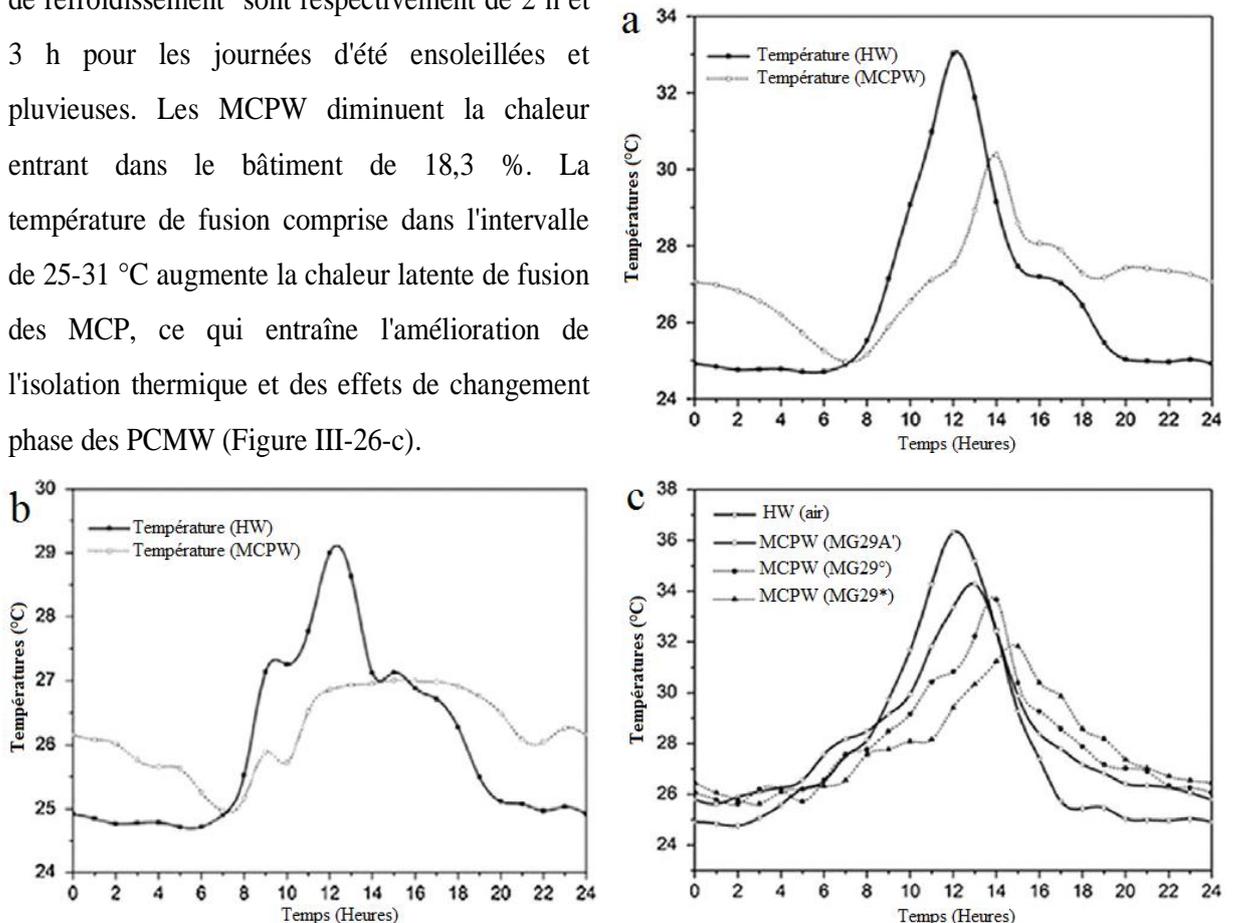


Figure III-26 : Température sur les surfaces intérieures de la PCMW et HW pendant (a) le jour d'été ensoleillé (b) le jour d'été pluvieux, ainsi que (c) la température sur les surfaces intérieures des fenêtres avec différents types de verre pour une journée d'été ensoleillée (Source: Zhong et al., 2015, p.6).

Synthèse

Les MCP sont considérés comme une solution très intéressante pour réduire les consommations énergétiques et améliorer le confort thermique au sein d'un bâtiment. Ils sont utilisés soit pour le chauffage, soit pour le rafraîchissement.

III- 4.4. Matériaux réfléchifs sur les toits

Un grand nombre d'études expérimentales et numériques nord-américaines ont montré l'efficacité de l'utilisation de matériaux réfléchifs pour les toitures, étant donné qu'elles sont les parois de bâtiment recevant le plus de radiation solaire en période estivale. A cet effet, en Californie, Akbari et al. (1997) comparent les charges de climatisation ainsi que le pic de consommation d'énergie de deux bungalows scolaires identiques avec des réflectivités différentes de toit et avaient obtenu 35% d'économies. Akbari et al. (1998) ont également conclu que l'augmentation de la réflectivité des toits de 20% à 60% de bâtiments commerciaux en Californie peut atteindre une diminution de la température des toits dans l'après-midi d'été chaud de 7,2 °C. Dans une autre étude, Akbari (2003) a rapporté des économies d'électricité de 33Wh/m²/jour en augmentant la réflectivité du toit de 26% à 72%, ce qui se traduit par des économies d'énergie annuelles d'environ 125 kWh. Pour la même localisation, Hildebrandt et al. 1998 ont obtenu les économies de climatisation quotidiennes de 17%, 26% et 39% dans un bureau, un musée et un hôpital avec des toits de haute réflectance.

Parker et al. (1994) ont étudié six maisons en Floride avant et après l'application de revêtements à albédo élevé sur leur toit. La réduction des charges de climatisation obtenue est entre 11% et 43% avec une économie moyenne de 9,2 kWh/jour, et la réduction du pic de puissance (entre 17h et 18 h) était en moyenne entre 0.4-1.1kW avec une réduction de 0,7 kW. Ils ont également étudié sept magasins dans un centre commercial en Floride. Après l'application d'un revêtement réfléchissant sur leurs toits, une réduction de 25% d'énergie quotidienne de climatisation et une baisse de la demande de 29% ont été réalisées (Parker et al. 1997).

Akridge (1998a) rapporte que des économies quotidiennes de 75Wh/m² (28%) pour un bâtiment scolaire en Géorgie en peignant son toit galvanisé avec un revêtement acrylique blanc. Le même chercheur Akridge (1998b) a également mesuré une réduction de 33°C de la température de toit d'un bâtiment après l'application d'un revêtement de contrôle thermique. Au Texas, Konopacki et Akbari (2001) enregistrent des économies d'énergie quotidiennes de 11% et une réduction du pic de puissance de 14% dans un grand magasin quand une membrane réfléchissante a été utilisée. Les économies d'énergie dans un immeuble de bureaux dans le Mississippi ont atteint 22% après application d'un revêtement de toiture réfléchissant (Boutwell et Salinas, 1986). A Hong Kong, Cheung et al. (2005) montrent que la réduction de 30% de l'énergie solaire peut atteindre 12% d'économies dans le refroidissement annuel en énergie.

III- 4.5. Murs-rideaux de verre

Bouden (2007), réalise une étude dont l'objectif est de savoir si les murs rideaux en verre étaient appropriés pour le climat méditerranéen tunisien. Pour ce faire, il a mené des simulations numériques sur un bâtiment administratif en utilisant le code de calcul TRNSYS pour l'évaluation des charges de chauffage et de climatisation. Le bâtiment est divisé en cinq zones thermiques selon l'orientation des fenêtres. Seule la façade principale du bâtiment a été simulée avec différents tailles et types de verre. Les autres façades sont restées inchangées. Des simulations horaires ont été effectuées sur une période d'une année en utilisant les données météorologiques de Tunis, et les consommations quotidiennes d'énergie thermique du bâtiment ont été calculées. Les consommations énergétiques du bâtiment ont été étudiées pour quatre orientations de la façade principale : Sud, Ouest, Est et Nord. Elles sont comparées pour toutes ces orientations, pour les combinaisons de sept différents types de vitrages (Tableau III-5) et cinq ratios de surface vitrée (20%, 45%, 60%, 70% and 90%).

Tableau III-5 : Les différents types de verre utilisés dans la simulation (Source : Bouden, 2007, p.9).

Description	U_w (W/m ² K)
Simple vitrage, verre transparent	5.8
Simple vitrage, verre teinté (vert)	5.8
Double vitrage transparent + lame d'air : 4mm+12mm +4mm	2.9
Double vitrage : verre transparent+lame d'air+verre teinté : 4mm+12mm+4mm	2.9
Double vitrage : verre transparent+lame d'air+verre réfléchissant : 4mm+12mm+4mm	2.3
Double vitrage : verre transparent+lame d'aire+verre basse émissivité : 4mm+12mm+4mm	1.7
Double vitrage : verre transparent+gaz d'argon+verre basse émissivité : 4mm+16mm+4mm	1.1

Les résultats de cette simulation ont montré qu'en ce qui concerne le chauffage des locaux, le mur rideau en verre peut être très intéressant dans le contexte de Tunis si l'orientation, et ainsi que le type de vitrage sont soigneusement sélectionnés. Ceci dit, le double vitrage avec un verre transparent et un verre basse émissivité rempli d'argon engendre la consommation d'énergie la plus faible. En été, le double vitrage avec un verre transparent et un verre réfléchissant conduit à la consommation d'énergie la plus faible. Sur la période annuelle, le double vitrage avec un verre clair et un verre réfléchissant a la plus faible consommation d'énergie ; elle est suivie par un double vitrage fait d'un verre transparent et une basse émissivité.

Synthèse

Cette étude a montré que les murs-rideaux de verre peuvent être adoptés dans le cas des bâtiments administratifs à Tunis. Ils peuvent être plus intéressants qu'un mur en maçonnerie avec de petites fenêtres couvrant 20 % de la superficie totale de la paroi, si le type de verre approprié est utilisé.

Lartigue et al. (2014) proposent une méthode d'optimisation multi-objectifs de charge de chauffage, charge de refroidissement, et durée de lumière du jour annuelle intérieure. Les variables à optimiser sont le ratio de surface vitrée par rapport à la paroi (Window to Wall Ratio-WWR) et le type de verre, caractérisé par sa transmission lumineuse-TL, le facteur solaire-FS et le coefficient de transmission thermique-U. Les variables peuvent avoir des effets à double impact en produisant un apport bénéfique en hiver pour l'augmentation de gains solaires et la durée de lumière du jour, et aussi, un effet défavorable en produisant la surchauffe en été. La méthodologie adoptée permet d'avoir des solutions optimales d'un tel problème.

Un dortoir existant situé aux USA a été choisi comme cas d'étude. Le bâtiment se développe en cinq niveaux et ayant des pièces identiques. Le calcul est effectué pour une seule chambre devant être rénové, et située à l'étage central du bâtiment, ce qui signifie qu'elle a une seule façade extérieure orientée sud-est, et les cinq autres étant adiabatiques. La consommation d'énergie est calculée en utilisant le logiciel TRNSYS. Les variables considérées dans la méthode d'optimisation sont : six ratios de surface vitrée par rapport au mur (10, 20, 30, 40, 50, et 60%) et treize types de verre dont les propriétés : TL : Transmission lumineuse, FS : Facteur solaire, U est le coefficient de transmission thermique, et t_n est la transmissivité calculé du verre, sont données dans le Tableau III-5.

Tableau III-6 : Propriétés des verres étudiés. (Source : Lartigue et al. 2014, p. 3)

Type de verre	TL	FS	Coefficient U ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	t_n
1	0.137	0.101	2.49	0.149
2	0.236	0.295	2.51	0.257
3	0.285	0.107	0.94	0.311
4	0.441	0.391	2.49	0.481
5	0.596	0.431	0.92	0.650
6	0.604	0.319	1.58	0.658
7	0.630	0.366	1.31	0.687
8	0.630	0.366	0.71	0.687
9	0.702	0.463	0.82	0.765
10	0.702	0.463	1.70	0.765
11	0.744	0.624	2.00	0.811
12	0.786	0.607	3.20	0.856
13	0.814	0.746	2.89	0.887

La Figure III-27 montre toutes les solutions possibles du problème dans l'espace fonction-objectif. Elles sont regroupées sous forme de lignes, chacune correspondant à un type de fenêtre. Chaque point de la ligne correspond à un WWR, ce qui confirme que la variable WWR donne une caractéristique monotone à toutes les fonctions-objectifs, et valide le fait qu'une variation d'1 % de WWR est suffisante et que cette variable n'a pas à être affinée à un nombre infini de valeurs. Cette figure montre également les solutions qui ne sont pas optimales ayant les valeurs les plus élevées des trois fonctions-objectifs.

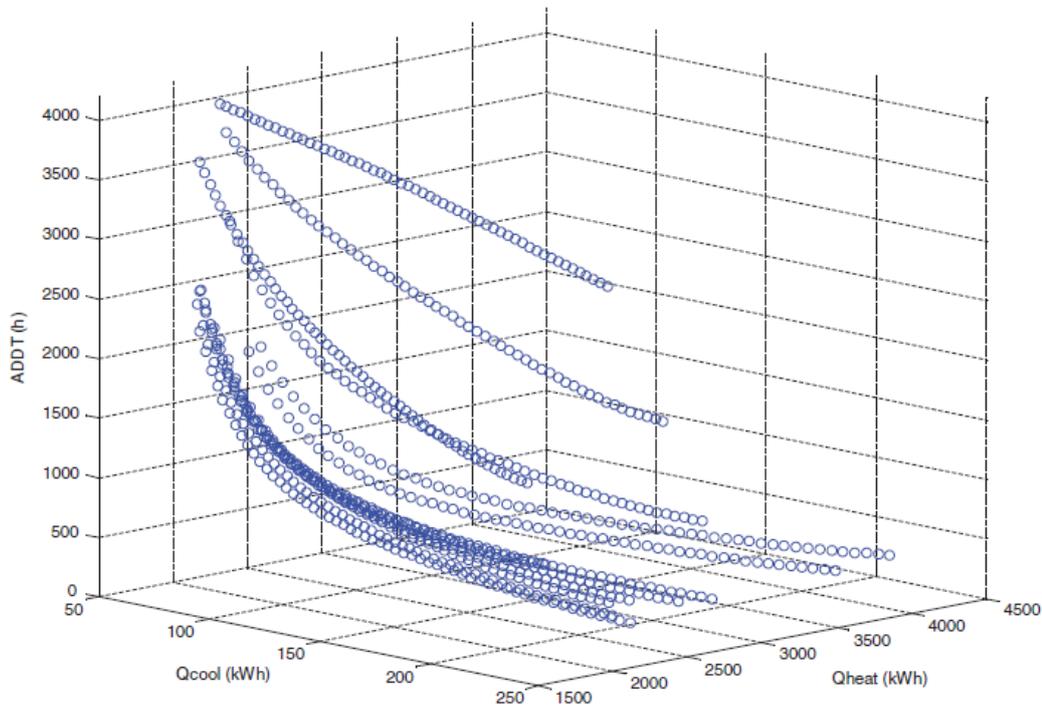


Figure III-27 : Les solutions potentielles (Source : Lartigue et al., 2014, p.7)

La figure III-28 montre les solutions Pareto¹¹ optimales parmi toutes les solutions potentielles précédentes. Ce sont les solutions optimales non dominées avec un objectif sur les trois qui est inférieur à toute autre solution. Cet ensemble de solutions optimales indique que 2 types parmi les 13 fenêtres ne sont jamais optimaux; ce sont les types 2 et 4. Certaines des solutions sont optimales sur toute la gamme des WWR, tels que les types 6, 9, 10 et 11. L'analyse des solutions optimales montre que les types 8 et 13 sont optimaux pour une large gamme de WWR, mais pas sur la totalité de la gamme. Le type 1 est optimal seulement pour les trois valeurs les plus basses de WWR. Enfin, certains types de fenêtres sont optimaux seulement pour une seule valeur de WWR, tels que les types 3, 5, 7 et qui sont optimaux pour le WWR, qui est égal à 10%. D'autre part, le type 12 semble être non-dominé seulement pour le WWR qui est égal à 56%.

¹¹ **Pareto** : est une approche qui retrouve les solutions optimales identiques pour un problème, c'est-à-dire les solutions qui conduisent au meilleur compromis entre les objectifs antagonistes, (Lartigue, 2014).

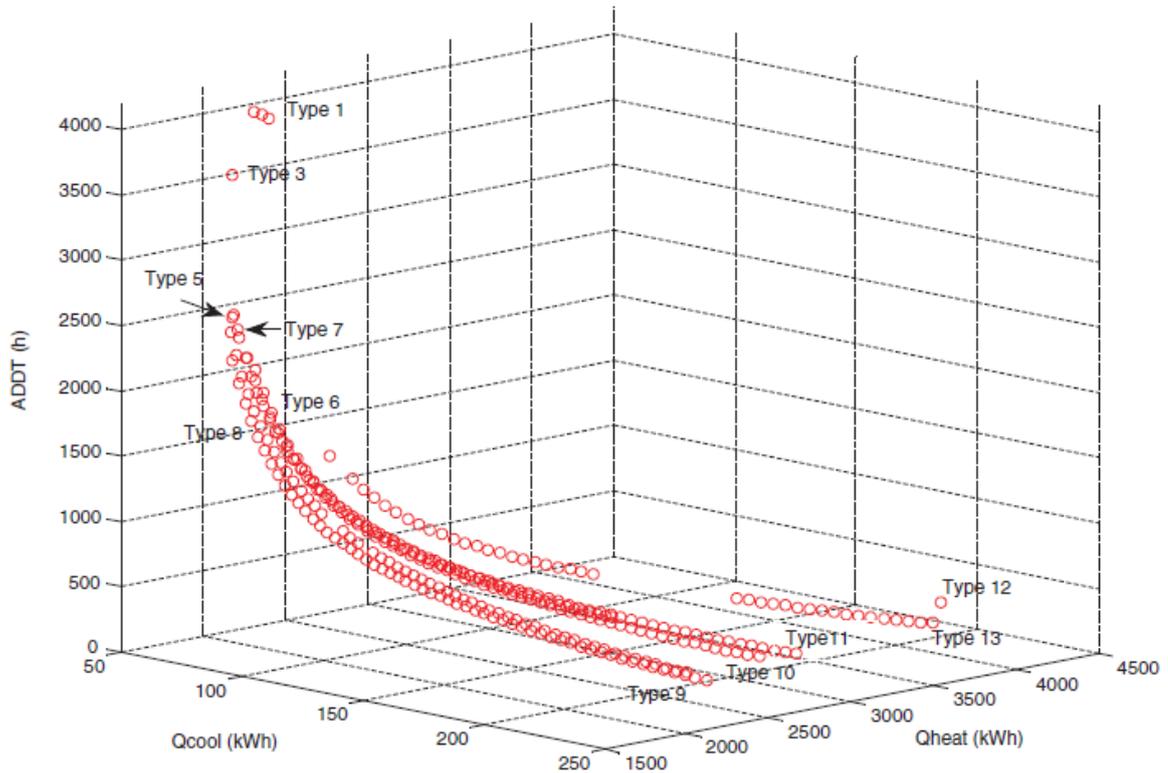


Figure III-28: Solutions optimales obtenues par la méthode Pareto.

(Source : Lartigue et al., 2014, p.8)

Synthèse

La méthode Pareto est choisie, car elle est appropriée pour l'optimisation de plusieurs objectifs antagonistes. Elle permet d'isoler un ensemble de solutions constitué par des simulations qui apportent alternativement une amélioration sur un critère et une détérioration sur un autre. Cet ensemble, que l'on dénomme ensemble de Pareto, peut être facilement isolé par l'application de l'une ou l'autre des deux propriétés suivantes (Lartigue et al., 2014):

- Pour chaque non-membre de l'ensemble de Pareto, il existe au moins un membre de l'ensemble de Pareto dont tous les critères soient meilleurs.
- Pour chaque membre de l'ensemble de Pareto, il est impossible de trouver un autre membre de cet ensemble dont tous les critères soient meilleurs.

Les variables du problème sont le ratio de surface vitrée par rapport au mur WWR, et le type de verre, à savoir les propriétés optiques et les thermiques par le triplet (TL, FS, et Coefficient-U). Cette méthode donne rapidement les solutions optimales d'un problème, et fournit des lignes directrices d'aide à la décision. Le procédé peut être utilisé pour de nombreuses autres études d'optimisation.

L'étude de Lam et al. (2015) a pour objectif de quantifier l'influence de différents types de murs-rideaux de verre sur leur performance énergétique dans le cas des immeubles de bureaux, ainsi que d'établir une base de données servant à l'optimisation de l'efficacité énergétique de ces façades dès la phase de conception, pour le climat froid de Montréal au Canada.

Un espace bureau typique est supposé être à un étage intermédiaire est modélisé dans EnergyPlus. SimLab 2.2, un programme conçu pour l'étude de sensibilité utilisée pour l'échantillonnage. Il est utilisé pour quantifier et classer la sensibilité de la consommation d'énergie finale par rapport aux variations des configurations du mur-rideau. L'analyse de sensibilité globale est utilisée pour quantifier et classer l'importance des différents paramètres sur la consommation d'énergie finale.

Neuf paramètres de conception des façades sont considérés : Le coefficient de transmission thermique du verre (U_{gl}), Le facteur solaire (FS), la transmission lumineuse (TL), le coefficient de transmission thermique des allèges (U_{sp}), le coefficient de transmission thermique du cadre (U_{fr}), le ratio de surface vitrée par rapport au mur (WWR), le taux d'infiltration, et la profondeur et l'inclinaison des brise-soleils.

L'influence de ces paramètres sur le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et la consommation annuelle totale est quantifiée par deux méthodes : Etude d'incertitude et Etude de sensibilité multicritères. Le coefficient de variation obtenu à partir de l'analyse d'incertitude indique la sensibilité de la consommation finale d'énergie par rapport à la variation des configurations des murs-rideaux. L'indice de sensibilité total obtenu par l'analyse de sensibilité globale quantifie l'effet total de chaque propriété sur la consommation d'énergie en tenant compte de l'influence des neuf paramètres suscités.

La figure III-29 montre les coefficients de variation du chauffage, refroidissement, éclairage et l'énergie totale consommée de ce bureau pour chaque orientation cardinale. D'une manière générale, le coefficient de variation est le même pour les quatre orientations pour le chauffage, l'éclairage et la consommation totale d'énergie, et qui est respectivement d'environ 34-38%, 28% et 17-20%. Pour la consommation d'énergie de refroidissement, l'écart est d'environ 55% pour les façades est et ouest, 65% pour la façade sud, et 42% pour la façade nord. Ces résultats indiquent que la variation des propriétés des murs-rideaux a généralement le plus grand impact sur le refroidissement, suivi du chauffage, éclairage et consommation d'énergie totale. la variation des configurations du mur-rideau a beaucoup moins d'impact sur la consommation d'énergie de refroidissement pour la façade nord que pour les trois autres orientations. La conception de murs-rideaux a un plus grand impact sur la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement pour la façade sud.

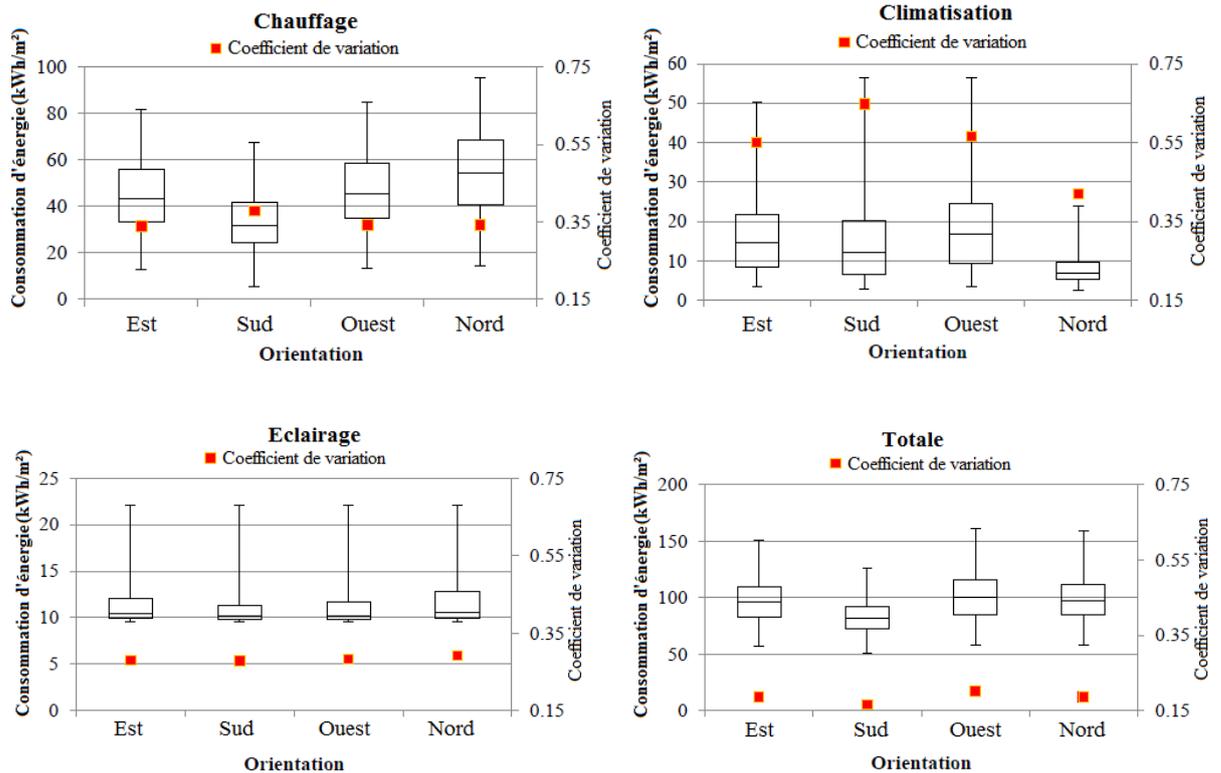


Figure III-29 : Consommation finale d'énergie montrant les valeurs maximales, le quartile supérieur, la médiane, le quartile inférieur et les valeurs minimales et coefficient de variation. (Source : Lam et al., 2015, p4)

L'indice de sensibilité globale est utilisé pour quantifier l'influence des propriétés du verre sur la consommation d'énergie. Les résultats de l'étude indiquent que le rapport fenêtre/paroi (WWR), le coefficient-U du vitrage (Ugl) et le taux d'infiltration sont les trois paramètres qui influent le plus la consommation annuelle d'énergie de chauffage pour les quatre orientations. Le WWR a l'impact le plus significatif avec un indice de sensibilité totale d'environ 0,6-0,8, qui est d'environ 1,1 à 1,9 fois plus élevé que le deuxième paramètre (valeur U du vitrage). Le deuxième et le troisième paramètre les plus significatifs ont des indices similaires de sensibilité totale.

Les paramètres de conception tels que le FS, l'inclinaison, la profondeur des brise-solaires, le coefficient-U du cadre, et la TL ont le même effet sur la consommation d'énergie de chauffage annuelle pour les quatre orientations. L'influence du coefficient-U de l'allège est la moins importante pour les quatre orientations. Le WWR, le FS et la profondeur des brise-soleils sont les trois paramètres les plus influents sur la consommation d'énergie pour le refroidissement pour les façades est, sud et ouest, tandis que pour la façade nord le WWR, le FS et Ugl sont les trois paramètres les plus significatifs. Le WWR a l'impact le plus significatif avec un indice de sensibilité totale d'environ 0,6 à 0,8, qui est d'environ 2,8 à 4,0 fois plus élevé que le deuxième paramètre, c'est-à-dire le FS pour les façades orientées est, sud et

ouest. Pour la façade nord, l'indice de sensibilité totale de WWR est d'environ 0,6, ce qui est 1,5 fois plus élevé que le FS.

Synthèse

L'analyse d'incertitude montre que la variation des configurations de murs-rideaux a généralement le plus grand impact sur le refroidissement, suivi du chauffage, de l'éclairage et de la consommation d'énergie totale. Cette variation a beaucoup moins d'impact sur la consommation d'énergie de refroidissement pour la façade nord que pour les trois autres orientations avec le plus grand impact sur la façade sud.

L'analyse globale de sensibilité montre que le WWR est le paramètre de conception le plus influent sur le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et la consommation totale d'énergie. La méthode appliquée dans cette recherche (The Analysis of Variances -ANOVA) peut être attribuée à d'autres climats, et les données de performance énergétique générées pourraient servir de ligne directrice pour la conception de façade à murs-rideaux de verre sans avoir à évaluer chaque cas de conception.

III- 4.5.1. Façades double-peau (FDP)

Stec et Van Paassen (2005) ont étudié les stratégies de ventilation et leur potentiel de réduction de la consommation d'énergie. Ils ont atteint des résultats très élevés arrivant jusqu'à un écart de 70%. Des résultats allant jusqu'à 93,3% sont réalisés lorsqu'une FDP est comparée à une façade simple-peau (Baldinelli, 2009). Kragh (2001 et 2010) rapporte des réductions numériques dans une gamme de 30-40% dans les deux cas, l'un au Royaume-Uni et l'autre en Belgique. Balocco (2002) a étudié l'influence de la largeur de la cavité sur le potentiel de refroidissement des FDP, constatant qu'une cavité de 35cm conduit à la réduction maximale de 27,5 %. Faggembauu et al. (2003) ont également évalué l'influence de différents paramètres, tels que la position des dispositifs d'ombrage et vitrage à faible émissivité, et ils ont eu une réduction maximale de 27% des gains intérieurs et charges de climatisation.

Larsen et al. (2014) ont proposé deux modèles numériques (BS : Building Shading et WSD Window Shading Device Object) pour simuler le comportement thermique d'une façade double peau végétalisée pour le climat tempéré chaud de la ville de Salta, une ville dans le nord-ouest de l'Argentine. Ils ont montré que le gain de chaleur d'une fenêtre nue orientée ouest est d'environ 6,8 MJ/m²-jour et sa perte de chaleur est 0.8MJ/m²/jour. En couvrant la fenêtre avec une façade végétale la baisse en gain de chaleur peut atteindre 2,1 MJ/m²/jour. Autrement dit, le gain en chaleur est réduit de 63 %. Les deux modèles ont prédit des quantités similaires de réduction de l'énergie de climatisation évaluées à une

différence moyenne de 10 % à 12 %. Une différence maximale de 1.3°C a été calculée entre les températures de surface des verres.

Ces façades contribuent également à la réduction de la charge de chauffage. Perez-Grande et al. (2005) se sont concentrés sur les propriétés thermiques du verre concluant que le choix d'un verre approprié peut réduire la charge thermique jusqu'à 90 %. Baldinelli (2009) a montré que les économies liées à la réduction des charges de chauffage peuvent être supérieures à 65% comparativement à une façade simple peau et simple vitrage. Des résultats similaires ont également été atteints dans des contextes plus larges, comme au Royaume-Uni, où Kolokotroni et al. (2004) ont montré une réduction de 70 % de charges de chauffage. Des réductions significatives de 50 % et 40 % de charges de chauffage ont été respectivement constatées par Pappas (2006) et Andjelkovic et al. (2012), en raison de l'effet de serre lorsque les FDP sont comparées à des solutions simple-peau.

III- 5. Interactions entre microclimat et aménagements

Ali-Toudert (2009) mène une étude paramétrique dans le but d'analyser les rapports entre l'échelle urbaine et l'échelle architecturale en termes de performances énergétiques des bâtiments. Elle étudie plusieurs paramètres urbains (différentes géométries et orientations du canyon urbain : H/W et orientations solaires variables), et aborde différentes propriétés constructives (isolation et inertie thermique, et ratios du vitrage). Dans cette étude trois régions climatiques sont considérées: La ville allemande Mannheim et deux villes algériennes ; chaude et sèche (Ghardaïa) et chaude et humide (Alger). L'auteur adopte la méthode de couplage numérique en combinant deux logiciels : Le logiciel du canyon urbain TEB¹², pour simuler les effets urbains, et le logiciel TRNSYS pour évaluer la demande énergétique des bâtiments. Le bâtiment étudié est supposé être un immeuble de bureaux, de forme cubique et ses dimensions sont 18 m X 18 m X 18 m. Il s'élève à cinq niveaux et comporte dix zones thermiques de part et d'autre des deux façades, séparées par une zone intermédiaire qui limiterait les échanges thermiques entre les zones disposées l'une face à l'autre (Figure. III-31).

¹² **TEB** : Town Energy Balance a été développé pour calculer l'échange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère. Il a été inclu dans le modèle de la surface de l'atmosphère SURFEX lui-même couplé aux modèles de prévision atmosphérique (AROME, ARPEGE) et aux modèles de recherche (MesoNH). TEB a également été couplé aux modèles ARPS américains (pour étudier l'impact sur les orages urbains sur St. Louis, USA, Rozoff et al 2003) et RAMS (Suzat, 2014).

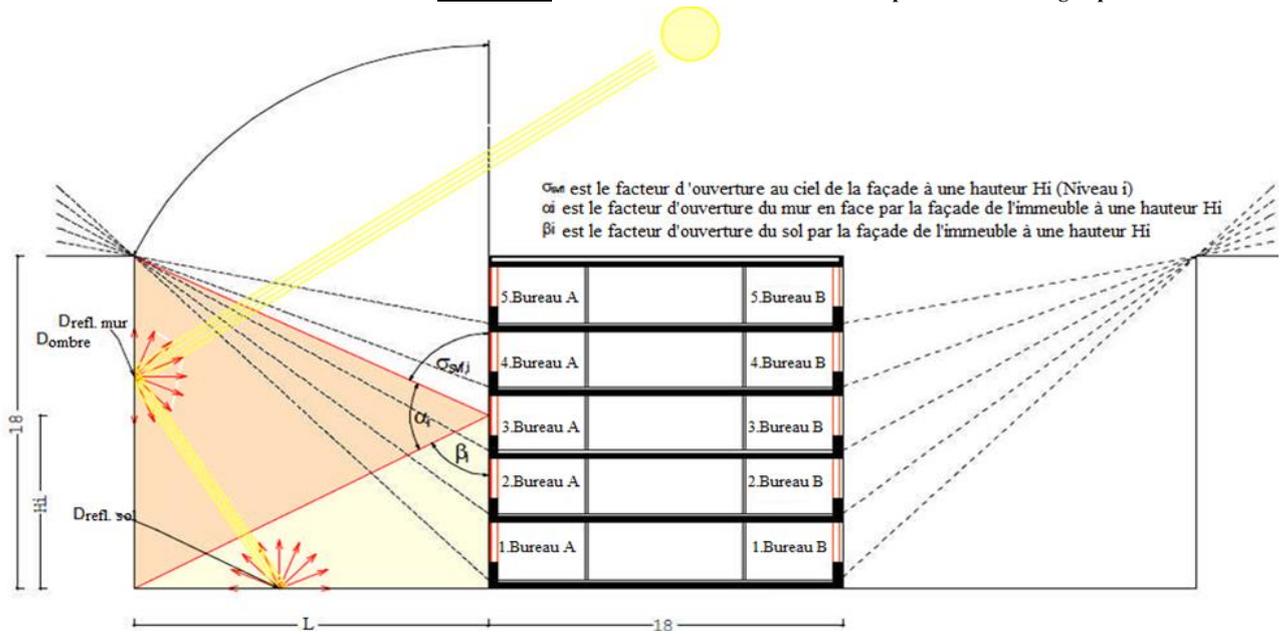


Figure III-31 : Immeuble de bureaux étudié comme simulé avec TRNSYS 16.

(Source : Ali-Toudert, 2009, p.1).

Les charges de refroidissement et de chauffage sont calculées pour les dix zones thermiques pour une période d'une année dans les trois contextes urbains suscités. Les valeurs des variables considérées sont représentées dans le Tableau III-7.

Tableau III-7: Paramètres utilisés pour la simulation des modèles TEB et TRNSYS.

(Source : Ali-Toudert, 2009, p.2)

	ID	Forme codifiée →	-1	0	1
Contexte urbain	A =	Profil vertical	H/L = 0.2	H/L = 1	H/L = 1.8
	B =	Orientation solaire	NS	NESO	EO
Bâtiment	C =	Ratio du verre	30%	60%	90%
	D =	Isolation thermique	$U_{mur} = 0.15$ $U_{fen\hat{e}tre} = 0.7$ $U_{plafond} = 0.10$	$U_{mur} = 0.40$ $U_{fen\hat{e}tre} = 1.5$ $U_{plafond} = 0.35$	$U_{mur} = 0.65$ $U_{fen\hat{e}tre} = 2.3$ $U_{plafond} = 0.60$
	E =	Inertie thermique	Construction légère	-	Construction massive
	Climat	F =	climat	Mannheim: 49.31°N	Alger : 36.24°N

Pour procéder à l'analyse de la base de données obtenue, l'auteur utilise la méthode des plans d'expériences qui permet d'atteindre une meilleure connaissance d'un système avec un minimum d'essais et un maximum de précision sur les résultats. Cette méthode a la capacité de mettre en évidence des phénomènes secondaires comme les interactions entre les facteurs d'influence. Elle est au départ une méthode qui s'impose dans le secteur industriel (Ali-Toudert, 2009), mais elle peut aussi démontrer tout son intérêt dans des recherches s'appuyant sur de lourdes campagnes de mesure ou de simulations. Elle fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience, mais de manière organisée et raisonnée.

Les niveaux des consommations énergétiques présentés dans cette étude concernent les 10 zones thermiques du bâtiment ayant des façades externes. Ces valeurs sont calculées sur une année. La Figure III-32 montre un exemple de calculs de la demande d'énergie pour le climat océanique de la ville de Mannheim, en Allemagne (49.31°N). Les valeurs positives révèlent un effet proportionnel alors que les valeurs négatives signifient l'effet inversement proportionnel.

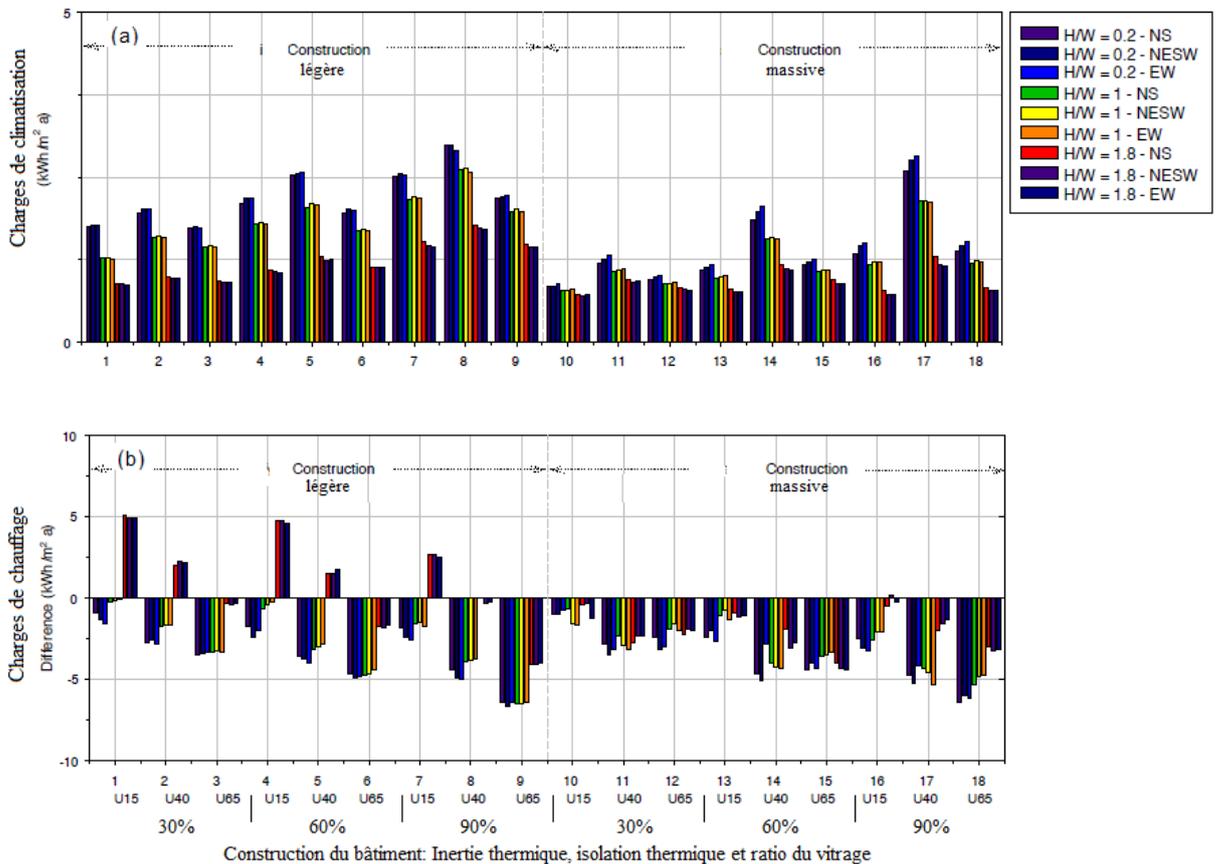


Figure III-32 : Charges de chauffage et de climatisation pour la ville de Mannheim.

(Source : Ali-Toudert, 2009, p.4)

Les résultats obtenus montrent que tous les paramètres ont des effets opposés sur le chauffage et le refroidissement, sauf le paramètre C (ratio du vitrage), qui a pour effet particulier d'élever à la fois les charges de chauffage et de refroidissement lorsqu'il est augmenté. Les besoins en chauffage augmentent avec l'augmentation du rapport H/W, du ratio de vitrage en façades, et avec moins d'isolation thermique. Néanmoins, les besoins de refroidissement diminuent avec les rues les plus étroites, avec moins d'isolation thermique et avec une construction massive. Proportionnellement, les paramètres D (isolation thermique) et C (ratio du vitrage) sont les plus influents sur la demande d'énergie, suivis par le paramètre E (inertie thermique). L'augmentation du paramètre A (profil vertical H/W) conduit à une amplification de la demande totale d'énergie en raison de l'augmentation des besoins en chauffage à cause de

l'ombrage des canyons et des façades des bâtiments, bien que cela réduit les charges de climatisation. Les charges en climatisation augmentent lorsque les effets d'ICU sont inclus, ce qui est plus évident pour le cas d'une construction légère et de faible densité (une forte densité fournit plus d'ombre). Par contre, la demande de chauffage est particulièrement inférieure si le contexte urbain est bien modélisé en raison des températures élevées de l'air extérieur, sauf pour le cas de constructions légères et mal isolées.

Synthèse

Cette étude paramétrique aborde les effets du contexte urbain, des propriétés constructives et du climat sur les besoins énergétiques. La pertinence des valeurs des paramètres étudiés à savoir les températures de l'air en fonction du contexte urbain, y compris la géométrie du profil vertical, la densité urbaine et les propriétés constructives est démontrée. Il s'agit d'une récolte de connaissances par la modélisation numérique appliquée sur un immeuble cas d'étude. Dans le cadre de notre travail, nous avons décidé intentionnellement de conserver les dimensions de ce bâtiment et l'un des ratios $H/W=1$ pour nos simulations. Les plans d'expériences sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la recherche en thermique du bâtiment puisqu'ils permettent aussi de quantifier les paramètres d'entrées par des niveaux, que ce soit des paramètres mesurables ou subjectifs. Les travaux de Gossard (2011) et Bonte (2014) illustrent l'utilisation des plans d'expériences pour caractériser la performance énergétique des bâtiments en fonction de leur construction, du type d'occupation et des équipements de génie climatique mis en œuvre à l'intérieur de ceux-ci. Par conséquent, les plans d'expériences sont une bonne alternative pour les études paramétriques dans notre domaine et pour laquelle nous optons volontairement.

L'étude menée par Allegrini et al. (2012) a pour but de quantifier l'influence des inter-réflexions et de piégeage radiatif en ville sur la demande d'énergie de climatisation et de chauffage des bâtiments. La géométrie simple d'une rue canyon est choisie comme un cas typique d'une configuration urbaine d'une ville. Les flux de chaleur entre les bâtiments sont analysés pour évaluer l'influence des longues et courtes longueurs d'ondes sur le bilan radiatif et sur la température de surface. Trois types de bâtiments avec différentes enveloppes sont analysés. Le premier type, dénommé Nouveau Bâtiment (New Building-NewB), correspond à un nouveau bâtiment bien isolé avec un ratio de vitrage de 50 %. Le second type de bâtiment, appelé Vieux Bâtiment (Old Building-OldB), est modérément isolé avec un ratio de vitrage de 25 %. Le troisième type de bâtiment représente un Bâtiment Rénové (Retrofitted Building-RetroB). Il a le même ratio de vitrage que l'ancien bâtiment, mais il est aussi bien isolé que le nouveau bâtiment. Ces trois types de constructions représentent la majorité des bâtiments qui peuvent être trouvés dans les zones urbaines d'Europe centrale.

Les demandes annuelles de chauffage et refroidissement des locaux pour les trois types de bâtiments dans la rue canyon (Street Canyon-SC) sont comparés avec les demandes d'un bâtiment autonome (Stand Alone-SA). Le rapport d'aspect de la rue canyon est $H/W = 1$. L'orientation du bâtiment dans cette étude est égale à 0° où les façades des bâtiments sont orientées nord-sud (Figure III-33).

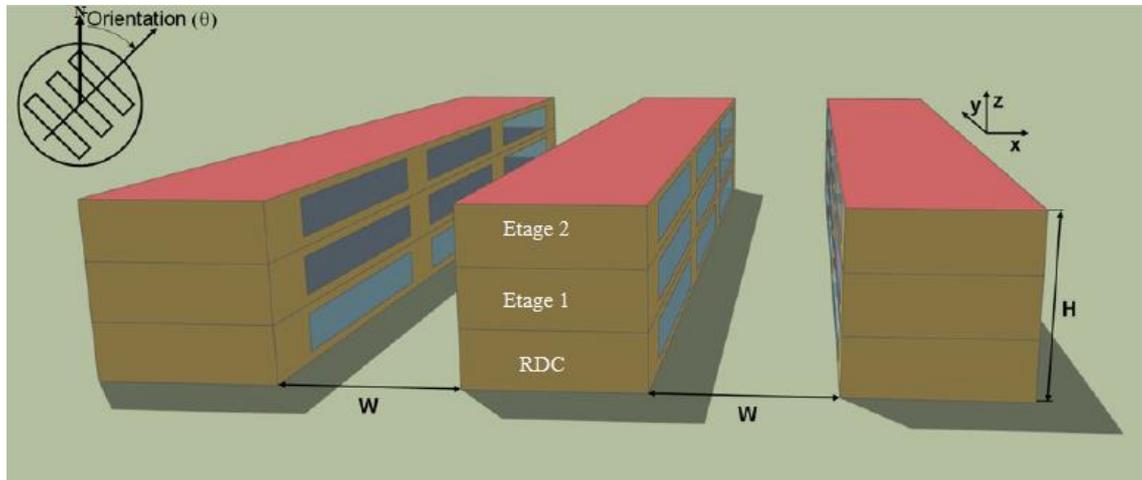


Figure III-33 : L'immeuble étudié entouré par deux rues canyons avec un aspect $H/W=1$.

(Source : Allegrini et al., 2012, p.3)

L'approche choisie pour cette étude est les simulations numériques via le logiciel TRNSYS 17.0 après lui avoir intégré un modèle 3D qui inclut les échanges radiatifs de longues et courtes longueurs d'ondes entre les bâtiments dans le canyon urbain calculés compte tenu des multiréflexions. Les données météorologiques considérées sont pour le bâtiment autonome-SA; les températures de l'air de la station rurale "Bâle- Binningen" sont utilisés, alors que pour la configuration de la rue canyon-SC, la température de l'air est corrigée en utilisant les données mesurées pour la ville suisse Bâle pour tenir compte de l'effet de l'ICU. Afin de simuler l'incidence des enveloppes végétales à l'interface bâtiment-microclimat, un modèle de transport aéraulique à l'échelle de la rue canyon a été développé puis implémenté dans TRNSYS.

Les résultats des consommations énergétiques en figure III-34 sont d'abord discutés pour la configuration SA, qui est considérée comme la configuration de référence. Le Vieux bâtiment OldB montre une demande de chauffage plus élevée que les deux bâtiments NewB et RetroB, ce qui peut être expliqué par la qualité inférieure d'isolation par rapport aux deux autres bâtiments. Les deux bâtiments NewB et RetroB de la configuration SA ont approximativement la même demande en chauffage, bien que leurs ratios de vitrage soient totalement différents (respectivement 50% et 25%). Pour ces types de constructions, les pertes de chaleur par convection à travers les surfaces vitrées sont largement compensées par les gains solaires à travers le vitrage, et par conséquent, les deux types de construction montrent la même demande de chauffage.

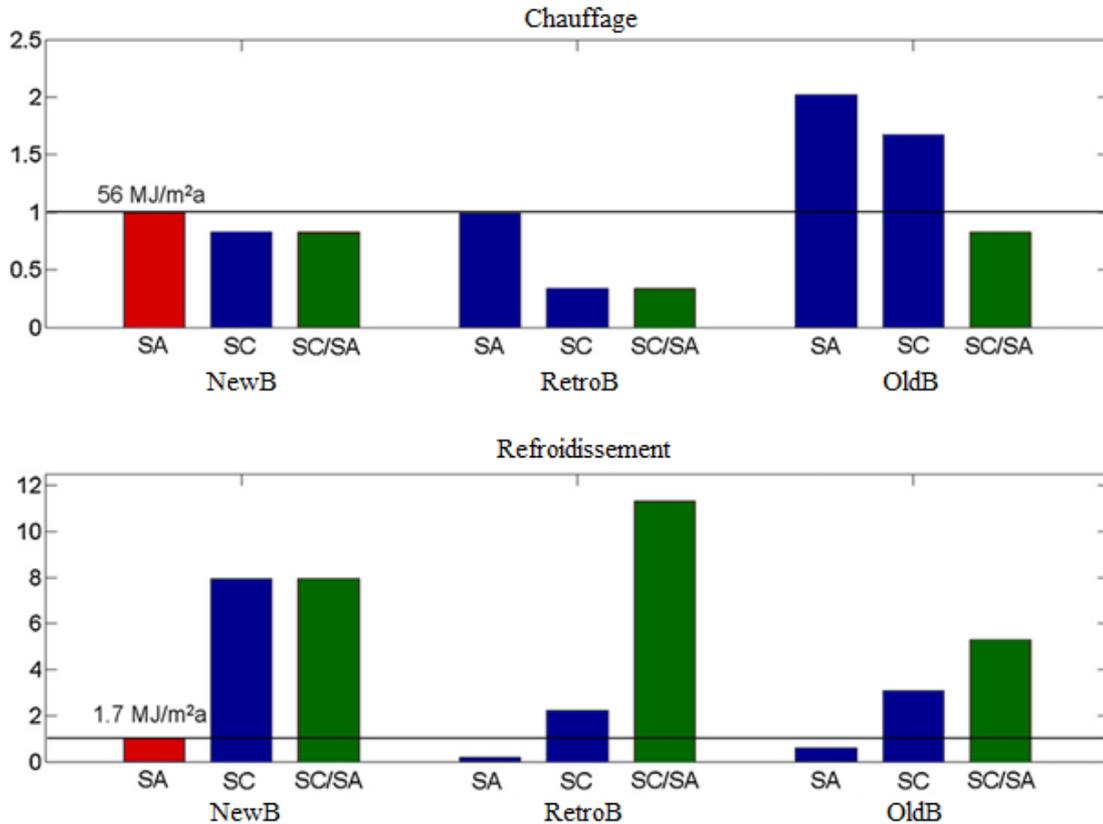


Figure III-34 : Consommations annuelles de chauffage et refroidissement pour les trois types de bâtiments et les deux configurations (SC et SA), (Source : Allegrini et al., 2012, p.5).

Cependant, le ratio du vitrage important du type NewB conduit à une demande de refroidissement plus importante attribuée à l'énergie solaire plus élevée passant à travers le vitrage. La réduction du ratio du vitrage, comme pour le RetroB et OldB, se traduit par des exigences de refroidissement inférieures. Le RetroB, qui est bien isolé, montre la plus faible demande de refroidissement, ce qui peut être expliquée par des gains de chaleur réduits à travers les murs isolés. En comparant les deux configurations SA et SC, une réduction de la demande de chauffage et une augmentation importante de la demande de refroidissement pour les bâtiments sont observées pour la configuration SC. Plusieurs phénomènes urbains expliquent cette observation. La première raison est que le rayonnement solaire est piégé à l'intérieur des canyons urbains, ce qui conduit à des températures plus élevées en façades, et donc à des demandes de chauffage moins importantes et des exigences de refroidissement plus élevées dans la configuration SC. La deuxième raison est que, pendant la nuit, les façades des bâtiments refroidissent moins par rapport à la configuration SA, parce que le rayonnement des ondes longues vers le ciel froid est partiellement bloqué par d'autres bâtiments dans une configuration de SC. La troisième raison justifiant la différence de la demande d'énergie entre SA et configuration SC est que, dans la configuration SC les pertes de chaleur par convection et l'évacuation de la chaleur du canyon sont beaucoup plus faibles en raison des vitesses peu importantes du vent local à l'intérieur des rues canyons.

Et quatrièmement, est qu'en raison du phénomène d'ICU des températures plus élevées se produisent dans la ville, et donc aussi dans les canyons urbains.

Synthèse

On retiendra de cette étude qu'en raison des multiréflexions, plus de rayonnements solaire et thermique est absorbé par les façades de bâtiments longeant les canyons urbains. Ces effets engendrent des températures de surface élevées conduisant à des charges de climatisation importantes de l'espace. D'autres mécanismes, comme les coefficients peu importants de transfert convectif de chaleur, la dissipation réduite de chaleur dans les canyons, et l'effet d'ICU peuvent expliquer ces hausses de températures. Il a été constaté que la demande de refroidissement pour les trois types de bâtiments est plus élevée, et que la demande de chauffage est plus faible pour le cas d'une rue canyon que pour le bâtiment autonome. Pour notre recherche, nous optons délibérément pour cette morphologie urbaine, où un bâtiment délimité par des rues canyons, offre de réelles opportunités d'analyse.

Dans leur étude, Yang et al. (2012) établissent une co-simulation pour l'évaluation de la consommation d'énergie d'un bâtiment en milieu urbain en se basant sur trois programmes: le logiciel du microclimat urbain ENVI-met¹³ (Figure III-35), le logiciel EnergyPlus¹⁴ (Figure III-36) pour la simulation énergétique du bâtiment, ainsi qu'un code de couplage numérique BCTVB (Building Controls Virtual Test Bed) pour transférer les résultats de la simulation d'ENVI-met dans le modèle EnergyPlus. Un bâtiment au centre d'un quartier urbain est choisi comme cas d'étude afin d'analyser les effets du microclimat sur sa performance énergétique. Les simulations se sont déroulées pendant trois jours d'été (10-12 Août) pour le climat tempéré de Francfort (50.05° N, 8,6° E), en Allemagne, et trois jours d'hiver (4-6 Janvier), pour le climat subtropical humide de Guangzhou (23.13° N, 113.23° E), en Chine.

¹³ **ENVI-met** : est un modèle tridimensionnel du microclimat basé sur la dynamique et la thermodynamique des fluides (Bruse, 1999). C'est l'un des rares modèles de l'échelle méso. Le développement du modèle a été lancé en 1995 par Michael Bruse à la Ruhr-Universität à Bochum en Allemagne. ENVI-met est gratuit et fonctionne -contrairement à beaucoup d'autres simulations climatiques- sur un ordinateur standard x86 avec un système d'exploitation Microsoft Windows. Une version qui fonctionne sur les systèmes d'exploitation Unix est également devenue disponible (Huttner, 2012).

¹⁴ **EnergyPlus** : est un programme complet de simulation d'énergie de bâtiment utilisé pour modéliser à la fois la consommation d'énergie - pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage - et l'utilisation de l'eau dans les bâtiments, (<https://energyplus.net/>).

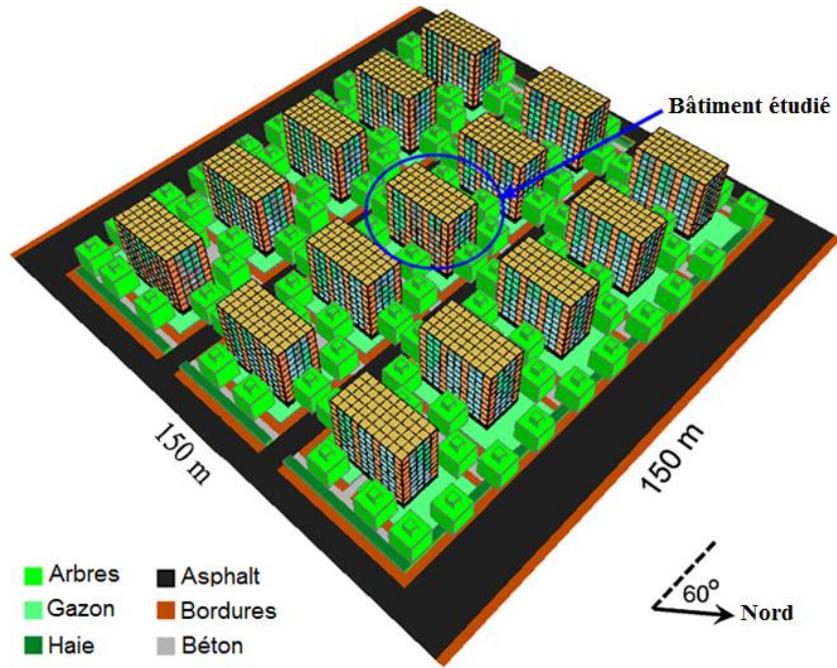


Figure III-35 : Bâtiment étudié et voisinage dans le logiciel ENVI-met.

(Source : Yang et al., 2012, p.5)

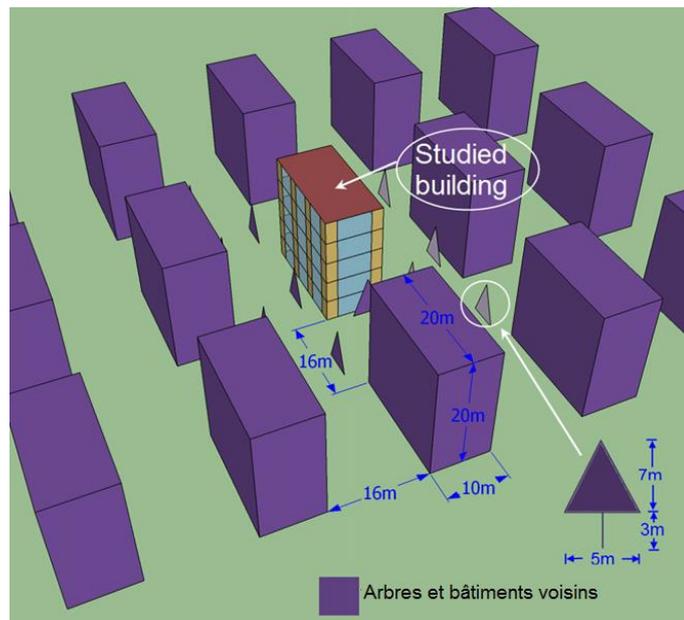


Figure III-36 : Bâtiment étudié et son voisinage dans le logiciel EnergyPlus.

(Source : Yang et al., 2012, p.5)

La Figure III-37 montre les charges de refroidissement horaires sensibles et latentes pendant la période climatisé (08h-18h) pour chaque cas. Il a été observé que la charge de refroidissement sensible pour le cas 1 (bâtiment isolé : sans masques, sans couplage) est beaucoup plus élevée que dans les autres cas (éclipsés par les obstructions environnantes). Cela signifie que la charge de refroidissement sensible

est fortement influencée par l'environnement local. La charge sensible de refroidissement augmente de façon significative pour les cas 3 (avec végétation et couplage) et 4 (sans végétation, avec couplage) par rapport au cas 2 (masques sans couplage). La principale raison qui est à l'origine de ce résultat, est le développement du phénomène d'ICU. La charge latente de refroidissement dans le cas 3 est sensiblement plus élevée que pour les autres cas en raison de l'effet de l'humidification de la végétation. En effet, Bouyer (2009) a montré que la production de l'humidité par la végétation urbaine cause une hausse dans la charge latente de refroidissement des constructions. Par conséquent, l'humidité de l'air devrait être une composante non négligeable du microclimat pour le calcul des charges de refroidissement des constructions situées dans des régions à climat chaud et humide.

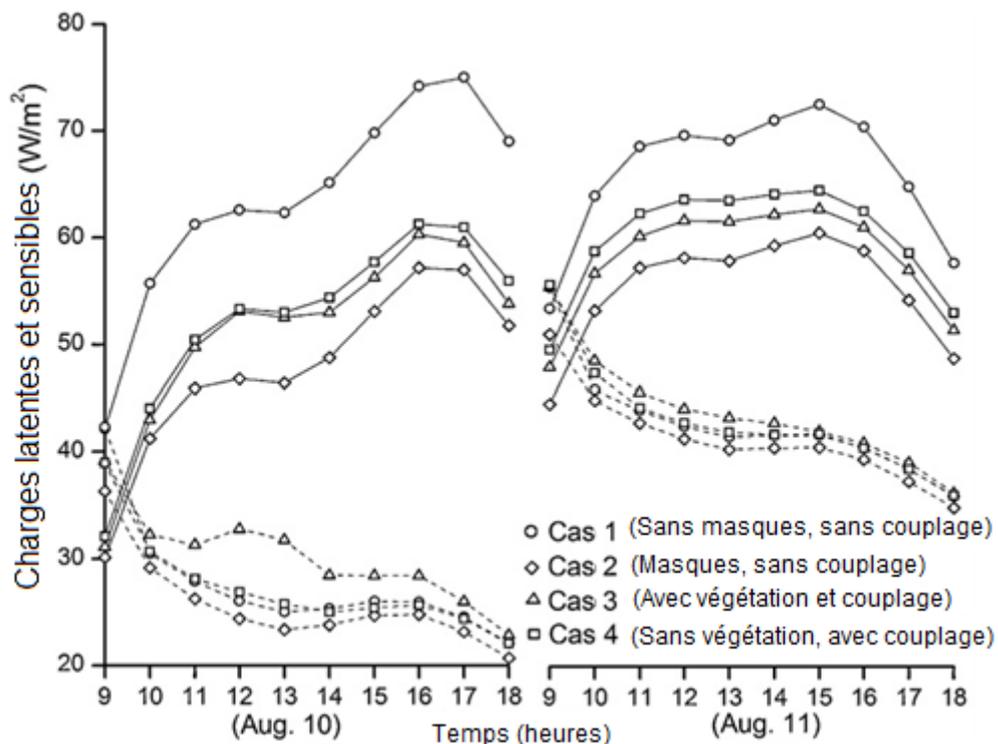


Figure III-37: Charges horaires sensibles et latentes de climatisation pour les Cas 1-4 à Guangzhou. (lignes continues : Charges sensibles ; lignes discontinues : charges latentes), (Source : Yang et al., 2012, p.7)

La figure III-38 représente les charges horaires de chauffage pour le cas d'hiver. Il a été constaté que pendant les jours de la semaine, les charges de chauffage du cas 1 (bâtiment isolé) sont inférieures aux autres cas au cours de la journée avec une température de consigne de 18°C, mais elle est supérieure aux autres cas pendant la nuit avec une température de consigne de 15°C. Ceci est dû au gain de chaleur le jour, et à sa perte pendant la nuit par rayonnement à ondes longues, compte tenu de l'environnement urbain épars. Cependant, la demande de chauffage pour le cas 1 est généralement inférieure à l'autre cas au cours de la journée du week-end (6 Janvier). Les écarts constatés entre les demandes de chauffage

pour le cas 2 (masques, sans couplage) et le cas 4 (sans végétation, avec couplage) sont négligeables, et il n'y a pas de relations claires entre eux.

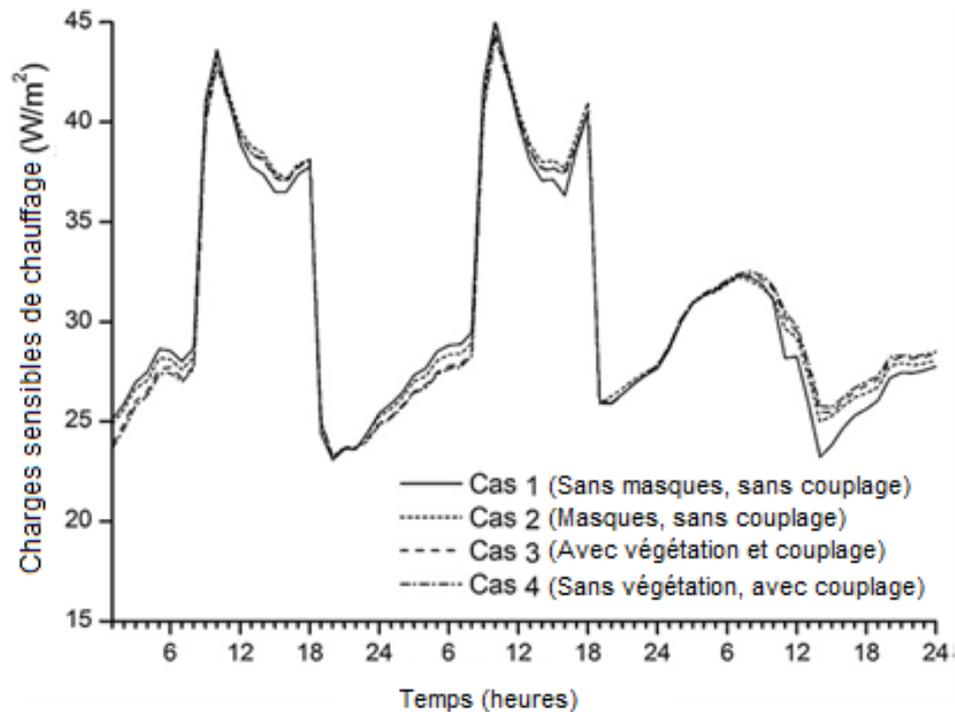


Figure III-38 : Charges horaires de chauffage pour les cas 1-4 à Francfort. (Source: Yang et al., 2012, p.7)

Quelques conclusions préliminaires peuvent être tirées de cette étude. Tout d'abord, la charge de refroidissement d'un bâtiment est fortement affectée par la quantité de rayonnement solaire qui atteint sa surface. Deuxièmement, le transfert de chaleur par convection, induit par le vent aux surfaces extérieures, peut être un facteur important dans les charges de chauffage et refroidissement. Enfin, la chaleur et /ou les transferts d'humidité entre intérieur et extérieur par infiltration d'air entraînent des impacts significatifs sur le refroidissement du bâtiment et ses charges de chauffage.

Synthèse

Plusieurs avantages ont été montrés en reliant le logiciel du microclimat ENVI-met à celui d'EnergyPlus. Cela pourrait fournir une description plus réaliste pour le microclimat urbain. Par ailleurs, le poids de chaque facteur du microclimat peut être évalué sous tous les contextes urbains donnés. Conformément à cette étude, nous avons employé la méthode de couplage numérique en utilisant le logiciel ENVI-met pour la caractérisation du microclimat urbain.

Wong et al. (2011) se sont intéressés à l'évaluation des consommations d'énergie d'un bâtiment en climat tropical à Singapour selon 32 cas de variations de la morphologie urbaine. Afin d'atteindre cet

objectif, l'effet de variation des paramètres de densité du bâti, hauteur et densité de la végétation ont été étudiés. Une série de calculs numériques ont été réalisés à l'aide de deux codes numériques ; STEVE¹⁵ (Screening Tool for Estate Environment Evaluation) pour caractériser les paramètres du microclimat urbain (Jusuf et Wong, 2009) qui a été corrélé avec le logiciel TAS¹⁶ pour simuler les consommations énergétiques du bâtiment étudié. Des variantes telles que le ratio de végétation, la hauteur et la densité du bâti ont considérablement modifié les températures de l'air et ont créé ainsi un microclimat particulier. D'ailleurs le degré d'influence sur la température de l'air a pu atteindre 1,2°C. Chacune de ces variantes a son degré d'influence dont le plus élevé est dû à l'effet d'ombrage des arbres suivi par la hauteur et la densité. Les auteurs ont constaté une réduction de la charge de climatisation de l'ordre de 5-10 % peut être atteinte si les éléments urbains sont agencés avec efficacité (Wong et al., 2011).

III- 6. Conclusion

Afin d'étudier l'impact des microclimats urbains sur les consommations énergétiques des bâtiments, nous avons pris une grande partie de ce chapitre pour sa compréhension à travers plusieurs angles de vue et évaluations réalisées. Nous avons vu que la consommation énergétique des bâtiments est sujette de plusieurs paramètres influents qui sont :

- La performance thermique de l'enveloppe du bâtiment est le facteur principal affectant sa consommation d'énergie ;
- les données relatives à l'environnement immédiat: température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et radiation solaire ;
- les éléments de l'aménagement relatifs aux surfaces et aux vides urbains, comme les arbres, les parcs, l'eau et les matériaux ;
- les interactions entre microclimats et aménagements.

¹⁵ **STEVE** : Screening Tool for Estate Environment Evaluation, développé par le Dr Steve Kardinal Jusuf de l'Université nationale de Singapour, est une application qui calcule la température minimale (Tmin), température moyenne (Tavg) et la température maximale (Tmax) d'un site urbain existant ou fictif. L'outil STEVE, est une application dans un système d'information géographique (SIG) sous une plate forme nommée ArcGIS. Le calcul dans STEVE porte sur les conditions d'une journée calme, ce qui exclut la variable de la vitesse du vent. La carte matricielle produite par STEVE est faite sur la base d'une zone tampon avec un diamètre spécifique. Il est réputé être plus approprié et précis pour les zones urbaines tropicales (Jusuf et Wong, 2009).

¹⁶ **TAS** : est un logiciel de modélisation dynamique de bâtiment incluant le chauffage et la climatisation. Tas est développé par EDSL (Environmental Design Solution Limited) depuis 1989. Tas est constitué de 3 outils : Un modeleur 3D, un module d'analyse thermique/énergie, et un module CFD pour permettre une création dynamique des modèles (www.edsl.net).

Nous avons aussi cité dans ce chapitre un "briefing" sur l'évolution des études et logiciels faits par rapport à la notion du microclimat et ses effets sur la consommation énergétique des bâtiments urbains. D'ailleurs, ce développement a donné naissance à la méthode appelée « couplage numérique » qui est la technique la plus adaptée pour faire face à la fois aux complexités et à la non-linéarité des paramètres microclimatiques urbains avec les différentes caractéristiques thermoradiatives du bâtiment tout en évaluant ses performance énergétiques et thermiques. Cette méthode fait collaborer deux types d'outils :

Les outils de simulation du microclimat : Les logiciels de simulations microclimatiques ont pour objectif d'améliorer la compréhension du climat urbain en tentant de reproduire tout ou une partie du fonctionnement de celui-ci. Ils visent également à évaluer les bénéfices – en matière de climat et de confort thermique – que pourraient apporter différents scénarii architecturaux et urbanistiques. Il est possible de classer les modèles existants en deux groupes selon leur nature. D'une part les modèles physiques, qui visent à résoudre un système d'équation. Ce dernier représente l'équilibre énergétique résultant des transferts de chaleur existant en milieu urbain (Gartland, 2008). D'autre part les modèles empiriques, qui établissent des lois de comportement du climat urbain sur la base d'observations et de mesures. Les modèles empiriques englobent les algorithmes statistiques, les paramétrisations, les formules d'ingénierie et les conceptualisations qualitatives (Svensson et al., 2002). Certains modèles étudient spécifiquement une variable climatique en particulier (par exemple le vent ou la température d'air), d'autres se focalisent sur certains flux de l'équation énergétique urbaine. Les échelles d'étude des modèles existants varient de l'échelle microclimatique à l'échelle mésoclimatique, soit de l'échelle du bâtiment à l'échelle de la région.

Ces logiciels ne peuvent pas prendre en compte toute la complexité de l'environnement urbain. En effet, la morphologie urbaine est complexe et les matériaux utilisés sont très divers. En outre, le traitement de la végétation est également un sujet complexe. Ainsi, les modèles numériques de climat urbain sont une représentation simplifiée du milieu urbain réel (Erell et al., 2011). Par ailleurs, les nombreux paramètres d'entrée des modèles sont parfois eux mêmes l'expression d'une simplification du cas réel. En règle générale, les entrées des modèles sont de trois types, à savoir les paramètres pour décrire le site étudié – concernant aussi bien le bâti que la végétation urbaine, les variables nécessaires pour alimenter le modèle (variables de forçage) et les conditions initiales pour débiter le calcul (Baklanov et al., 2009).

Les outils de simulation énergétique des bâtiments : Il existe plusieurs outils de simulation thermique et énergétique de bâtiments largement utilisés par les ingénieurs et les architectes pour optimiser la conception de bâtiments. Ils offrent des possibilités pertinentes pour l'analyse thermique et

énergétique des bâtiments en un mode dynamique. Le rapport de Crawley et al. (2008) fournit une liste exhaustive mise à jour et une étude comparative de 20 programmes récents de simulation énergétique des bâtiments. De nombreux outils sont efficaces dans toutes leur caractéristiques ce qui appuierait la gamme de simulation. Néanmoins, ils identifient certaines restrictions concernant d'une part l'échange avec d'autres outils de simulation notamment le logiciel de CAO¹⁷, et d'autre part les conditions météorologiques extérieures de ces outils sont généralement issues des observations à long terme de la station météorologique locale, basées sur les statistiques. De plus, ces outils ignorent l'effet de la modification du microclimat ainsi que son interaction avec les aménagements environnants, en dépit de leur influence sur la consommation énergétique et le comportement thermique des bâtiments.

¹⁷ Conception assistée par ordinateur.

Deuxième *partie*

Etude de cas

**IV - Etude expérimentale et numérique
d'un immeuble en verre réfléchissant**

IV- 1.Introduction

Un des objectifs de cette thèse est d'étudier le microclimat urbain autour de bâtiments en verre réfléchissant. Pour le présent chapitre, nous avons mené une étude expérimentale et numérique du microclimat autour d'un bâtiment réel. Dans le chapitre V, nous généraliserons l'étude du microclimat avec une étude de sensibilité multicritère. L'étude d'un cas réel nous permettra de vérifier notre seconde hypothèse portant sur les conditions thermiques particulières autour de bâtiments en verre réfléchissant, au moyen d'une campagne de mesures *in-situ* associée à des simulations numériques afin de mettre en évidence les interdépendances bâti-microclimat-énergie. Nous faisons donc l'investigation d'un bâtiment entièrement en verre réfléchissant dans le climat chaud d'Alger. Ce chapitre sera consacré d'abord à la présentation du cas d'étude, puis nous exposerons les méthodes expérimentales et numériques utilisées. En décrivant l'application de notre méthode à l'étude du microclimat, nous montrons la mise en œuvre des différentes étapes à effectuer et à enchaîner pour mener à bien l'application de cette méthode. Nous souhaitons ainsi, démontrer la cohérence de notre démarche.

Nous cherchons à déterminer les causes de l'apparition des conditions microclimatiques particulières autour des bâtiments de verre réfléchissant, ainsi que leur impact sur la consommation énergétique de ces derniers, dans le cas du climat chaud d'Alger.

IV- 2. Présentation de l'immeuble en verre réfléchissant

IV- 2.1. Choix du type de bâtiment

Dans ce travail, nous réduisons le champ d'étude à une seule classe de bâtiment, celle du secteur tertiaire et plus particulièrement les immeubles de bureaux. Ce choix est guidé par les raisons suivantes :

- Généralement, les ratios de vitrage des façades d'immeubles de bureaux sont très élevés et les besoins d'énergie sont particulièrement amplifiés, notamment pour le cas d'une conception architecturale non passive ;
- La durée d'activation des charges internes (occupants et équipements) est simplement paramétrable, du fait qu'elle est directement associée aux horaires d'activité des usagers, tandis que dans les logements d'habitation, on observe des fluctuations d'un logement à un autre dues aux différences d'appréciation du niveau de confort (températures de consigne personnalisées) et aux différences de niveau d'équipement (électroménager, audiovisuel, etc.), qui sont des sources internes de chaleur.

IV- 2.2. Situation géographique

Le bâtiment étudié est un édifice de bureaux ayant des façades couvertes de verre réfléchissant. A Alger, le mur-rideau de verre a été introduit dans les années 1980 dans quelques projets ponctuels et rares à l'exemple du Ministère du commerce au Ruisseau, l'entreprise CALTRAM et les banques et assurances à Bir Mourad Raïs). Depuis les années 1990, l'engouement pour des bâtiments ayant des façades vitrées, est notable dans le paysage urbain de la ville, à travers de nombreux projets de construction : Ministère des Finances à Ben-Aknoun, cité de la musique à Bab-el-Oued, immeuble de SONATRACH à Hydra), (Chabane, 2006). En plus des questions d'accessibilité favorables à l'installation de différents capteurs de mesure, l'édifice de bureaux abritant le siège social de l'entreprise nationale de la "SONATRACH" (Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures), situé à Djenan Malik, dans le quartier urbain de Hydra, est choisi pour notre étude expérimentale (Figure IV-1).



Figure IV-1: Situation de l'immeuble cas d'étude dans le quartier de Hydra

(Source : Chabane, 2006, p.73)

L'immeuble est situé à côté d'un bâtiment administratif de R+8 au Nord-Est, quatre villas de R+1 au Sud-Est, d'habitations collectives en R+3 au Sud-Ouest, et d'un bâtiment administratif en R+5 au Nord-Ouest. L'entrée principale est située au sud-ouest de l'édifice (Figure IV-2).

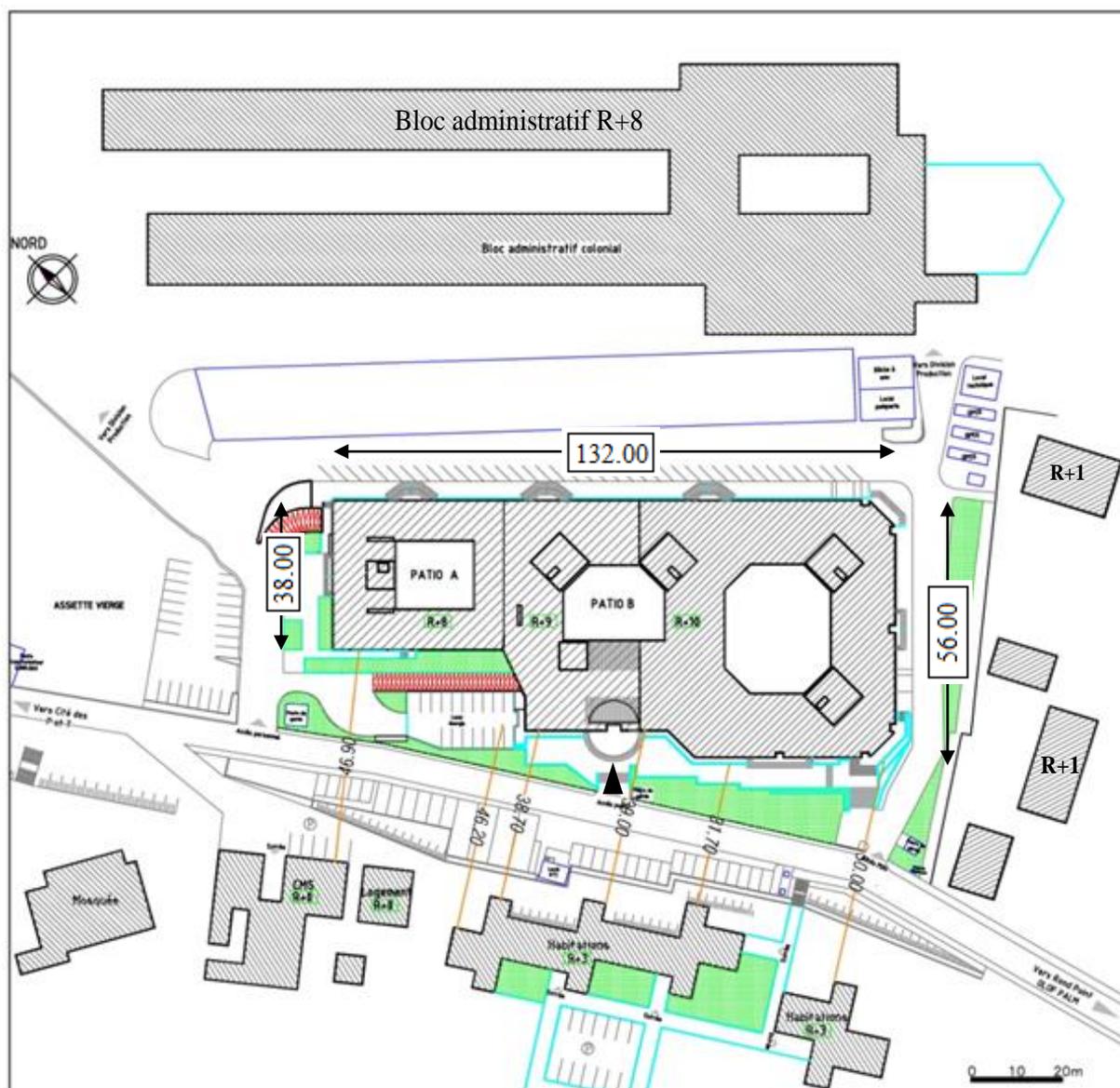


Figure IV-2 : Situation de l'immeuble étudié dans son contexte immédiat.

(Source : Service technique de La SONATRACH)

IV- 2.3. Configuration formelle et spatiale

L'édifice de forme rectangulaire est composé de trois grands blocs accolés, conçus en dégradé. Le plus haut avec 10 étages, puis le deuxième avec 9 étages et le troisième constitué de 8 étages, enserrant chacun un patio central découvert, entouré de façades-rideaux du même type que les façades extérieures (Figure IV-3).

L'immeuble présente également, une surface totale de plancher de 2 756 m², une surface totale d'enveloppe de 24 804 m² (plancher bas compris), et une surface totale de parois vitrées de 14 400 m² dont 3 240 m² réalisée pour les trois patios. Cette construction est de forme parallélépipédique dont les dimensions sont 132 m de longueur, 56 m de largeur maximale et 38 m de hauteur maximale, soit un volume de 206 720 m³ à climatiser.

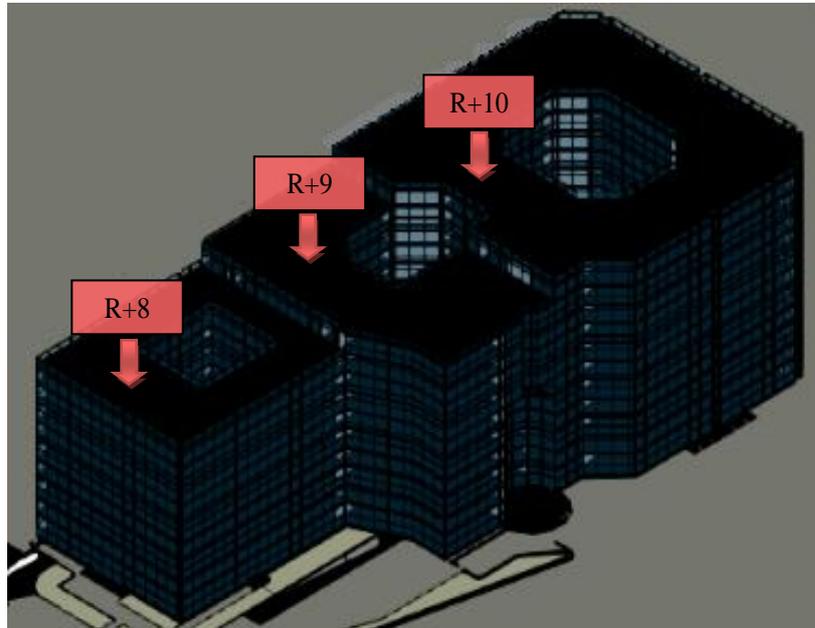


Figure IV-3 : Vue extérieure de l'immeuble étudié (Source : Auteur).

Les espaces de travail se distinguent par leurs dispositions par rapport aux façades extérieures et aux trois atriums caractérisant l'édifice ; on trouve pour chaque bloc des "bureaux périphériques" et des "bureaux centraux" distribués par un couloir en boucle. Les variabilités dimensionnelles des bureaux sont liées à la nature de l'activité et au nombre d'usagers qu'ils abritent (Figure IV-4).

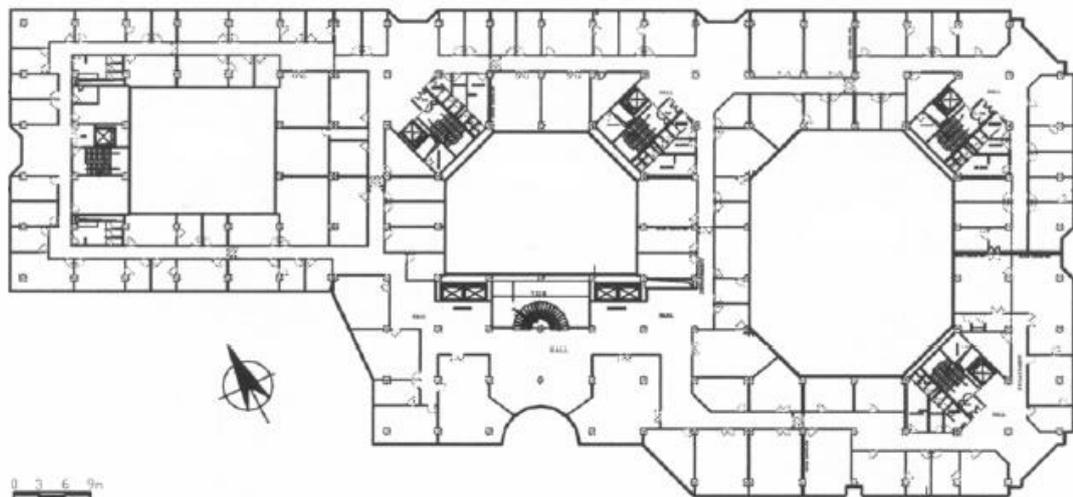


Figure IV-4 : Plan de l'étage courant de l'immeuble étudié.

(Source : Service technique SONATRACH)

IV- 2.4. Taux de vitrage des façades

De l'extérieur, les façades de l'immeuble sont totalement habillées de verre (Figure IV-5), contrairement aux parois intérieures qui se composent de deux parties : une allège en aluminium, séparée des panneaux extérieurs des murs-rideaux de verre par une épaisseur de 7 cm de laine de roche assurant l'isolation thermique ; et une partie supérieure en verre réfléchissant (Figure IV-6). Les fenêtres de désenfumage servent à l'évacuation de la fumée en cas d'incendie. Leurs dimensions correspondent aux unités rectangulaires du mur-rideau de verre de $1,50 \times 1,70 = 2,55 \text{ m}^2$.



Figure IV-5: Vue extérieure du bâtiment étudié (Source : Auteur).

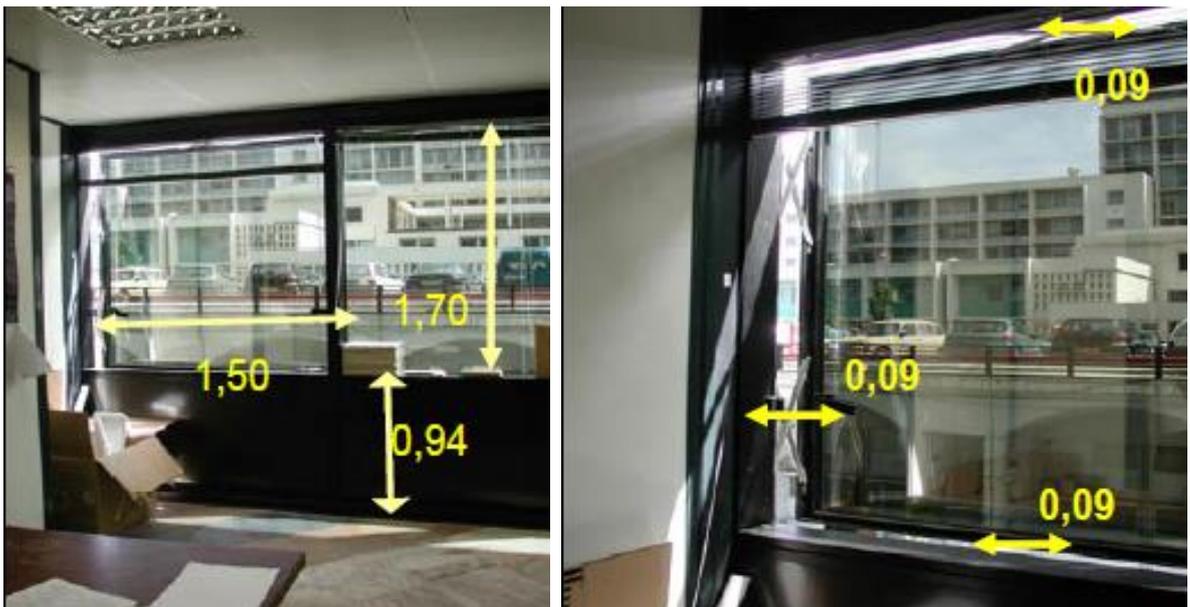


Figure IV-6: Vues intérieures du bâtiment étudié (Source : Chabane, 2006, p.75).

IV- 2.5. Propriétés énergétiques et lumineuses

Le verre se définit par ses propriétés physiques en relation avec le rayonnement solaire, à savoir :

- sa capacité de transmission de la lumière, caractérisée par son coefficient de transmission lumineuse TL ;
- son aptitude à transférer la chaleur déterminée, par son facteur solaire FS de transmission totale d'énergie à travers le vitrage;
- sa disposition à bloquer le transfert de chaleur, définie par son coefficient de transmission thermique surfacique U (en W/m^2K) ;
- son pouvoir réfléchissant du rayonnement solaire incident, traduit par le coefficient de réflectance solaire (RS), qui est la fraction de lumière incidente réfléchi par le vitrage ;
- son émissivité (e), qui est la capacité à libérer de la chaleur absorbée.

Dans notre cas, le type de verre utilisé est un double vitrage réfléchissant conçu de façon à augmenter la fraction d'énergie solaire incidente réfléchi (RF). Cette couche réfléchissante est obtenue par le dépôt d'une couche mince à base d'oxyde métallique sur le vitrage, sur une seule face du verre (en face 2 numérotée dans l'ordre de la progression vers l'intérieur). Ce verre reflète en même temps le rayonnement solaire infrarouge et ultraviolet, non perceptible à l'œil. Autrement dit, cette couche réfléchissante va diminuer la chaleur solaire entrante, et donc le FS sera faible et la chaleur absorbée par le vitrage étant alors essentiellement réémise vers l'extérieur (Figure IV-7).

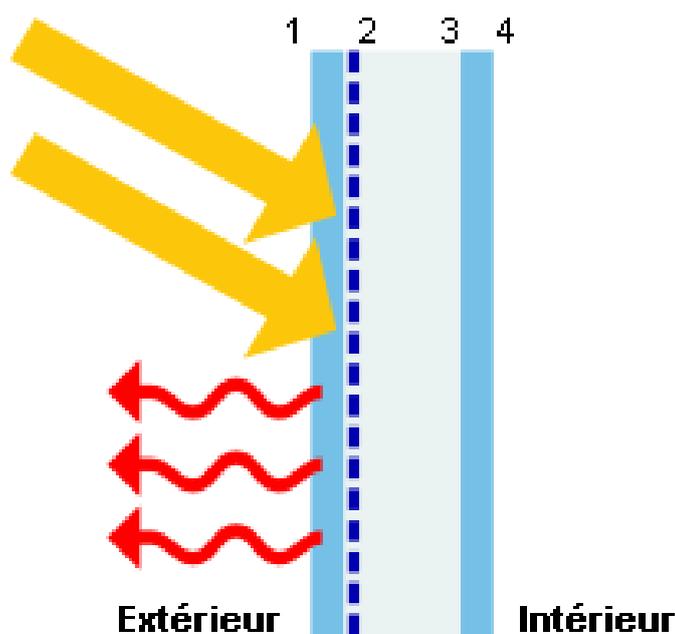


Figure IV-7: Composition du verre réfléchissant.

(Source : <http://multiglass.be>)

La figure IV-8 montre les caractéristiques physiques du verre utilisé pour notre cas d'étude. On observe une réflexion significative atteignant 30% dans le domaine du visible, une faible transmission lumineuse (15-20%) et une basse transmission ultraviolet. La transmission atteint son maximum près de la partie orange du domaine du visible (le verre apparaît brun en transmission, de l'intérieur) et se verra bleu en réflexion de l'extérieur, car la courbe de réflexion a atteint un sommet autour de la couleur bleue du domaine du visible (Button et Pye, 1993). La faible transmission du rayonnement visible donne une ambiance intérieure sombre et implique l'utilisation de l'éclairage artificiel toute la journée, et pour toute l'année.

Les propriétés physiques du verre considéré sont : une transmission lumineuse de $TL=0.211$, une réflectance solaire $RF=0.320$, une absorption de 0.531, la valeur $U=2.49W/m^2K$, et une épaisseur de 6+12+6 mm. Le reflet de ces façades à murs-rideaux de verre réfléchissant peut occasionner une réelle augmentation des températures extérieures (Shin et Huang, 2001), il peut atteindre jusqu'à 90 % d'énergie solaire réfléchi pour d'autres couleurs de couches réfléchissantes. Toutefois, le taux de réflexion dépend de la quantité du rayonnement, de son angle d'incidence, de l'épaisseur du verre, et de la couleur de la couche mince (Button et Pye, 1993).

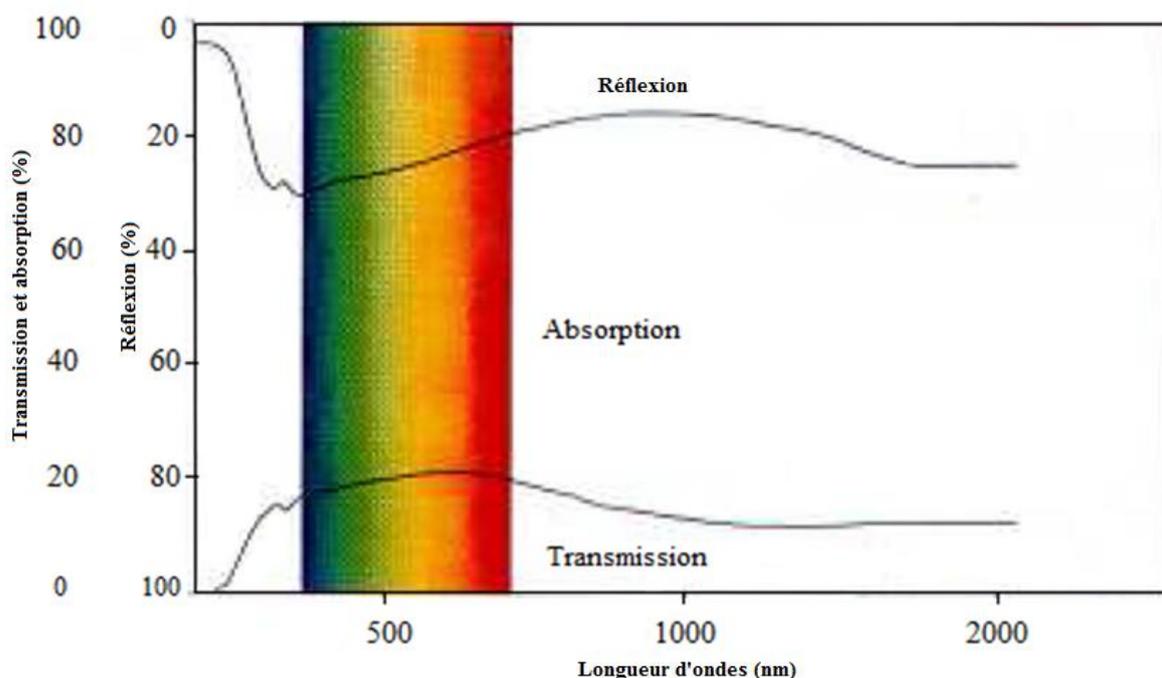


Figure IV-8: Propriétés énergétiques et lumineuses du double vitrage étudié.

(Source : Button et Pye, 1993, p.41)

IV- 2.6. Type de réflexion

La nature de la réflexion (spéculaire ou diffuse¹) joue également un rôle au niveau perceptif. Ainsi, la mise en place d'éléments trop réfléchissants ou présentant une réflexion spéculaire (Figure IV-9) trop marquée pourrait mener à un certain éblouissement et à une gêne visuelle. Une réflexion est qualifiée de spéculaire lorsque l'angle d'incidence des rayons lumineux incidents est égal à l'angle de réflexion des rayons réfléchis. Lorsque les imperfections de surface sont plus petites que la longueur d'onde de la lumière incidente (c'est le cas de ce verre utilisé en façades), la lumière est réfléchie d'une manière spéculaire (Deneyer et Moenssens, 2004).

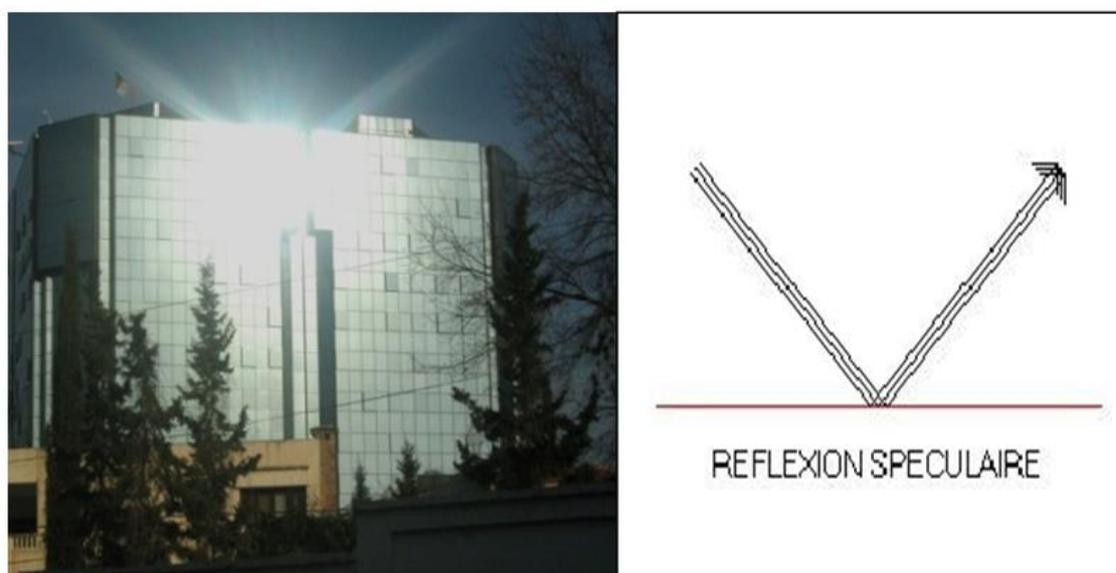


Figure IV-9: Réflexion spéculaire des murs-rideaux. (Source : Auteur).

Cependant, la prise en compte de l'influence des murs-rideaux de verre sur les espaces extérieurs doit répondre à certaines exigences. Dans cette optique, certaines variables telles que l'éblouissement durant le jour et les températures élevées sont retenues comme objet de plainte et d'inconfort des voisins de cet immeuble de verre.

IV- 2.7. Système HVAC

Le chauffage, ventilation et climatisation-CVC, de l'anglais Heating, Ventilation and Air-Conditioning-HVAC est la technologie de confort de l'environnement hermétique du bâtiment étudié.

¹ **Réflexion diffuse** : c'est lorsque les rayons lumineux incidents sont réfléchis dans toutes les directions. La majorité des objets présentent des surfaces complexes qui produisent une réflexion diffuse, c'est-à-dire pour laquelle la lumière incidente est réfléchie dans toutes les directions.

Son objectif est d'assurer le confort thermique et une qualité de l'air intérieur acceptable. Elle est basée sur les principes de la thermodynamique, la mécanique des fluides, et le transfert de chaleur. Cependant, l'installation de ce système engendre des consommations d'énergie considérables. Dans cet immeuble, le refroidissement est assuré par un système centralisé de conditionnement d'air froid durant l'été. Cet air est envoyé à travers des unités à débits variables : des ventilo-convecteurs dans les bureaux de petites dimensions et des bouches de soufflage dans ceux de grandes dimensions (Figure IV-10).



Figure IV-10 : Dispositifs de refroidissement ; ventilo-convecteur à gauche, plafonnier à droite.

(Source : Chabane, 2006, p.77)

IV- 3.Méthodologie de recherche : L'approche in-situ des ambiances

L'approche in-situ des ambiances accorde dans un premier temps la primauté aux phénomènes perçus. Dans notre cas, nous nous attelons à obtenir des comptes-rendus de perception, toutes modalités sensibles confondues. Il est demandé à des usagers permanents de décrire aussi précisément que possible, ce qu'ils perçoivent et ressentent face à l'immeuble de verre réfléchissant pendant la journée. Ces commentaires, enregistrés et précisés ensuite par de brefs entretiens semi-directifs, sont analysés afin d'identifier les phénomènes relevant d'une expérience partagée. Ce sont la redondance et la récurrence des descriptions de même nature provenant d'observateurs différents qui attestent d'une communauté de perception pour un site donné. Par ce premier corpus, on rend compte à la fois de ce qui est perçu et des manières de percevoir in-situ. Ce travail a été effectué lors de notre recherche de magistère (Mehaoued, 2009).

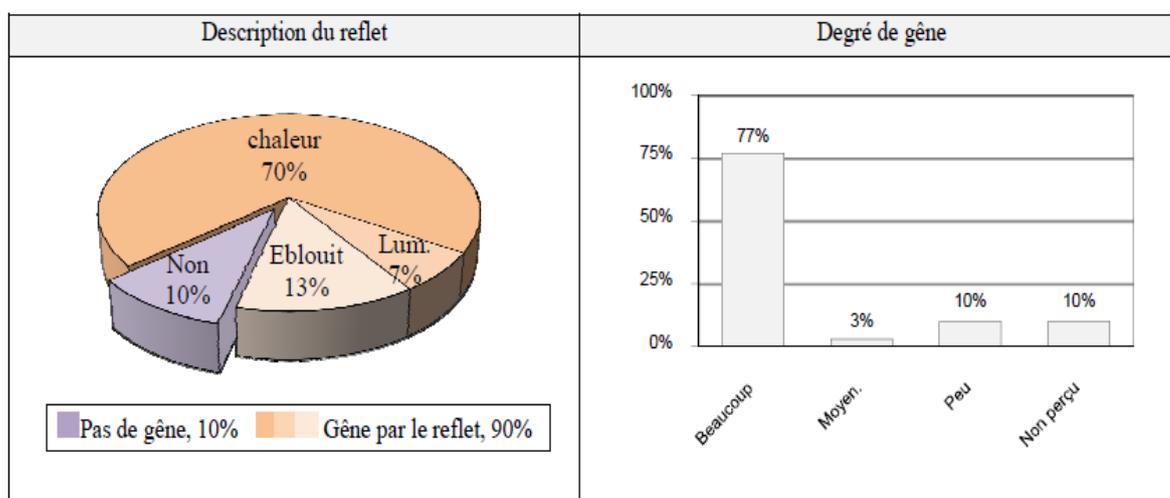
Dans un premier temps nous avons procédé à l'évaluation spécifique de l'impact du reflet du rayonnement solaire réfléchi par les façades réfléchissantes, sa perception par les habitants, la manière avec laquelle il est perçu ainsi que le degré de gêne qu'il provoque. Nous citerons dans ce qui suit une petite partie des résultats de notre enquête.

En effet, la quasi-totalité des répondants (90%) perçoit ce reflet, mais une minorité d'entre eux uniquement (10%) déclare que ce reflet n'est pas perçu en raison des plantations se trouvant devant les fenêtres. Cependant, la manière avec laquelle ce reflet est ressenti diffère entre les répondants, à ce fait la plupart d'entre eux (70%) l'a décrit par une surchauffe de leurs espaces intérieurs donnant vers les façades de verre réfléchissant, cela s'expliquerait par l'insuffisance des persiennes et le manque de dispositifs de contrôle. Les autres répondants (13%) l'ont attribué à l'éblouissement agressant leurs yeux et les empêchant même d'ouvrir leurs fenêtres. Une petite portion des répondants (7%) a parlé d'une lumière assez forte dans leurs espaces (Tableau IV-1 à gauche).

Pour ce qui est du degré de gêne à ce reflet, d'une manière globale, la majorité (77%) parmi ceux qui perçoivent le reflet, a jugé qu'elle est excessivement gênée. Très peu d'entre eux, uniquement (13%) juge que ça les dérange d'une façon moindre du fait qu'ils ne subissent pas ces conditions n'étant pas sur les lieux, ou bien en raison de la présence du masque végétal empêchant la pénétration et la visualisation du rayonnement réfléchi (Tableau IV-1 à droite).

Tableau IV-1 : Evaluation globale du reflet du rayonnement solaire et du degré de gêne

(Source : Mehaoued, 2009).



L'évaluation post-occupationnelle réalisée par Chabane (2006) du même bâtiment, a permis de le classer parmi les bâtiments "malsains" avec un BSI (Building Syndrom Index)² qui correspond à 2.85. L'auteur s'est basé sur les plaintes des occupants de l'immeuble concernant leur état de santé physique à savoir ; irritation des yeux, irritation de la gorge, irritation du nez, fatigue et maux de tête. Ces

² **Le BSI** : est un indicateur de SBS (Sick Building Syndrom) permettant de classer un environnement de "sain" lorsqu'il est inférieur à 1.5 ou de "malsain" lorsqu'il en est supérieur. Il décrit un bâtiment susceptible de provoquer des états négatifs de santé, (Chabane, 2006).

symptômes sont générés essentiellement par l'environnement hermétique des espaces-bureaux favorisant l'utilisation de l'air conditionné, ainsi que les propriétés lumineuses et énergétiques du verre employé.

Pour notre thèse, les phénomènes ainsi identifiés sont mis à l'épreuve au cours d'une seconde phase et servent de guide à une approche orientée du site. Un retour sur le terrain est alors nécessaire. Le rapport entre observation et description s'inverse : il ne s'agit plus de décrire ce que l'on perçoit mais de rapporter les descriptions à ce qui est observable, enregistrable et mesurable sur place. L'objectif est de préciser les conditions d'apparition des phénomènes perçus à travers des campagnes de mesures. Dans le but de mieux comprendre les phénomènes urbains, Nunez et Oke (1977) avaient effectué les premières mesures dans une rue canyon de la ville de Vancouver au Canada. Par la suite de nombreuses études similaires se sont succédées avec pour objectif d'étudier l'influence de la morphologie et des configurations urbaines sur les apports et échanges énergétiques et sur le microclimat, (Ringebach, 2003). L'échelle d'investigation est différentes selon l'objectif des travaux, puisqu'elle peut aussi concerner les phénomènes autour d'un bâtiment ou à l'intérieur d'une rue, que la couche d'atmosphère au dessus d'une agglomération urbaine.

IV- 3.1. Campagne de mesures : Protocole et instrumentation

Pour le cas de la présente étude, la campagne de mesures se déroule pendant la journée estivale du 07 Août 2013. Dans le but de déterminer les conditions microclimatiques que subit et crée l'immeuble. Afin d'y parvenir, des mesures de température, de la vitesse de l'air ainsi que de l'humidité relative sont effectuées en continu sur site, pendant toute la journée représentative. Ces mesures sont complétées par des mesures mobiles à différents points du site.

En conformité avec les critères du cas étudié, les points de mesures ont été placés comme suit : un premier point de référence situé sur le toit de l'immeuble, le second point de mesure est à 2 m du sol, quant aux autres points, ils sont judicieusement et principalement choisis selon les orientations des quatre façades de l'immeuble pour la prise de vues thermiques (Figures IV-11 et IV-12).

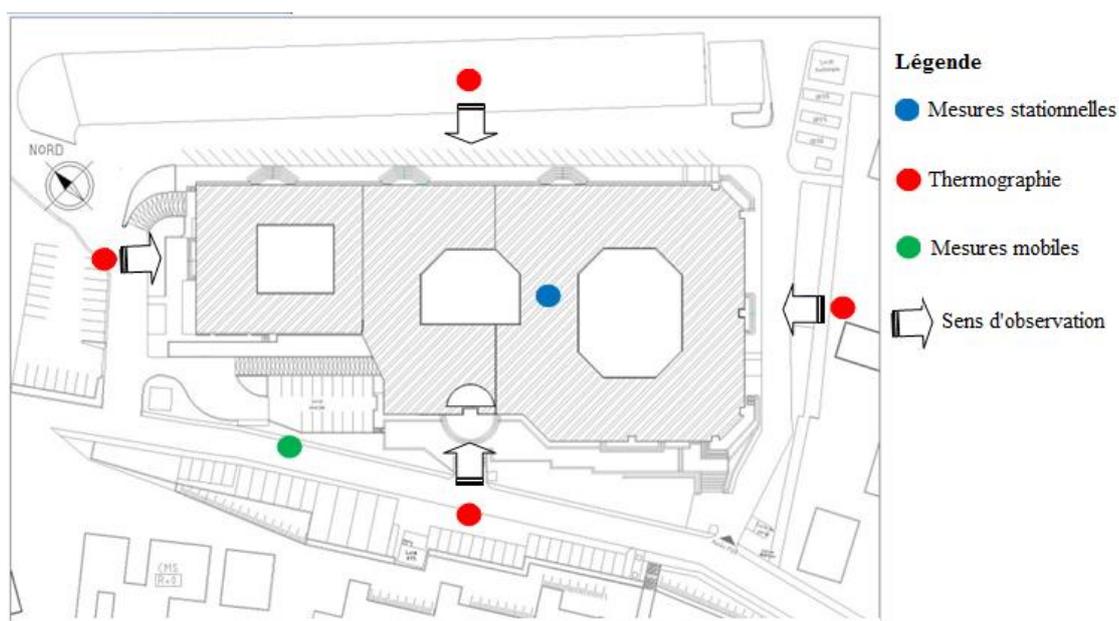


Figure IV-11: Localisation horizontale des points de mesures (Source : Auteur).

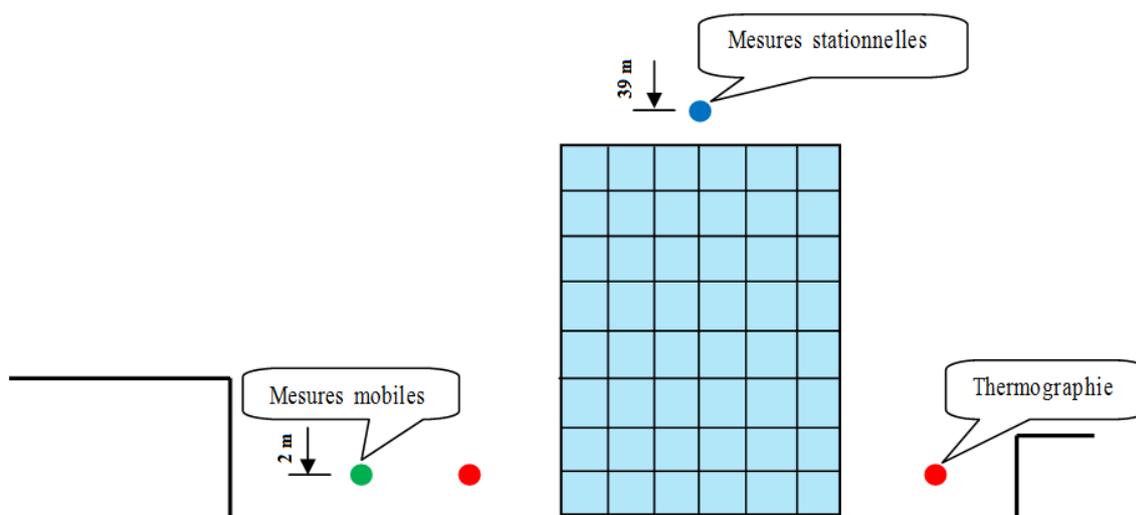


Figure IV-12 : Localisation verticale des points de mesures (Source : Auteur).

L'objectif de cette étude expérimentale et numérique est de mesurer in-situ certaines grandeurs caractéristiques du microclimat urbain, de modéliser les consommations énergétiques du bâtiment et de montrer l'importance du microclimat sur cette consommation. Pour effectuer des mesures en ces points, nous avons combiné trois types d'instruments selon différents protocoles. On distingue :

IV- 3.1.2.1 Mesures stationnelles

Elles concernent notre point de référence situé au-dessus du toit de l'immeuble. Elles sont réalisées en continu pendant 24 heures par une micro-station HOBO fixe permettant de mesurer différents

paramètres : température de l'air, humidité relative et vitesse du vent. Cette micro-station elle a été étalonnée avant usage par les climatologues de l'ONM (Office Nationale de Métrologie), elle va caractériser les caractéristiques climatiques durant la campagne de mesures. La description des appareils de mesure est donnée dans le Tableau IV-2.

IV- 3.1.2.2 Mesures mobiles

Le second point de mesure est situé à 2 m du sol où les mesures y sont réalisées une seule fois en matinée, à 7 h du matin. La température, l'humidité et la vitesse de l'air sont mesurées à l'aide d'un appareil mobile nommé hygro-thermomètre (Tableau IV-2). Ces paramètres servent de données d'entrées au logiciel du microclimat ENVI-met.

Les autres points de mesures représentent des endroits situés face aux quatre façades de l'immeuble et servent à prendre des thermogrammes à l'aide d'une thermographie infrarouge qui est une technique permettant d'obtenir une image thermique d'une scène par analyse des infrarouges (Tableau IV-2). L'accent a été mis sur une journée à ciel dégagé, et à temps calme, dans des conditions d'ensoleillement optimales et favorables.

Tableau IV-2: Caractéristiques des capteurs utilisés lors de la campagne de mesures.

Instruments	Type de mesures et incertitudes	Illustrations
Micro-station HOBO	<ul style="list-style-type: none"> • Température, humidité relative et vitesse de l'air sur le toit. • L'erreur la plus défavorable est ± 8 parties par million (PPM) par semaine à 25°C, soit environ 5 secondes par semaine. 	
Hygro-thermomètre Testo 635	<ul style="list-style-type: none"> • Température, humidité relative et vitesse de l'air à 2 m du sol. • L'incertitude de la température est à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, l'incertitude de l'humidité relative est à $\pm 3\%$, et l'incertitude de vitesse de l'air est à $\pm 5\%$. 	

<p align="center">Appareil thermographique ThermaCAM® B2</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Thermogrammes des façades. • L'incertitude de mesure est de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. 	
---	--	---

IV- 3.2. Couplage numérique

L'objectif premier de notre recherche est de proposer une méthode de couplage de logiciels pour énoncer et déterminer les causes de l'apparition des conditions microclimatiques particulières autour des bâtiments de verre réfléchissant, ainsi que leur impact sur la consommation énergétique des bâtiments dans le cas du climat chaud d'Alger.

La figure IV-13 résume la méthodologie de l'étude. Le microclimat autour d'un bâtiment en verre réfléchissant situé à Alger a été étudié expérimentalement et numériquement (Fig. IV-13.a). Ensuite, l'étude de l'impact du microclimat sur les charges de climatisation a été réalisée (Fig. IV-13.b). Pour ce faire, nous avons calculé avec le logiciel Ecotect les charges de climatisation du bâtiment en utilisant trois fichiers météo différents: l'un de la station météo de référence située à l'aéroport, loin de l'immeuble (cas 1), un autre issu de la micro-station située sur le toit de l'immeuble (cas 2), et pour le dernier, nous avons utilisé les output du logiciel de microclimat ENVI-met, prenant en compte l'enveloppe du bâtiment et ses effets sur l'environnement immédiat (cas 3) :

- Cas 1 - Station météorologique de référence (appelée Ref-St): ce fichier utilise les données météorologiques mesurées par la station de référence de la ville, située à l'aéroport, à 25 km du centre-ville d'Alger. Les données du 2 août 2013 ont été utilisées pour créer le fichier météo pour la simulation.
- Cas 2 - Micro-station sur le toit (appelée Toit): ces données sont enregistrées sur le toit de l'immeuble sont réalisées par la micro-station Hobo.
- Cas 3 - Modélisation du microclimat avec ENVI-met (référéncé ENVI-met): utilise les données météorologiques calculées par le logiciel du microclimat ENVI-met. Cette modélisation est basée sur les données mobiles mesurées comme expliqué ci-dessus.

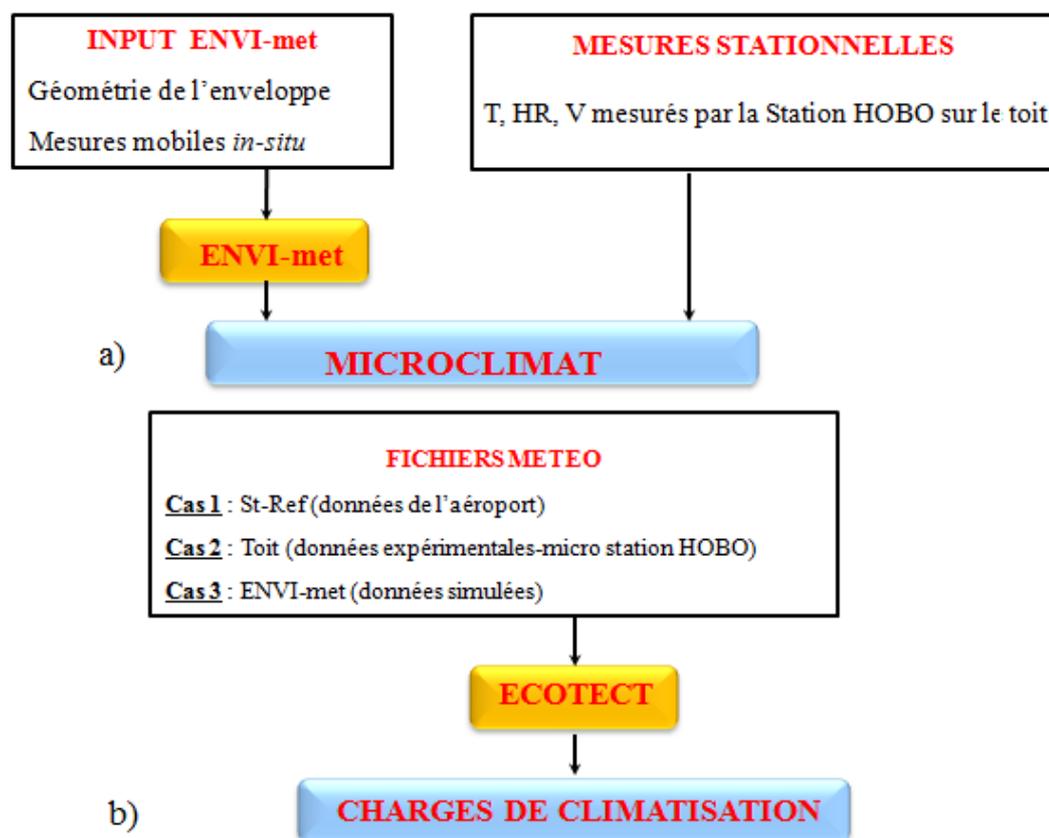


Figure IV-13 : Schéma illustrant l'approche méthodologique utilisée.

(Source : Auteur)

IV- 3.2.1. Choix du logiciel de simulation microclimatique ENVI-met

ENVI-met est un des rares modèles de l'échelle méso, c'est un modèle tridimensionnel du microclimat basé sur la dynamique et la thermodynamique des fluides (Bruse, 1999). Le développement du modèle a été lancé en 1995 par Michael Bruse à la Ruhr-Universität à Bochum en Allemagne. ENVI-met est gratuit et fonctionne -contrairement à beaucoup d'autres simulations climatiques- sur un ordinateur standard x86 avec un système d'exploitation Microsoft Windows. Une version qui fonctionne sur les systèmes d'exploitation Unix est également devenue disponible (Huttner, 2012). Ce freeware dont le nom est tiré du terme "Environmental Meteorology" concerne des domaines d'application divers : géographie et dynamique spatiale, économie et gestion urbaine, physique urbaine et morphologie urbaine (Cerma, 2000).

Avec une résolution typique de 0,5-10 m dans l'espace, et 1-10 s dans le temps pour une durée spécifique de 24 à 48 heures, le modèle permettant de simuler l'écoulement autour et entre les bâtiments, les processus d'échange de chaleur et de vapeur au niveau des surfaces urbaines, de la turbulence, des

échanges d'énergie et de masse entre la végétation et ses environs et de la dispersion des particules et des réactions chimiques simples (Yang et al., 2012). La fonction du logiciel est accomplie par la solution des équations de base physique pour le courant de vent, la thermodynamique et l'équilibre de rayonnement des surfaces, (Huttner 2012, Lahme & Bruse 2003, Samaali & al.2007).

IV- 3.2.2.1 Rôles et avantages du logiciel ENVI-met

Les apports de ce freeware peuvent être réalisés grâce à ses différents calculs (Yang et al., 2012):

- Détermination des flux de radiation de longue et courte longueur d'onde tout en considérant la réflexion et la radiation dissipée par les bâtiments et la végétation.
- Le profil vertical des paramètres atmosphériques (température de l'air, vitesse de l'air et de l'humidité de l'air) de 0 à 2500 m au dessus du sol.
- Prise en compte du rôle de la végétation dans la transpiration, l'évaporation, et la chaleur sensible et considération complète de son paramètre physique, tel que le taux de la photosynthèse. Les plantes sont aussi pourvues des indices "Densité foliaire" et "Densité des racines".
- Calcul de la température surfacique de chaque point de la grille du site simulé.
- Considération de l'eau et de l'échange de chaleur dans le sol.
- Estimation des paramètres bioclimatiques à l'exemple de la PMV adapté aux espaces extérieurs par Jendritzky (1993).
- Calcul de la dispersion des gaz et des particules, à l'exemple des poussières PM10 y compris la sédimentation des particules de surface des feuilles de plantes.

ENVI-met permet d'avoir d'autres avantages pour la simulation des sites urbains (Ali-Toudert, 2005):

- La simulation dynamique du microclimat avec un cycle journalier.
- Le traitement de plusieurs structures urbaines : utilisation de différentes tailles et formes des constructions et possibilité de réalisation des détails comme les auvents et les galeries.
- 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.

IV- 3.2.2. Limites du logiciel ENVI-met

Parmi les limites du logiciel, celles qui sont citées par Rosheidat et al. (2007), elles concernent les obstacles qu'ils ont constatés au cours de leurs recherches :

- ENVI-met ne peut pas simuler l'eau animée comme les fontaines et jets d'eau. De plus cet élément naturel est représenté dans l'environnement urbain comme étant un type de sol dont les caractéristiques se limitent à la transmission et à l'absorption du rayonnement d'ondes courtes.

- Le modèle est conçu pour la modélisation microclimatique seulement. Comme tous les modèles CFD, les domaines et le temps de calcul sont limités.

IV- 3.2.3. Paramètres des simulations d'ENVI-met pour le bâtiment existant

IV- 3.2.2.1 Paramètres météorologiques

Afin d'arriver à procéder à notre exercice de simulation, nous avons pris en considération les données climatiques (température de l'air, humidité relative, vitesse et direction du vent) relatives à une journée chaude du 02 août 2013. L'accent a été mis sur une journée à ciel dégagé, et à temps calme, dans des conditions d'ensoleillement optimales favorables. Pour l'enregistrement de ces données, nous avons tenu compte de celles qui ont été mesurées sur site à 2 m d'altitude (Annexe-B).

Pour l'humidité spécifique, d'après ENVI-met 4.0, cette valeur doit être enregistrée pour le sommet du modèle de simulation à 2500 m de hauteur, car elle concerne la masse d'air au niveau de la méso échelle. Comme cette échelle concerne d'après Tabaud (2000) une extension horizontale de 300 à 50km, nous avons pris en considération pour la calculer :

- L'humidité relative enregistrée à 2500 m qui est de 47 %.
- La pression atmosphérique à 2500 m qui est de 746,86 hPa.
- La conversion de la température de l'air mesurée sur site vers la hauteur de 2500 m est de 8,4°C.

Pour calculer l'humidité spécifique, nous avons inséré la température de l'air, la pression atmosphérique et l'humidité relative dans le calculateur Climate Calculator et nous avons obtenu une valeur de 5,40 g/kg encadrée en rouge (Figure IV-14).

T [°C]	Relative humidity [%]	Air-pressure [hPa]
8.4	47.0	746.86
Ohm [T] Pt-100	Ohm [T] Pt-100	Partial pressure water vapour
Saturation vapour pressure [T]	Saturation vapour pressure [T]	Air density waterless [g/cm³]
Relative humidity [%]	Saturation humidity [g/m³]	Absolute humidity [g/m³]
Water content [g/kg]	Dew point [°C]	T [°C]
5.40744		

E-Mail malto.info@mm-systeme.de Product [Data Logger for temperature and humidity](#)
 Web www.mm-systeme.de Visit our shop <http://shop.mm-systeme.de>

Figure IV-14: Calculateur d'humidité spécifique Climate Calculator. (Source : www.mm-systeme.de)

La vitesse du vent est aussi un paramètre important à prendre en compte pour la simulation. Toutefois, la disposition de la station de référence en ville fait que la vitesse du vent soit influencée par la rugosité urbaine, d'où la faible importance de ce paramètre mesurée (2,3 m/s) pour le début de journée. Et comme nous avons vu auparavant, nos observations pour cette étude doivent être réalisées par temps calme avec une vitesse inférieure à 3 m/s, ce qui est vérifié pour notre journée de référence. Ceci dit, pour effectuer nos simulations, le logiciel ENVI-met nécessite l'enregistrement de la vitesse du vent à 10 m de hauteur, alors que la station de mesure du site nous donne des valeurs enregistrées à 2 m du sol. De ce fait, nous nous sommes référés à la méthode utilisée par Tebbani (2006) en employant le Tableau IV-3 de Nikolopoulou et al. (2004). Ce dernier nous a servi à calculer la vitesse du vent à la hauteur exigée (10 m) dans un site urbain en utilisant la formule IV-1 suivante :

$$S = V_H / V_{10}$$

IV-1

V_H : vitesse du vent en site plat et dégagé. V_{10} : vitesse du vent à 10 m de hauteur. Ce qui nous a donné les valeurs du rapport ($S = 0,6$) et la vitesse du vent ($V_{10} = 3,83$ m/s) pour 10 m de hauteur.

Tableau IV-3 : Coefficient S de la vitesse du vent en fonction de la hauteur. (Source : Nikolopoulou et al., 2004)

H (m)	S (Suburbain)	S (Urbain)
10	0.6	0.36
20	0.73	0.47
30	0.82	0.55
40	0.89	0.62
50	0.94	0.68
60	0.99	0.73
70	1.04	0.77
80	1.08	0.82
90	1.11	0.86
100	1.14	0.89
110	1.18	0.93
120	1.21	0.96
130	1.24	0.99
140	1.27	1.02
150	1.29	1.05

IV- 3.2.2.2 Les matériaux

Le fichier de configuration du logiciel permet d'enregistrer les données et caractéristiques des matériaux, mais de façon autonome en 3D pour chaque bloc du site d'étude. Dans notre cas, nous avons opté pour le même matériau à chaque fois pour tous les bâtiments du site d'étude. Nous avons utilisé des bâtiments entièrement vitrés avec deux types de verre ayant des coefficients de réflexion du rayonnement solaire de 0,05 et 0,32.

Le tableau IV-4 qui suit récapitule les données de simulation dans ENVI-met pour le cas du bâtiment en verre réfléchissant existant.

Tableau IV-4 : Inputs d'ENVI-met pour le bâtiment existant en verre réfléchissant.

Domaine d'étude	120 m x 170 m x 60 m
Dimensions du maillage*	60 x 85 x 30 (dx=dy=dz=2 m)
Journée	7 Août
Heure de départ	7h
Données microclimatiques	Mesures <i>in-situ</i>
Variables initiales	Humidité spécifique 5.40 g eau/kg air à 2500 m Température de l'air 28°C Humidité relative 47 % à 2 m Direction du vent NE Vitesse du vent 1 m/s
Enveloppe bâtie	Double vitrage : Epaisseur 6+12+6 mm, albedo 0.32 Toit : Epaisseur 25 cm, albedo 0.15
Sol	Asphalt : Epaisseur 8 cm, albedo 0.2 Revêtement gris en béton : Thickness 20 cm, albedo 0.23

* Ce maillage a été validé après sa comparaison avec un autre maillage plus resserré dont dx=dy=dz=0.5. Les résultats ont montré un écart maximal de 3.51 % pour les températures de l'air : cette faible valeur permet de valider notre maillage.

IV- 3.2.2.3 Choix de l'emplacement des récepteurs

Nous avons placé cinq (08) récepteurs sur le fichier des entrées (.in) pour enregistrer les paramètres climatiques (Figures IV-15 et IV-16) :

- Le premier T est un récepteur de référence placé sur le toit du bâtiment afin de comparer le calcul des paramètres climatiques par ENVI-met et ceux enregistrés avec la micro-station HOBO.
- Quatre récepteurs RNE, RSE, RSO et RNO, sont mis respectivement à proximité des façades nord-est, sud-est, sud-ouest et nord-ouest du bâtiment à une distance de 1,00 m des façades. Trois niveaux de l'immeuble sont considérés à savoir: le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau. Nous avons choisi cet emplacement afin de relever les températures de l'air affectées par le reflet des façades et d'évaluer l'effet sur les consommations énergétiques.

- Trois autres récepteurs sont placés à l'intérieur des patios P1, P2 et P3.

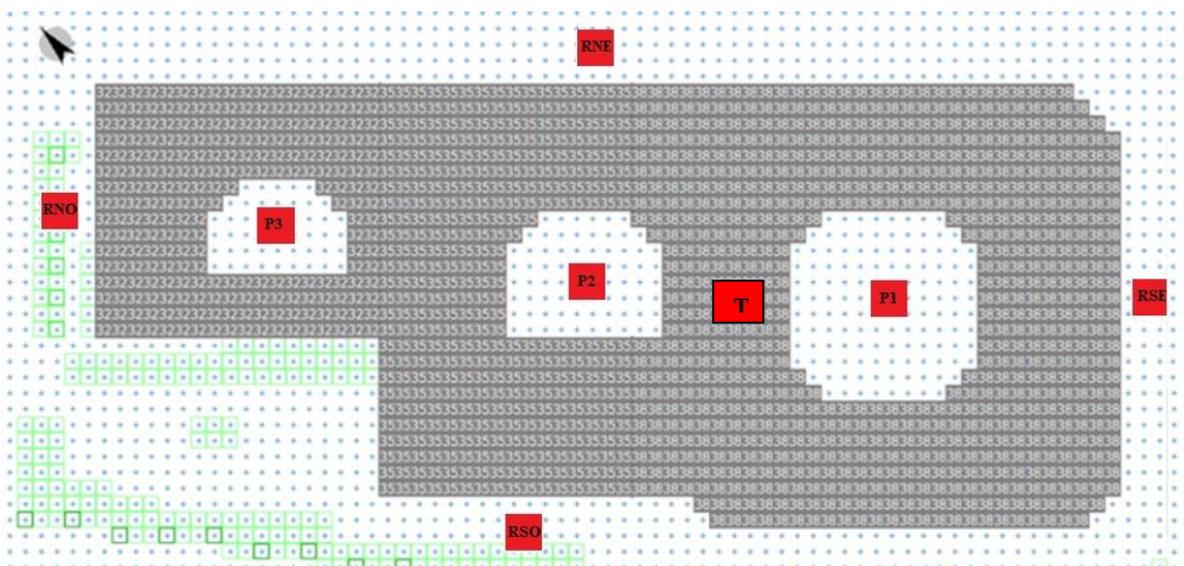


Figure IV-15 : Vue en plan montrant la disposition horizontale des récepteurs.

(Source : Auteur)

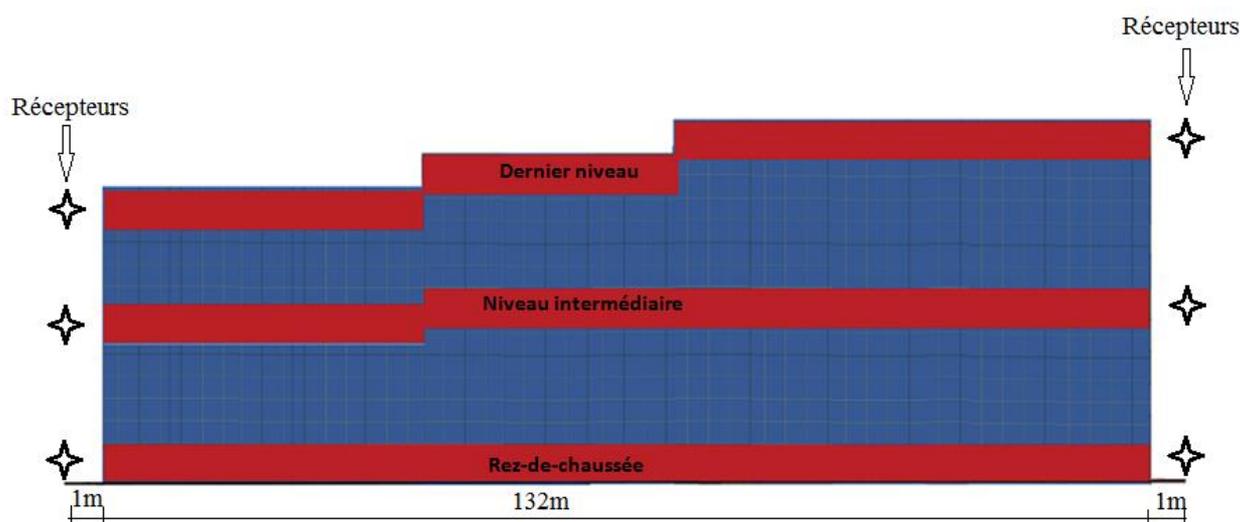


Figure V-16: Coupe montrant la disposition verticale des récepteurs.

(Source : Auteur)

IV- 3.2.4. Choix du logiciel de simulation énergétique Ecotect

Ecotect est un outil d'analyse de conception conçu par le Dr. Andrew Marsh de la compagnie Square One Research. Ce logiciel offre un large éventail de fonctionnalités; le tracé de l'ombrage, l'éclairage, l'acoustique et l'analyse du vent, ainsi que la thermique. Il utilise CIBSE Admittance Method (Chartered Institution of Building Services Engineers) pour calculer les charges de chauffage et de refroidissement pour les zones d'un bâtiment donné. Les facteurs des charges sont des gains solaires directs et indirects, les gains internes, les gains inter-zonaux, et le flux de chaleur inter-zonal (Gezer, 2003). Il peut afficher

des températures horaires internes, ainsi que des distributions annuelles de température. Les fonctionnalités d'analyse de consommation d'énergie, d'eau et d'émission de carbone intègrent des outils permettant de visualiser et de simuler les performances d'un bâtiment.

Parmi les chercheurs ayant utilisé Ecotect, nous citons :

- Alexandri et Jones (2008) dans leur étude sur l'effet des toitures et murs végétalisés sur les consommations énergétiques de bâtiments dans le cas typique d'une rue canyon.
- De Rosa et al. (2010) l'ont utilisé pour calculer l'éclairement naturel intérieur dans des conditions d'un ciel couvert.
- Strømman-Andersen et Sattrup (2011) l'ont adopté dans leur étude portant sur l'usage de l'énergie dans le bâtiment dans un canyon urbain et ont tiré des conclusions sur la densité urbaine par rapport à la lumière du jour et les gains solaires passifs.
- Kanters et al. (2012), en réalisant une enquête internationale sur les méthodes et les outils les plus utilisés dans la conception solaire, avaient cité Ecotect parmi ces derniers. Kanters et Horvat (2012) dans leur étude sur l'énergie solaire en tant que paramètre de conception dans la planification urbaine, avaient utilisé Ecotect.
- Tagliabue et al. (2012) avaient utilisé trois logiciels dans leur étude d'analyse du confort visuel et la consommation d'énergie dans un espace bureau, et avaient évalué l'économie d'énergie par l'ensoleillement à l'aide d'Ecotect.
- En Algérie, deux projets bioclimatiques conçus par l'architecte italien Cucinella, ont fait l'objet d'étude de la performance énergétique à l'aide du logiciel Ecotect, cité dans le chapitre I § 6.2.1 et § 6.2.2.

IV- 3.2.2.1 Rôles et avantages et du logiciel Ecotect

- Pour notre recherche, le choix d'Ecotect Analysis 2011 comme logiciel de simulations des consommations d'énergie est dû à l'ergonomie de son interface (plus accessible pour les architectes), et à sa compatibilité avec le logiciel Revit Autodesk (les deux sont produits par la même société d'édition : AutoDesk). De plus, nous avons déjà un niveau de maîtrise avancée de ce logiciel, du fait qu'il soit l'un des outils de prédilection pour les architectes dans leur profession.
- Le logiciel comprend un éditeur de graphes facilement paramétrable avec un affichage visuel et interactif permettant que tous les résultats (analyses, valeurs et courbes) soient imprimés, récupérés, ou bien enregistrés sous forme de fichier PICT pour exportation dans d'autres logiciels ; comme Word ou Excel. Les résultats peuvent être directement présentés dans le contexte du modèle du bâtiment. Ainsi,

des concepts complexes, et des ensembles de données vastes peuvent être communiqués de manière étonnamment intuitive et efficace. (Yang et al., 2014).

- L'analyse quantitative dans Ecotect peut fournir une base scientifique pour la planification d'économie d'énergie dans le bâtiment. (Newell et al., 2013).
- L'outil météo est un module utilitaire permettant de traiter très rapidement des fichiers de données météorologiques sur les 8760 heures annuelles. Il comprend les fonctions suivantes : visualisation des données en graphiques ou en tableaux importation universelle à partir d'un fichier texte.
- Le diagramme psychrométrique est une méthode d'analyse bioclimatique très utile fournie par l'outil météo d'Ecotect (Chambers, 1970). Il détermine la zone de confort de chaque région, et peut fournir une analyse optimale correspondant à diverses stratégies passives selon les caractéristiques météorologiques locales.
- L'outil météo dans Ecotect peut également analyser le rayonnement solaire, et calculer la meilleure orientation relative aux constructions selon les deux périodes annuelles de surchauffe et de sous chauffe. Cependant, Ecotect peut simuler la position du soleil annuelle avec précision à tout moment, et fournir des statistiques précises sur l'intensité du rayonnement solaire des zones de planification. Il peut même afficher la piste de la trajectoire du soleil et la donner sous forme de diagramme stéréographique.
- La bibliothèque des matériaux du logiciel est très riche et les propriétés sont personnalisables.

IV- 3.2.2.2 Limites du logiciel Ecotect

Comme le programme peut effectuer de nombreux types d'analyse, l'utilisateur doit être conscient des différentes exigences de modélisation, et des données avant la modélisation/importation du modèle. Par exemple; pour l'analyse des consommations énergétiques, les données météorologiques et une modélisation géométrique appropriées sont importants; les données des matériaux appropriés et compréhensibles sont nécessaires pour tous les types d'analyse (Gezer, 2003). La simulation numérique, en particulier dans le cas de calculs énergétiques sur des fragments urbains étendus et maillés assez finement, demande un temps de calcul assez important. Cette donnée est cruciale car elle peut entraver tout le processus de simulation. La non-prise en considération de ce critère peut faire perdre beaucoup de temps, voire bloquer la simulation. Ceci dit, avant d'opter pour un logiciel donné, l'évaluation du matériel informatique ainsi que le volume et la nature des simulations est plus que nécessaire.

IV- 3.2.5. Paramètres des simulations d'Ecotect pour le bâtiment existant

IV- 3.2.2.1 Site et localisation

Ces informations déterminent les coordonnées géo-référencées du site par la définition de la longitude, la latitude et le fuseau horaire (Fig.IV-24). Notre site est situé à 36.42°Nord et 4.12° Est. Le logiciel inclut la nature du site et intègre les coefficients liés à la rugosité, nébulosité, pollution, etc. ayant un impact considérable sur la vitesse du vent. Dans notre cas, nous avons un site de type urbain. Une autre fonction très utile est celle de décalage nord qui nous a permis d'essayer les deux orientations des rues canyons Nord-Sud et Est-Ouest pour l'étude paramétrique au chapitre V.

IV- 3.2.2.2 Importation du projet

Après avoir modélisé le bâtiment que nous étudions via Autodesk Revit Architecture, on procède à l'exportation du modèle géométrique vers l'outil d'analyse Autodesk Ecotect Analysis sous format (*.gbXML). Ecotect inclut l'option préférences d'utilisateur à travers laquelle nous avons pu modifier et définir les unités dans lesquelles le modèle construit sera lu. Le logiciel repose sur le concept de "zone thermique", sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène (Salomon et al., 2005). Afin d'identifier les zones thermiques, Ecotect permet de nommer et d'affecter une couleur à chaque zone pour faciliter son repérage et sa sélection.

IV- 3.2.2.3 Les matériaux de construction

Les matériaux déterminent la réponse thermique d'un projet. Leurs propriétés thermoradiatives indiquent leur capacité à conduire la chaleur et la stocker. Leur température de surface est conjointement liée à la température de l'air intérieur qui définit la température moyenne de rayonnement. Dans Ecotect, nous avons attribué aux parois, les matériaux qui conviennent. Nous avons même créé de nouveaux matériaux lorsque le choix proposé ne correspondait pas à notre cas d'étude. Il faut dire également qu'Ecotect n'accepte pas des valeurs surréalistes pour le facteur de réflexion en avertissant dans une boîte de dialogue, ce qui va nous permettre de la modifier à une valeur raisonnable.

IV- 3.2.2.4 Chargement des fichiers de données climatiques

Avant de faire une analyse, nous devons localiser notre modèle sur la Terre. Pour ce faire, nous devons charger le fichier météo dans le dossier contenant des fichiers sous format *.wea installés dans Ecotect. Si la ville désirée ne se trouve pas dans ce dossier, nous avons la possibilité de choisir et obtenir les données météo, soit sur le site Ecotect (Square One, Inc) ou sur le site Energy-Plus. Si nous avons besoin d'utiliser le site Energy-Plus, nous téléchargerons des fichiers sous format *.epw devant être

convertis et sauvegardés sous l'extension *.wea pour qu'Ecotect soit alors en mesure de les charger. Dans notre cas, nous avons utilisé les données microclimatiques issues des fichiers récepteurs du logiciel ENVI-met. Ces fichiers pour qu'ils soient lus et chargés par Ecotect, nous avons procédé par les étapes suivantes :

- Nous avons d'abord ouvert l'un des fichiers texte d'ENVI-met par Microsoft Excel.
- Nous l'avons réorganisé dans Excel, en fonction des données dont on a besoin pour la simulation, par la création de plusieurs macros permettant la suppression des données inutiles et la gestion des données utiles. Ces macros sont définies comme une suite d'instructions automatiques écrites avec un langage de programmation de Visual Basic pour Application-VBA.
- Puis, nous avons ouvert les autres fichiers, auxquels les macros précédemment créées ont été exécuté. L'objectif de cette étape est de réduire le temps pour s'adapter à la pratique professionnelle.
- Après cela, tous les fichiers météorologiques sont enregistrés dans Excel sous l'extension CSV (séparateur : point-virgule).
- Dans l'outil météo d'Ecotect nous avons chargé les fichiers sous l'extension (Separated Value Files) pour les convertir par la suite sous l'extension (Custom Column Format *.CCF) et les utiliser pour les différents calculs d'Ecotect.

IV- 3.2.2.5 Gestion des zones thermiques

Dans notre cas, les zones thermiques ne peuvent pas être à évolution libre (température flottante), mais plutôt thermostatées avec une consigne de climatisation de 27°C représentative de la zone de confort dit "normal" de la ville d'Alger, telle définie dans le DTR C 3.4 (DTR C3.4, 1998). Les puissances de rafraîchissement nécessaires pour maintenir la température souhaitée sont calculées avec un intervalle de temps d'une heure. Dans notre cas, notre bâtiment est considéré comme étant un ouvrage multizone où chaque étage représente sept zones thermiques dont quatre orientées vers l'extérieur, et trois autres vers les patios (Figure IV-17). Pour chaque zone, il est possible d'appliquer une durée des charges de climatisation. Pour notre travail, cette durée est facilement paramétrable, puisque nous considérons une seule classe de bâtiments, celle des bâtiments tertiaires et plus particulièrement les immeubles de bureaux, donc elle est directement liée aux horaires de travail des usagers de 8h à 20h (Tableau IV-5).

L'éclairage, les équipements électriques et les personnes dégagent de la chaleur à la zone à laquelle ils appartiennent, et par conséquent, les surfaces environnantes absorbent et réfléchissent cette énergie pour augmenter leurs températures de surface. Nous avons donc défini le nombre et l'activité des personnes pour chaque zone ; deux (02) personnes sédentaires générant chacune 70 W, ayant un ordinateur libérant 230 W de chaleur. Pour l'éclairage, nous avons choisi une lumière fluorescente avec 10 W/m² d'énergie.

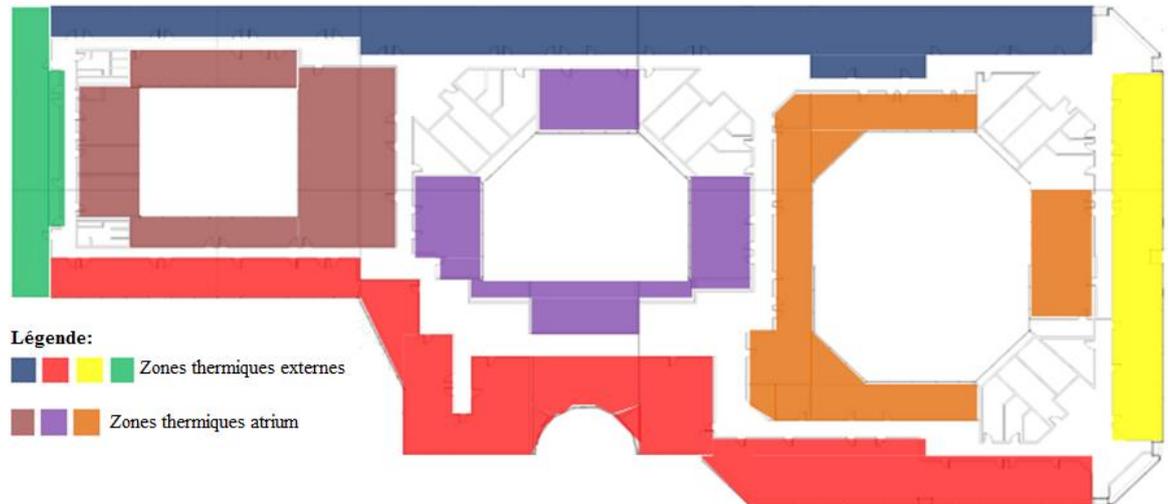


Figure IV-17 : Zones thermiques représentées dans Ecotect.

Tableau IV-5: Inputs d'Ecotect pour le bâtiment existant en verre réfléchissant.

Description de l'immeuble	Immeuble de bureaux avec sept zones thermiques pour chaque niveau.
Caractéristiques du verre	Transmission lumineuse TL 0.211 Facteur solaire FS 0.391 Réflectivité 0.320 Absorption 0.380 Valeur-U 2.49W.m ² .K ⁻¹ Epaisseur 6+12+6 mm
Journée	7 Août
Période d'occupation	08 h-20 h
Climatisation	Allumée si la température $T_{op} \geq 27^{\circ}\text{C}$ durant la période d'occupation.
Taux de ventilation	Vitesse du vent négligeable 0.1 m/s Infiltration 0.1 vol/h
Gains internes	Chaleur latente : 4 Personnes/zone et 70 W/Personne. Chaleurs sensible : 240 W
Niveau d'éclairage	400lux
Tenue vestimentaire (clo)	Tenue d'été 1 clo

IV- 4. Analyse et interprétation des résultats

Nous rappelons que les résultats présentés dans ce qui suit concernent la journée d'observation intensive (07 Août 2013). Cette journée est caractérisée par des ambiances météorologiques anticycloniques, des conditions radiatives optimales (nébulosité nulle, atmosphère très claire).

IV- 4.1. Mesures micro-météorologiques

Simultanément à la journée de photographie thermique, des mesures micro-météorologiques ont été effectuées sur le toit de l'immeuble, instrumentées par la micro-station HOBO, qui a permis de caractériser les profils atmosphériques de l'humidité relative, de la température de l'air, ainsi que de la vitesse et de la direction du vent pendant une semaine. Nous présentons ici les résultats obtenus lors d'une seule journée de la campagne.

IV- 4.1.1. Température de l'air et humidité relative

La figure V-I8 montre l'évolution de la température et de l'humidité de l'air et au niveau du toit durant la journée de mesure. La courbe rouge indique les températures de l'air qui varient de 8h à 20h sont entre 22.9°C et 31.7°C comme valeur maximale enregistrée à 15h. Pour la première période nocturne (de 20h à minuit), les valeurs atteignent 28.0°C à 20h, ceci pourrait s'expliquer par le relâchement de la chaleur, emmagasinée durant le jour, et de ce fait, la manifestation du phénomène d'îlot de chaleur urbain au dessus du toit. Pour la deuxième période nocturne de 1h jusqu'à 7h00 du matin, les températures varient entre 20.0°C et 22.7°C, ce qui est dû au refroidissement nocturne.

La courbe bleue montre les variations de l'humidité relative pour la journée de mesure. La courbe affiche des valeurs d'humidité relative importantes de 1h à 7h du matin, elles sont comprises entre 57% et 72%, ce qui est dû à la diminution de la vapeur d'eau. Dans la journée de 8h à 20h, les valeurs hygrométriques atteignent un minimum de 37% à 16h. La baisse constatée est sans doute à mettre à l'actif d'une reprise des échanges avec la couche limite urbaine. A partir de 20h, les échanges avec cette dernière commencent à diminuer, et les valeurs d'humidité relative reprennent leur augmentation pour atteindre 70 % à minuit.

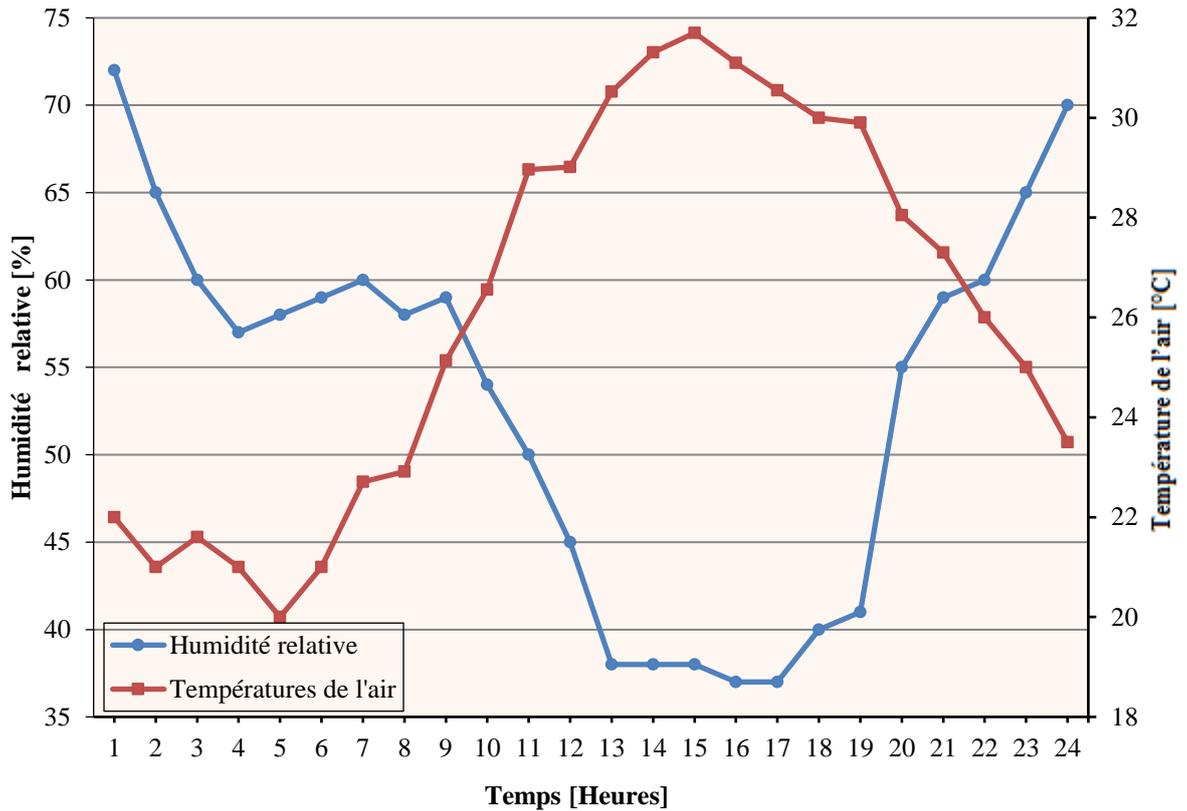


Figure IV-18: Evolution des températures de l'air et de l'humidité relative mesurées sur le toit de l'immeuble.

IV- 4.1.2. Vitesse du vent

Tout comme pour les températures, la figure IV-19 suggère une forte stabilité des masses d'air. Ceci est engendré par les chaleurs journalières communiquées en partie à l'air ambiant. De ce fait, le vent reste faible et ses vitesses n'excèdent pas les 3.1 m/s. Comme nous avons vu auparavant, nos observations sont réalisées par temps calme avec une vitesse de vent inférieure à 3 m/s. Le graphe suivant prouve que le vent est très faible au cours de la journée d'observation, constamment inférieur au seuil de 3.1 m/s, et la plupart du temps inférieur à 2 m/s.

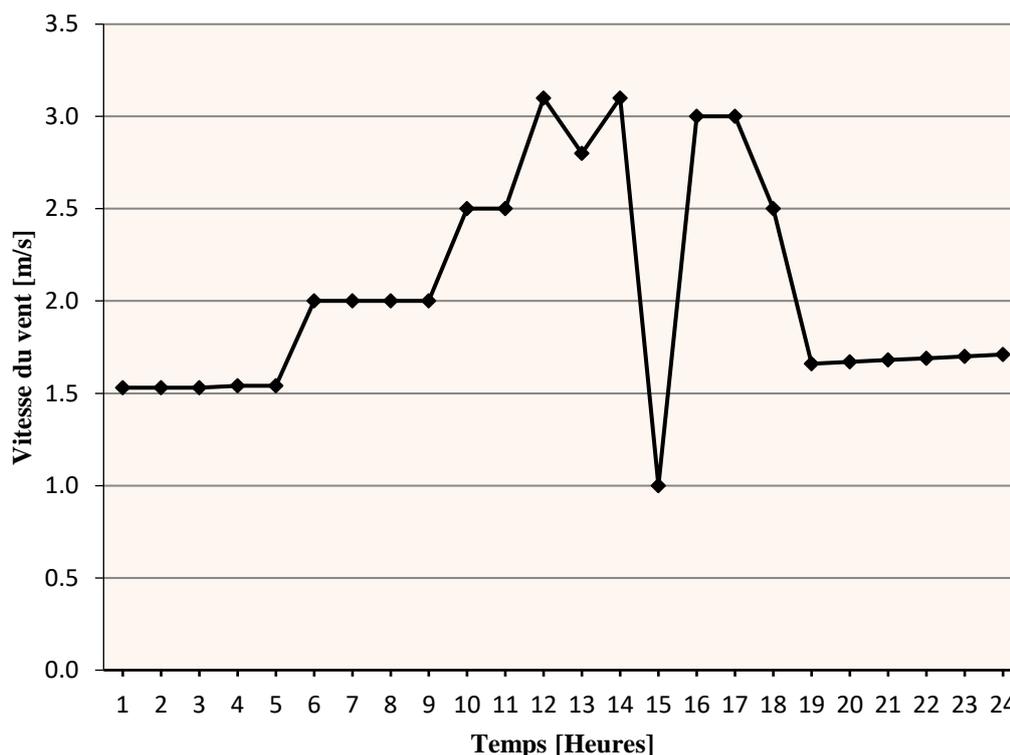


Figure IV-19 : Evolution des vitesses du vent mesurées sur le toit de l'immeuble.

IV- 4.1.3. Températures de surfaces des murs-rideaux de verre réfléchissant

Pour une meilleure compréhension des effets thermiques des murs-rideaux en verre réfléchissant, des thermographies sont effectuées d'abord afin d'analyser les températures de surface des parois. La figure IV-20 montre les températures de surface des quatre façades vitrées, pour trois séquences de la journée type d'été du 7 Août : 9h, 12h et 15h. Les températures de surface sont mesurées à l'aide d'une caméra thermique qui montre des variations significatives entre les différentes façades pour les trois séquences horaires. Les températures de surface dépendent incontestablement de l'orientation de chaque façade.

a) Température de surface vs. temps

La façade nord-est montre une température de surface maximale de 44.4°C le matin à 9h. Ceci est dû au rayonnement incident après le lever du Soleil. La température de surface diminue et atteint 27.7°C à 12h et $30,6^{\circ}\text{C}$ à 15h lorsque le Soleil est éloigné de cette façade. Cette augmentation à 15h peut être expliquée par la réflectance de la façade blanche du bâtiment de 9 étages en face (Figure IV-20).

Sur la façade sud-est, le thermogramme indique une valeur maximale de $48,4^{\circ}\text{C}$ à midi en raison du rayonnement incident. A 9h, la température mesurée est de $34,9^{\circ}\text{C}$, en raison de l'exposition au Soleil. À 15h, la température diminue car la façade est cachée du Soleil. Pour le côté sud-ouest, les premiers effets de chauffage apparaissent à la troisième séquence de la journée avec des valeurs plus élevées

comparativement aux façades nord-est et sud-est. En effet, à 15h, la température de surface atteint un maximum de 55,4 °C. En raison de l'exposition au Soleil, les températures sur les façades deviennent très élevées et provoquent un échauffement de l'air. Pendant la matinée à 9h, la façade sud-ouest affiche la température de surface la plus basse de 18,8 °C car elle est ombragée jusqu'au 12h lorsqu'elle reçoit de l'énergie solaire du Zénith et atteint 28,9 °C. Aux premières heures de la journée, la façade nord-ouest ne reçoit pas de rayonnement solaire direct, de sorte que ses températures de surface sont de 20,7 °C à 9h et 28,5 °C à 12h. Dans l'après-midi, une température de 39,0 °C est enregistrée à 15h. Comme susmentionné, le coefficient d'absorption de la façade en verre est environ 40%. Cette absorption augmente de manière significative les températures de surface. Ensuite, l'enveloppe réémet le rayonnement infrarouge aux environnements intérieurs et extérieurs.

b) Température de surface vs. hauteur

Plusieurs images sur la figure IV-20 montrent l'évolution de la température de surface avec la hauteur. On peut voir que la température diminue avec la hauteur, en particulier pour la façade nord-est durant toute la journée, mais aussi pour les façades sud-est et sud-ouest à 15h et pour les façades nord et ouest à 12h. Le niveau supérieur du bâtiment est plus froid que les niveaux inférieurs. Ceci s'explique par l'effet dièdre. Les façades en contact avec la surface horizontale (route en asphalte) crée un effet de dièdre (Lehtih et Izard, Marcillat et Destobbeleire, 2002), qui permet des échanges convectifs de chaleur entre les deux surfaces adjacentes - horizontale et verticale. Par conséquent, il y a une chaleur supplémentaire reçue par les niveaux inférieurs du bâtiment, en provenance de la réflexion de l'asphalte. Ces échanges convectifs de chaleur jouent un rôle important dans le réchauffement de l'air. Dans notre cas, le bâtiment est entouré de routes en asphalte. Priyadarsini, Wong et Cheong Kok Wai (2008) et Gros, Bozonnet et Inard (2014) ont également montré par des études numériques et expérimentales la diminution de la température de surface avec la hauteur des bâtiments. Les deux expliquent les températures plus élevées aux niveaux inférieurs par la proximité de la surface de la route, ce qui augmente la température de l'air et donc la température de surface du bâtiment par un transfert de chaleur par convection.

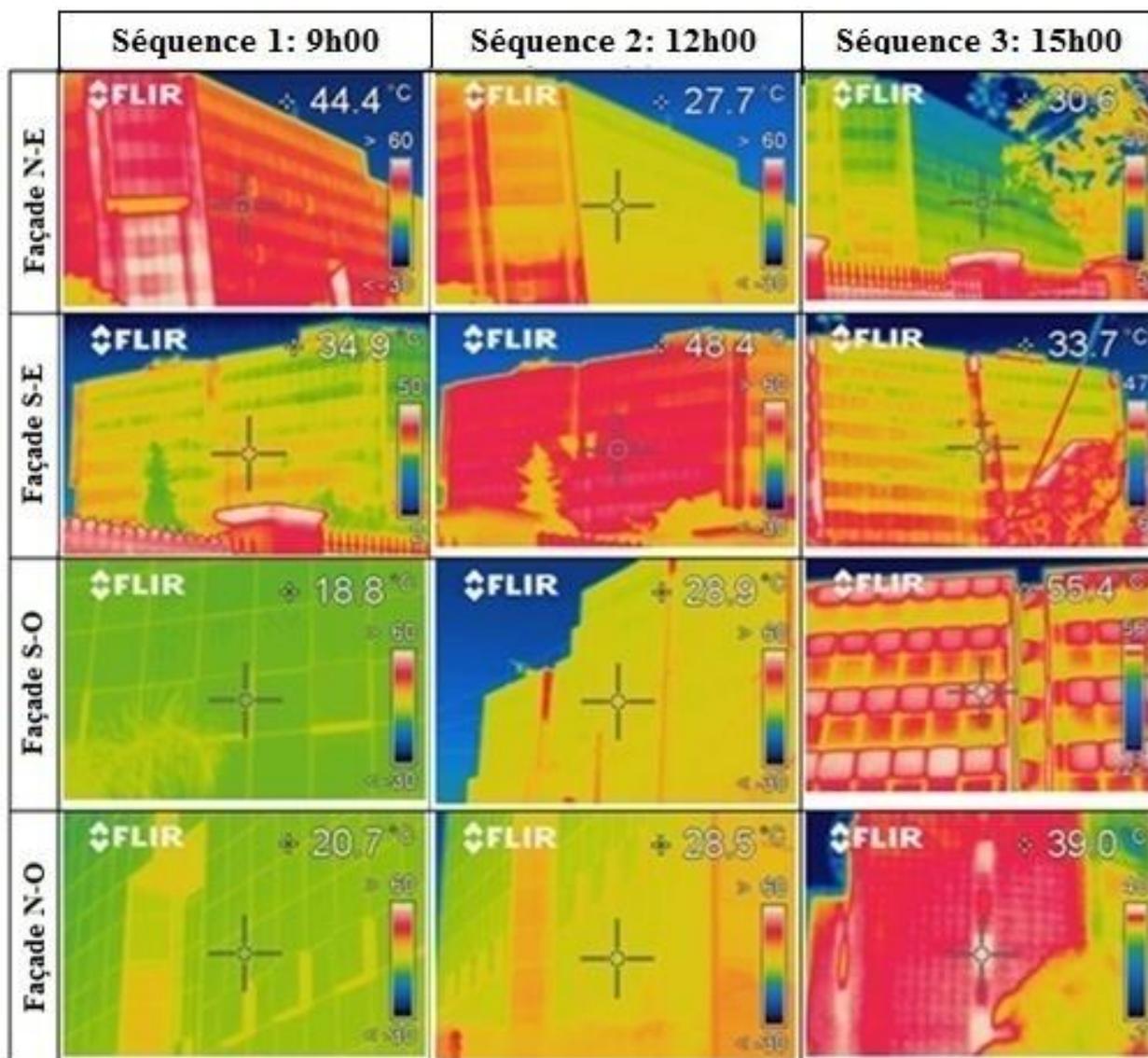


Figure IV-20 : Températures de surface des murs-rideaux de verre réfléchissant.

Ces captures indiquent que les murs-rideaux de verre chauffent du fait qu'ils réfléchissent et absorbent le rayonnement solaire. Par la suite, ils réémettent le rayonnement infrarouge vers l'intérieur et l'extérieur, ce qui génère une charge thermique supplémentaire à celle qui est produite par conduction et convection. Danks et al. (2016) note que la réflectance importante du verre réfléchissant augmente la température de surface des espaces environnants (façades, parcs, trottoirs et toits). Par conséquent, les auteurs proposent de limiter l'irradiation réfléchi par les façades à 1500 W/m^2 .

Cependant, comme nous l'avons vu dans chapitre III § 3.3.3, de nombreux chercheurs ont largement étudié les propriétés des surfaces dans les villes, et ont montré que l'albédo élevé des trottoirs et des toits peuvent atténuer l'îlot de chaleur urbains et la demande de climatisation des bâtiments. A titre d'exemple, Gros et al. (2016) rapportent que pour un asphalte standard et un asphalte froid, ayant

respectivement des albédos de 0.1 et 0.7, les températures de leurs surfaces ont une différence de 10°C. La différence dans la demande d'énergie est proche de 78 % pour la même étude. Carnielo et Zinzi (2013) révèlent également une différence de température de surface d'environ 19°C pendant une période d'irradiation maximale. Ils comparent les revêtements traditionnels d'asphalte vieilli et d'asphalte blanc ayant respectivement des albédos d'environ 0,10 et 0,65 respectivement. L'économie d'énergie réalisée avec l'asphalte blanc cassé est de 18,9 % pour un bâtiment non isolé et de 14,6 % pour un bâtiment isolée.

IV- 4.1.4. Microclimat autour du bâtiment

IV- 4.1.2.1 Comparaison entre valeurs simulées et mesurées

Dans notre simulation avec ENVI-met, l'effet du verre réfléchissant est modélisé à l'emplacement de récepteurs extérieurs (R) situés à une distance de 1 m des façades selon leurs quatre orientations (NE, SE, SO et NO), et pour trois différents niveaux $H = 1,8$ m, $H = 17$ m et $H = 31$ m. La figure IV-21 montre l'évolution des températures de l'air simulées à 1 m des quatre façades (NE, SE, SO et NO) pour une hauteur de 1,80 m, celles mesurées sur le toit par la micro-station HOB0, et celles mesurées par la station météo de référence (ST-Réf) de la ville. On constate que les courbes de températures de l'air sont très décalées en amplitude. De 8h à 20h, les températures enregistrées à la ST-Ref sont inférieures à celles affichées par les récepteurs près des façades et celles mesurées sur le toit avec une différence maximum de 5.7°C à 17h. Pourtant, pendant la journée, il ya un réchauffement microclimatique dans la ville en raison de la densification. Les conséquences de cette caractéristique sont un «piégeage» accru du rayonnement solaire et des vitesses de vent plus faibles, ce qui entraîne une dissipation beaucoup plus faible de la chaleur.

Toutes les valeurs de température de l'air simulées aux emplacements des récepteurs sont plus élevées que celles prises sur le toit, qui est supposé recevoir la quantité d'énergie solaire la plus importante en été, alors qu'elle affiche -2,5°C comme différence de température d'air maximale par rapport au récepteur R-NO. Au début de la journée, la température de l'air mesurée sur le toit est égale à celle identifiée par le récepteur R-NE, mais supérieure de 1,5°C (Toit-SO) aux trois autres récepteurs à 8h et à 9h, cette température est égale à celles simulées aux R-SO et R-NO, mais inférieure aux deux autres. En fait, le rayonnement solaire réchauffe les façades du bâtiment ensoleillées, qui en retour, émettent un rayonnement à ondes longues et courtes chauffant d'autres surfaces. Le rayonnement solaire est ensuite réfléchi plusieurs fois entre des surfaces voisines.

La température de l'air la plus basse et la plus élevée autour du bâtiment sont respectivement calculées par les récepteurs R-SO et R-NO avec 23,4°C à 8h et 36,2°C à 17h respectivement. Quelques heures après le lever du soleil, la façade Nord-Est, reçoit et réfléchit les rayons solaires, ce qui augmente la température de l'air au niveau du récepteur R-NE comparé aux trois autres récepteurs par l'effet de l'orientation ($T = 24,9^{\circ}\text{C}$ à 8h). De 9h à 12h, les températures de l'air au même point restent plus élevées que celles simulées aux façades NO et SO. Alors qu'en après-midi, elles passent sous les valeurs des trois autres points. Pour le récepteur R-SE, au début de la journée, les températures de l'air sont inférieures à celles identifiées au niveau du récepteur NE, mais au-dessus de celles simulées aux façades SO et NO. De 9h à 15h, elles sont au-dessus de celles des autres récepteurs. À 9h, elles sont égales à celles du R-NE, et à 20h à celles du récepteur R-NO. En ce qui concerne le récepteur R-SO, ses températures sont égales à celles du R-NO de 8h à 12h, mais inférieures à celles calculées au niveau des points R-NE et R-SE. De 12h à 20h, elles dominent seulement les températures du point R-NE.

La courbe des températures de l'air du récepteur R-NO est identique à celle du récepteur R-SO jusqu'à 12h, et en dessous de celle des récepteurs R-NE et R-SE. De 13h à 15h, la courbe est inférieure à la courbe du R-SE mais au-dessus des autres. De 16h la courbe passe au-dessus des autres courbes. À 20h, les courbes se rencontrent au coucher du soleil; la courbe du toit est égale aux quatre autres avec l'apparition du phénomène d'ICU, donc des températures plus élevées se produisent sur les toits des immeubles. L'intensité de l'ICU est très rapide juste après le coucher du soleil en raison des différences significatives entre le refroidissement rural et urbain. Plus tard dans la nuit, les deux gradients s'harmoniseront et l'intensité diminue.

Plusieurs raisons expliquent cette observation. Une première raison est que, lorsque le rayonnement solaire direct intercepte le mur-rideau, une partie du rayonnement solaire est réfléchi de manière diffuse. La somme de tous les rayonnements diffus d'ondes courtes, constitués par le rayonnement solaire diffus et la réflexion diffuse du rayonnement solaire direct, est répartie sur les surfaces et réfléchi plusieurs fois entre les bâtiments. En retour, les surfaces urbaines émettent un rayonnement à ondes longues conduisant à des températures de surface et d'air plus élevées. Une deuxième raison est que la dissipation de la chaleur du site est beaucoup trop lente en raison de la faible vitesse locale du vent pendant la journée d'étude. Une troisième raison est qu'en raison du phénomène d'ICU, la température de l'air est plus élevée dans la ville, et donc dans la rue il fait plus chaud.

Notons que l'élévation de la température de l'air, à proximité des façades, est également induite par les pertes de chaleur de l'enveloppe bâtie qui sépare les milieux intérieurs des milieux extérieurs. De ce fait, l'apport de chaleur externe près d'une surface est amplifié par la chaleur émise, réfléchi ou

diffusée par l'enveloppe. Dans des espaces plus ouverts, les températures les plus élevées sont toujours celles enregistrées près des surfaces thermiques, en particulier celles exposées au rayonnement solaire. En effet, et conformément aux observations de Noilhan (1980), la température de l'air est généralement plus élevée près d'un mur ensoleillé, particulièrement en été, que dans un espace dégagé.

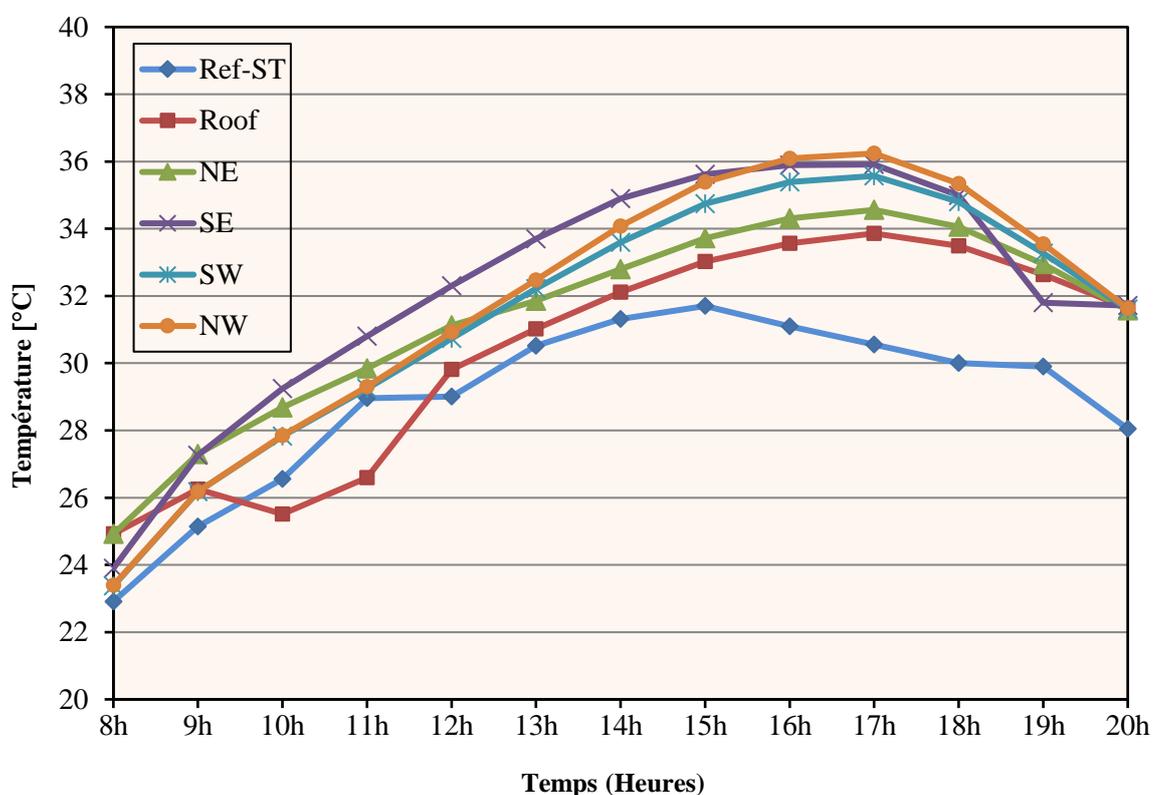


Figure IV-21 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées.

IV- 4.1.2.2 Evaluation de la température en fonction de la hauteur

Les figures IV-22, IV-23, IV-24 et IV-25 (a, b, c) comparent les températures de l'air autour du bâtiment pour les trois différents niveaux (RDC, niveaux intermédiaire et dernier niveau), pour quatre séquences horaire de la journée : 9h, 12h, 15h et 18h. Nous constatons que les températures ambiantes sont généralement plus élevées au premier niveau à 1,80 m du sol. Le tableau IV-6 donne les moyennes des températures d'air calculées par ENVI-met. Les moyennes des températures sont comprises entre 26.7°C pour le dernier niveau (H= 31 m) à 9h du matin, et 35.0°C pour le RDC (H= 1.8 m) à 15h d'après-midi. Un écart maximal de 1,7°C est obtenu à 15h entre le RDC (H= 1.8 m) et le dernier niveau (H= 31 m).

Tableau IV-6 : Moyenne des températures de l'air en fonction de la hauteur.

Niveaux des niveaux	9h	12h	15h	18h
Moy. température au RDC	27.0	31.5	35.0	34.7
Moy. température niv. intermédiaire	27.0	30.5	34.0	34.2
Moy. température dernier niveau	26.7	30.2	33.5	33.8

Les différences de température de l'air aux trois niveaux peuvent être attribuées à la quantité de chaleur transférée de ces différentes faces du site à l'air, en tant que flux sensible. Ce dernier dépend des températures de surface affectées par l'exposition solaire (Allegrini et Dorer, 2012). Comparé aux deux niveaux (b) et (c), au niveau (a), avec la présence de plus de surfaces irradiées verticales et horizontales ainsi, une énergie plus rayonnante est dissipée. Rappelons que les travaux de Chatzimitriou et Yannas (2015) mentionnés précédemment mettent en évidence la forte influence de l'asphalte, avec un albédo de 0.15, qui a toujours été la surface la plus chaude, sur la production d'énergie.

Pour les atriums, la température de l'air se situe entre une moyenne de 34.0°C pour le premier niveau, 33,7°C pour le deuxième niveau, et 33,5°C pour le troisième niveau, à 15h. L'atrium le plus chaud est le plus petit en raison du piégeage du rayonnement solaire. Les résultats démontrent l'effet de la réflexion des façades de verre sur le microclimat en raison des multiples réflexions entre les façades et le sol, par des effets dièdres, conduisant à des températures de surface et d'air plus élevées.

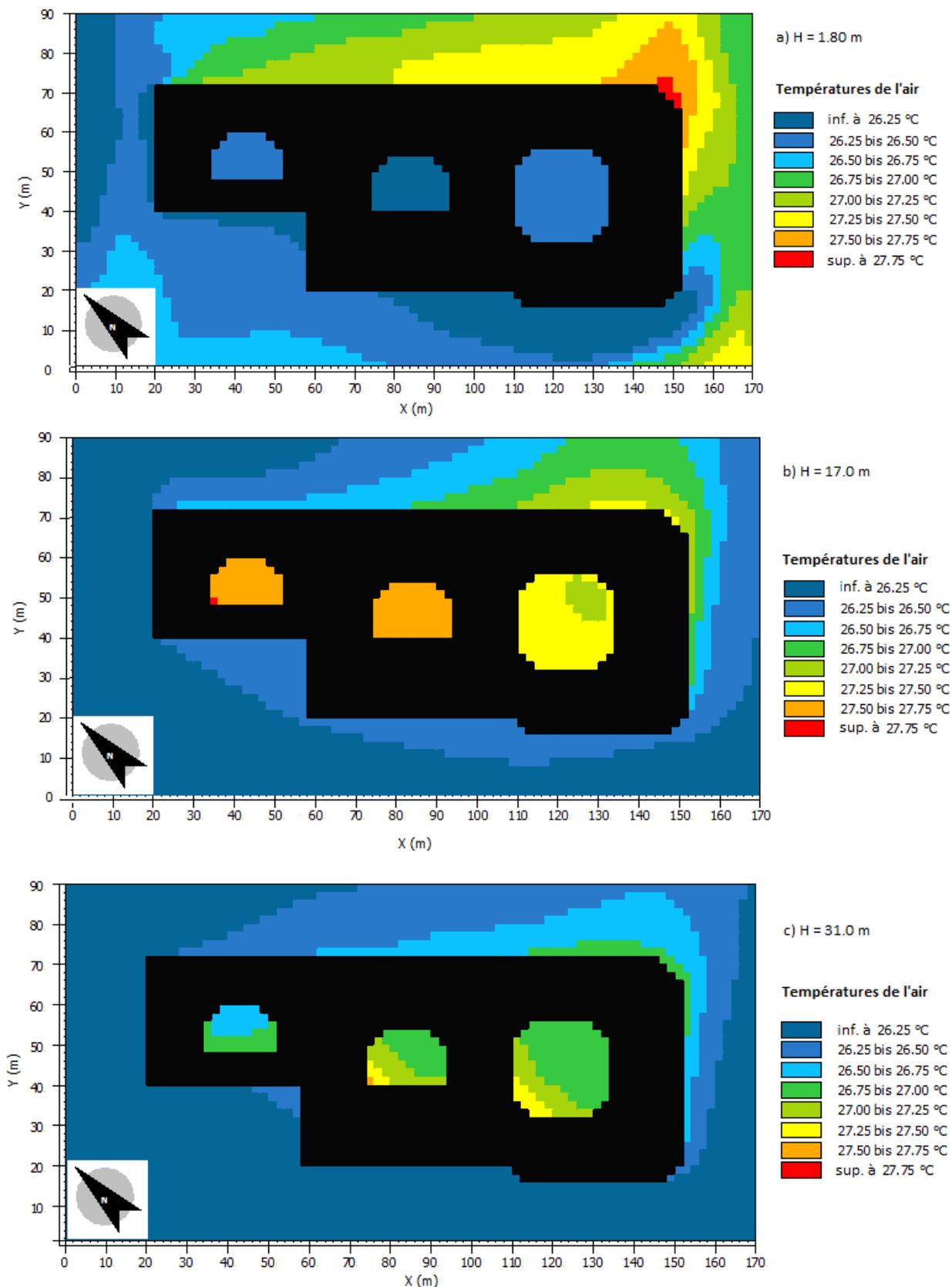


Figure IV-22 : Isothermes autour de l'immeuble à 9h du matin, aux trois niveaux considérés.

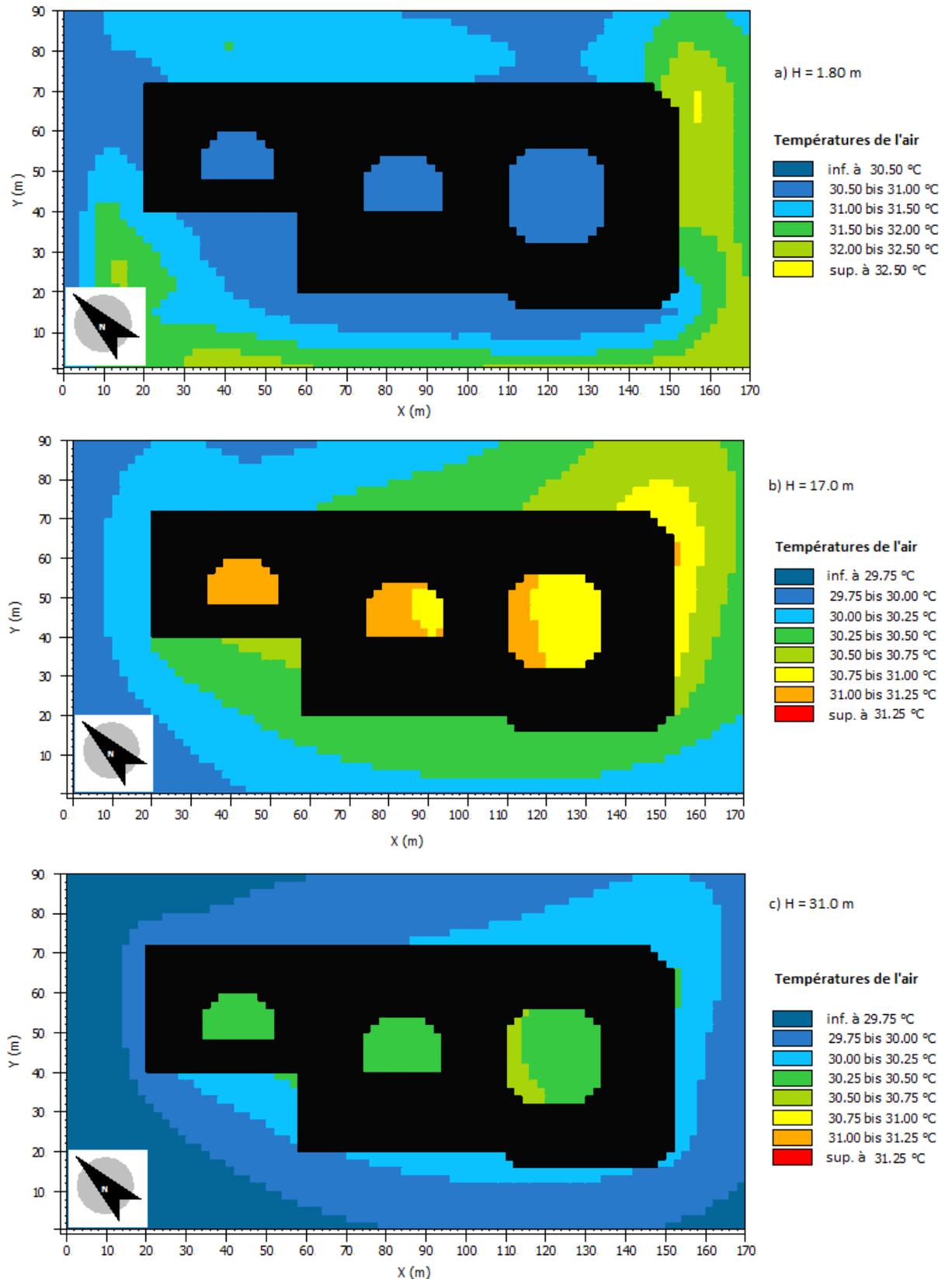


Figure IV-23 : Isothermes autour de l'immeuble à 12h, aux trois niveaux considérés.

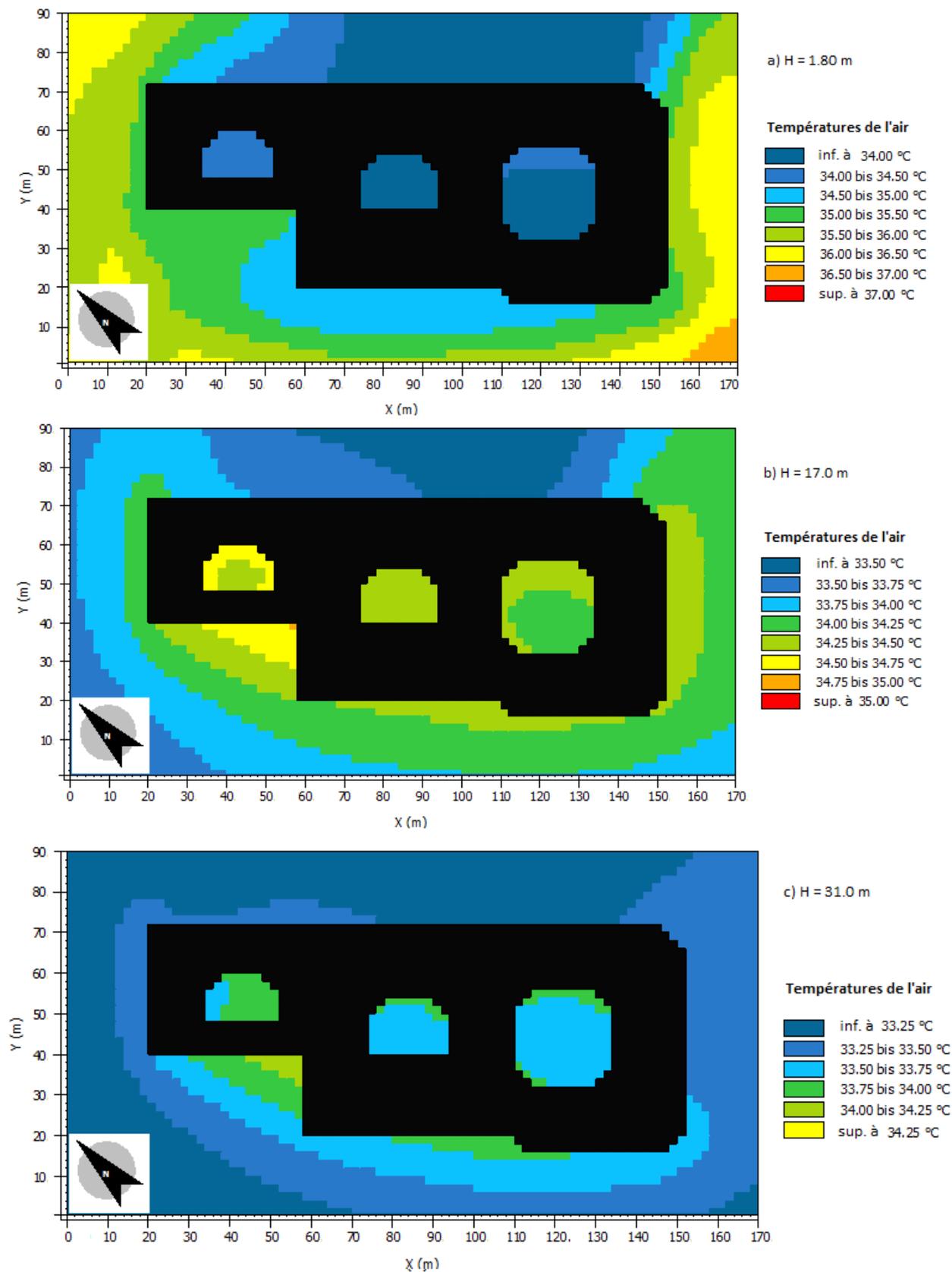


Figure IV-24 : Isothermes autour de l'immeuble à 15h d'après-midi, aux trois niveaux considérés.

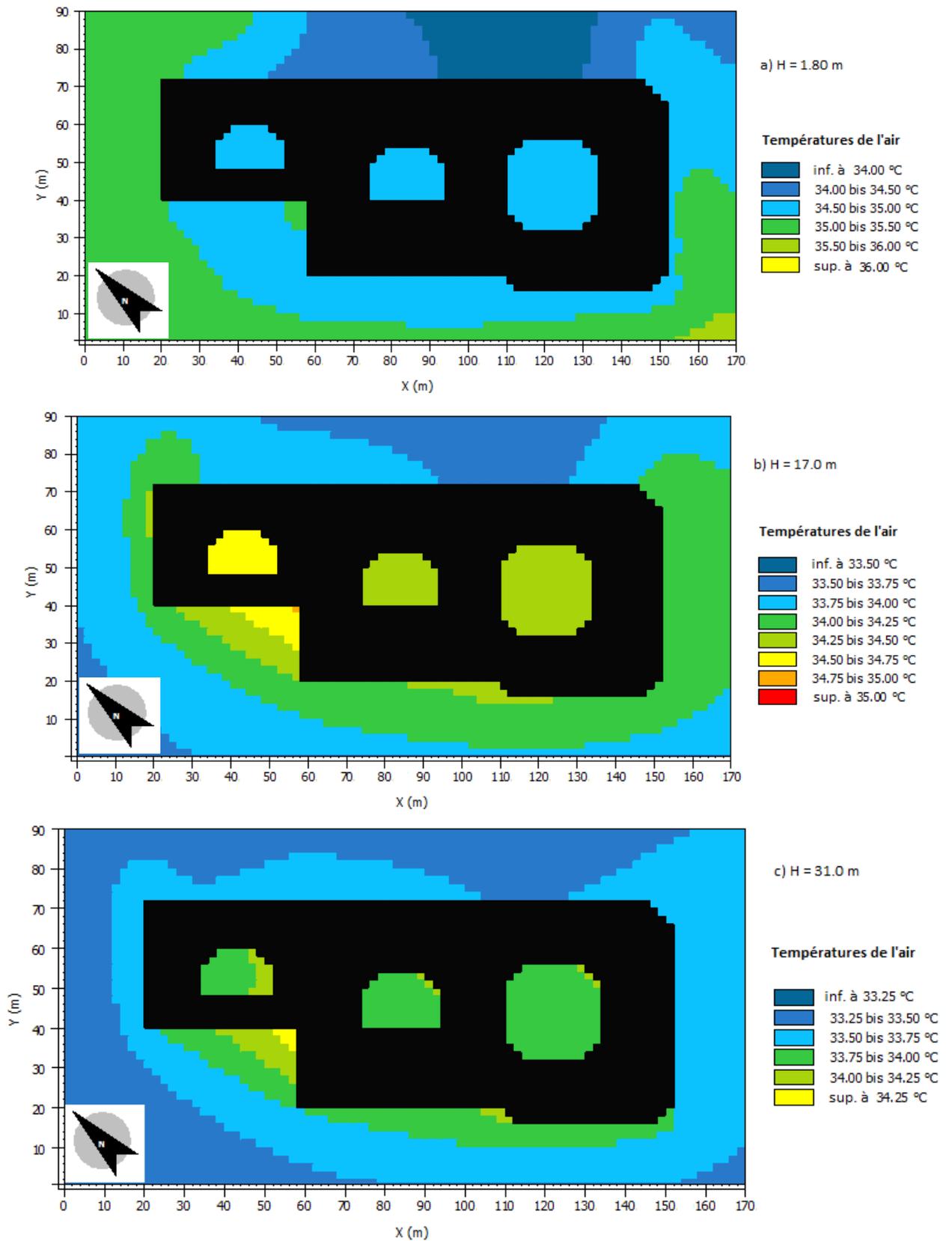


Figure IV-25 : Isothermes autour de l'immeuble à 18h d'après-midi, aux trois niveaux considérés.

IV- 4.2. Calcul des consommations d'énergie de climatisation

Après avoir montré l'impact du bâtiment vitré sur son environnement extérieur, nous avons mené une étude pour quantifier l'impact de cet environnement sur la charge de climatisation de ce même bâtiment. L'évaluation de la charge de climatisation a été réalisée avec Ecotect. L'énergie de climatisation du bâtiment est calculée pour une journée type d'été le 2 août 2013, pour trois microclimats (cas 1, 2 et 3). Les charges de climatisation sont calculées pour 7 zones thermiques (4 zones extérieures et 3 zones intérieures donnant sur les patios), et pour 3 niveaux (RDC, niveau intermédiaire et dernier niveau). Pour les trois cas considérés, la première étape consiste à créer les fichiers météo avec Ecotect. Selon les cas, ils sont soit mesurés par la station météorologique (cas 1), la micro-station HOBO sur le toit (cas 2) ou calculé par ENVI-met (cas 3). Dans ce dernier cas 3, le fichier météo est créé à partir des données climatiques calculées aux 7 récepteurs, et pour les 3 hauteurs. Au total, 21 fichiers météo ont été générés pour calculer précisément la charge de refroidissement des 21 zones thermique.

Les fichiers météo des récepteurs pour qu'ils soient lus et chargés par Ecotect, nous avons procédé par les étapes suivantes :

- Nous avons d'abord ouvert l'un des fichiers texte d'ENVI-met par Microsoft Excel.
- Nous l'avons réorganisé dans Excel, en fonction des données dont on a besoin pour la simulation, par la création de plusieurs macros permettant la gestion des données utiles. Ces macros sont définies comme une suite d'instructions automatiques écrites avec un langage de programmation de Visual Basic pour Application-VBA (Figure IV-26).
- Puis, nous avons ouvert les autres fichiers et auxquels les macros précédemment créées ont été exécutées.
- Après cela, tous les fichiers météorologiques sont enregistrés dans Excel sous l'extension CSV.
- Dans l'outil météo d'Ecotect nous avons chargé les fichiers sous l'extension (Separated Value Files) pour les convertir par la suite sous l'extension (Custom Column Format *.CCF) et les utiliser pour les différents calculs d'Ecotect.

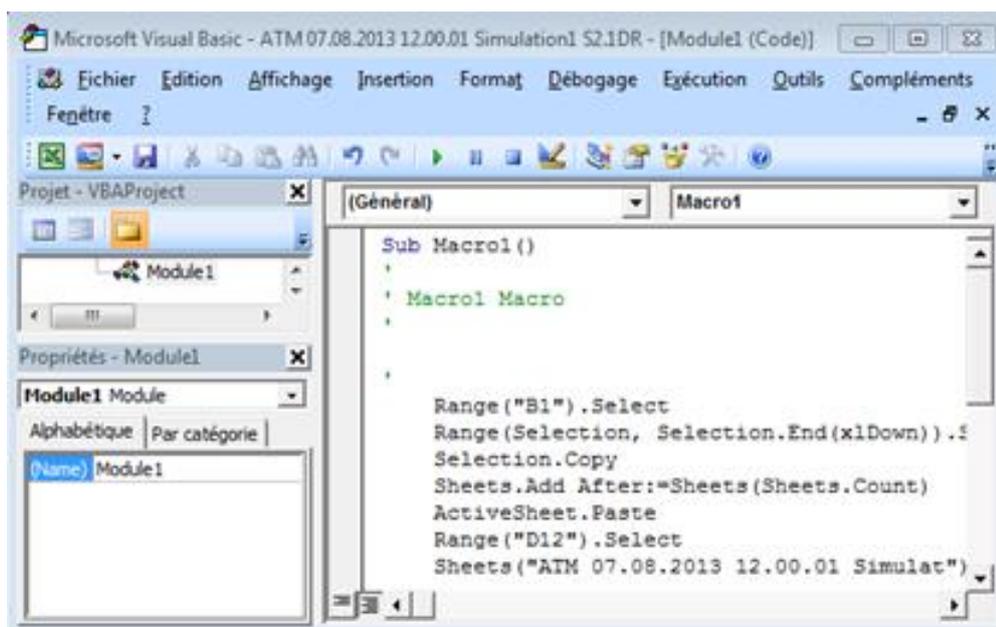


Figure IV-26: Création des macros dans VBA. (Source : Auteur)

La Fig. 13 montre la charge de climatisation moyenne des 21 zones considérées au cours de la période (8: 00–20: 00), pour les trois microclimats. Comme prévu, la charge de climatisation la plus élevée est obtenue dans le Cas-3, correspondant au microclimat calculé avec ENVI-met. Ce microclimat prend en compte l'impact de l'îlot thermique urbain créé par le bâtiment en verre réfléchissant, et donc la température de l'air est plus élevée que pour les autres microclimats. La charge de climatisation calculée dans le Cas-2 avec les données météorologiques sur le toit sont inférieures de 8%. En effet, la microstation mesure le microclimat urbain, mais seulement pour une position localisée, sur le toit, et ne peut pas prendre en compte les reflets des façades verticales du bâtiment. Enfin, la charge de refroidissement la plus faible est calculée dans le Cas-1, avec les données mesurées à la station de référence loin du bâtiment. La valeur est inférieure de 15% au Cas-3. Ceci étant dit, les charges de climatisation de cet immeuble vitré sont 4,4 fois supérieures à celles d'un bâtiment BBC (bâtiment basse consommation) avec 50 Wh/m²/jour.

Finalement, la température extérieure peut donner des résultats sous-estimés (Cas-1 et Cas-2). Les températures calculées autour du bâtiment ont permis de discuter l'effet de la réflectance du verre sur le microclimat urbain, et son impact sur la charge de refroidissement du bâtiment. Ces températures sont donc appliquées pour estimer la charge de refroidissement du bâtiment. Les résultats montrent l'impact significatif de l'interaction du microclimat sur la demande d'énergie qui est fortement affectée par la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface du bâtiment.

Ces résultats montrent l'impact significatif du microclimat sur la demande en énergie, qui est fortement affectée par l'augmentation de l'énergie solaire engendrée par les façades réfléchissantes du bâtiment. Ils sont en accord avec d'autres études dans la littérature, qui ont montré l'impact du microclimat sur la demande en énergie telle que Bouyer et al., (2011); Bozonnet et al., (2005); Toparlak et al., (2018).

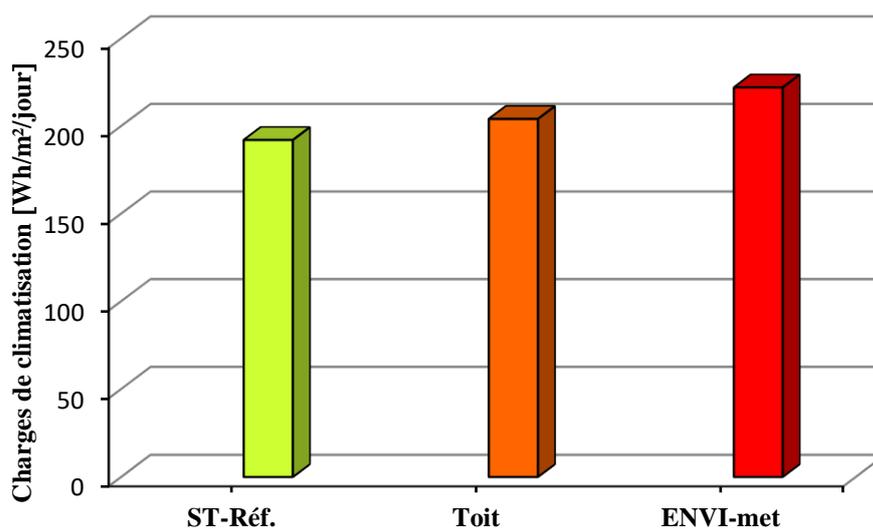


Figure IV-27: Charges de climatisation pour les Cas-1, Cas-2 et Cas-3.

IV- 5.Conclusion

Les charges de climatisation d'un immeuble couvert entièrement en verre réfléchissant est calculée pour le climat méditerranéen d'Alger (Algérie). Le principal paramètre d'influence du microclimat urbain est pris en considération: les multiples réflexions entre façades du bâtiment et les surfaces du voisinage. Cette étude porte sur trois données météorologiques différentes : la station météorologique de référence, les données mesurées sur le toit du bâtiment, et les données calculées par ENVI-met autour du bâtiment sur la base de mesures réelles. On constate que la demande de climatisation du bâtiment avec les données d'ENVI-met est plus élevée que les deux autres cas (données de station météorologique et données du toit). Pour le climat considéré d'Alger, la différence entre les zones rurales et urbaines est importante pour la climatisation de l'espace. L'ICU du site urbain contribue à l'amplification de nos observations. Le mécanisme le plus important est l'échange de rayonnements entre l'enveloppe du bâtiment et les surfaces urbaines en raison des inter-réflexions. De plus, une température de surface plus élevée provoque une importante température de l'air, donc une charge de refroidissement plus considérable. Ce qui fait qu'en ignorant l'effet d'ICU, une sous-estimation importante de la demande de climatisation est engendrée. En ce qui concerne les reflets des façades, la température de l'air augmente au niveau du RDC du bâtiment et elle est plus élevée pour la façade orientée Sud-Est. L'utilisation du

verre réfléchissant présente un impact thermique important en augmentant la température de l'air extérieur et la charge de climatisation. Pour évaluer cette dernière, le calcul du microclimat autour du bâtiment nous semble être la solution la plus appropriée. Une méthode complète pourrait consister à combiner des outils de simulation de microclimat, et de l'énergétique du bâtiment.

V- Etude de sensibilité des facteurs impactant le microclimat et la consommation énergétique

V- 1. Introduction

Si dans le chapitre-IV nous avons procédé à l'étude d'un bâtiment existant avec une enveloppe en verre réfléchissant, dans le présent chapitre, nous allons nous intéresser à une échelle beaucoup plus grande à savoir celle d'une rue de typologie Canyon. Pour cela d'ailleurs, nous avons choisi une morphologie urbaine, ce qui est un cas classique et très répandu. De nombreux travaux utilisent cette géométrie courante pour des études liées à la consommation d'énergie, comme nous l'avons recensé au chapitre-III. Quant au présent chapitre, il nous servira à quantifier les impacts de différents paramètres (facteurs), dont le revêtement de verre réfléchissant sur la consommation énergétique des bâtiments.

L'objectif de cette thèse étant de mettre en évidence l'impact du revêtement vitré sur le microclimat, la réflectivité du verre est un des facteurs étudiés. Cependant, d'autres facteurs influencent le microclimat, et de ce fait, nous avons opté de mener une étude de sensibilité rigoureuse, suivant une méthodologie adaptée. L'avantage des études de sensibilité ou paramétriques est qu'elles permettent d'obtenir des données de manière brève et concise pour des configurations qui n'existent pas encore (nouvelles formes de bâtiments, agencement des rues), et ce afin d'optimiser les nouvelles constructions. Dans ce chapitre, nous présenterons notre étude paramétrique, en considérant, pour le climat d'Alger, deux géométries (H/W) du canyon, deux orientations cardinales (Nord-Sud et Est-Ouest) et deux coefficients de réflectivité solaire (vitrage réfléchissant et vitrage transparent). La méthode de couplage numérique associant les deux outils utilisés pour l'étude d'un cas réel est adoptée (Cf. Ch-IV). L'investigation concerne les charges de refroidissement pour une journée type d'été. L'énorme base de données est analysée statistiquement en utilisant la méthodologie du plan d'expériences (Design of Experiments-DoE). Nous cherchons à vérifier l'impact du reflet sur l'espace extérieur en termes de conditions thermiques, ainsi que sur l'espace intérieur en termes de consommations d'énergie de climatisation.

V- 2. Présentation de l'étude paramétrique

Afin d'établir notre travail de recherche, qui consiste en une étude paramétrique, le comportement thermique d'une rue canyon fictive est étudiée par la méthode de simulations numériques, en fonction de différentes configurations, et pour y arriver, nous avons utilisé la méthodologie du plan d'expériences.

V- 2.1. Méthodologie du plan d'expériences (Design of Experiments-DOE)

Les études paramétriques impliquent souvent un grand nombre de cas à modéliser. Effectuer des simulations dynamiques sur ordinateur pour plusieurs cas, parfois aléatoires, peut être une activité extrêmement laborieuse, de plus, le temps de calcul associé est très important.

Une alternative efficace pour remédier à ce problème est la mise en œuvre d'un plan d'expériences (*Design of Experiments* – DOE) sur une analyse paramétrique de sensibilité. Ces méthodes sont employées afin d'obtenir les informations qualitatives les plus pertinentes d'une base de données d'expériences, en réalisant le plus petit nombre possible d'expériences. Selon ces méthodes, les expériences sont prévues de manière à ce que les observations redondantes puissent être éliminées sans aucune perte de représentativité, en réduisant le nombre d'essais, afin de fournir des informations sur les interactions les plus importantes entre les variables (Montgomery, 2013).

V- 2.1.1. Historique

Utiliser des expériences pour comprendre des phénomènes est un fait que l'humanité connaît depuis longtemps. Ainsi au moyen âge, Nicolas Oresme (1325-1382) mentionne l'utilisation de ce procédé dans ses écrits. Par la suite, d'autres chercheurs se sont lancés pour leurs travaux dans la méthode expérimentale à l'exemple de l'un de ses précurseurs Francis Bacon (1561-1626), et Arthur Young (1746-1820) qui aborda la répétabilité des expériences en considérant leur variabilité (Tinsson, 2010).

Toutefois, c'est au 19^{ème} siècle, que les méthodes expérimentales se démocratisent. et c'est à cette période que les plans d'expériences ont été utilisés en tant que méthode rigoureuse d'expérimentation, grâce aux travaux du mathématicien Ronald Fisher (1890-1962), qui a été employé en 1919 dans un centre de recherche agronomique à Londres, "Rothamsted Experimental station". En cherchant à augmenter les rendements agricoles, R. Fisher a constaté l'impossibilité de réaliser la totalité des expériences en combinant les divers types d'engrais, les variétés végétales, les méthodes de cultures, les types de sol..., ce qui l'a mené à réaliser des configurations expérimentales fondées sur des modèles statistiques rigoureux, cette étape a constitué le commencement de la méthode théorique des plans d'expériences. Par la suite, d'autres chercheurs ont utilisé et développé les techniques de planification expérimentales dans d'autres domaines que l'agronomie, à l'exemple du chercheur japonais G.Taguchi, qui a vulgarisé leur usage dans le milieu industriel, en réalisant des tables de configuration expérimentales faciles à utiliser pour les personnes non-spécialistes (Tinsson, 2010).

Parmi les chercheurs ayant utilisé le plan d'expériences, nous citons :

- Ali-Toudert (2009) a adopté le plan d'expériences dans son étude paramétrique dans le but d'analyser les rapports entre l'échelle urbaine et l'échelle architecturale en termes de performances énergétiques des bâtiments.

- Bonte et al. (2014) l'ont utilisé dans le but d'évaluer l'impact du comportement des usagers sur la performance énergétique.
- Gossard et Lartigue (2013) l'ont utilisé afin de mesurer l'impact de l'optimisation des parois extérieures sur la performance énergétique des bâtiments.
- Faye (2016) l'a utilisé pour étudier l'impact de la structure interne des matériaux isotropes granulaires sur leurs propriétés thermiques macroscopiques.

V- 2.1.2. Les facteurs

Pour bien mener la méthodologie DOE, nous commençons par identifier les facteurs qui sont les variables d'entrée supposées influencer les réponses d'intérêt. Pour chaque variable d'entrée, plusieurs niveaux sont définis. Ces niveaux représentent la plage de l'effet désiré sur chaque variable. Les scénarii d'expériences sont ensuite définis sur une méthode spécifique de projet expérimental, qui détermine chaque paramètre d'entrée pour chaque série de tests expérimentaux. Les réponses sont évaluées, en observant les différences possibles entre les groupes des changements d'entrée. Ces différences sont alors attribuées aux variables d'entrée individuellement (effet principal) ou en combinaison avec une autre variable d'entrée (effet d'interaction).

V- 2.1.3. Méthode du plan Factoriel Fractionné

Il existe de nombreux types de plans d'expériences. Notre choix s'est porté sur un plan fractionnel complet 2^n . Cette fraction est choisie de manière à exploiter le principe de la rareté des effets (sparsity of effects) capable de fournir des informations représentatives sur les effets les plus importants liés au problème, tout en utilisant une fraction réduite de l'information par un plan factoriel complet en termes d'exécutions expérimentales et des ressources informatiques. Ce type de plan consiste à assigner deux niveaux (haut et bas), respectivement notés -1 et $+1$, aux n facteurs de l'expérience et à évaluer ensuite la réponse pour chacune des 2^n combinaisons. Ainsi, les simulations doivent être réalisées pour chaque réponse, afin de calculer les effets de chacun des facteurs suivant l'équation V-1. Il s'agit de trouver une combinaison linéaire entre les facteurs permettant de mettre en équation l'expérience (Bonte, 2014).

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i,j,k=1}^n a_{ijk} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k + \dots \quad V - 1$$

Avec, Y la réponse, X_i les facteurs, n le nombre de facteurs, et a_{ij} les effets estimés des différents facteurs.

V- 2.1.4. Choix des paramètres (facteurs)

1) Modèle urbain : canyon

Pour l'analyse de sensibilité des facteurs considérés dans le cas présent, nous utilisons un modèle urbain simplifié d'une rue canyon, à partir duquel il est possible de créer des variations contrastées suivant la méthode d'analyse statistique. Un modèle urbain simplifié de deux géométries de la rue canyon d'une longueur de 54 m, composées de neuf enveloppes bâties de formes cubiques identiques, de dimensions de 18 m x 18 m x 18 m est considéré. Le bâtiment situé au centre est pris comme zone d'étude pour déterminer quantitativement l'influence des différentes actions sur ses consommations énergétiques de climatisation (Tableau V-1).

2) Paramètres

- **Prospect H/W**

A l'échelle urbaine, nous faisons varier la largeur des rues (W) en gardant une seule hauteur des bâtiments (H) pour obtenir deux prospects H/W différents :

- H/W=1 pour un **canyon large** avec: H=18 m et W=18 m.
- H/W=3 pour un **canyon étroit** avec: H=18 m et W=6 m.

- **Orientation cardinale**

Ces canyons ont été examinés selon deux orientations :

- L'axe du canyon est parallèle à l'axe Est-Ouest (référé **canyon EO**).
- L'axe du canyon est parallèle à l'axe Nord-Sud (référé **canyon NS**).

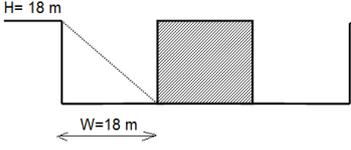
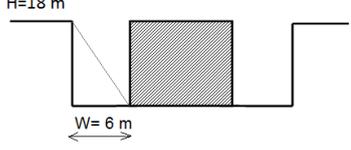
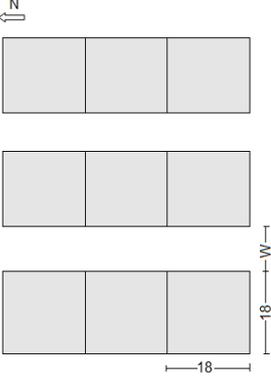
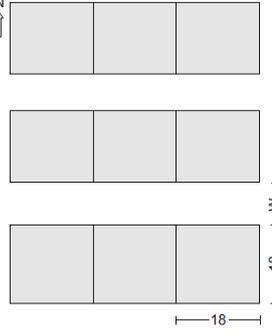
- **Réfectivité solaire du verre**

A l'échelle du bâtiment, la caractéristique principale de l'enveloppe est évaluée, notamment la réfectivité des murs-rideaux de verre :

- Verre transparent : 0.05.
- Verre réfléchissant bleuâtre 0.32.

La composition de l'espace de recherche statistique doit être aussi complète que possible permettant de mieux mesurer la sensibilité de chaque facteur sur les variables réponses, tout en évitant les biais ou les redondances sur les résultats. Les données météorologiques d'une journée type d'été (07 Août 2013) sont considérées comme base d'une échelle de temps d'analyse, puisque les canicules estivales à Alger sont très fréquentes avec des températures très importantes.

Tableau V-1: Modèle urbain utilisé dans l'étude paramétrique.

Facteurs	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Prospect H/W (A)	Canyon large : H/W=1	Canyon étroit : H/W=3
		
Orientation cardinale (B)	Nord-Sud	Est-Ouest
		
Réfectivité solaire (C)	Transparent: 0,05	Réfléchissant: 0,32

Le Tableau V-2 donne les états -1 et +1 de chacun des facteurs considérés. La méthode conventionnelle dans ce type de plan d'expériences est de prendre en compte les valeurs extrêmes des intervalles de variation des facteurs. Nous donnons dans le tableau V-2 les conditions du domaine d'étude. Ce tableau est connu sous le nom de matrice d'expériences.

Tableau V-2 : Matrice d'expériences.

A	B	C
-1	-1	-1
-1	-1	+1
-1	+1	-1
-1	+1	+1
+1	-1	-1
+1	-1	+1
+1	+1	-1
+1	+1	+1

V- 3. Les réponses

Dans notre étude, une seule réponse est considérée : la consommation énergétique de climatisation du bâtiment. Les réponses sont les sorties des expériences. Ce sont les valeurs sur lesquelles les facteurs ont de l'influence et que l'expérimentateur choisit d'analyser. Cette charge de climatisation est calculée avec le logiciel Ecotect. Le tableau V-3 ci-dessous donne les valeurs des charges de climatisation (réponses) pour les huit cas étudiés. Ce tableau contient également la matrice des effets principaux et leurs interactions.

Tableau V-3 : Matrice des effets principaux et des interactions des facteurs.

N° Simulation	Moyenne	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Q=Wh/m ² /jour
1	+	-	-	-	+	+	+	-	311
2	+	-	-	+	+	-	-	+	187
3	+	-	+	-	-	+	-	+	340
4	+	-	+	+	-	-	+	-	206
5	+	+	-	-	-	-	+	+	310
6	+	+	-	+	-	+	-	-	185
7	+	+	+	-	+	-	-	-	322
8	+	+	+	+	+	+	+	+	198
Coefficient	a₀= 257,37	a₁=- 3,62	a₂= 9,12	a₃=- 63,37	a₁₂=- 2,87	a₁₃= 1,12	a₂₃=- 1,12	a₁₂₃= 1,37	

En choisissant l'étude de sensibilité multicritère précédemment décrite, il est important de noter que les résultats vont dépendre :

- du nombre de simulations réalisées ;
- des valeurs choisies pour les seuils (niveaux bas et haut) de chaque facteur.

Nous avons donc testé de quelle manière les facteurs considérés altèrent les résultats de l'étude de sensibilité à savoir les charges de climatisation Q. Les valeurs des coefficients obtenus dans le Tableau V-3 montrent l'effet principal de chaque facteur et son interaction avec les autres. Chaque effet

principal est défini comme la différence entre les moyennes des réponses pour les niveaux +1 et -1 du facteur considéré. Autrement dit, l'effet d'un facteur est l'incidence moyenne sur la réponse d'un changement de niveau de ce facteur (passage du niveau -1 au niveau +1). L'équation qui suit donne un exemple de calcul d'un coefficient :

$a_1 = \frac{-Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8}{8}$	V - 1
--	-------

Où : $a_1, a_2 \dots$ les effets des facteurs, et $Q_1, Q_2 \dots$ les charges de climatisation.

Nous constatons que les effets principaux des facteurs A (profil vertical) et C (réflectivité solaire) sont inversement proportionnels aux besoins en climatisation, les coefficients a_1 et c_1 étant négatifs. L'effet principal du facteur B (orientation solaire) entraîne une élévation des besoins en climatisation lorsqu'il accroît. Le signe de l'effet principal indique le sens de variation de Q pour le facteur considéré. Par exemple, l'effet principal du facteur A est négatif : cela indique que Q décroît lorsque A augmente et vice-versa. Ainsi, les besoins en climatisation diminuent moyennement avec les rues étroites (augmentation H/W) favorisant des effets d'ombre en façade. Les besoins en climatisation diminuent fortement avec l'accroissement du facteur C (réflectivité solaire) verre réfléchissant, tandis qu'ils augmentent moyennement avec l'exposition des façades au flux de rayonnement solaire (orientation cardinale), sachant que la demande d'énergie est calculée en moyenne pour deux orientations à chaque fois (Nord/Sud et Est/Ouest). Hiérarchiquement, les paramètres (ou facteurs) les plus influents sur la demande d'énergie en climatisation sont : la réflectivité solaire (C), puis l'orientation cardinale (B), suivis du prospect H/W du canyon étroit (A). Nous mettons en évidence que C est le facteur le plus influent sur Q. A est le facteur qui a le moins d'influence sur Q.

En plus de ces effets principaux des paramètres individuels, il existe des interactions qui influent sur la demande d'énergie. Il s'agit donc de savoir si une combinaison de facteurs interagit sur la variable. Ces interactions sont l'influence du niveau d'un facteur sur l'effet d'un autre facteur sur la demande d'énergie. Suivant le tableau ci-dessus, les trois facteurs sont interactifs entre eux et influencent l'énergie de climatisation. Cependant, nous constatons une domination du facteur A sur B occasionnant la plus forte décroissance avec la valeur de -2,87. Les interactions du prospect ainsi que l'orientation avec les autres facteurs sont peu significatives avec les valeurs absolues de 1,12 et 1,37.

L'intérêt de cette étude est de quantifier l'impact de ces facteurs, tous influents sur la consommation de climatisation. On trouve ainsi que Q est très influencé par le revêtement du bâtiment, puis comparativement dans une moindre mesure par l'orientation et le type de canyon. Plus le verre est

réfléchissant, plus la consommation sera moindre. Ce résultat est bien sûr prévisible, mais ce DOE permet de chiffrer les impacts, ce qui est un apport non négligeable.

V- 4. Consommation énergétique

La figure V-1 montre les charges de climatisation moyennes des six zones de chaque bâtiment pendant la période d'occupation de 08h à 20h pour les huit cas des canyons simulés. Globalement, les charges totales de climatisation pour le verre transparent sont plus élevées que celles du verre réfléchissant. Elles sont de 340 Wh/m²/jour, 311 Wh/m²/jour, 322 Wh/m²/jour et 310 Wh/m²/jour pour les cas des simulations 1, 3, 5 et 7 du verre transparent respectivement, contre 206 Wh/m²/jour, 187 Wh/m²/jour, 198 Wh/m²/jour et 185 Wh/m²/jour pour les quatre cas des simulations 2, 4, 6 et 8 du verre réfléchissant.

Les écarts de consommation obtenus sont d'un maximum de 134 Wh/m²/jour pour les simulations 1-2 et d'un minimum de 124 Wh/m²/jour pour les simulations 3-4, et ce, pour le canyon large avec un prospect H/W= 1. De plus, l'écart entre les charges de climatisation relatif au type des vitrages diminue lorsque le ratio géométrique augmente. Ceci signifie que les charges de refroidissement sont fortement influencées par les propriétés optiques et thermiques des murs-rideaux de verre des canyons. En effet, le verre transparent laisse passer une grande partie de la lumière (TL= 80 %) et du rayonnement infrarouge (FS= 76%), contrairement au verre réfléchissant qui stoppe le rayonnement infrarouge (FS=48%) et ne laisse accéder que 48% de rayonnement visible.

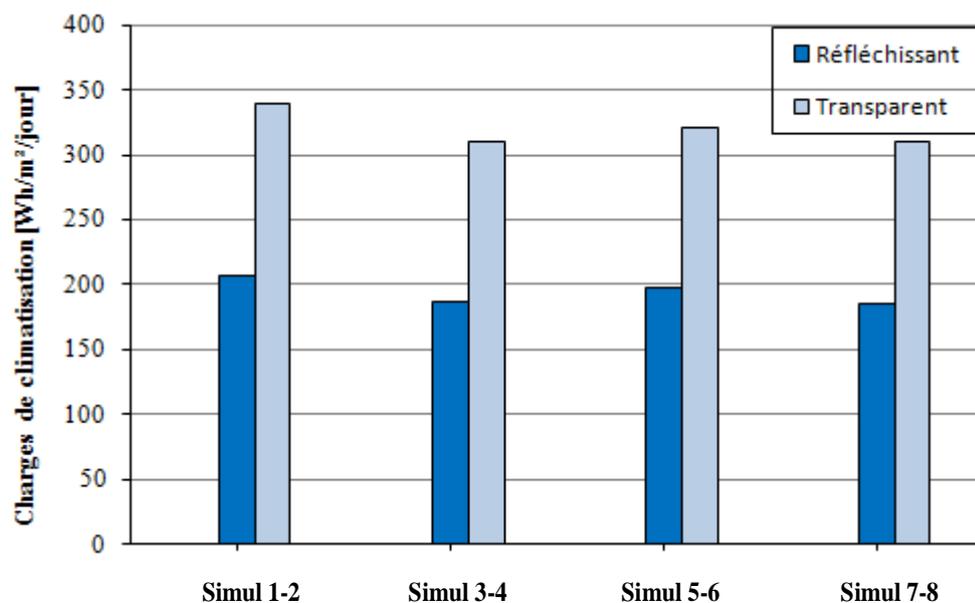


Figure V-1 : Charges totales de climatisation pour tous les cas simulés.

En comparant les quatre canyons pour chaque type de verre, nous concluons que l'énergie nécessaire à la climatisation est maximale avec un ratio géométrique $H/W=1$ et une orientation cardinale E-O. La morphologie la plus adaptée à la conservation de l'énergie semble donc être la rue canyon la moins large. En résumé, le microclimat est impacté par le verre réfléchissant parce que la température de l'air augmente, mais cela ne compense pas l'intérêt d'avoir un verre réfléchissant car cela limite fortement le flux solaire entrant.

V- 5. Paramètres d'entrées des simulations d'ENVI-met

V- 5.1. Paramètres météorologiques

La même journée du 02 août 2013 est considérée pour le cas de l'étude paramétrique. Pour l'enregistrement de ces données, nous avons tenu compte de celles qui ont été mesurées par la station de référence de l'Office National de Météorologie à Dar-El-Beida située à environ 20 km au sud-est d'Alger-Centre (Figure V-1). Le climat de la ville d'Alger est décrit à l'annexe-A.



Figure V-1: Situation de la station météorologique Dar-El-Beida.

(Source : Google Earth réadapté par l'auteur)

Nous avons procédé de la même manière de l'étude du cas réel, en considérant pour le calcul les paramètres d'entrée du logiciel ENVI-met comme récapitulés dans le tableau V-3 qui suit. L'annexe-B décrit les démarches entreprises pour les simulations d'ENVI-met.

Tableau V-3: Inputs des simulations d'ENVI-met pour l'étude paramétrique.

Domaines d'étude	Canyon large : 90 m x 54 m x 60 m / Canyon étroit : 66 m x 54 m x 60 m
Dimensions des maillages	Canyon large : 45 x 27 x 30 / Canyon étroit : 33 x 27 x 30 (dx= dy=dz= 2 m)
Journée	2 Août
Heure de départ	00:00
Données microclimatiques	Mesures de la station de référence de l'aéroport d'Alger
Variables initiales	Humidité spécifique 7.59 g eau / kg air à 2500 m Température de l'air 24.7°C Humidité relative 73 % à 2 m Direction du vent NE Vitesse du vent 2.83 m/s
Enveloppe bâtie	Double vitrage : Epaisseur 6+12+6 mm, albedo 0.32 Toit : Epaisseur 25 cm, albedo 0.15
Sol	Asphalte : Epaisseur 8 cm, albedo 0.2 Revêtement gris en béton : Epaisseur 20 cm, albedo 0.23

V- 5.2. Choix de l'emplacement des récepteurs

Nous avons placé deux récepteurs dans le fichier des entrées (.in) pour enregistrer les paramètres climatiques (Figure V-2 et V-3) :

- Le premier T est un récepteur de référence placé sur le toit du bâtiment afin de comparer le calcul des paramètres climatiques par ENVI-met à ceux enregistrés par la station de référence.
- Chacun des deux récepteurs N1, S1 est mis respectivement à proximité des façades Nord et Sud du bâtiment à une distance de 1 m. Nous avons choisi cet emplacement afin de relever les températures de l'air affectées par le reflet des façades, et d'évaluer leurs effets sur les consommations énergétiques.

L'annexe-C donne un exemple de calcul du récepteur S1, pour le cas du canyon large orienté Est-Ouest.

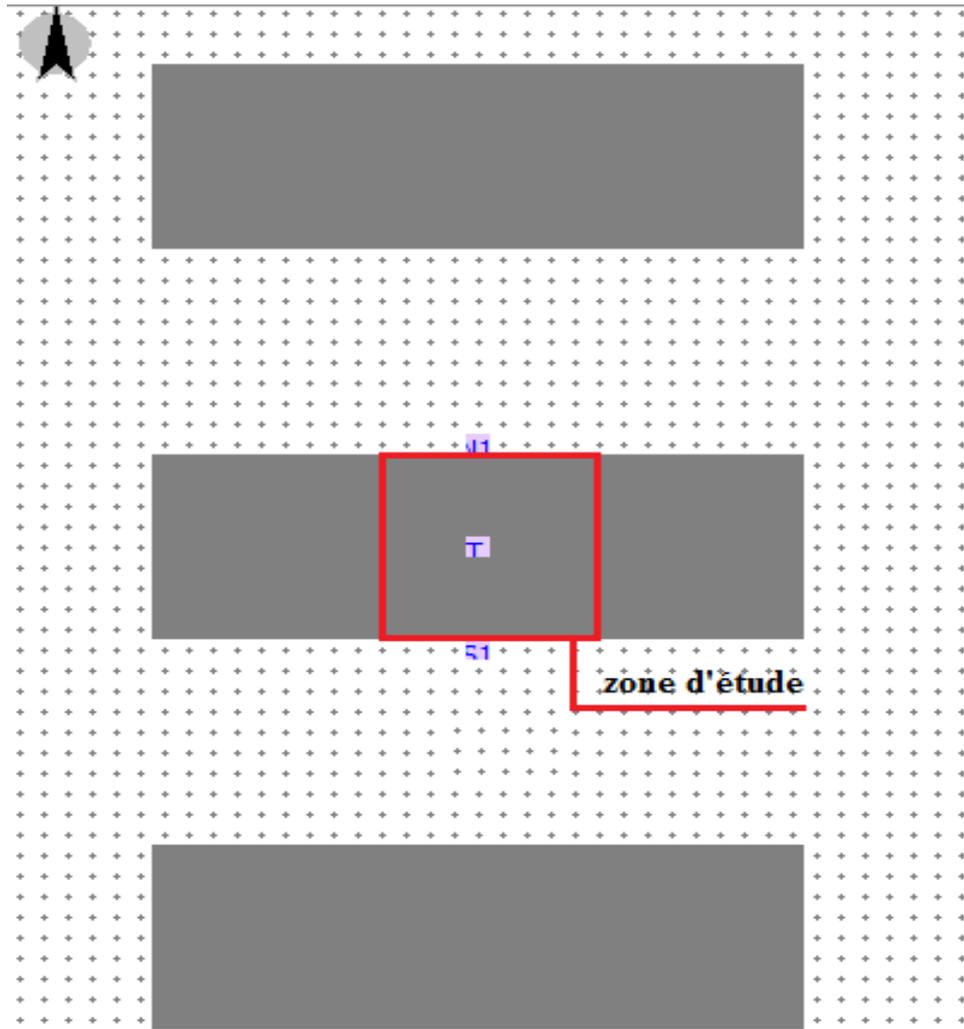


Figure V-2 : Vue en plan indiquant le positionnement des récepteurs.

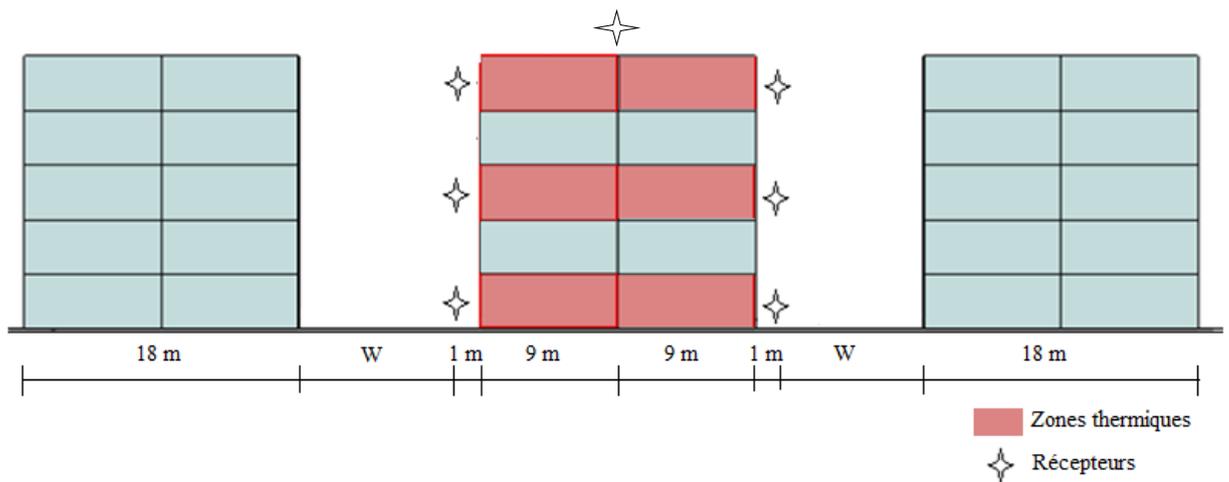


Figure V-3 : Coupe verticale indiquant le positionnement des récepteurs et les zones thermique simulées.

V- 6. Paramètres d'entrées pour la simulation Ecotect

Après avoir modélisé notre domaine d'étude via Autodesk Revit Architecture, nous procédons à l'exportation du modèle géométrique vers notre outil d'analyse Autodesk Ecotect Analysis sous format (*.gbXML). Notre bâtiment est considéré comme étant un ouvrage multizone où chaque étage représente deux zones thermiques orientées vers l'extérieur. Pour le zonage thermique, nous nous sommes inspirés des travaux de recherche d'Ali-Toudert (2009), (Figure V-4). Nous avons calculé les consommations énergétiques pour trois niveaux à savoir: le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau. Tous les autres paramètres sont identiques à ceux de l'étude du bâtiment existant (Tableau IV-6).

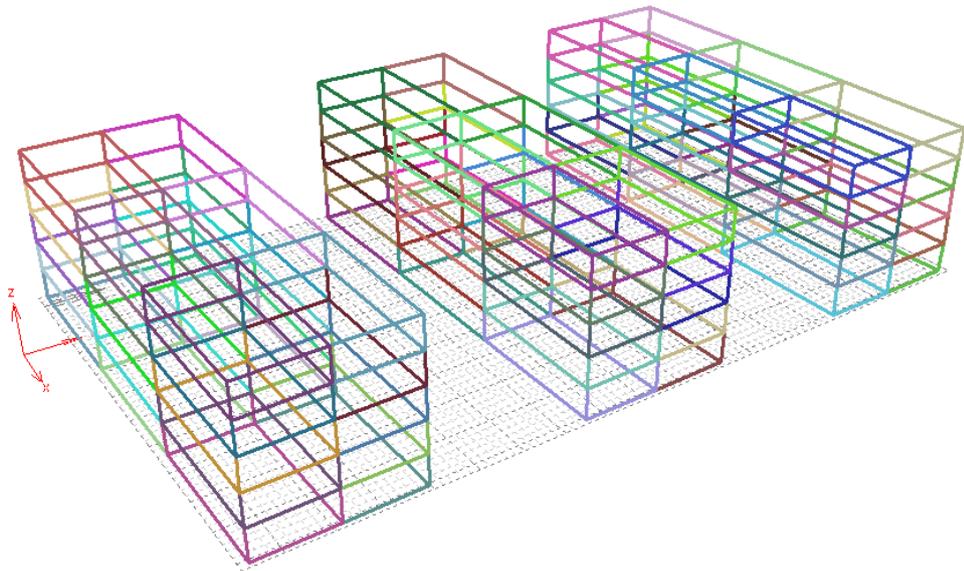


Figure V-4 : Zones thermique représentées dans Ecotect.

V- 7. Analyse du microclimat dans les canyons

Nous rappelons que le microclimat est calculé avec le logiciel ENVI-met à partir des données issues de la station de référence de l'ONM (Office National de Météorologie) situé à l'aéroport d'Alger. Les démarches détaillées de la simulation ENVI-met sont décrites dans l'annexe-B. Dans ce qui suit, nous allons d'abord analyser les températures de l'air et le rayonnement solaire dans les canyons pour le cas du "verre réfléchissant", puis nous comparerons les résultats à ceux du "verre transparent".

V- 7.1. Températures de l'air

V- 7.1.1. Simulation n°04 [-1, +1, +1]

La figure V-5 (a, b, c et d) montre la répartition des températures de l'air dans le volume des canyons larges dont $H/W=1$ orientés E-O, et dont la réflectivité solaire des murs-rideaux de verre est de 0.32. Les

températures de l'air sont données pour quatre séquences horaires 9h, 12h, 15h et 18h. Globalement, durant toute la journée, nous constatons une stratification verticale de l'air dans le volume des canyons avec des températures de l'air plus importantes au niveau du sol. Pour la matinée, à 9h les températures ambiantes simulées dans les deux canyons varient entre 26.0°C au niveau de la chaussée et 25.0°C au dernier, ce qui nous donne un faible écart de 1°C (Figure V-4-a).

A midi, les températures de l'air dans les canyons sont plus importantes avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire. Nous obtenons alors des températures de l'air allant de 28.0°C au niveau haut à 30.5°C au niveau bas avec 2.5°C de différence (Figure V-4-b). Dans l'après midi, une différence maximale allant jusqu'à 4.0°C est calculée aux alentours de 15h avec des températures de l'air comprises entre 31.0°C au niveau haut et 35.0°C au niveau bas des canyons (Figure V-4-c).

En fin d'après-midi les températures ambiantes simulées dans les canyons varient entre 30.5°C et 32.5°C, avec une différence de 2.0°C (Figure V-4-d). Ceci est dû aux températures de surfaces moins importantes et aux zones ombragées des canyons avec le coucher du soleil, amenuisant ainsi les inter-réflexions et les températures de l'air à l'intérieur des rues.

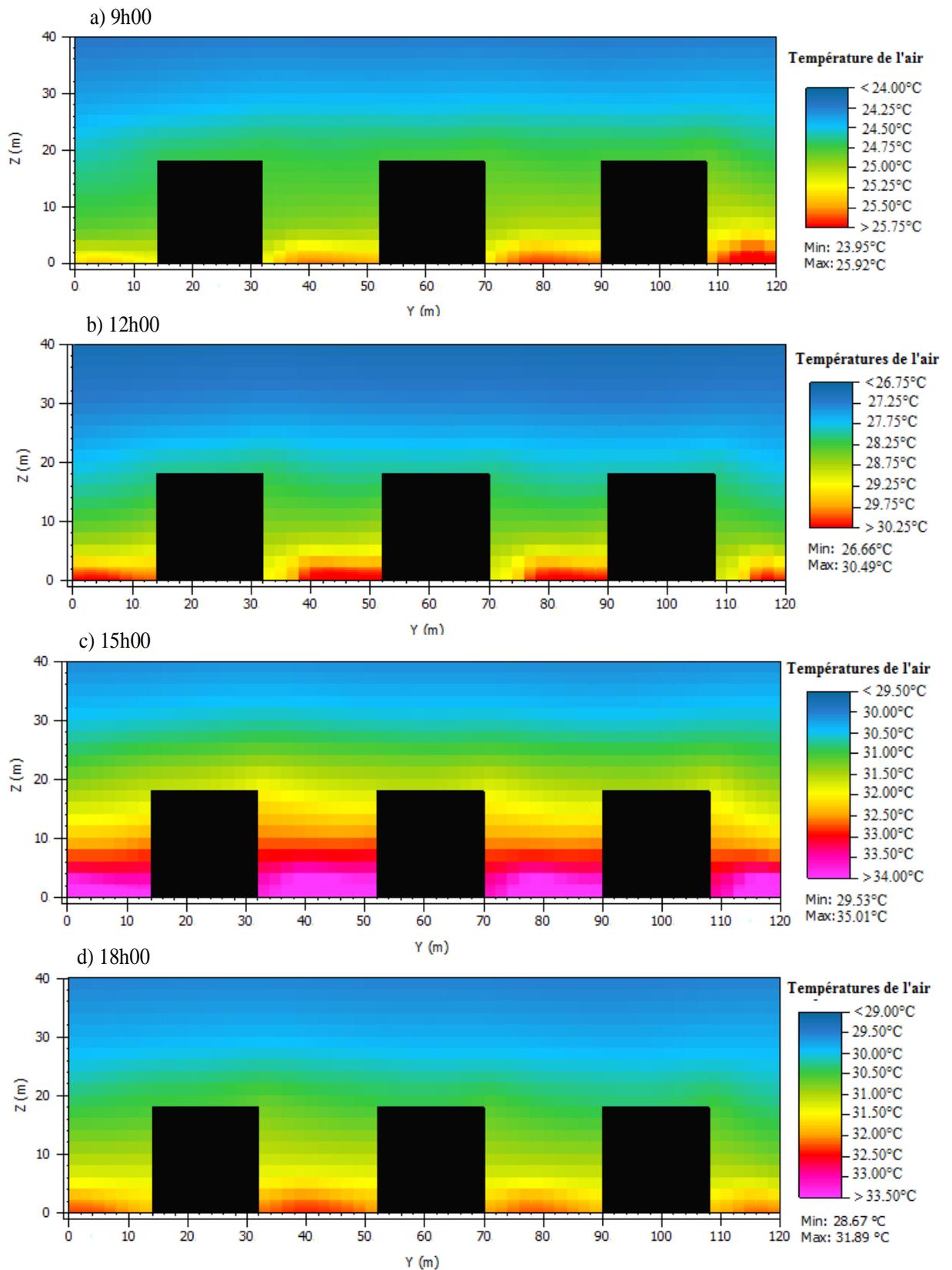


Figure V-5 : Températures de l'air dans les canyons pour la Simulation n°04 [-1, +1, +1].

En effet, pour cette séquence horaire avec la faible intensité du Soleil et sa hauteur qui est encore à l'horizon, les canyons reçoivent du rayonnement direct sur les façades orientées Sud et la chaussée. Les façades orientées Nord restent les zones ombragées (Figure V-6). Cela engendre de faibles températures des surfaces et de l'air. Au niveau de la chaussée, l'air est plus chaud vu les propriétés thermoradiatives de l'asphalt (Cf. Chapitre II § II-2.2.1).

En effet, dans l'après-midi, les canyons larges ($H/W=1$) orientés E-O sont très exposés (Figures V-6). L'exposition au soleil est définie par le facteur d'ouverture au ciel SVF calculé par ENVI-met, et qui est de l'ordre de 0.40 au niveau du sol. Le rayonnement solaire pénétrant dans l'espace de la rue et atteignant latéralement les façades, intègre un processus d'inter-réflexions avec l'ensemble des surfaces de la rue et des façades vitrées, ce qui crée un piégeage radiatif et augmente ainsi les températures de l'air.

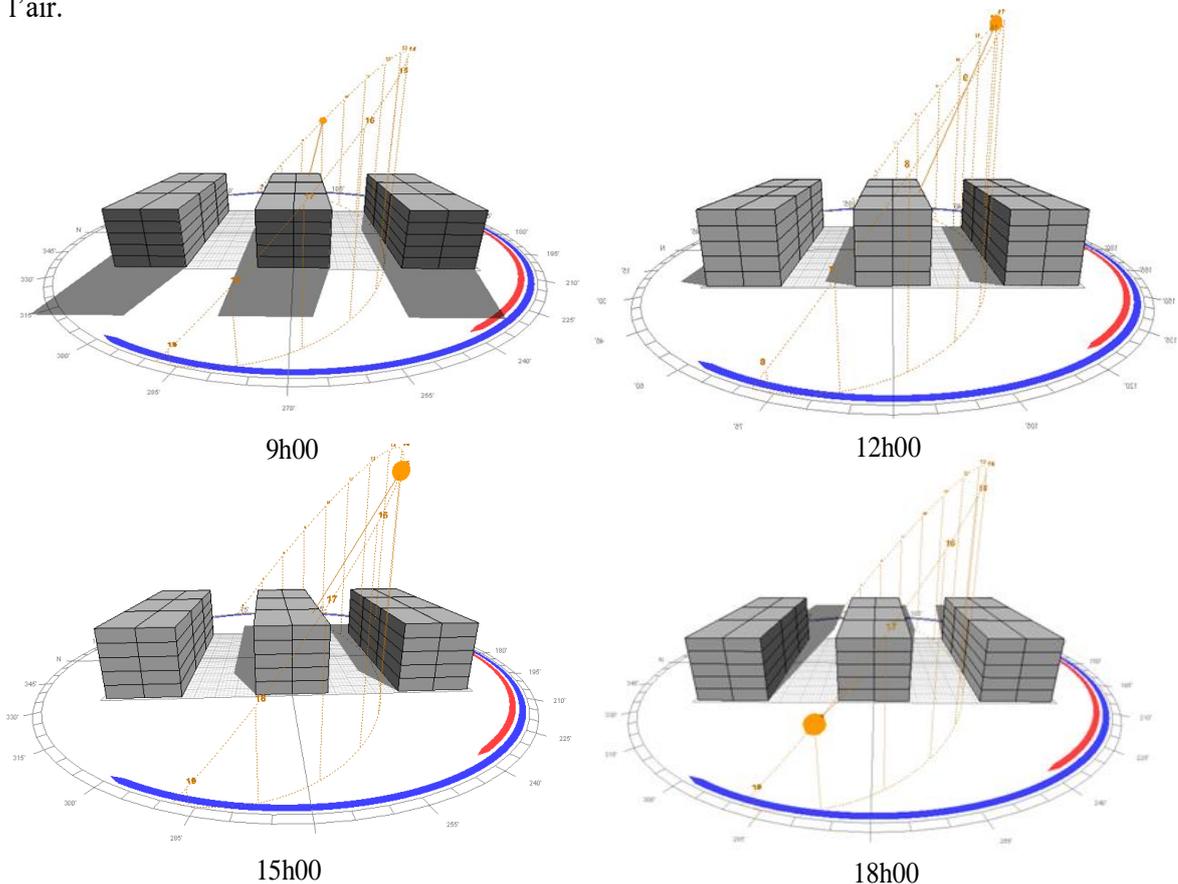


Figure V-6 : Ensoleillement et ombrage dans les canyons pour la Simulation n°04 [-1, +1, +1].

Les variations des températures de l'air dans le volume du canyon sont attribuées à la quantité de chaleur transférée à l'air à partir de ses facettes comme flux sensible, qui dépend des températures des surfaces qui sont à leur tour directement affectée par l'exposition au soleil. Plus la superficie totale irradiée du canyon est grande, plus l'énergie rayonnante dissipée est importante (Ali-Toudert et Mayer, 2006).

V- 7.1.2. Simulation n°02 [-1, -1, +1]

La figures V-7 (a, b, c et d) montre la répartition des températures de l'air pour le cas des canyons du même ratio $H/W=1$ et du verre réfléchissant, mais ayant une orientation Nord-Sud. Nous remarquons que cette fois-ci, la stratification du volume d'air dans les canyons se fait de manière diagonale, avec des températures de l'air plus importantes aux abords des façades et du sol irradiés.

A 9h du matin, les températures ambiantes calculées dans les canyons varient entre 24°C et 24.5°C, avec une légère différence de 0.5°C (Figure V-7-a). Ceci dit, les températures de l'air au voisinage des façades orientées Ouest recevant le soleil matinal, sont légèrement plus élevées que celles avoisinant les façades Est d'en face.

A midi, les variations sont de 2.0°C avec des températures comprises entre 26.5°C et 28.5°C. Ceci est dû à l'accentuation de l'effet de stratification diagonale des températures de l'air (Figure V-7-b).

A 15h d'après-midi, toutes les facettes des canyons se réchauffent et la stratification du volume de l'air tend à redevenir verticale. Une différence de température de l'air de 2.0°C est obtenue aux alentours de 15h avec des températures de l'air comprises entre 30.0°C et 32.0°C (Figure V-7-c). En effet, les murs-rideaux de verre réfléchissant absorbent et réfléchissent le rayonnement solaire, ce qui fait qu'ils deviennent chauds à cause de l'augmentation de leur température de surface, par conséquent, ils réémettent le rayonnement infrarouge qui chauffe davantage l'air.

En fin d'après-midi à 18h, les températures ambiantes simulées dans les deux canyons varient entre un de 29.5°C et de 30°C avec une légère différence de 0.5°C (Figure V-7-d). La disparition de la stratification du volume de l'air est observée. Ceci est dû à une faible intensité du rayonnement solaire aux températures de surface moins importantes, en raison de la création de zones ombragées dans les canyons avec le coucher du soleil.

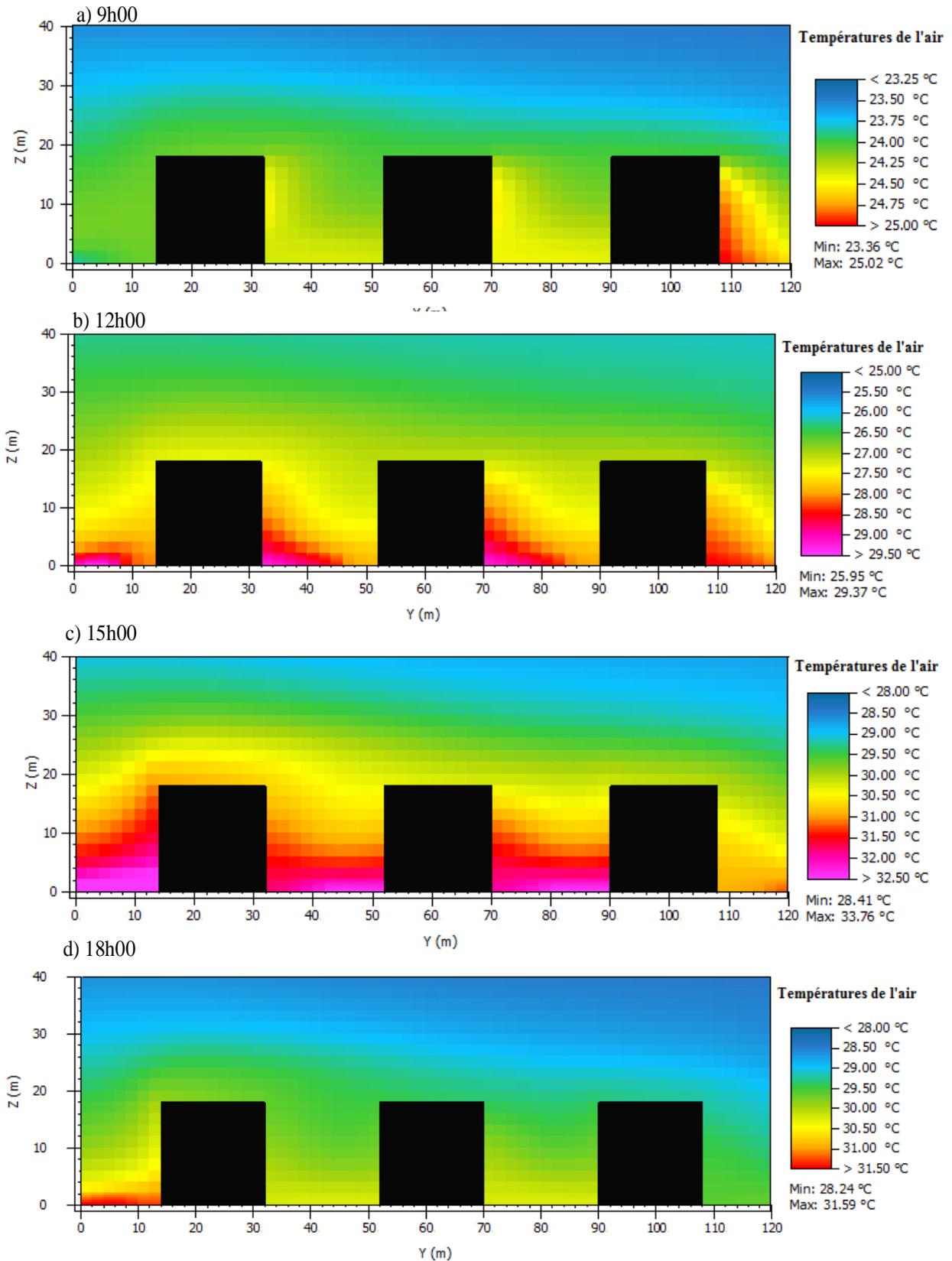


Figure V-7 : Températures de l'air dans les canyons à 18h. Simulation n°02 [-1, -1, +1].

En effet, à part les façades latérales, les autres façades possèdent les mêmes facteurs d'ouverture au ciel-SVF et les mêmes masques solaires formés exclusivement par les bâtiments adjacents (Figure V-8). Ces observations sont le résultat des effets de dièdre qui sont très ressentis avec des températures de l'air plus élevées causées par les inter-réflexions du rayonnement solaire direct entre les surfaces contigües des façades réfléchissantes et du sol exposés.

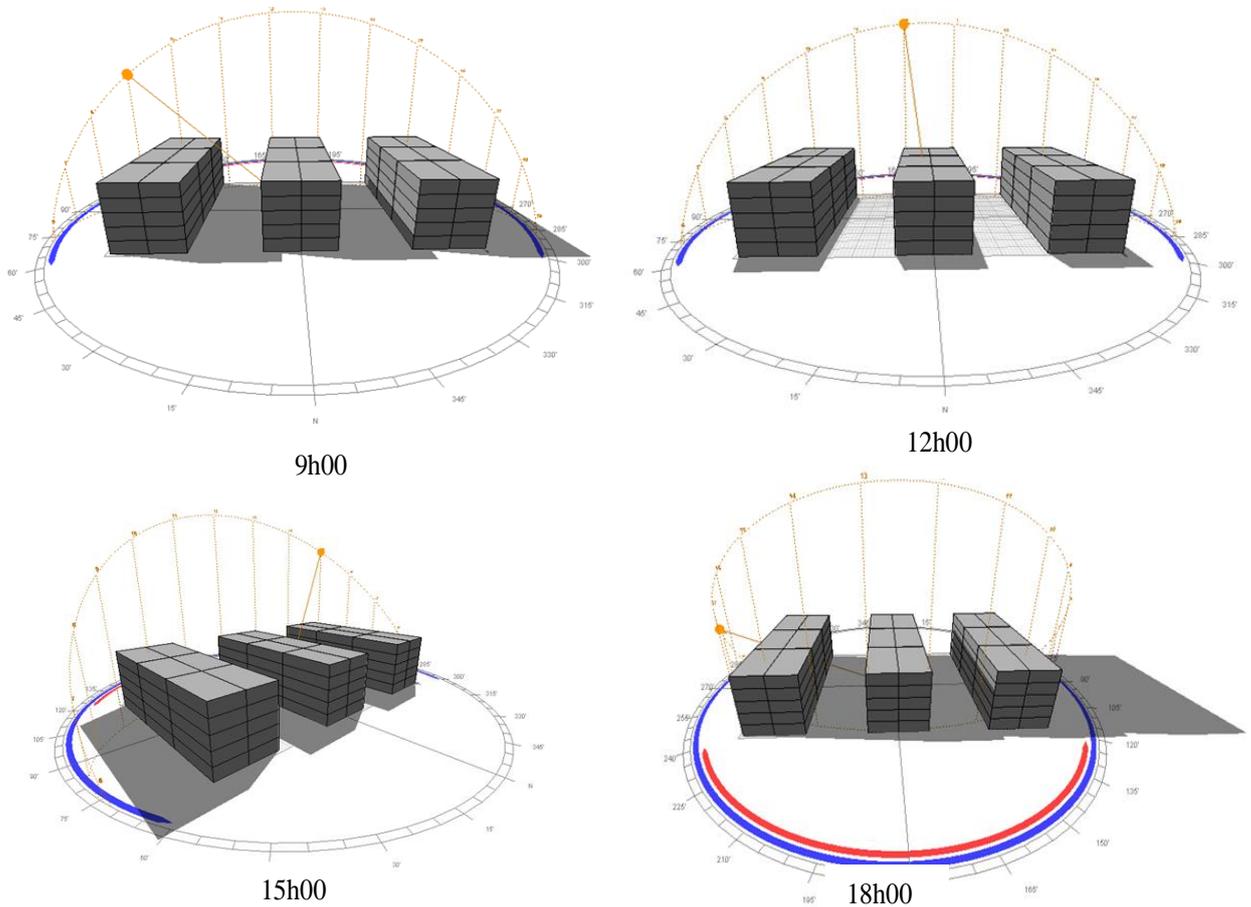


Figure V-8 : Ensoleillement et ombrage des canyons à 18h. Simulation n°02 [-1, -1, +1]

Synthèse des simulations n°04 et 02

En comparant les rues orientées Est-Ouest et Nord-Sud du même rapport d'aspect $H/W=1$, des différences entre les températures de l'air sont observées. Les rues Est-Ouest ont tendance à être plus chaudes que les rues Nord-Sud. Comme mentionné précédemment, ceci est dû à une plus longue exposition au rayonnement solaire des rues Est-Ouest dans la journée. Les valeurs maximales des températures de l'air pour les deux sont enregistrées à 15h avec comme valeur 35.0°C pour les rues Est-Ouest et 32.0°C pour les rues Nord-Sud. En effet, le préchauffage de la rue suit le temps d'exposition solaire liée à l'orientation des canyons. L'étude faite par Tiraoui (2000) citée par Athamena (2012)

récapitule dans le tableau V-1 l'apport des variations du rapport d'aspect H/W sur les effets thermiques d'une rue canyon localisée à la latitude de 45° Nord et orientée Nord-Sud.

Tableau V-4: Relations entre le rapport d'aspect de la rue canyon et les conditions thermiques d'après Tiraoui, (2000), (Source : Athamena, 2012, p. 33).

	H/W	Avantages
L'accessibilité solaire	0.5 à 2	L'absorption solaire est comprise entre 13 % (H/W=0.5) et 27 % (H/W=2) lorsque l'albédo de surface est égal à 0.4.
	0.58	Le rapport H/W est représentatif des villes de latitude 45°N.
Gain de chaleur	0.4	Le gain de chaleur est de 30 % par rapport à une situation de surface dégagé (H/W=0).
	0.7	Le gain de chaleur est de 50 % par rapport au cas H/W=0.
	1.0	Le gain de chaleur est de 70 % par rapport au cas H/W=0.

V- 7.1.3. Simulation n°08 [+1, +1, +1]

La figure V-9 (a, b, c et d) montre les températures de l'air pour le cas des canyons profonds (H/W=3) orientés Est-Ouest, pour quatre séquences horaires de la journée étudiée. Globalement, la stratification de l'air dans le volume du canyon reste très faible durant toute la journée. Ceci est dû à la valeur élevée du prospect H/W=3 obstruant le rayonnement solaire direct.

En début de matinée, à 9h, les températures ambiantes simulées dans les deux canyons restent uniformes, et sont de l'ordre de 24.5°C (Figure V-9-a). A midi, bien que les températures de l'air s'élèvent, la différence reste faible ne dépassant pas 0.5°C avec des températures de l'air allant de 28.5°C à 29°C, simulées respectivement dans les niveaux haut et bas des rues (Figure V-9-b).

Après le midi solaire à 15h, les températures ambiantes dans les rues augmentent encore pour atteindre 32.0°C et une différence qui reste identique à celle enregistrée à 12h et qui est de 0.5°C entre le niveau bas et le niveau haut qui affiche 31.5°C (Figure V-9-c). Vers la fin d'après-midi, à 18h, la différence est la même, mais avec des températures de l'air sont légèrement moins importantes que celles relevées à 15h, avec des températures de 31.0°C au niveau haut, et de 31.5°C au niveau de la chaussée (Figure V-9-d).

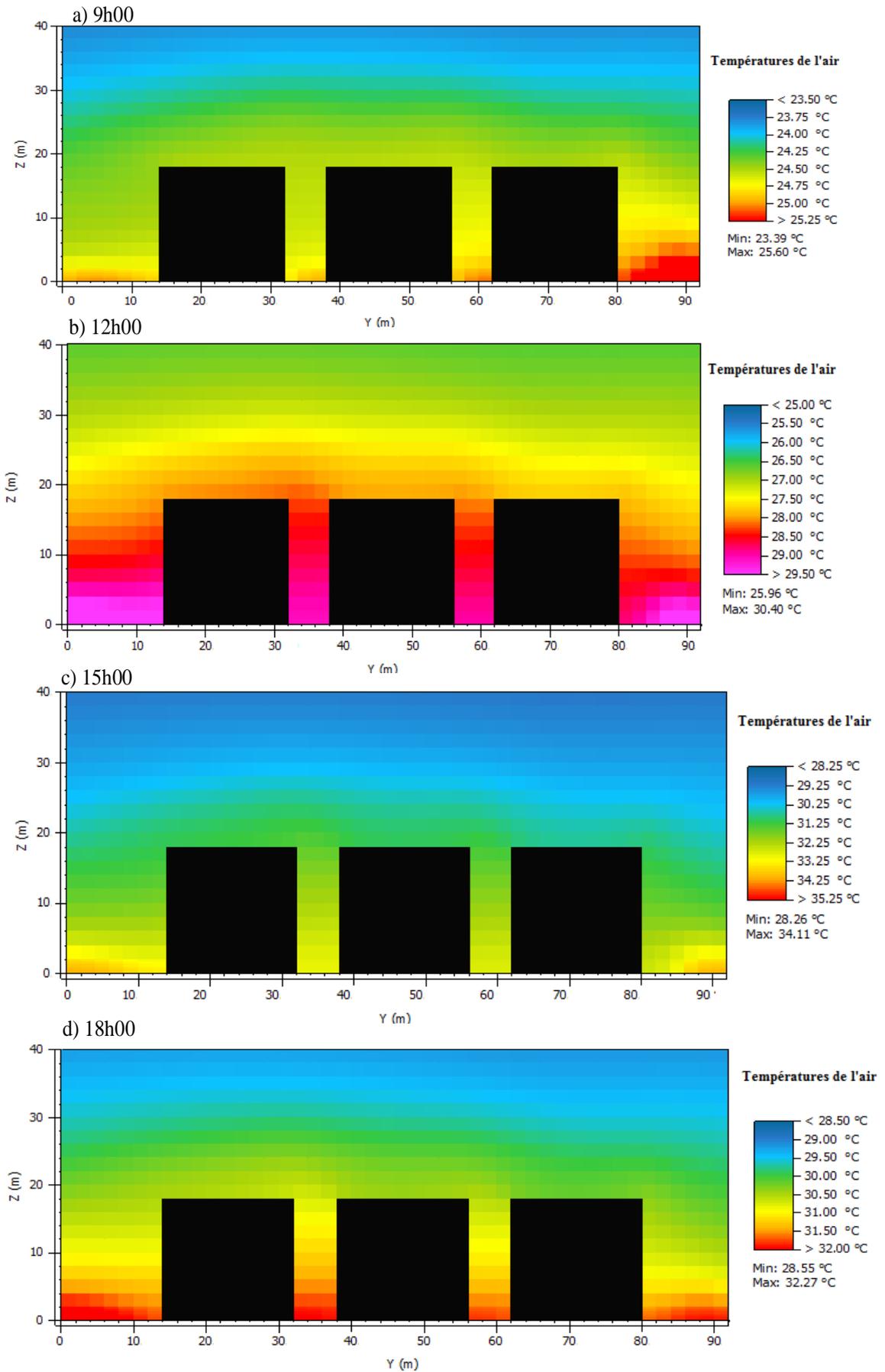


Figure V-9 : Températures de l'air dans les canyons pour la simulation n°08 [+1, +1, +1].

Ceci est dû à l'étroitesse des rues qui génèrent des masques solaires proches, formés par les bâtiments adjacents, engendrant de faibles températures des surfaces et de l'air (Figure V-10).

En effet, vu l'étroitesse des rues, l'accessibilité au soleil est diminuée, ceci contribue fortement à la réduction des gains de chaleur radiante, et influe directement sur la température de l'air (Figures V-10). Dans ce cas où la densité de construction est maximale, les facteurs de vue du ciel des surfaces sous la canopée sont réduits, le piégeage radiatif et le peu de ventilation dans les rues entraînent une certaine inertie pour le refroidissement du volume d'air et des surfaces. Offerle et al. (2007) cite que les températures de façades d'un canyon à Göteborg, en, Suède demeurent 5 à 7°C plus chaudes que les toitures pendant l'été et cette tendance est respectée quelle que soit la saison avec des contrastes un peu moins importants pendant l'hiver (Offerle et al. 2007).

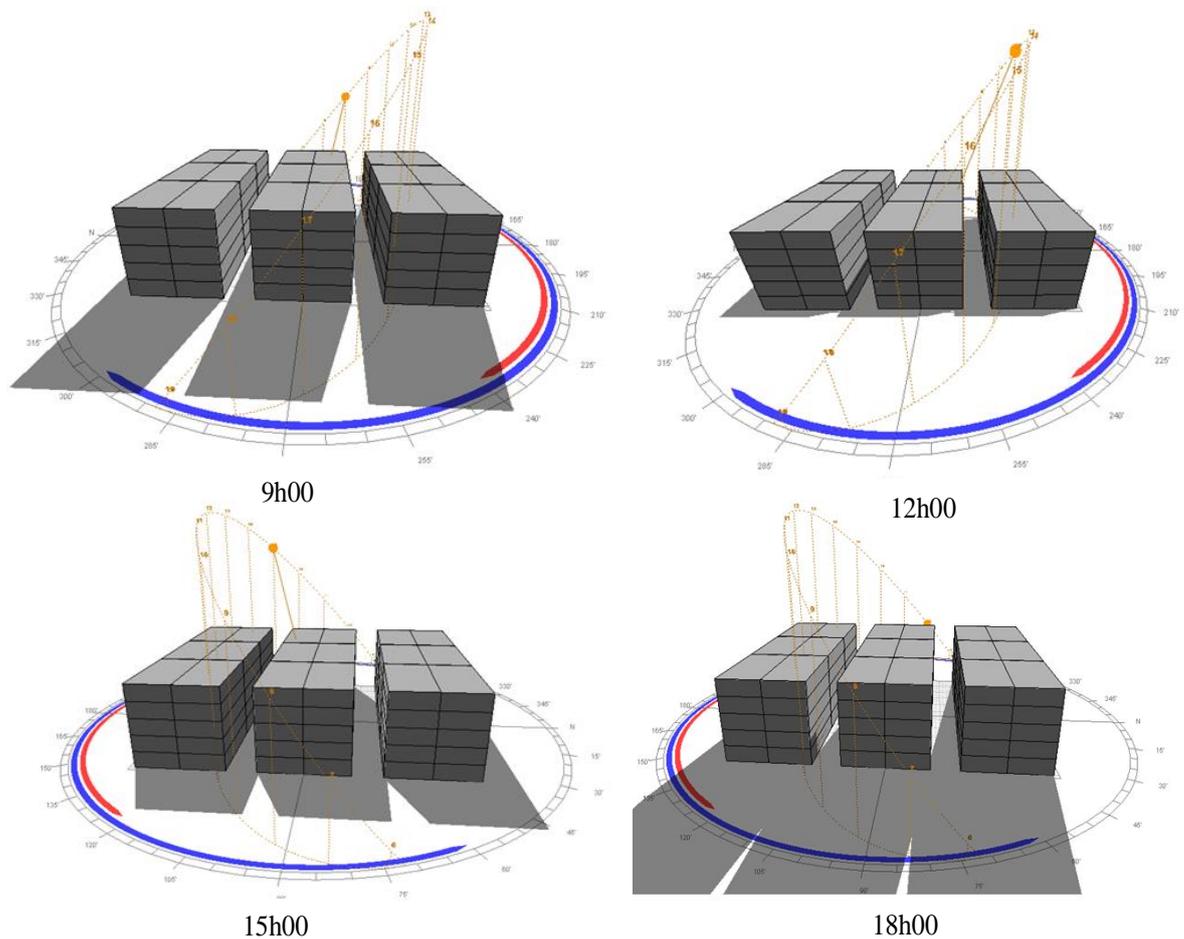


Figure V-10 : Ensoleillement et ombrage des canyons pour la simulation n°08 [+1, +1, +1].

V- 7.1.4. Simulation n°06 [+1, -1, +1]

Les figures V-11 (a, b, c et d) montrent les températures de l'air pour le cas des canyons du même ratio $H/W=3$ mais orientés Nord-Sud, et pour le même type de verre. Nous remarquons une uniformisation des températures de l'air dans les rues canyons durant toute la matinée et une légère stratification verticale de l'air dans le volume du canyon.

A 9h du matin, les températures de l'air atteignent 24.0°C et à midi elles sont de l'ordre de 27.5°C avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire (Figure V-11-a).

A midi, avec un Soleil qui est plutôt au Zénith, les façades orientées ouest, et pratiquement la moitié de la chaussée reçoivent du rayonnement direct (Figure V-11-b), ce qui entraîne des inter-réflexions du rayonnement solaire entre les surfaces du canyon, et équilibre la température de l'air dans tout son volume.

Après le midi solaire, les températures ambiantes dans les rues augmentent avec l'exposition des parties supérieures des façades orientées Est. Nous remarquons la réapparition d'une légère stratification du volume d'air avec une variation de 1.5°C à 15h. Cependant, les températures simulées sont de l'ordre de 31.5°C au niveau de la chaussée et de 30.0°C pour le niveau le plus haut (Figure V-11-c). Vers la fin d'après-midi, à 18h, la différence est la même (0.5°C) mais avec des températures de l'air légèrement moins importantes que celles relevées à 15h, et qui sont comprises entre 29.5°C et 30°C (Figure V-11-d).

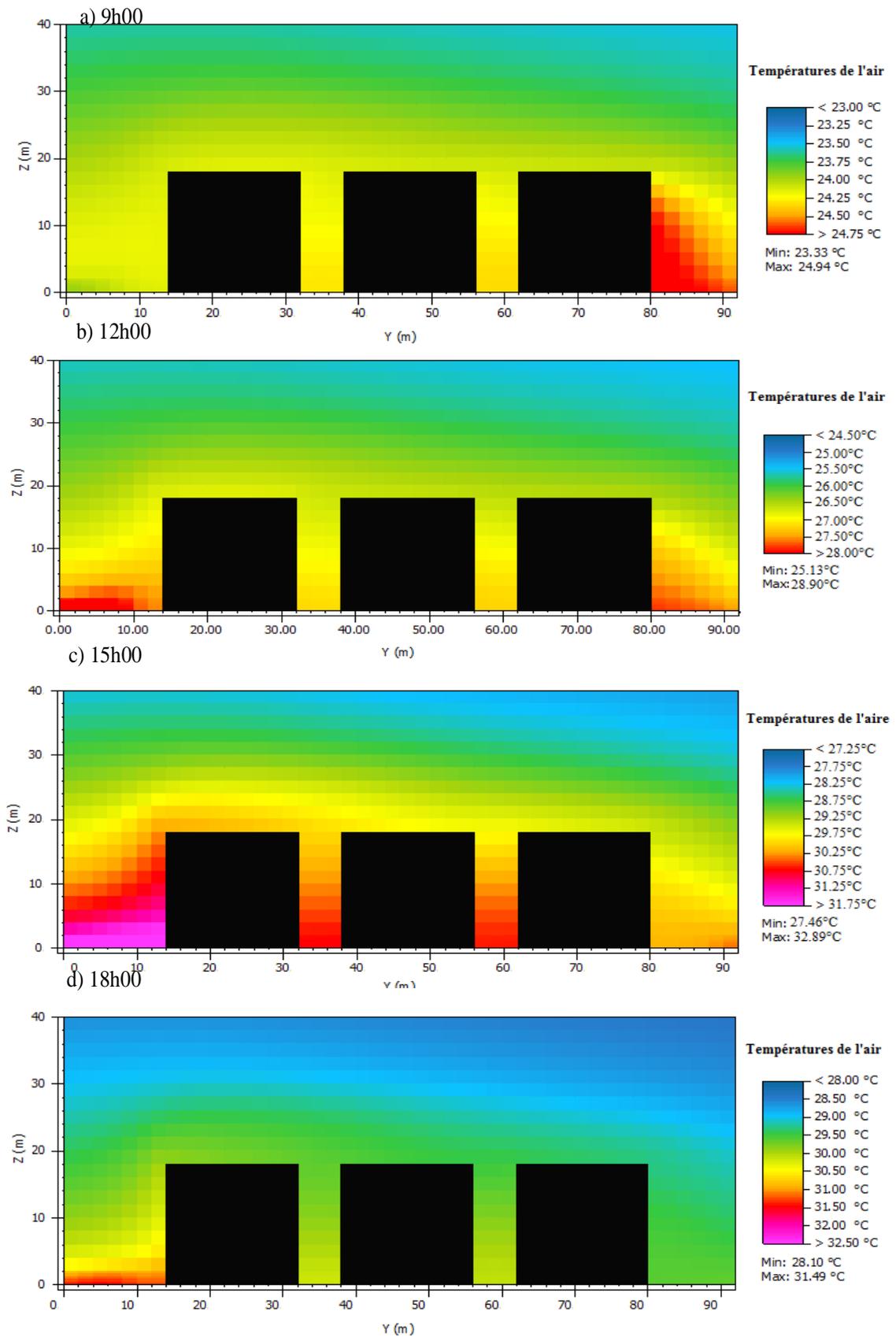


Figure V-11 : Températures de l'air dans les canyons pour la simulation n°06.

La quantité d'énergie que peut collecter et réfléchir la façade d'un bâtiment, dépend directement de son accès au soleil. Dans ce cas, les obstacles rapprochés diminuent le temps d'ensoleillement des façades (Figure V-12). Ceci dit, dans un milieu urbain dense, la quantité d'énergie reçue par les façades des bâtiments risque d'être peu importante (Cheng et al., 2006).

En effet, durant l'après-midi, cette scène reçoit une quantité d'énergie qui résulte de la somme de deux sources distinctes : le soleil qui émet un rayonnement qualifié de direct, et la voûte céleste qui émet un rayonnement qualifié de diffus. Avec le rapport d'aspect important du ce canyon ($H/W=3$), la part du flux radiatif réfléchi vers l'atmosphère diminue. Ce piège radiatif est aussi valable pour le rayonnement thermique émis par les surfaces.

Ainsi, le fond des rues canyons sera souvent caractérisé par un flux solaire et un éclairage faible. De même, l'orientation des rues par rapport aux points cardinaux aura une influence déterminante sur la pénétration du flux solaire, ce qui est le cas des rues étroites orientées Nord-Sud, amène les constructions à se faire ombre toute la journée (Figure V-12).

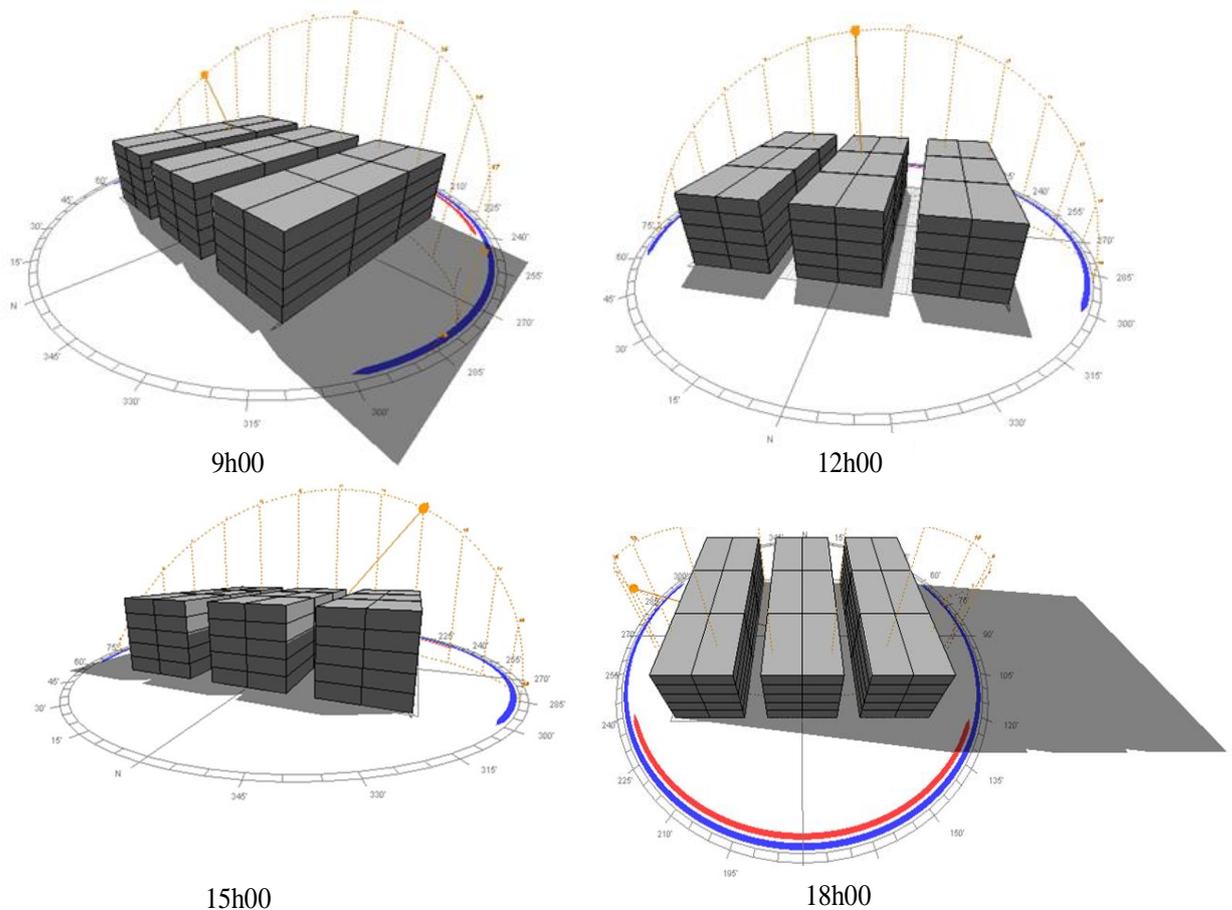


Figure V-12 : Ensoleillement et ombrage des canyons pour la simulation n°06.

Synthèse des simulations n°08 et n°06

En comparant les températures de l'air dans les rues orientées Est-Ouest et Nord-Sud du même rapport d'aspect $H/W=3$, de légères différences de températures de l'air dans les deux canyons sont constatées. Les rues Est-Ouest ont tendance à être un peu plus chaudes que celles orientées Nord-Sud. Comme mentionné précédemment, ceci est dû à une plus longue exposition au rayonnement solaire des rues Est-Ouest. Cependant, les valeurs maximales des températures de l'air pour les deux sont enregistrées à 15h avec comme valeur de 32.0°C pour les rues Est-Ouest et 31.5°C pour les rues Nord-Sud, ce qui fait une différence de 0.5°C . En effet, le réchauffement des températures de l'air dans la rue suit le temps d'exposition solaire liée à l'orientation des canyons.

Synthèse des températures de l'air

L'évolution diurne des températures de l'air sur une journée type d'été ont été simulées pour deux rapports d'aspect $H/W=1$ et $H/W=3$, ainsi que pour deux orientations E-O et N-S. Les températures de l'air diminuent avec l'augmentation du rapport d'aspect H/W montrant une différence maximale de 3.0°C entre les canyons orientés E-O, avec $H/W = 1$ et $H/W=3$, vers 15h00.

Cela s'explique par la vitesse de réchauffement de l'air du canyon large orienté E-O, puisque la chaleur sensible transférée à l'air augmente avec l'augmentation de l'exposition au rayonnement solaire. Ainsi, les maxima de température de l'air dans les canyons profonds ont été atteints à différents moments de la journée selon l'orientation. Plus explicitement, les T_{max} se produisent en début d'après-midi pour les canyons N-S, mais persistent jusqu'en fin d'après-midi pour les canyons E-O, ce qui correspond au temps de plus grande exposition des facettes du canyon pour chaque orientation.

Comme nous l'avons présenté dans le premier chapitre, la morphologie ou la géométrie urbaine accroît les multiples réflexions du rayonnement solaire, réduit les transferts hors du canyon des flux de chaleur sensible, et diminue les pertes de rayonnements infrarouges, du fait de l'effet écran des murs des bâtiments. Elle influence ainsi le climat urbain et modifie l'albédo global de la ville en piégeant le rayonnement.

V- 7.2. Comparaison des deux verres : Ecart des températures de l'air

Dans la section suivante, nous allons comparer les températures extérieures de l'air dans les quatre canyons étudiés précédemment (près des façades à murs-rideaux de verre réfléchissant) à celles des températures de l'air simulées dans les canyons dont les bâtiments sont revêtus de verre transparent. Cette étape nous servira à reconnaître savoir le degré d'influence de la réflectance des façades.

V- 7.2.1. Simulations n°03 [-1, +1, -1] et 04 [-1, +1, +1]

L'écart des températures de l'air extérieur entre les deux verres est défini par la différence de température horaire simulée à une distance de 1 m des façades vitrées des bâtiments. La figure V-13 montre les écarts des températures de l'air pour les trois niveaux étudiés des immeubles des canyons, à savoir : le RDC référé H1, le niveau intermédiaire référé H2 et le dernier niveau référé H3, et ce pour le cas du canyon large orienté E-O avec H/W=1. Nous remarquons pour le point N1, représentant le récepteur positionné à 1m des façades orientées vers le Nord, que des écarts des températures Δt apparaissent dans les canyons. Globalement, pour tous les points les écarts sont plus importants pour le RDC, suivis des écarts du niveau intermédiaire puis du dernier niveau. Cependant, pour le point N1, les écarts pour les deux niveaux intermédiaire et dernier se rapprochent. Cette variabilité met en relief le problème des surchauffes occasionné par les vitrages réfléchissants. Ceci dit, l'écart maximal simulé est de l'ordre de 1.2°C apparu au RDC aux alentours de 16h.

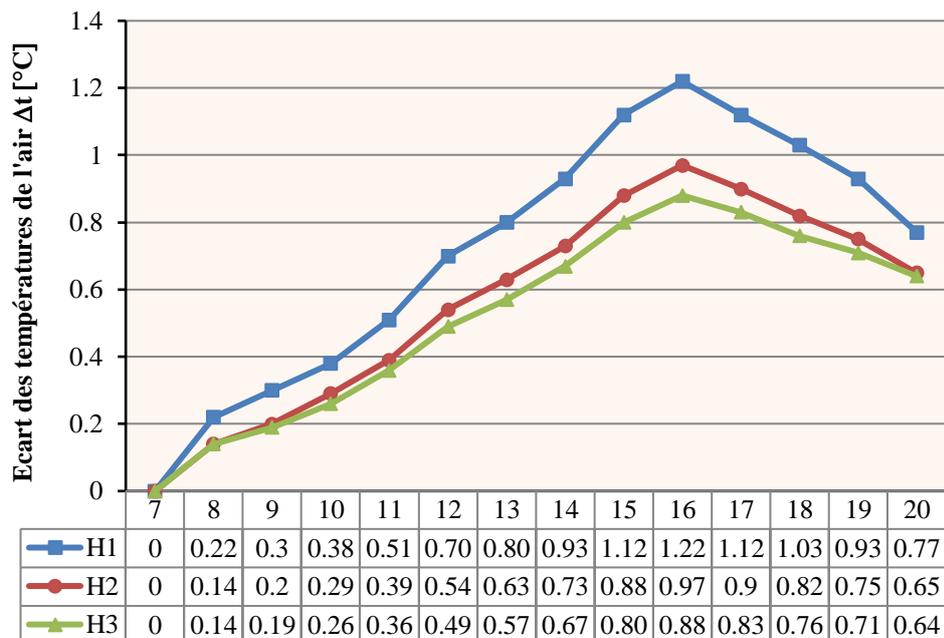


Figure V-13 : Températures de l'air des récepteurs au point N1, pour trois niveaux (Canyon large E/O).

La figure V-14 montre les écarts des températures de l'air pour trois : niveaux des immeubles des canyons, à savoir le RDC, le niveau -intermédiaire et le dernier niveau, et ce pour le cas du canyon large orienté E-O avec H/W=1. Pour le point S1 qui représente le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Sud, les écarts obtenus durant la matinée ne dépassent pas 1.0°C avec un maximum de 0.8°C pour le RDC à 12h. Durant l'après-midi les écarts sont tous compris entre 0.5°C simulé à 13h pour le dernier niveau et 1.3°C à 16h00 pour le RDC.

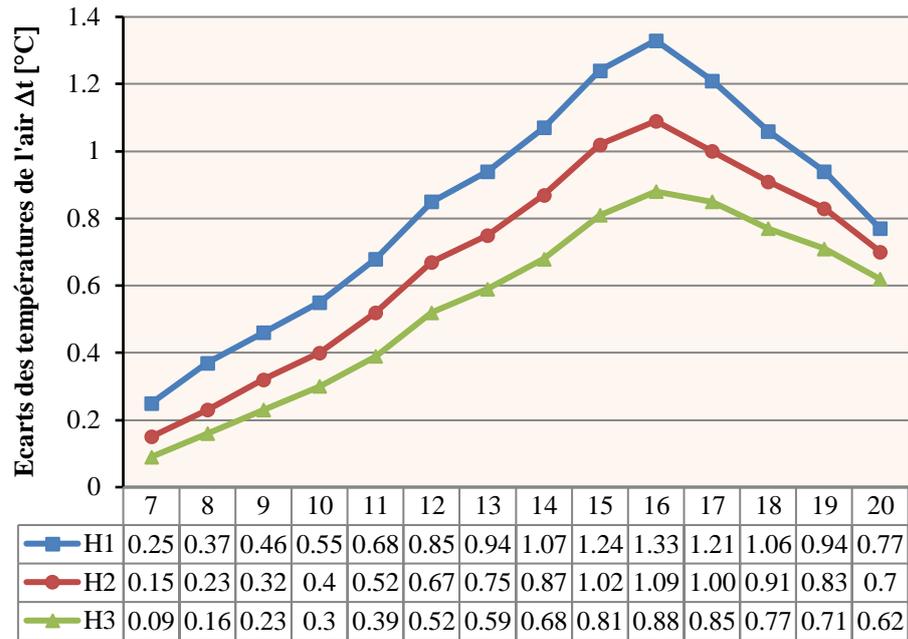


Figure V-14: Températures de l'air des récepteurs au point S1, pour trois niveaux (Canyon large E/O).

V- 7.2.2. Simulations n°01 et 02 [-1, -1, -1] et [-1, -1, +1]

La figure V-15 montre les écarts des températures de l'air pour trois niveaux des immeubles des canyons à savoir le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau, et ce pour le cas du canyon large orienté N-S avec $H/W=1$. Nous remarquons pour le point N1 représentant le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Nord, que des écarts des températures Δt apparaissent dans les canyons. Cependant, pour le point N1, les écarts pour les deux niveaux RDC et intermédiaire se rapprochent. Les écarts par rapport au dernier niveau restent plus importants. Ceci dit, les écarts maxima simulés sont de l'ordre de 1.3°C, 1.2°C et 0.9°C apparus aux alentours de 16h respectivement pour le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau.

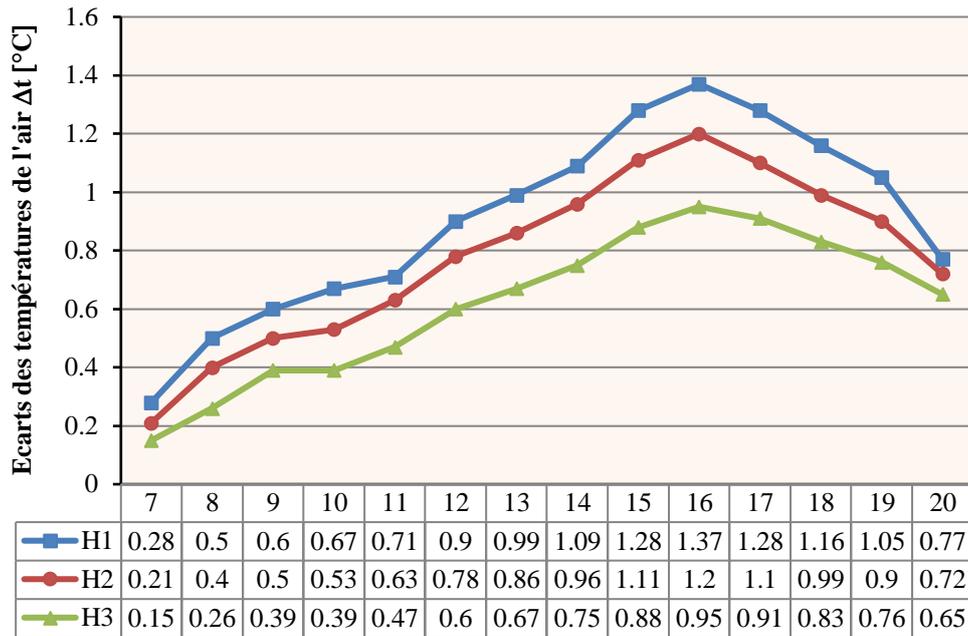


Figure V-15 : Températures de l'air des récepteurs au point N1, pour trois niveaux (Canyon large N/S).

La figure V-16 montre les écarts des températures de l'air pour trois niveaux ; le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau, dans le cas du canyon large orienté N-S avec H/W=1. Pour le point S1 qui représente le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Sud, les écarts simulés durant la matinée arrivent à un maximum de 0.8°C pour le RDC à 12h. Durant l'après-midi les écarts sont tous compris entre 0.7°C simulé à 13h pour le dernier niveau et 1.5°C à 16h pour le RDC.

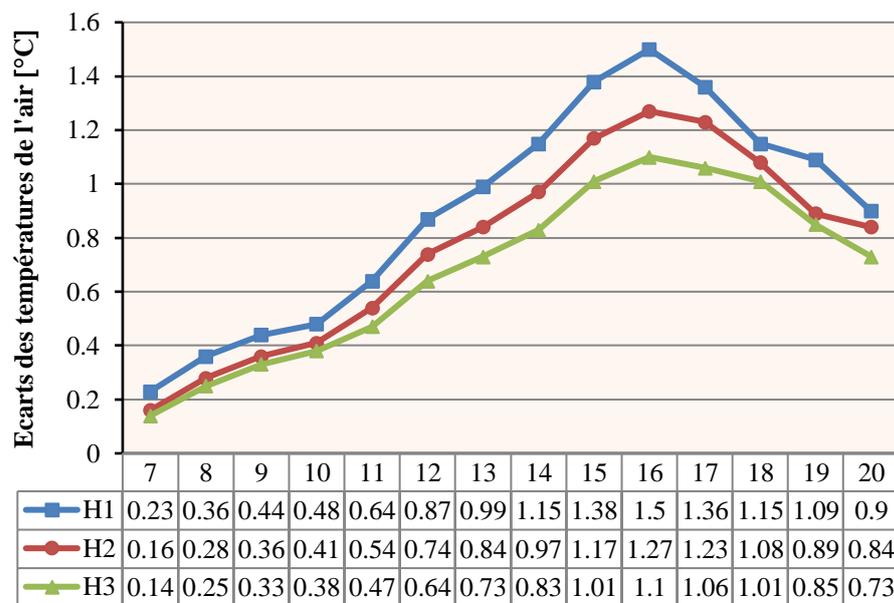


Figure V-16 : Températures de l'air des récepteurs au point S1 (Canyon large N/S).

V- 7.2.3. Simulation n°07 et 08 [+1, +1, -1] et [+1, +1, +1]

La figure V-17 montre les écarts des températures de l'air pour trois niveaux : le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau, pour le cas du canyon étroit orienté E-O avec $H/W=3$. Nous remarquons pour le point N1 qui représente le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Nord que des écarts des températures Δt apparaissent dans les canyons. Ceci dit, les écarts maxima simulés sont de l'ordre de 1.3°C, 1.1°C et 0.9°C apparus aux alentours de 16h respectivement aux niveaux du RDC et intermédiaire, et le dernier niveau.

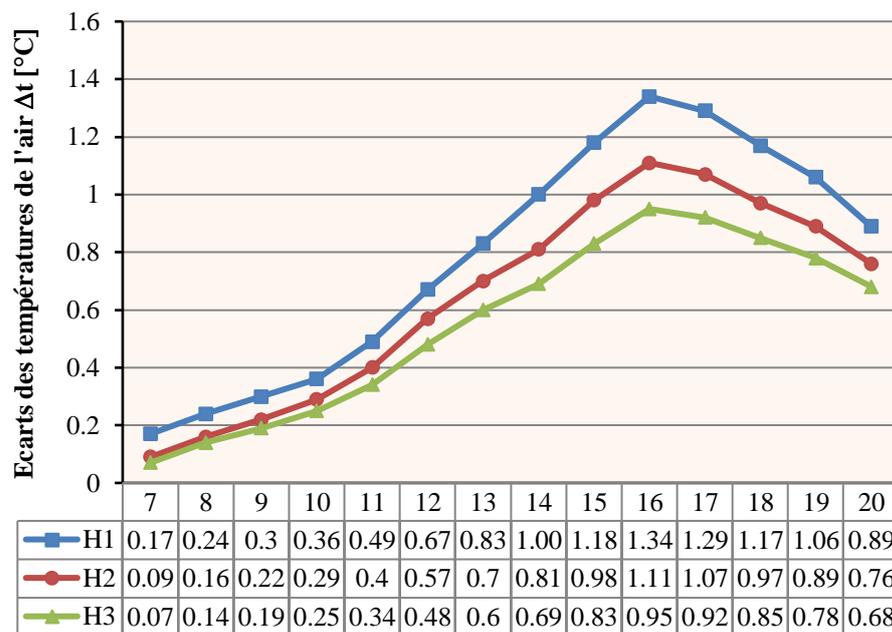


Figure V-17 : Températures de l'air des récepteurs au point N1 (Canyon étroit E/O).

La figure V-18 montre les écarts des températures de l'air pour trois niveaux : RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau, pour le cas du canyon profond avec $H/W=3$ orienté E-O. Pour le point S1 qui représente le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Sud, les écarts simulés durant la matinée arrivent à un maximum de 0.6°C pour le RDC à 12h00. Durant l'après-midi les écarts sont tous compris entre 0.6°C simulé à 13h pour le dernier niveau et 1.3°C à 16h pour le RDC.

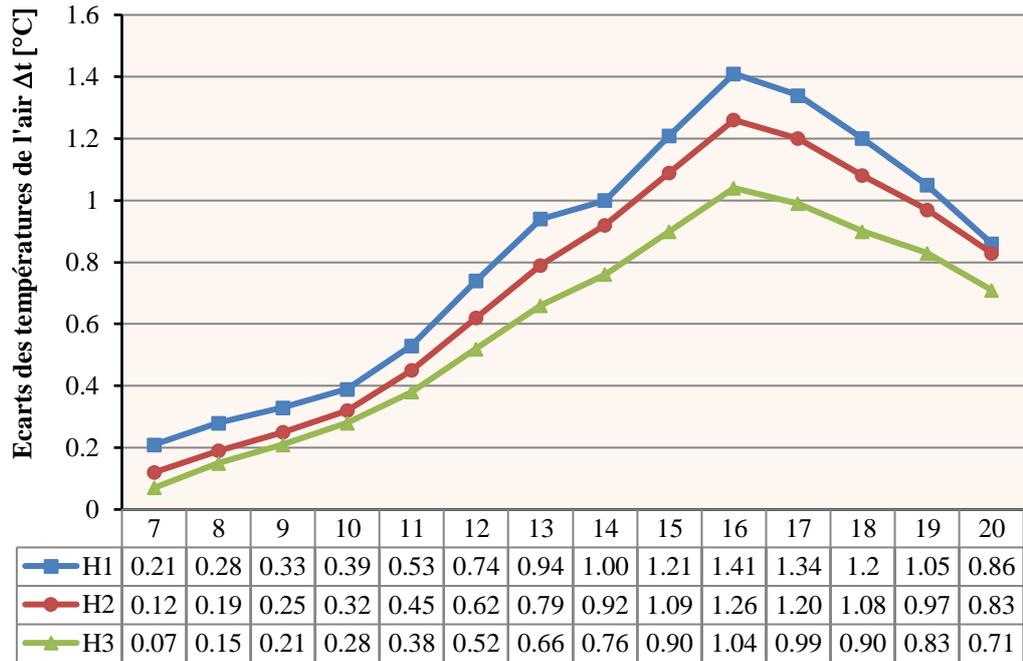


Figure V-18 : Températures de l'air des récepteurs au point S1 (Canyon étroit E/O).

V- 7.2.4. Simulations n°05 et 06 [+1, -1, -1] et [+1, -1, +1]

La figure V-19 montre les écarts des températures de l'air pour trois niveaux : RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau, pour le cas du canyon étroit orienté N-S avec $H/W=3$. Nous remarquons pour le point N1 qui représente le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Nord, que des écarts des températures Δt apparaissent dans les canyons. Ceci dit, les écarts maxima simulés sont de l'ordre de 1.2°C , 1.1°C et 0.8°C apparus aux alentours de 16h, respectivement au niveau du RDC, niveau intermédiaire et le dernier niveau.

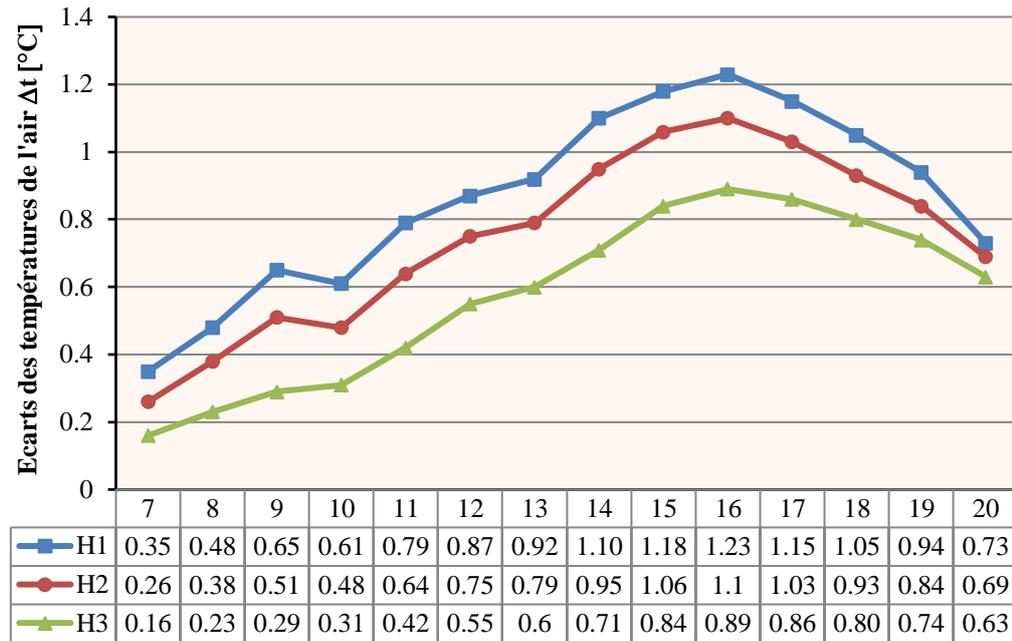


Figure V-19: Températures de l'air des récepteurs au point N1 (Canyon étroit N/S).

La figure V-20 montre les écarts des températures de l'air pour trois niveaux : le RDC, le niveau intermédiaire et le dernier niveau, pour le cas du canyon profond avec $H/W=3$ orienté N-S. Pour le point S1 qui représente le récepteur positionné à 1.00 m des façades orientées vers le Sud, les écarts simulés durant la matinée ne dépassent pas 0.8°C comme maximum calculé pour le RDC à 12h00. Durant l'après-midi les écarts sont tous compris entre 0.6°C simulé à 13h00 pour le dernier niveau, et 1.2°C à 16h00 pour le RDC.

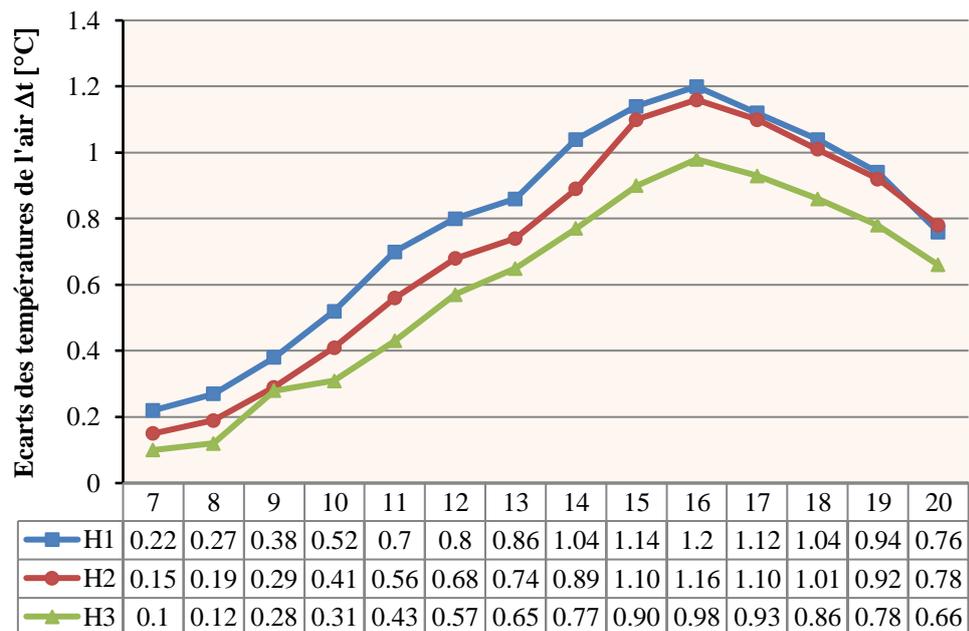


Figure V-20 : Températures de l'air des récepteurs au point S1 (Canyon étroit N/S).

Synthèse des écarts de température de l'air

Les écarts des températures de l'air pour les trois niveaux : le RDC (H1), le niveau intermédiaire 5H2° et le dernier niveau H3, nous laisse conclure que la température de l'air à coté des façades de verre réfléchissant est influencée principalement par :

- l'intensité du rayonnement solaire ; globalement, durant la matinée les écarts de température de l'air n'excèdent pas 1.0°C, et dans l'après midi ils atteignent un maximum de 1.5°C à 16h ;
- la réflectivité des façades vitrées, dans tous les cas simulés la température de l'air dans les canyons à façades réfléchissantes est plus élevée que celle des canyons à façades non réfléchissantes. Ceci indique que le revêtement des façades est un paramètre très important dans le bilan thermique d'un canyon urbain ;
- la hauteur des points considérés, le niveau le plus bas entraîne une augmentation de la température de l'air vu l'énergie amplifiée reçue par les surfaces du canyon ;
- Les multiréflexions entre les façades qui sont donc un facteur important. Wa-Gichia (1998) note que la façade d'en face peut être une source au moins aussi importante que la voûte céleste lors d'un ciel clair ;
- l'augmentation de la largeur de la rue, avec une hauteur de bâtiments fixe, entraîne une augmentation de la température de l'air ;
- l'orientation de la rue ; les canyons orientés Est-Ouest restent plus chauds que ceux orientés Nord-Sud ;
- de même au niveau des façades, les surfaces exposées au sud, présentent des coefficients de réflexion plus élevés pour renvoyer le rayonnement solaire vers la rue et les bâtiments d'en face (Patriarche, 2014). Elles favorisent donc, une élévation de la température de l'air ambiant ;
- les masques solaires ; l'ombre portée du bâtiment analysé, ou celle produite par les bâtiments au voisinage modifient les coefficients de réflexion des façades et diminue donc la température de l'air.

V- 7.3. Flux de rayonnement à ondes courtes

Pour mieux approcher la réflectivité solaire des façades, nous allons étudier le rayonnement direct S, diffus D et la composante globale G du rayonnement à ondes courtes du lever au coucher du soleil, pour le point S1 (Figures V-21, V-22 et V-23), pour la hauteur de 1.80 m, des quatre cas des simulations 2, 4, 6 et 8 des canyons E-O et N-S avec leurs rapports d'aspect H/W=1 et H/W=3. Ces quatre cas sont référés EOP1V2, EOP2V2, pour les canyons orientés E-O avec P1 : H/W=1 et P2 : H/W=3

respectivement. NSP1V2, NSP2V2 pour les canyons orientés NS avec P1 : H/W=1 et P2 : H/W=3 respectivement. V2 signifie le verre réfléchissant.

G est principalement affecté par la composante solaire directe S en raison du climat méditerranéen et du ciel clair. S diminue avec l'augmentation du rapport d'aspect H/W. Inversement, D augmente pour les deux orientations et avec l'augmentation du rapport d'aspect, à cause de la quantité croissante du rayonnement réfléchi de manière diffuse. Toutefois, cela ne dépasse pas 45 W/m² dans tous les cas, et atteint un maximum d'environ 43 W/m² pour la géométrie la plus large (Figures V-21, V-22 et V-23).

Pour les rues E-O (Figure V-23), les canyons dont H/W=1 sont très exposés de 09h à 17h, avec G autour de 920 W/m². Ceci est dû au fait que les rues orientées E-O permettent aux rayons solaires d'atteindre l'espace de la rue, latéralement à partir des façades. Les inter-réflexions du rayonnement solaire entre les murs-rideaux et les rues sont très importantes dans ces cas. Ces inter-réflexions ne diminuent que pour les rapports d'aspect très élevé, à savoir H/W=3, pour lequel G est d'environ 200 W/m² vers midi. Cependant, la rue est encore irradiée en début de matinée et tard dans l'après-midi.

Les rues N-S sont irradiées nettement moins longtemps que les rues E-O. Les valeurs importantes de H/W permettent l'obtention d'une ombre importante en obstruant le rayonnement solaire direct au niveau de la rue. La durée de l'exposition solaire est réduite lorsque H/W augmente. La rue avec H/W=1 reçoit la plus grande quantité de rayonnement solaire (pendant 9 h), tandis que la rue de H/W=3 est exposée pendant 4 h (Figure V-23).

Avant le midi solaire, la façade orientée vers l'ouest ne reçoit directement du ciel que le rayonnement solaire diffus. Toutefois, elle est exposée au rayonnement réfléchi par les surfaces de la scène urbaine, en particulier, par la façade située en face, et par la chaussée de la rue entre les deux façades. Les façades de verre à fort albédo situées en face réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire qu'elle reçoit en matinée. Une partie du rayonnement qu'elle réfléchit est directement reçue par la façade ouest considérée. Par conséquent, l'éclairement global de la façade ouest augmente significativement même avant que celle-ci ne soit exposée au rayonnement solaire direct. Le même constat est fait pour la façade orientée vers l'est qui reçoit plus de rayonnement solaire au cours de l'après-midi qu'elle ne l'aurait reçu si le bâtiment était isolé.

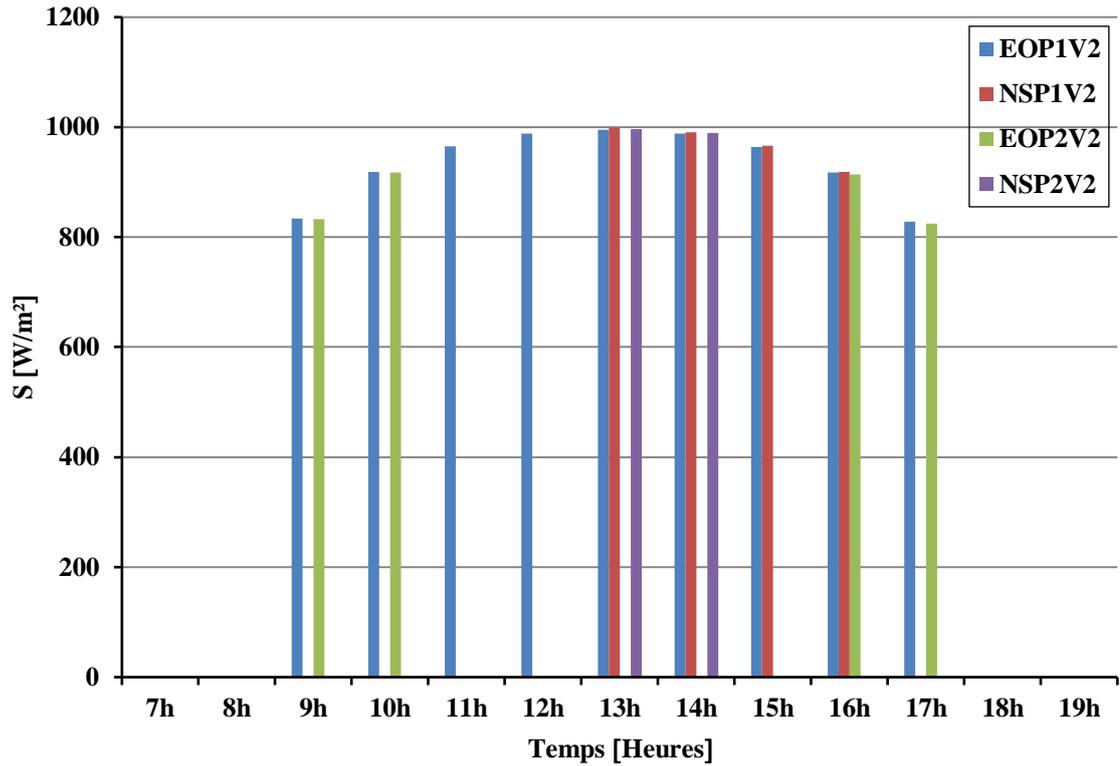


Figure V-21 : Evolution du rayonnement solaire direct S au point "S1".

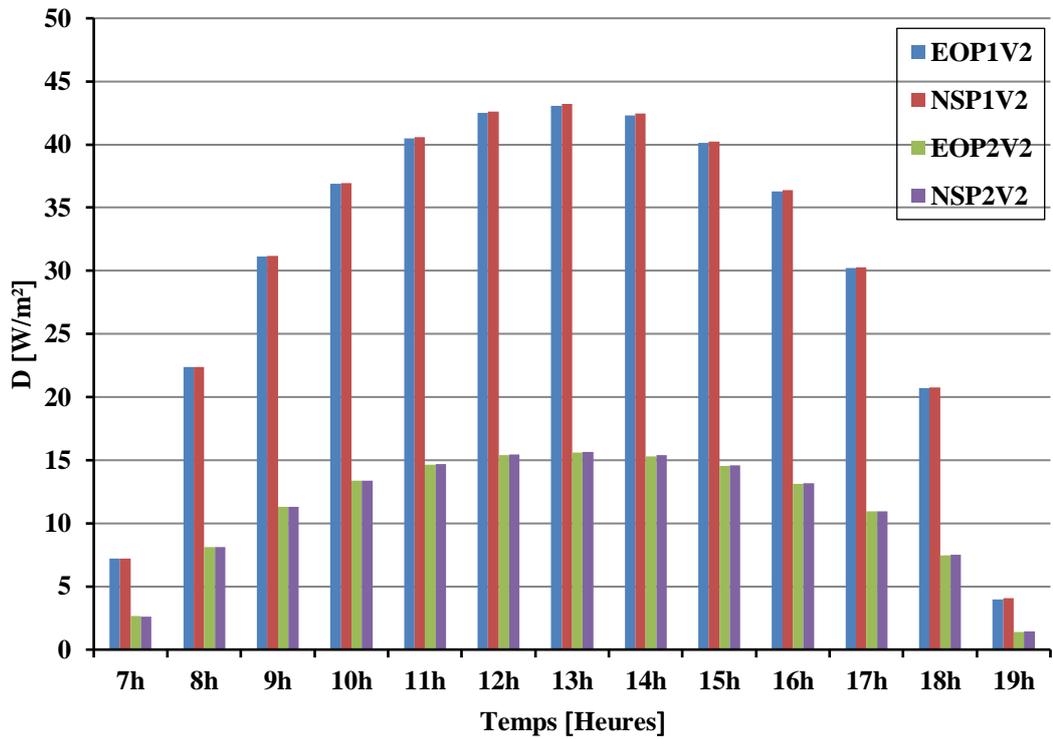


Figure V-22 : Evolution du rayonnement solaire diffus D au point "S1".

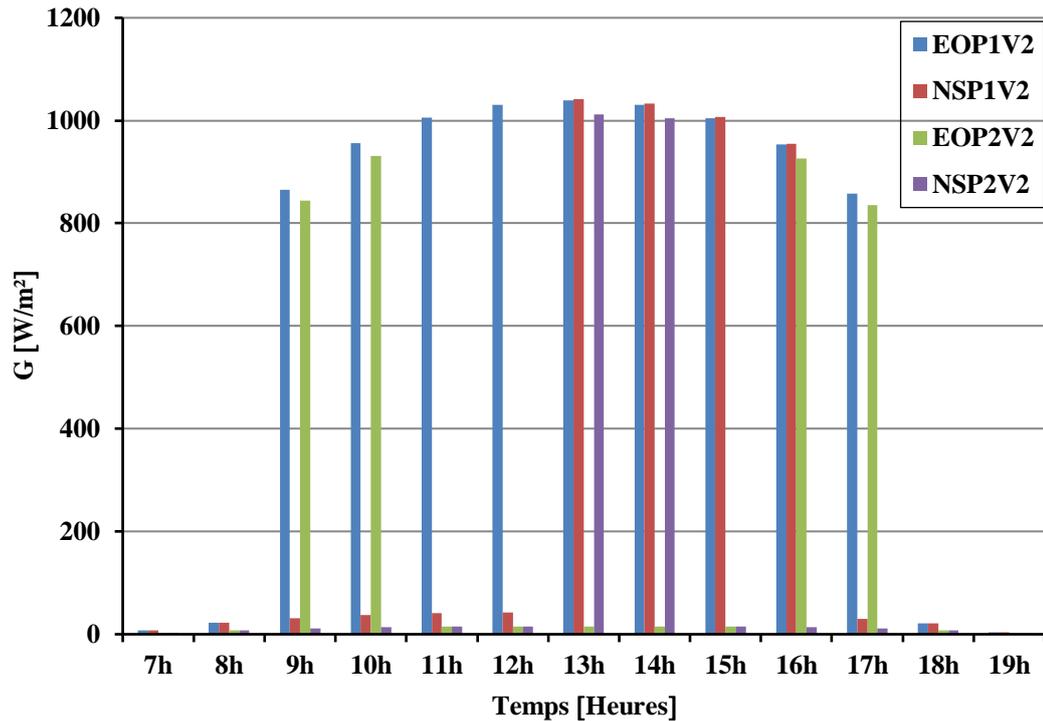


Figure V-23 : Rayonnement solaire global G au point "S1".

Synthèse des rayonnements

La quantité d'énergie que peut collecter la façade d'un bâtiment, dépend directement de son accès au soleil. Le rayonnement solaire pénétrant dans l'ouverture de la rue intègre un processus d'inter-réflexions et de multiples absorptions avec l'ensemble des surfaces de la rue et des locaux vitrés, et la part du flux radiatif réfléchi vers l'atmosphère s'en trouve diminuée. Ce piège radiatif est aussi valable pour le rayonnement thermique émis par les surfaces, qui, à cause de la vision réduite du ciel, ne peut profiter pleinement du potentiel de rafraîchissement offert par la voûte céleste, amenuisant ainsi le refroidissement des surfaces verticales et de la chaussée. Mills (2008) décrit ces effets comme étant une sorte de mini-effet de serre qui se développe et entraîne l'augmentation du bilan radiatif des surfaces urbaines, et qui sont les conditions idéales pour identifier le phénomène d'ICU.

En effet, il est indispensable de veiller à ce que les bâtiments ne soient pas en forte ou faible expositions solaires, pour que les espaces intérieurs puissent intercepter un ensoleillement et une illuminance adéquats (Cf. Chapitre II § II-3.6.4).

V- 8. Conclusion

Comme attendu et comme nous venons de le constater, les sollicitations thermiques varient d'un bâtiment à un autre selon les masques solaires, les orientations, et les propriétés des surfaces environnantes. Des bâtiments identiques dans une même ville peuvent avoir des besoins énergétiques différents. Le bâtiment dans la ville est donc influencé par les autres constructions et par les phénomènes microclimatiques à l'échelle de la canopée urbaine. La prise en compte de l'interaction bâtiments-microclimat permet d'améliorer la prédiction des besoins énergétiques.

Dans la continuité des études antérieures sur ces questions de microclimats urbains et caractéristiques des surfaces en ville, le travail actuel permet, d'une part, l'évaluation de l'impact des enveloppes réfléchissantes sur l'environnement microclimatique dans le cas de bâtiments entièrement en verre réfléchissant. D'autre part, le développement d'une méthode permettant la prédiction de la réponse thermique des bâtiments entièrement en verre réfléchissant aux sollicitations météorologiques dans un milieu urbain.

En plus de la charge thermique supplémentaire ajoutée à l'environnement extérieur en termes d'inconfort thermique, les murs-rideaux de verre réfléchissant occasionnent de sérieuses sources de gêne liées essentiellement aux effets d'éblouissement (Mehaoued, 2009). Pour la qualité des environnements intérieurs vécus, les occupants d'immeubles existants se plaignent de la qualité tonale du verre réfléchissant "sombre et foncée" qui atténue fortement l'éclairage naturel et engendre un sentiment de tristesse (Chabane, 2006).

Toutes ces considérations doivent conditionner la qualité du verre utilisé dans la conception des enveloppes en murs-rideaux de verre réfléchissant dans les environnements urbains en amont dans la demande du permis de construire ; qualité du verre à réglementer.

V- 9. Lien entre les deux études réalisées

L'impact d'un bâtiment existant en verre réfléchissant sur l'environnement extérieur et intérieur dans la ville d'Alger, en Algérie, est étudié. L'environnement extérieur a été étudié expérimentalement et numériquement. Une micro-station météo a été installée sur le toit du bâtiment et des thermogrammes ont été réalisés pour mesurer la température de surface en façades. Les données météorologiques mesurées par un thermo-hygromètre mobile permettent le calcul des températures de l'air autour du bâtiment avec le logiciel ENVI-met. Quant à l'étude paramétrique, elle nous a servi à quantifier les impacts de différents paramètres urbains et architecturaux, sur la consommation énergétique des bâtiments.

Pour le cas du bâtiment existant, on constate que les températures élevées des façades du bâtiment augmentent les températures de l'air environnant. Les températures de l'air calculées autour du bâtiment sont supérieures à celles mesurées sur le toit, suivies de celles enregistrées par la station météo de référence à l'aéroport. Les mesures expérimentales (à travers les thermogrammes) et les températures de l'air calculé par ENVI-met, montrent que les températures de l'air diminuent avec la hauteur du bâtiment. Ceci est dû à l'effet du dièdre qui se produit entre la surface horizontale chaude de la chaussée (l'asphalte) et les bas niveaux inférieurs du bâtiment.

Similairement, pour l'étude paramétrique, nous constatons, très clairement une stratification verticale du volume de l'air plus prononcée dans les canyons larges, avec des températures plus élevées au niveau du sol. La température de l'air diminue avec l'augmentation du ratio H/W, et un écart maximal de 3°C est enregistré entre les canyons E/O, avec H/W=1 H/W=3 vers 15h. Les températures de l'air calculées dans les canyons à parois verticales réfléchissantes sont plus élevées que celles calculées dans le cas du verre transparent. L'écart maximal enregistré est de l'ordre de 1.5°C, à 16h, pour les mêmes canyons larges avec H/W= 1 orientés E/O au niveau le plus bas (RDC).

Les charges de climatisation du bâtiment existant ont été calculées avec le logiciel Ecotect, avec trois fichiers météo. Les charges de climatisation calculées avec les données à proximité des façades sont plus élevées de 8% que celles calculées avec les données mesurées sur le toit, et 15% plus élevées que celles calculées avec la station météo de référence. Lorsqu'il n'est pas pris en compte, l'effet de l'îlot de chaleur urbain, entraîne une sous-estimation importante de la demande en énergie de climatisation.

Pour l'étude paramétrique, nous constatons que les consommations sont très différentes suivant les niveaux des trois facteurs considérés (le prospect, l'orientation et la réflectivité du verre). Globalement, les charges totales de climatisation pour le verre transparent sont plus élevées que celles du verre réfléchissant. Hiérarchiquement, les facteurs les plus influents sur la demande d'énergie en climatisation sont : la réflectivité solaire (C), puis l'orientation cardinale N/S (B), suivis du prospect H/W du canyon étroit (A). La morphologie la plus adaptée à la conservation de l'énergie semble donc être la rue canyon la moins large. En résumé, le microclimat est impacté par le verre réfléchissant parce que la température de l'air augmente, mais cela ne compense pas l'intérêt d'avoir un verre réfléchissant car cela limite fortement le flux solaire entrant. Même si les façades en verre réfléchissant sont conçues pour diminuer la pénétration du rayonnement solaire, ils ont tendance à augmenter considérablement la température de l'air extérieur.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Les niveaux de consommation d'énergie des bâtiments en Algérie ont augmenté de plus de 30% au cours des 30 dernières années et continueront encore d'augmenter jusqu'en 2025, (Chenak, 2009). Tout comme à l'échelle planétaire, cette augmentation est due à l'accroissement du parc des bâtiments, à l'augmentation de la surface moyenne des logements, et à l'évolution simultanée des exigences de confort. Pour le secteur tertiaire, les deux premières branches par la taille, les bureaux et les commerces, sont les plus consommateurs d'énergie et représentent 40% de la consommation totale, (Aprue, 2014). En effet, l'amplification des niveaux de consommation d'énergie et l'inconfort thermique des bâtiments sont le résultat de plusieurs paramètres influents qui sont :

- Le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment qui est le facteur principal affectant sa consommation d'énergie ;
- les données relatives à l'environnement immédiat: température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et radiation solaire ;
- les éléments de l'aménagement relatifs aux surfaces et aux vides urbains, comme les arbres, les parcs, l'eau et les matériaux ;
- les interactions entre microclimats et aménagements.

La consommation d'énergie des bâtiments urbains est donc affectée par le microclimat environnant qui diffère des données météorologiques. L'échelle microclimatique constitue le support de nombreuses hétérogénéités physiques dues aux spécificités à la fois urbaines et environnementales. A cet égard, les caractéristiques des bâtiments eux-mêmes peuvent complètement modifier le microclimat d'une scène urbaine. Notre recherche abordait alors l'évaluation de l'impact du microclimat urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments par la contribution des enveloppes entièrement en verre réfléchissant.

Les études bibliographiques recensés dans notre travail ont permis de dresser un panorama théorique et d'identifier un ensemble de travaux en rapport étroit avec la problématique. On en retient la grande pertinence des effets microclimatiques de l'environnement urbain sur les performances énergétiques des bâtiments, ainsi que les méthodes afférentes. Les études numériques sont le plus souvent réalisées pour estimer les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation à travers plusieurs angles de vue; certaines se sont intéressées à l'influence des paramètres microclimatiques, et d'autres à l'influence des composants de l'enveloppe. Pour essayer de résoudre le problème de la consommation énergétique, une

panoplie d'outils existe, mais ne prend pas correctement en compte les conditions aux limites microclimatiques (Bouyer, 2009).

Deux hypothèses ont ainsi été mises en place

1. La méthode de couplage numérique intégrant deux outils de simulation microclimatique et énergétique permet non seulement de simuler l'environnement extérieur proche du bâtiment en verre réfléchissant, mais également le calcul de ses consommations d'énergie, pendant la période estivale.
2. En été, les bâtiments à murs-rideaux de verre réfléchissant peuvent entraîner des conditions thermiques particulières sur leurs environnements extérieurs proches, qui pourraient engendrer des modifications des ambiances thermiques intérieures des bâtiments et une amplification des charges de climatisation.

Des objectifs liés aux problématiques de fond ont orienté notre travail de thèse :

1. l'objectif premier de notre recherche est d'adopter la méthode de couplage numérique pour énoncer et déterminer les causes de l'apparition des conditions microclimatiques particulières autour des bâtiments de verre réfléchissant, ainsi que leur impact sur la consommation énergétique des bâtiments dans le cas du climat chaud d'Alger ;
2. notre second objectif est de mener une étude paramétrique plus généralisable en considérant une morphologie urbaine de type canyon avec le climat chaud d'Alger ; cette étude permet d'examiner plusieurs facteurs urbains (voir introduction) et d'enveloppe (vitrage réfléchissant et vitrage transparent) sur les charges de climatisations du bâtiment étudié.

L'objectif premier de notre recherche était d'adopter une méthode multi-scalaire faisant dialoguer deux échelles spatiales différentes à savoir l'échelle urbaine et l'échelle architecturale pour évaluer la demande de climatisation des bâtiments étudiés.

Pour cela nous avons réalisé ce qui suit :

- dans un premier temps, configuration des bâtiments étudiés avec le logiciel ENVI-met pour simuler l'environnement extérieur et obtenir des données microclimatiques ;
- dans un second temps, modélisation des bâtiments étudiés à l'aide du logiciel de dessin Revit Architecture pour pouvoir les exporter vers Ecotect ;

- et enfin, extraction les fichiers météorologiques issus de récepteurs d'ENVI-met pour en créer d'autres sous format (*.wea.) compatibles avec Ecotect pour évaluer les consommations d'énergie, et ce, en déployant le langage de programmation de Visual Basic pour Application-VBA dans Excel.

En réponse à nos hypothèses citées plus haut, nous avons étudié le comportement d'un bâtiment de bureaux existant, conformément aux critères constructifs et climatiques de son environnement proche réel. L'objectif de cette étude expérimentale et numérique est d'effectuer des mesures *in-situ* de certaines grandeurs caractéristiques du microclimat urbain et de modéliser la consommation énergétique du bâtiment pour montrer l'importance du microclimat sur cette consommation. Après avoir étudié un bâtiment existant entièrement en verre réfléchissant, nous nous sommes intéressés à l'étude de sensibilité des facteurs impactant le microclimat et la consommation énergétique. L'objectif de cette thèse étant de mettre en évidence l'impact du revêtement vitré sur le microclimat, la réflectivité du verre était un des facteurs étudiés. Cependant, d'autres facteurs influencent le microclimat, et de ce fait, une étude de sensibilité rigoureuse, suivant une méthodologie adaptée a été menée. L'avantage des études de sensibilité ou paramétriques est de quantifier les impacts des facteurs sur une ou plusieurs fonctions. Dans notre cas, la méthodologie de plan d'expériences (Design of Experiments) nous a permis d'évaluer et de hiérarchiser l'influence de 3 paramètres liés à l'urbanisme et à l'enveloppe sur la consommation de climatisation.

Un premier constat est que les températures d'air dans les rues adjacentes étudiées diminuent avec l'augmentation du rapport d'aspect hauteur du bâtiment/largeur du canyon (H/W) montrant un pic de différence de 3.0°C entre les canyons orientés E-O avec $H/W = 1$ et $H/W=3$ autour de 15h. Cela s'explique par la vitesse de chauffage de l'air du canyon large orienté E-O, puisque la chaleur sensible transférée à l'air augmente avec l'exposition au rayonnement solaire. Ainsi, les maxima de température de l'air dans les canyons profonds ont été atteints à différents moments de la journée selon l'orientation. Plus explicitement, les températures d'air maximales se produisent en début d'après-midi pour les canyons N-S, mais persistent jusqu'à la fin de l'après-midi pour les canyons E-W, ce qui correspond au temps de plus grande exposition des facettes du canyon pour chaque orientation, respectivement. Ainsi, dans notre cas, la température de l'air est plus sensible à l'orientation qu'au rapport d'aspect.

Comme nous l'avons présenté dans le premier chapitre, la morphologie ou géométrie urbaine accroît les multiples réflexions du rayonnement solaire, réduit les transferts hors du canyon des flux de chaleur sensible et diminue les pertes de rayonnements infrarouges du fait de l'effet écran des murs des

bâtiments. Elle influence ainsi le climat urbain et modifie l'albédo global de la ville en piégeant le rayonnement.

Pour le rayonnement à ondes courtes, la quantité d'énergie que peut collecter la façade d'un bâtiment, dépend directement de son accès au soleil. Le rayonnement solaire pénétrant dans l'ouverture de la rue, intègre un processus d'inter-réflexions et de multiples absorptions avec l'ensemble des surfaces de la rue et les locaux vitrés, et la part du flux radiatif réfléchi vers l'atmosphère s'en trouve diminuée. Ce piège radiatif est aussi valable pour le rayonnement thermique émis par les surfaces, qui, à cause de la vision réduite du ciel, ne peut profiter pleinement du potentiel de rafraîchissement offert par la voûte céleste, amenuisant ainsi le refroidissement des surfaces verticales et de la chaussée. Mills (2008) décrit ces effets comme étant une sorte de mini-effet de serre qui se développe et entraîne l'augmentation du bilan radiatif des surfaces urbaines, et qui sont les conditions idéales pour identifier le phénomène d'ICU.

Globalement, les charges totales de climatisation pour le verre transparent sont plus élevées que celles du verre réfléchissant. Elles sont de 340 Wh/m²/jour, 311 Wh/m²/jour, 322 Wh/m²/jour et 310 Wh/m²/jour pour les cas des simulations 1, 3, 5 et 7 du verre transparent respectivement, contre 206 Wh/m²/jour, 187 Wh/m²/jour, 198 Wh/m²/jour et 185 Wh/m²/jour pour les quatre cas des simulations 2, 4, 6 et 8 du verre réfléchissant.

Les écarts de consommation obtenus sont d'un maximum de 134 Wh/m²/jour pour les simulations 1-2 et d'un minimum de 124 Wh/m²/jour pour les simulations 3-4, et ce, pour le canyon large avec un prospect H/W= 1. De plus, l'écart entre les charges de climatisation relatif au type des vitrages diminue lorsque le ratio géométrique augmente. Ceci signifie que les charges de refroidissement sont fortement influencées par les propriétés optiques et thermiques des murs-rideaux de verre des canyons. En effet, le verre transparent laisse passer une grande partie de la lumière (TL= 80 %) et du rayonnement infrarouge (FS= 76%), contrairement au verre réfléchissant qui stoppe le rayonnement infrarouge (FS=48%) et ne laisse accéder que 48% de rayonnement visible.

En comparant les quatre canyons pour chaque type de verre nous concluons que l'énergie nécessaire à la climatisation est maximale avec un ratio géométrique H/W=1 et une orientation cardinale E-O. La morphologie la plus adaptée à la conservation de l'énergie semble donc être la rue canyon la moins large. En résumé, le microclimat est impacté par le verre réfléchissant parce que la température de l'air augmente, mais cela ne compense pas l'intérêt d'avoir un verre réfléchissant car cela limite fortement le flux solaire entrant.

Le nouveau pas franchi dans ce travail au niveau de la modélisation, est la possibilité d'analyser à la fois le microclimat, mais aussi les consommations énergétiques des bâtiments à murs-rideaux de verre réfléchissant de manière objective. De plus il est possible de comparer d'un point de vue énergétique plusieurs solutions de conception architecturale et/ou urbaine entre elles.

Par rapport aux résultats des autres études, nous avons une description microclimatique plus complète de l'environnement urbain étudié qui nous permet d'avoir toutes les données relatives au bâtiment d'étude, ce qui n'est pas vraiment systématique dans les articles et travaux qui ont été rapportés dans l'étude bibliographique. Nos résultats ne nous permettent pas, comme les études d'Ali-Toudert (Ali-Toudert, 2009) de simuler les consommations d'énergie d'un bâtiment sur une durée d'une année. Cependant, ils sont plus en accord avec l'étude de Yang et al. (Yang et al., 2012) qui ont utilisé le logiciel du microclimat ENVI-met pour simuler les charges de climatisation et de chauffage d'un bâtiment pour trois jours.

Les variables simulées montrent que l'influence du microclimat est plus prononcée près des façades réfléchissantes du bâtiment étudié, en particulier pour les températures d'air où les écarts avec la température d'air météorologique peuvent aller jusqu'à 4°C. Ceci confirme l'intérêt de prendre en compte le microclimat de la manière la plus exacte possible pour évaluer les consommations énergétiques de bâtiments sans s'éloigner de la réalité. La prise en compte des masques solaires pour les simulations théoriques atténue considérablement la consommation de climatisation et confirme également cette recommandation.

L'originalité de ce travail réside avant tout dans le déroulé méthodologique et en particulier dans l'étape intermédiaire d'étude de sensibilité qui a permis de construire la grille d'étude de la dernière partie. L'utilisation de ce type de méthode statistique, habituellement utilisée pour d'autres domaines scientifiques, a montré des résultats satisfaisants. Elle se démarque d'autres méthodes plus classiques comme l'étude paramétrique mono-critère, car les interactions des paramètres d'entrée ont été prises en compte sans les établir au préalable.

Limites et perspectives

Au terme de ce travail de thèse, une partie des objectifs initiaux ont été atteints. Toutefois, des améliorations techniques et des pistes de recherches peuvent être proposées pour aboutir à une analyse énergétique des bâtiments dans leur environnement climatique encore plus directe, précise et instructive pour la pratique opérationnelle.

- **La modélisation physique**

La modélisation est un des éléments clé de ce travail. Nous avons effectué un couplage numérique dont le temps de calcul est prohibitif pour un calcul en « couplage complet », mais des améliorations sont encore envisageables. En modélisation physique, tout peut évidemment être modifié et amélioré, c'est pourquoi nous proposons ici les perspectives nous paraissant prioritaires. Pour cela, il serait intéressant d'intégrer un modèle numérique pouvant réaliser un couplage plus rapide.

- **Réfectivité solaire**

La réfectivité solaire est considérée purement constante et non pas variable selon l'angle d'incidence du rayonnement solaire. La prise en compte de ce type de phénomène a du sens quand on cherche à optimiser l'aménagement en fonction des conditions microclimatiques. De plus, ne faudrait-il pas prendre en considération des réfectivités solaires plus élevées que celle considérée dans nos deux études.

- **Orientation et géométrie de la rue**

Dans notre recherche, nous nous sommes seulement intéressés à l'étude de rues canyons symétriques avec deux prospectus géométriques ($H/W=1$ et $H/W=3$) et deux orientations cardinales (Est-Ouest et Nord-Sud), mais il aurait été possible d'en imaginer d'autres. Cependant, afin de mieux appréhender l'effet des inter-réflexions, des configurations asymétriques avec une orientation Nord-est/Sud-Ouest, d'autres valeurs H/W , des formes curvilignes sur un terrain en pente feraient l'objet d'une analyse spécifique.

- **Forme bâtie**

Il pourrait être intéressant de prendre en compte des bâtiments auto-ombragés avec des formes plus complexes pour déterminer l'impact de leur mode de réflexions solaires ainsi que les gains en réalisés en consommation d'énergie.

- **Les aspects méthodologiques**

La décomposition du travail en deux parties, l'une consacrée à l'étude du bâtiment réel, l'autre à l'étude du bâtiment dans le système climatique urbain a permis de montrer que l'impact énergétique des aménagements ne peut pas s'entrevoir de manière générale, mais en le mettant en relation avec les caractéristiques intrinsèques du bâtiment étudié. Pour caractériser ce bâtiment de référence observé,

l'étude de sensibilité a permis de mettre en relief certaines tendances par le biais de paramètres calculables sur une version simplifiée du bâtiment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ait-Mekideche, M. (2011)** «Newsletter presse n°13». Sonelgaz, Alger, 16p.
- AGEDEN, (2010)** « Maitrise de l'énergie et énergies renouvelables en Isère, France ». Source : <http://www.alpesolidaires.org>, (consulté en mars 2015).
- Akbari et al. (1997)** « Peak power and cooling energy savings of high- albedo roofs », *Energy and Buildings* 25, pp.117–126.
- Akbari, H. Gartland, L.M. Konopacki, S.J. (1998)** « Measured energy savings of light colored roofs: results for three California demonstration sites », *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings: Efficiency and Sustainability*, vol. 3, pp. 3.1–3.12.
- Akbari, H. (2003)** « Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non- residential buildings », *Energy* v.28, pp. 953–967.
- Akridge, J.M. (1998)** « High-albedo roof coating—impact on energy consumption », *ASHRAE Transactions* 104 , pp.957–962.
- Alexandri, E. Jones, P. (2004)**, «The thermal effects of green roofs and green façades on an urban canyon», *PLEA2004 - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Eindhoven, The Netherlands, pp.1-6.
- Alexandri, E., Jones, P. (2008)** «Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates», *Building and Environment* 43, pp. 480–493.
- Ali-Toudert F. (2009)** «Energy efficiency of urban buildings: significance of urban geometry, building construction and climate conditions », *The seventh International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, 4p.
- Ali-Toudert, F., Mayer, H. (2006)** «Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate », *Building and Environment* (41), pp. 94-108.
- Ali-Toudert, F. Bensalem, R. (2001)** «A methodology for a climatic urban design *Proceeding of 18th Conference of Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, Brazil: pp.469-474.
- Ali-Toudert F. (2000)** «Intégration de la dimension climatique en urbanisme», mémoire de Magistère, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger, 175p.
- Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J. (2012)** «Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings», *Energy and Buildings* 55, pp.823–832.

- Martins T.A.L. et al. (2016)** «Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France», *Sustainable Cities and Society* 26, pp. 9–26.
- Andjelkovic A.S. et al. (2012)** «Development of simple calculation model for energy performance of double skin facades», *Thermal Sciences* vol.16, pp.s251-s267
- Aprue (2014)** «Energie finale consommée en Algérie– chiffres clés 2012 », Alger, Algérie, Source : <http://www.aprue.org.dz> (Consulté le 10.07.2015).
- Aprue. (2009)** « Programme ECO-BAT, Signature d'une convention entre l'Aprue et 11 OPGI », La Lettre APRUE, Bulletin trimestriel de l'APRUE n°15, pp.5-6.
- Athamena, K. (2013)** « Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France. 317 p.
- Atik, T. (2011)** « Les toitures végétalisées à Alger pour une contribution à l'amélioration du microclimat urbain méditerranéen », Mémoire de Magistère. EPAU, Alger. 247 p.
- Baldinelli, G.(2009)** « Double skin façades for warm climate regions. Analysis of a solution with an integrated movable shading system», *Building and Environment* 44, pp.1107–1118.
- Balocco, C.A. (2002)** « Simple model to study ventilated facades energy performance », *Energy Build* 34, pp.469–75.
- Baklanov, A. et al. (2009)** « Meteorological and air Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas », Ed.Springer, 202p.
- Ben Cheikh H. and Bouchair, A. (2008)** «Experimental Studies of a Passive Cooling Roof in Hot Arid Areas», *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°4, 6p.
- Benevolo, L. (1998)** «Histoire de l'architecture moderne, Tome 2, Avant-garde et mouvement moderne », Editions Dunod, Paris. (Traduit de l'italien par Vicari), 312p.
- Berrached, L. (2011)** «Etude prospective de la demande d'énergie finale pour l'Algérie à l'horizon 2030»,.Mémoire de Magistère. Université de Boumerdes, Algérie. 86 p.
- Bonhomme, M. (2013)** «Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 546p.
- Bosquet, S. (2014)** «Le verdissement des toitures pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur conforte une biodiversité à Londres », source : www.construction21.org, (consulté le 14 novembre 2016).
- Boucheriba, F. (2005)** «Impact de la géométrie des canyons urbains sur le confort thermique

- extérieur », Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, 193p.
- Boudghene Stambouli et al. (2012)** «A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* N°16, pp. 4445–4460.
- Bougriou, C. Hazem, A., Kaouha, K. (2000)** « Protections Solaires des Fenêtres », *Revue des Energies Renouvelables* Vol.3, pp. 127-135.
- Bourbia, F., et Boucheriba, F. (2010)** « Impact of street design on urban microclimate for semi- aride climate (Constantine) », *Renewable Energy* 35, pp.343–347.
- Bouyer, J., (2009)** « Modélisation et simulation des microclimats urbains. Étude de l’impact de l’aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments ». Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 324p.
- Bruse, M. (1999)** « The influences of local environment design on microclimate – Development of a prognostic numerical Model ENVI-met for the simulation of wind, temperature and humidity distribution in urban structures », These de Doctorat, Université de Bochum, Allemagne.
- Button, D., Pye, B. (1993)** « Glass in building: a guide to modern architectural glass performace », Ed. Butterworth architecture, Oxford, 372p.
- Boutwell, C. Salinas, Y. (1986)** « Building for the Future—Phase I: An Energy Saving Materials », Research Project, Mississippi Power Co.,Rohmand Haas Co. and University of Mississippi, Oxford.
- Boyer, H. (2012)** « Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France. 259 p.
- Bozonnet, E. (2005)** « Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments. Cas de la rue canyon », Thèse de doctorat. Université de la Rochelle, France, 176p.
- Bouden, C. (2007)** « Influence of glass curtain walls on the building thermal energy consumption under Tunisian climatic conditions: The case of administrative buildings », *Renewable Energy* 32 pp.141–156.
- Brophy, V. et al. (2000)** « Sustainable urban design»,. Energy Research Group, European Commission, Directorate - General Energy and Transport, Editions ENERGIE, Irlande, 23p.
- CERTU (2003)** « Les façades », Mémento technique du bâtiment, France, 35p.
- Chahab, O. (1994)** « The intelligent façade: Photovoltaic and Architecture », *Renewable Energy* Vol.5. pp.188 – 204.

- Chan A.L.S. (2011)** « Energy and environmental performance of building façades integrated with phase change material in subtropical Hong Kong », *Energy and Buildings* 43, pp.2947–2955.
- Chapelle, S., et Petitjean, O. (2015)** « Total et le gaz de schiste algérien », *Observatoire des multinationales, Rapport, France*, 25p.
- Chatzidimitriou, A., and Yannas, S. (2015)** « Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials », *Energy and Buildings* 108, pp.156–174.
- Chlela, F. (2008)** « Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse »
Thèse de doctorat: Université de la Rochelle, France. 302 p.
- Chlela F. et al. (2005)** «Feuille de route vers des bâtiments neufs et existants très basse consommation énergétique voire à énergie positive », *CSTB, Rapport DDD/DE/PEB*.
- Chenak, A. (2009)** «Efficacité énergétique dans le bâtiment-Projet pilote Med-Enec». *La lettre APRUE N°14* , pp. 1-2.
- Cheung, C.K. Fuller, R.J. Luther, M.B. (2005)** «Energy efficient envelope design for high rise apartments», *Energy and Buildings* 37, pp.37–48.
- Chowdhury, A.A. Rasul, M.G. Khan, M.M.K. (2008)** «Thermal-comfort analysis and simulation for various low-energy cooling-technologies applied to an office building in a subtropical climate », *Applied Energy* 85, pp.449–462.
- Chun, Y.P. Yu Yu, W.J. (2004)** «Influence of external thermal insulation compound system on the indoor temperature and humidity», *Low Temperature Architecture Technology* 2 pp.80–81.
- CNERIB. (1998)**. «Règlement thermique des bâtiments d'habitation et règles de calcul des déperditions calorifiques » *Alger: DTR.C3-2*.
- CNERIB. (1997)**. «Règles de calcul des apports calorifiques», *Alger: DTR.C3-2*.
- Colombert, M., (2010)**. «Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville»,*Thèse de Doctorat, Université Paris-Est*, 541p.
- Crawley, D.B. Hand, J.W. Kummert, M. Griffith, B.T. (2008)** «Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs », *Building and Environment* 43, pp.661–673.
- Cruz, N. et al. (2011)** « Bioclimatic architecture potential in buildings durability and in their thermal and environmental performance », *International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal*, 8p.

- De Dear, R-J., Brager G-S. (2002)** «Thermal comfort in naturally ventilated building revision to ASHRAE Standard 55 », *Energy and Buildings* 34, pp. 549–561.
- De Hatten, A. (2002)** « Mise en évidence des caractéristiques générales de l'îlot de chaleur urbain Strasbourgeois », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Delaunay, D. (1986)** « Microclimat d'une rue », Actes de colloque « Conception des formes urbaines et contrôle énergétique », CSTB, Nantes, pp.34-44.
- Djedjig, R., (2013).** « Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain » Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, France 171p.
- Dessus, B. et Pharabod, F. (2002)** « L'énergie solaire ». *Que sais-je?*, Ed. PUF, France, pp.14- 25.
- Dettwiller, .(1978)** « L'évolution séculaire de la température à Paris». *FRA*, 6 (13), 95–130. Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle 174 p.
- Doya, M., Bozonnet, E., Allard, F. (2012)** « Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment » *Energy and Buildings* 55, pp.42–50.
- Doya, M., (2010)** « Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense», Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle. 264 p.
- Dubois, C. (2014)** « Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique ; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers québécois ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 278 p.
- Dugué, A. (2013)** « Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations », Thèse de doctorat, Université Bordeaux-1, France, 137p.
- Eliasson, I. (1990/91)** « Urban geometry, surface temperature and air temperature », *Energy and buildings*, vol.15, pp. 141-145.
- Erell, E., Pearlmutter, D. et Williamson, T. (2011)** « Urban microclimate: designing the spaces between buildings », Editions Earthscan. 288p.
- ERG (1999)** « Solar Bioclimatic Architecture 2. Renewable Energy Series», Ireland, Energy Research Group. School of Architecture University College of Dublin. Lior.
- Escourrou, G. (1983)** « Le climat et l'environnement, les facteurs locaux du climat ». Ed. Masson, Paris, France
- Escourrou, G. (1991)** « Le climat et la ville ». Ed. Nathan, Paris, France, 190p.
- Faggembau D, Costa M, Soria M, Oliva A. (2003)** « Numerical analysis of the thermal behaviour of glazed ventilated facades in Mediterranean climates. Part II: applications

- and analysis of results ». *Sol Energy* 75, pp.229–39.
- Gandemer, J., & Guyot A. (1976)** « Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti », Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris, France, 130p.
- Gartland, L., (2008)** « Heat islands: Understanding and mitigating heat in urban areas », Editions Earthscan, 214p.
- Georgakis, Ch., Zoras, S. Santamouris, M. (2014)** « Studying the effect of “cool” coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique », *Sustainable Cities and Society* 13, pp.20–31.
- Givoni, B. (1978)** « L'homme, l'architecture et le climat » .Ed. du Moniteur, Paris, France 460p.
- Glockner, S. (2000)** « Contribution à la modélisation de la pollution atmosphérique dans les villes », Thèse de Doctorat. Université Bordeaux I, 174p.
- Gonzalo, R. , Habermann, K.-J. (2008)** « Architecture et efficacité énergétique », Ed Birkhäuser, Allemagne, 221p.
- Gossard, D., & Lartigue, B. (2013)** « Three-dimensional conjugate heat transfer in partitioned enclosures: Determination of geometrical and thermal properties by an inverse method », *Applied Thermal Engineering* 54, pp.549-558.
- Goulart, S. et T. Pitta (1994)** «Advanced topics in Bioclimatology to building design, regarding environmental comfort », Florianopolis: PPGEC-UFSC PPGEC-UFSC.
- Gracik, S. et al. (2015)** « Effect of urban neighborhoods on the performance of building cooling systems », *Building and Environment* 90 , pp..15-29.
- Guyot, G. (1999)** « Climatologie de l'environnement, cours et exercices corrigés ». Ed. Dunod, Paris, 525p.
- Hamel, KH. (2005)** « La ville compacte: une forme urbaine d'une ville durable en régions arides », Mémoire de magistère, Université de Biskra, 478 p.
- Hannawi, K. (2006)** « La conception des façades des bâtiments dans une approche de haute qualité environnementale », Mémoire de Master, Marne-la-vallée, France. 57 p.
- Himri, Y. et al. (2009)** « Review and use of the Algerian renewable energies for sustainable development » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 13 (2009), pp.91-102,2009.
- Hornez, J.-L. (2017)** « Bâtiment tertiaire technique. Valable sur: archicontemporaine.org.

- IBGE (2010).** Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments», pp.1-7.
- IEA (2011)** « World energy outlook 2011. Consulté le Septembre 05-10-2012, sur www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2011_web.pdf.
- Izard, J.L, Guyot, A. (1979)** «Archi-bio » Edition Parenthèses, Roquevaire » 131p.
- Izard, J-L. (2000)** « Microclimats et formes urbaines » [En ligne] [http://www.marseille.archi.fr/~ abc/Microclimurbain.htm](http://www.marseille.archi.fr/~abc/Microclimurbain.htm) (téléchargé en juin 2008).
- Jamekhorshid A, Sadrameli S-M, Farid M (2014)** «A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium », Renewable and Sustainable Energy Reviews N°31, pp. 531–42.
- Joarder, M. A-R. et al (2009)** « A simulation assessment of the height of light shelves to enhance daylighting quality in tropical office buildings under overcast sky conditions in Dhaka, Bangladesh », Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, pp.27-30.
- Johnston, J., and Newton, J. (2004)** «Building green, a guide to using plants on roofs, walls and pavement ». Ecology Unit, 95p.
- J.O.R.A. (2000)** « Décret exécutif N°2000-90 portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs », Journal Officiel de République Algérienne , n°25.
- J.O.R.A. (1999)** « Loi 99-09 du 28 Juillet 1999 Relative à la Maitrise de l'Energie». Journal Officiel de la République Algérienne, n°51.
- Kazim, A. (2007)** «Assessments of primary energy consumption and its environmental consequences in the United Arab Emirates », Renewable and Sustainable Energy Reviews11, pp.426–446.
- Keboer, L. (1999)** «Polymer modified mortar-ideal binder of external thermal insulation system », New Building Material 4, pp.37–39.
- Koenigsberger, O.H. et al. (1980)** « Housing and building; Patone. Climatic design. London,
- Kolokotroni M. et al (2004)** « Environmental impact analysis for typical office facades. Build Res; pp.32:2–16.
- Konopacki S., Akbari, H. (2001)** « Measured energy savings and demand reduction from a reflective roof membrane on a large retail store in Austin », Report No. LBNL- 47149, Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley,26p.
- Kossecka, M., Kosny, J. (2002)** « Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used buildings », Energy and Buildings 34, pp.321–331.

- Kragh M. (2001)** « Monitoring of advanced facades and environmental systems. The whole-life performance of facades », University of Bath, CWCT, 80p.
- Kragh M. (2010)** « Facade engineering and building physics. Examples of current best practice and recent innovations », Integrated Facade Symposium. San Francisco, 59p.
- Krüger, E-L, Pearlmutter, D. (2008)** «The effect of urban evaporation on building energy demand in an arid environment » *Energy and Buildings* (40), pp.2090–2098.
- Lam, T.C., Hua Ge, Fazio, P. (2015)** « Impact of curtain wall configurations on building energy performance in the perimeter zone for a cold climate », *Energy Procedia* 78, pp.352– 357.
- Larsen, S.F. Filippín, C. Lesino, G. (2014)** «Thermal simulation of a double skin façade with plants » *Energy Procedia* 57, pp.1763 – 1772.
- Lartigue, B., Lasternas, B., Loftness, V. (2014)** « Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight », *Indoor and Built Environment Vol.23*, pp.70–80.
- Leconte, F., (2014)** *Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy* », Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine. p.274.
- Lehtihet Kh. et al. (2002)** « Evaluation of microclimatic effects on urban sites by means of insitu measurements, thermographic study and numerical simulation », First International Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment, Nantes, France
- Liébard, A. De Herde, A. (2005)** « *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* » Ed. Le Moniteur, 768p.
- Lilensten, J. (2006)** « *Le système solaire revisité* ». Ed. Eyrolles, France, 308p.
- Li, N. (2010)** «Impacts of Human Behavior on Energy Consumption of Residential Buildings in China's Hot Summer and Cold Winter Zone », These Doctorat, Université de Chongqing, Chine.
- Lewandowski, A. (2012)** « *Utilisation des MCP dans le bâtiment 3E* », Mémoire de Master. INSA, Strasbourg, France. 57 p.
- Massu, C. (1982)** « *L'architecture de l'école de Chicago* », Coll. Espace & architecture. Ed. Dunod, Paris, 161p.
- Medjlekh, D. (2006)** « *Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment* », Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie, 303p.
- Mekki, B., (2010)** « *Bouzedjar, un village touristique original*». source :

http://www.vitamedz.com/la-passion-de-brahim-mekki-pour-un_villagetouristiquetout/Photos_17141_113751_46_1.html

- Merlin, P. (1996)** « Energie, environnement et urbanisme durable », Que sais-je ?, Ed. PUF, France, 128p.
- Mochida A. et al. (2006)** « Total analysis of cooling effects of cross-ventilation affected by microclimate around a building », Solar Energy 80, pp.371–382.
- Mora, L. (2003)** « Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet », Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEPTAB), Université de La Rochelle. France, 196p.
- Musy, M. (2008)** « Approches physiques des ambiances urbaines caractérisation et conception », CERMA – UMR CNRS. Université de Nantes, France, 20p.
- Nait, N. (2009)** « La réhabilitation énergétique dans les logements collectifs existants, cas du climat semi-aride de Constantine », Mémoire de magistère, Département d'architecture, Université de Constantine. 254P.
- Niccolo, A. Adriana, A. Michela, B. (2009)** « The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings », Energy and Buildings 41, pp.1181–1187.
- Noilhan, J. (1980)** « Contribution à l'étude du microclimat au voisinage d'un bâtiment », CSTB, Nantes.
- Wong N.H. et al. (2011)** « Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption », Solar Energy 85, pp.57–71.
- Oke, T-R. (1973)** « City size and the urban heat island. Atmospheric environment ». vol. 7, pp.769–779.
- Oke, T-R. (1987)** « Boundary layer climates. Methuen and co. London », Routededje 2nd edition, 435p.
- Oke, T-R. (1988)** « Street Design and Urban Canopy Layer Climate », Energy and buildings n°11, Canada, pp.103-113.
- Oke, T-R. (2006)** « Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban cities », Instruments and observing methods WMO/TD n°81, 47p.
- Olgyay, V. (2000)** « Bioclimatic approach to architectural regionalism », Design with climate, Princeton University Press, New Jersey, 236p.
- ONU. (2002)** « Sommet de Johannesburg 2002-Profil de l'Algérie ». Johannesburg: ONU.

- Pappas A. (2006)** « Energy performance of a DSF–analysis for the Museum of Contemporary Art», Denver. SOLAR. Denver, USA.
- Parker, D.S. Barkaszi, S.F. Sonne, J.K. (1994)** « Measured cooling energy savings from reflective roof coatings in Florida, Phase II report », Report No. FSEC-CR-699-94, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral FL.
- Patriarche, M. (2014)** « Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains», Thèse de Doctorat, ENTPE, France, 391p.
- Pearlmutter, D. (1998)** « Street canyon geometry and microclimate » Proceeding of 15th Conference of Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Lisbon, pp.163-166.
- Péchoin, D., Demay, F. (1988)** « Petit Larousse en couleurs ». Ed. Inc., France.
- Péguy P.-Y, Goeffette-Nagot F., Schmitt B., (2000)** «L'étalement urbain. in Economie géographique Approches théoriques et empiriques », BAUMONT C., Combes P.- P., Derycke P.-H., Jayet H., (Eds). Paris. Economica. 38p.
- Pellecuer, B. (2007)** « Energies renouvelables et agriculture Perspectives et solutions pratiques », Éditions FranceAgricole, Paris, France, 196p.
- Penicaud, H. (1978)** « Microclimats Urbains Étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments », Plan Construction R.A.U.C. France.
- Perez-Grande I, Meseguer J, Alonso G. (2005)** « Influence of glass properties on the performance of double-glazed façades » Applied Thermal Energy:25, pp.3163-3175.
- Powell, J. (2005)** « Puits canadien ou provençal. Mémoire de Master. Ecole d'architecture de Lyon, France, 50p.
- R.A. (2012)** « Sonelgaz appelle ses clients à la modération » Algérie news, 5p.
- Reiter, S., (2007)** « Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes », Thèse de Doctorat, Université catholique de Louvain, 279p.
- Ringebach, N. (2003)** « Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine». Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.180p.
- Robinson, D., & Stone, A. (2004)** « Solar radiation modelling in the urban context», Solar energy no. 77, pp.295–309.
- Sacre C. (1983)** « Le confort dans les espaces extérieurs: analyse microclimatique », Nantes: CSTB, 138 p.

- Sadineni S-B., Madala S., Boehm R-F. (2011)** « Passive building energy savings: A review of building envelope components », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* N°31 pp. 3617– 3631.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011)** « Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions », *Solar Energy* 85, pp.3085–3102.
- Sharifi, A., Yamagata, Y. (2015)** « Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review » *Applied Energy* 160, pp.336–357.
- Schittich, C. (2015).** « Best of detail FassadenFacades ». Ed. Detail, Allemagne, 200p.
- Schittich, C. (2001)** « L’architecture de verre dans la deuxième moitié du 20ème siècle» Schittich, C ; et al. (sous la dir.) «Construire en verre ». PPUR, Suisse.
- Scudo, G et Elsa, F., (2001)** « Thermal comfort in urban spaces: streets and courtyards», *Proceeding of 18th Conference of Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, Brazil.
- Sheweka, S.M. Magdy Mohamed, N. (2012)** « Green façades as a new sustainable approach towards climate change », *Energy Procedia* N°18, pp.507–520.
- Stauskis, G. (2014)** « Bioclimatic principles in architectural design: A way to better building », Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 129p.
- Stec, WJ, AHC Van Paassen. (2005)** « Symbiosis of the double skin facade with the HVAC system », *Energy Build*37.
- Sun X, Zhang Q, Medina M.A, Lee K. (2016)** «Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid–liquid phase change materials (PCMs) », *Applied Energy* Volume 162, pp.1453-1461.
- Svensson, M., Eliasson, I. et Holmer, B. (2002)** « A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night », *Climate Research*22, pp.215–226.
- Tang, R., Etzion Y., Erell, E. (2003)** « Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings », *Renewable Energy* 28, pp.1513–1522.
- Tapadinhas, L. (2012)** «Modélisation urbaine : de la représentation au projet », Collection « Références» de la Direction de la recherche et de l’innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), France, 324p.
- Todhunter, P.-E, (1990)** «Microclimatic variations attributable to urban canopy asymmetry and orientation », *Physical geography* n°2, vol. 11. pp.131-141.
- Vardoulakis, E. et al.(2013)** «The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands », *Solar Energy* 94, pp.128–144.

- Vinet, J., (2000)** « Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France p.252.
- Vischer, J.-C. (1989)** « Environmental quality in offices », Editions Van Nostrand Reinhold, 192p.
- Wang, H. Wu, W. (2008)** « Optimizing insulation thickness of external walls for residential buildings », Journal of Chongqing University 8, pp.937–941.
- WEC. (2011).** «For sustainable energy », source: www.worldenergy.org. (Consulté le 30 Décembre, 2014),
- Widera, B. (2014)** « Bioclimatic architecture as an opportunity for developing countries »,., 30th International PLEA Conference, CEPT Université d'Ahmedabad, Inde. pp.1-9.
- Wigginton, M. (2002)** «Vitrage et lumière solaire " Architecture d'Aujourd'hui n°342, France.
- Wines, J., (2000)** « Green Architecture », Edition Taschen, London, Angleterre, 240p.
- Wilhelm A.F. et al. (2012)** «Wall insulation measures for residential villas in Dubai: a case study in energy efficiency », Energy and Buildings 44, pp. 26–32.
- Yang, X. et al. (2012)** « An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments », Energy and Buildings 54, pp.243–251.
- Ye H, et al. (2014)** « The performance evaluation of shape-stabilized phase change materials in building applications using energy saving index », Applied Energy 113, pp.1118–1126.
- Zhong K. (2015)** « Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material », Energy and Building.

ANNEXES

Annexe-A : Climat de la ville d'Alger.

Annexe-B : Démarches des simulations d'ENVI-met.

Annexe-C : Résultats des simulations du récepteur S1.

Annexe - A

Climat de la ville d'Alger

Climat de la ville d'Alger

1. Zonage climatique en Algérie

Située dans une zone de transition, entre les régimes tempérés et subtropicaux, l'Algérie présente une grande variabilité climatique dont le premier zonage a été établi par Borel au CSTB en 1962 (Sami et al., 2000). Ceci permettait d'envisager le dimensionnement de systèmes de climatisation et de chauffage de bâtiments pour obtenir des conditions d'ambiance confortable. Plus tard en 1993, le CNERIB fait une autre classification plus précise en prenant compte les données météorologiques sur une période de dix ans de 1974-1984 (Ould-Henia, 2003). Globalement le territoire géo-climatique se divise en trois catégories à savoir :

Le Tell : plaines et plateaux, région humide, au climat chaud mais tempère, c'est une contrée méditerranéenne, avec forêts, cultures en terrasses, vergers d'arbres fruitiers, flore.

Les hauts-Plateaux : socle élevé, humidité rare, climat déjà excessif de type continental, plus de céréales, plus d'arbres fruitiers ni de vignes; aucune foret. C'est par excellence une région de pâturages. Une seule culture y réussit, celle de l'alfa.

Le Sahara: immenses étendues de pierres ou de sables sans humidité, au climat extrême aride et sec: le sol est aride desséché autour des sources, les oasis plaquent leur verdure dans le fond désolé du Sahara.

2. Le climat d'Alger

Le climat de la ville d'Alger est de type méditerranéen, c'est-à-dire, climat tempéré qui se caractérise par des étés chauds et des hivers doux et humides, le plus souvent pluvieux. La position intermédiaire des régions à climat méditerranéen entre les dépressions tempérées et les anticyclones subtropicaux explique que la saison froide soit humide et soumise à un temps variable et que la saison chaude soit sèche et soumise à un temps peu variable (pour le cas d'Alger c'est la présence de la chaîne montagneuse de l'Atlas blidéen sur son flanc sud et de la mer méditerranée au nord qui caractérise son climat). Plus on va vers les pôles, plus la sécheresse estivale est courte et moins marquée ; plus on s'approche de l'équateur, plus la sécheresse estivale dure.

L'interprétation des données climatiques, température, humidité relative, pluie, vent et rayonnement solaire nous donne une vision plus approfondie sur le climat d'Alger.

A)-Températures de l'air

La figure-I donne l'évolution des températures moyennes annuelles pour une période de 42 ans allant de 1973 à 2015. A partir du graphe, on peut distinguer deux phases. La première s'étale de 1973 à 1983 où toutes les températures sont comprises entre 16.0°C et 17.0°C et la seconde est comprise entre 1984 et 2015 où les températures sont comprises entre 17.5°C et 19.0°C mais avec un léger retour vers des valeurs inférieures à 17.5°C entre 1992 et 1994.

Dans l'ensemble, à partir de 1981 les températures moyennes n'ont fait qu'augmenter d'année en année, jusqu'à atteindre des valeurs maximales de 18.8°C, 18.6°C et 18.7 en 1989, 2003 et 2014 respectivement. Ceci démontre clairement une tendance au réchauffement climatique.

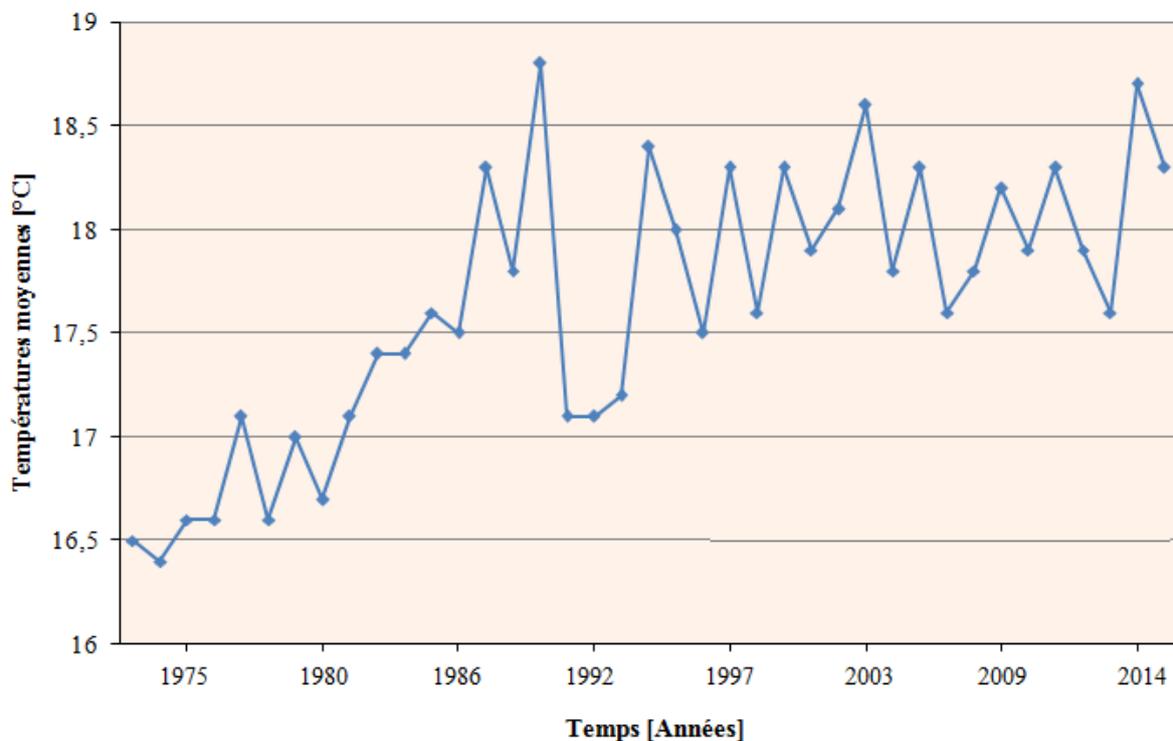


Figure I : Evolution des températures moyennes annuelles pour la période de 1973-2015.

(Source : en.tutiempo.net)

B)-Humidité relative

Le climat d'Alger est plutôt humide en raison de la proximité de la mer Méditerranée. L'humidité relative moyenne en hiver varie entre 70 et 87% tandis qu'elle ne descend pas au-dessus de 63% en été. L'important taux de l'humidité relative en été peut accentuer la sensation d'inconfort pour les habitants. (Figure-II).



Figure II : Humidités moyennes mensuelles (Source : ONM).

C)- Régime des vents

Le régime des vents est très variable d'un mois à un autre mais présente des vitesses moyennes de l'ordre de 2.5 à 2.8 m/s. C'est un régime de vents moyens et d'une direction dominante nord-est. (Figure -III). L'air saharien arrive parfois à traverser les montagnes de l'Atlas tellien pour s'étendre vers le littoral. Subissant l'effet de foehn, qui est un phénomène climatique exceptionnel, se produisant dans les grands massifs, tels que les montagnes Rocheuses, cet air s'assèche et se réchauffe sous le vent engendrant les canicules les plus sévères. Des canicules que la proximité de la mer dissipe difficilement par le phénomène de la brise.

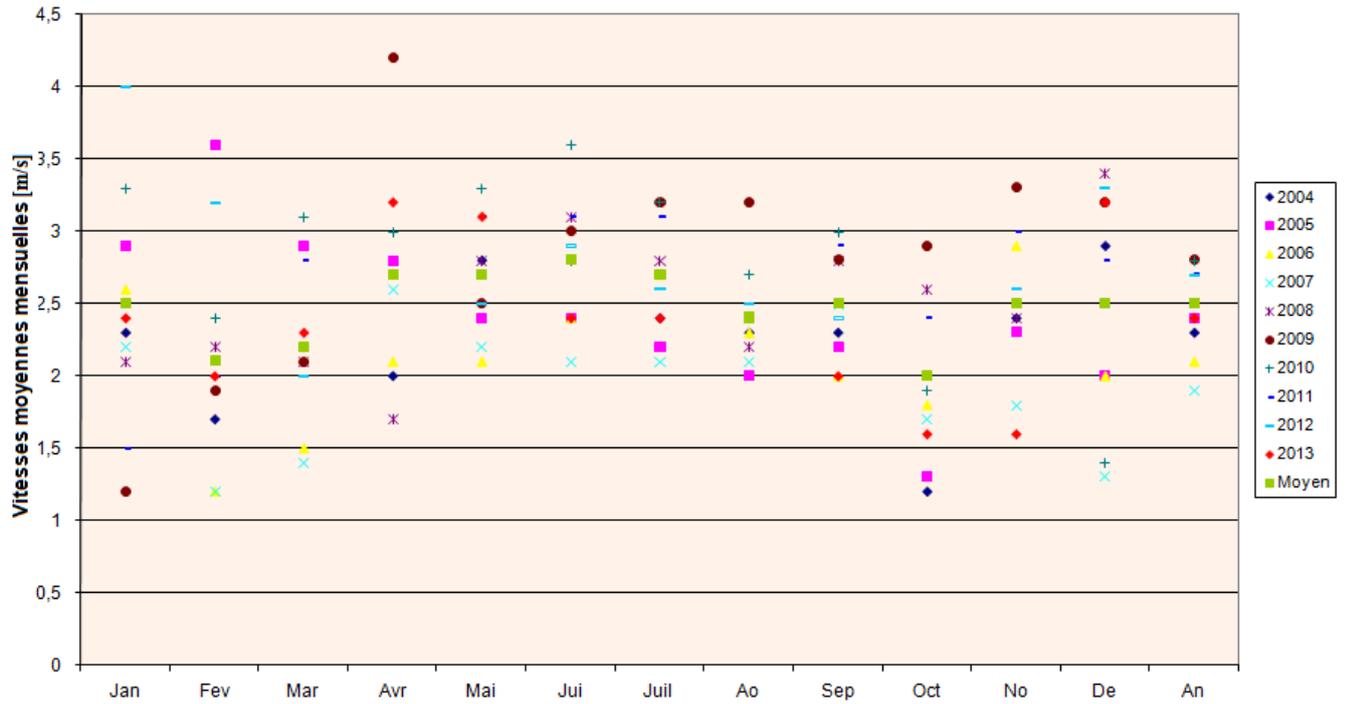


Figure III: Vitesses moyennes mensuelles du vent (Source : ONM).

D)-La radiation solaire

La radiation solaire présente la plus importante caractéristique avec plus de 250 jours de soleil par an, et l'intensité du rayonnement solaire direct varie entre 5000 et 6000 Wh/m² durant l'été, sur une surface horizontale isolée et sans contribution d'aucun masque solaire, avec des heures d'ensoleillement arrivant jusqu'à 16 heures par jour (Capderou, 1985).

Annexe - B

Démarches des simulations d'ENVI-met

Démarches des simulations d'ENVI-met

Parmi les calculs pris en considération par ENVI-met dans les simulations, nous trouvons les formules citées par Huttner (2012) :

1. Le calcul du bilan énergétique des façades

Les paramètres pris en compte dans le calcul du bilan énergétique des façades sont ses propriétés thermiques (albédo, émissivité et résistance thermique) en plus du transfert de chaleur sensible entre l'atmosphère et la façade et la conduction de chaleur à travers le matériau de la paroi (équation-1).

$$Q_{sw,net}^{abs} + Q_{lw,net}^{abs} - \varepsilon_f \sigma T_w^4 - c_p \rho_w K_h^w \frac{T_w - T_{w+1}}{Dx} - \frac{\lambda_w}{d(T_w - T_{w,i})} = 0 \quad (1)$$

- $Q_{sw,net}^{abs}$ et $Q_{lw,net}^{abs}$: Etant le rayonnement d'ondes courtes et ondes longues absorbé en [Wm^{-2}].
- ε_f : L'émissivité de la façade en [%].
- σ : La constante de Stefan-Boltzman.
- T_w : La température de façade en [K].
- c_p : La capacité calorifique spécifique de l'air à pression constante ($1200 [J(kgK)^{-1}]$).
- ρ_w : La densité en [kgm^{-3}].
- K_h^w : Le coefficient d'échange de chaleur à la surface de la paroi en [m^2s^{-1}].
- T_{w+1} : La température de l'air à la cellule de la grille à côté de la façade en [K].
- Dx : La distance [m] entre la façade et le centre de la cellule suivante de la grille.
- λ_w : Le coefficient de transmission de chaleur de la façade [$W(m^2K)^{-1}$].
- $T_{w,i}$: La température de la surface intérieure de la paroi en [K].

Le rayonnement d'ondes longues absorbé par les façades est calculé par l'équation-2 suivante :

$$Q_{lw,net}^{abs} = \varepsilon_f ((1 - svf) (\frac{1}{3} Q_{lw,ground} + \frac{2}{3} Q_{lw,buildings}) + svf (\frac{1}{2} Q_{lw,sky} + \frac{1}{2} Q_{lw,ground})) \quad (2)$$

- svf : Coefficient d'ouverture au ciel.
- $Q_{lw,ground}$: Le rayonnement à ondes longues émis par le sol.
- $Q_{lw,buildings}$: Le rayonnement à ondes longues émis par les autres bâtiments.
- $Q_{lw,sky}$: Le rayonnement à ondes longues provenant du ciel.

2. Le calcul du bilan énergétique de la surface du sol

Pour le calcul de la température T_0 à la surface du sol le bilan énergétique au niveau du sol est donné par l'équation-3 qui suit:

$$Q_{sw,net} + R_{lw,net}(T_0) - G(T_0) - H(T_0) - LE(T_0, q_0) = 0 \quad (3)$$

- $Q_{sw,net}$: Est le rayonnement net à ondes courtes de la surface.
- $R_{lw,net}$: Est le rayonnement net à ondes longues de la surface.
- G : Est le flux de chaleur du sol.
- H : Flux de chaleur sensible turbulent.
- LE : Flux de chaleur latente turbulent.

3. Fichiers entrées et sorties d'ENVI-met

Le programme de modélisation comporte trois interfaces utilisateur (Figure-I). La première est d'éditer l'entrée des cartes numériques préparées, et la mise en page du domaine de travail. Par conséquent, on doit générer des données de base à partir d'autres systèmes d'information géographique. Cette étape peut être assez complexe en fonction de l'environnement choisi pour le travail. Le programme se compose de modules de zones de travail, tels que 130x130 au maximum, donc en théorie on peut aller à une étude d'approximativement 1300 m x 1300 m (Ozkeresteci et al., 2004). La seconde interface est l'éditeur de configuration, où les bases de données pour le type de sol, l'humidité, la température, etc. sont entrées. La troisième est la zone de modélisation, où les paramètres supplémentaires sont présents, et le processus de modélisation se déroule. Les données de sortie peuvent être interprétées et visualisées dans le logiciel LEONARDO.

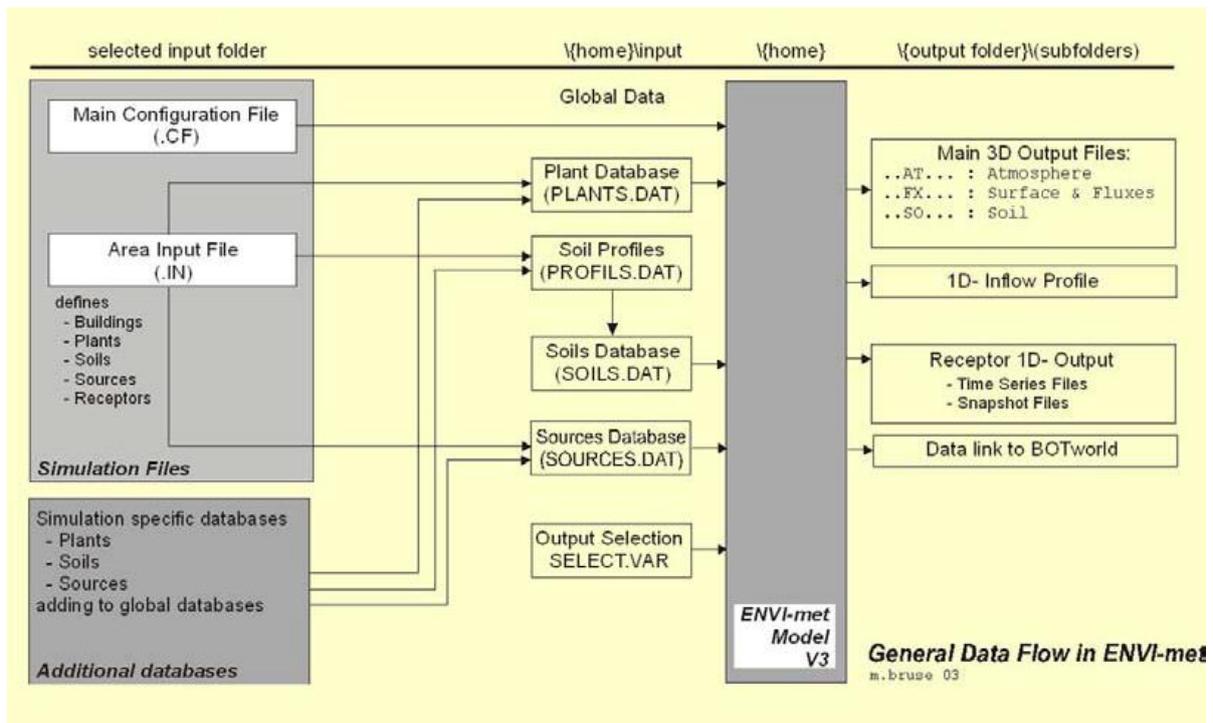


Figure I : Structure de données de base du logiciel.

(Source : Ozkeresteci et al., p.2)

3.1. Les entrées (inputs)

Les principaux paramètres d'entrée d'une simulation ENVI-met comprennent les conditions météorologiques initiales qui incluent la vitesse du vent à une hauteur de 10 m, direction du vent, rugosité du site, température de l'air à une hauteur de 2 m, humidité spécifique de l'air à une hauteur de 2500 m, et humidité relative de l'air à 2 m de haut, ainsi que les structures et les propriétés physiques des surfaces urbaines et des plantes, Bruse et Fleer (1998) et Huttner (2012).

A) - Fichier éditeur (*.in)

Le fichier éditeur nous sert à avoir une reconstitution graphique et technique de la structure urbaine du site d'étude, tel qu'il est dans la réalité, les données du modèle sont enregistrées et placées en trois dimensions dans des grilles horizontales et verticales. Ces éléments sont représentés par diverses cellules de grille dont la taille varie entre 0,5 mètres et 10 mètres. Préparer le fichier éditeur (*.in) est rendu possible grâce à l'introduction des informations suivantes :

- **Editeur construction/végétation**

La projection de la zone d'étude se fait en définissant les différentes dimensions des bâtiments, et en sélectionnant les types de murs existants et leurs propriétés thermoradiatives (verre, type de verre, béton...). Les différentes caractéristiques attribuées aux plantes sont représentées dans la base de données relative à la végétation PLANTS.DAT.

- **Editeur Sol**

Le type de sol est sélectionné en fonction du terrain étudié. Les différentes propriétés du sol que ce soit de l'asphalte, du marbre, du béton...sont représentées dans un fichier d'entrée PROFILES.DAT.

- **Editeur Sources**

Différentes sources de gaz et de particules peuvent être posés sur le modèle telles que : CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, H₂O₂ et PM.

- **Editeur Récepteurs**

Les fichiers des données météorologiques sont contenus dans les fichiers des récepteurs. Les récepteurs sont des points placés à l'intérieur de la zone simulée utilisée pour donner différents paramètres (état de l'atmosphère et de la surface) de $Z = 0$ à Z max, le nombre de récepteurs peut arriver à 100 (www.ENVI-met.com).

B) - Fichiers de configuration C.F (*.cf)

Ce fichier mentionne les importantes spécificités du site étudié telles que : nom de la simulation et des fichiers entrées/sorties, adresse des fichiers sorties, date et durée de la simulation, paramètres du climat (Figure-II).

```

%---- ENVI-met v4 main configuration file -----
%---- generated with Projectwizard -----
Fileversion                               =4.0
JobID                                      =Simulation
% Main data .....
Name for simulation (Text):                =Simulation CanAlGNS1
Area Input File to be used                =CanAlGEO1.INX
Filebase name for output (Text):          =Simulation1
Output Directory:                          =
Start simulation at Day (DD.MM.YYYY):      =07.08.2013
Start simulation at Time (HH:MM:SS):       =00:00:00
Total simulation Time in Hours:            =24
Wind speed in 10 m ab. Ground [m/s]       =3.83
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =290
Roughness Length z0 at Reference Point [m] =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]        =297.85
Specific Humidity in 2500 m [g water/kg air] =8.59
Relative Humidity in 2m [%]               =93
% End main data .....
[OUTPUTTIMING]
Output interval main files (min)           =60.00
Output interval log files (min)            =60.00
Include Nesting Grids in output (0:n,1:y) =0
    
```

Figure II: Fichier de configuration de notre cas d'étude.

(Source : Auteur)

3.2. Les sorties (outputs)

ENVI-met nous permet d'avoir les résultats des simulations enregistrées dans plusieurs répertoires, les plus importants sont :

- **Fichier de sorties en 3D**

Il contient les fichiers : atmosphère, surface et sol. Les résultats stockés sous format binaire (EDI/ edt)¹ doivent être lus en utilisant le Extract Tool2 fourni en accompagnement d'ENVI-met ou par le logiciel LEONARDO 4.0. Ce dernier est l'outil interactif de visualisation et d'analyse des données. Il nous permet d'obtenir selon le but de la recherche de nombreuses visualisations expliquant des aboutissements d'une simulation (Figures III , IV et V).

¹ **Le dossier d'EDI** : est le dossier de l'information de l'EDT-Dossier correspondant qui contient les données. Les deux dossiers sont nécessaires pour extraire des données avec succès.

² Programme servant à extraire des informations en chiffres à partir des fichiers de données binaires (EDI/edt) d'ENVI-met vers fichiers ASCII.

- **Fichier des récepteurs**

Les récepteurs posés à l'intérieur du modèle donnent des fichiers textes faciles à visualiser en utilisant le logiciel Excel (Annexe-A).

- **1D fichiers modèles**

Ce sont des fichiers sous format ASCII3 généralement employés pour contrôler et solutionner les problèmes pouvant être créés durant l'exercice de la simulation. Ces fichiers comportent les données du profil vertical du modèle uni dimensionnel d'ENVI-met.

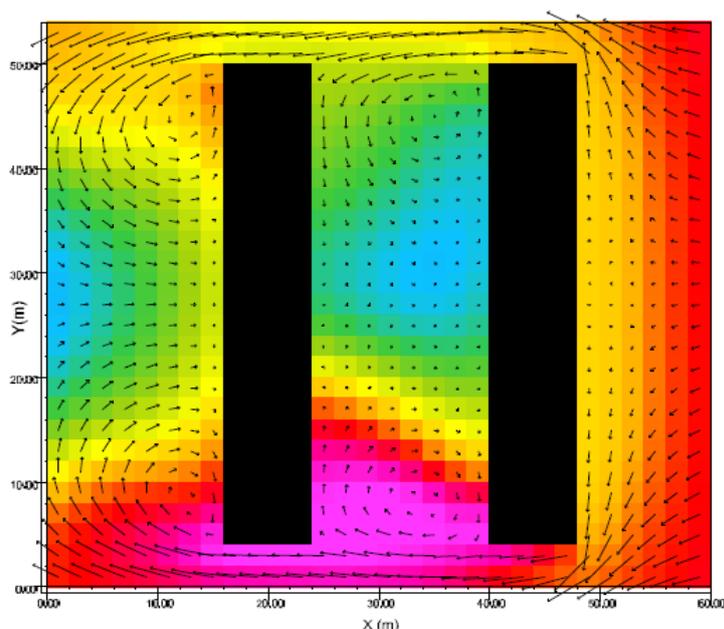


Figure III: Champs de vitesse du vent.

(Source : Bruse, 1999, p.3).

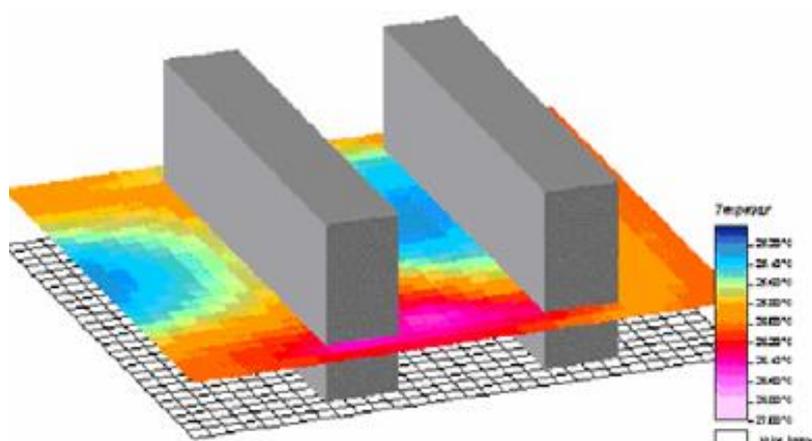


Figure IV: Zones d'information sur un plan horizontal combinées avec une vue

3D de l'objet d'étude (Source : www.ENVI-met.com).

³ **ASCII** : American Standard Code for Information Interchange , Norme de codage de caractères en informatique. Cette Norme d'échange des fichiers informatiques de type texte simple qui peut être lu par presque tous les programmes.

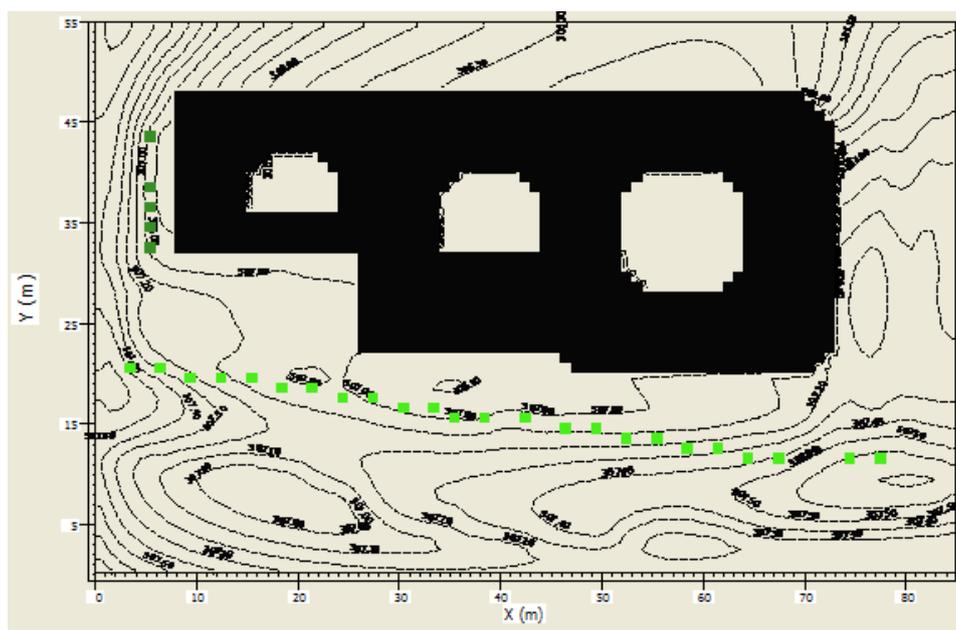


Figure V : Emploi de l'option des "Isolines" pour visualiser la structure d'une zone d'information (Source : Auteur).

Annexe - C

Résultats des simulations du récepteur S1

Exemple de calcul du récepteur S1 à 16h00

Date	Time	Modtime (min)	z(m)	u	v	w	wSpeed	wDir
07.08.2013	16:00:01	960	0.20	1.87	0.07	-0.00	1.87	267.90
07.08.2013	16:00:01	960	0.60	1.89	0.07	-0.00	1.89	267.91
07.08.2013	16:00:01	960	1.00	1.91	0.07	-0.01	1.91	267.94
07.08.2013	16:00:01	960	1.40	1.94	0.07	-0.01	1.94	267.98
07.08.2013	16:00:01	960	1.80	1.97	0.07	-0.02	1.97	268.03
07.08.2013	16:00:01	960	3.00	2.06	0.06	-0.03	2.06	268.23
07.08.2013	16:00:01	960	5.00	2.25	0.05	-0.06	2.25	268.60
07.08.2013	16:00:01	960	7.00	2.45	0.05	-0.10	2.45	268.80
07.08.2013	16:00:01	960	9.00	2.65	0.05	-0.13	2.65	268.90
07.08.2013	16:00:01	960	11.00	2.86	0.05	-0.15	2.86	269.00
07.08.2013	16:00:01	960	13.00	3.09	0.04	-0.17	3.10	269.27
07.08.2013	16:00:01	960	15.00	3.37	-0.01	-0.24	3.38	270.10
07.08.2013	16:00:01	960	17.00	3.70	-0.16	-0.51	3.74	272.48
07.08.2013	16:00:01	960	19.00	4.05	-1.51	-0.54	4.35	290.43
07.08.2013	16:00:01	960	21.00	4.41	-1.66	-0.32	4.73	290.62
07.08.2013	16:00:01	960	23.00	4.84	-1.74	-0.25	5.15	289.73
07.08.2013	16:00:01	960	25.00	5.20	-1.79	-0.20	5.50	289.02
07.08.2013	16:00:01	960	27.00	5.39	-1.84	-0.16	5.70	288.80
07.08.2013	16:00:01	960	29.00	5.47	-1.87	-0.14	5.78	288.91
07.08.2013	16:00:01	960	31.00	5.49	-1.90	-0.12	5.81	289.13
07.08.2013	16:00:01	960	33.00	5.48	-1.93	-0.11	5.81	289.36
07.08.2013	16:00:01	960	35.00	5.46	-1.94	-0.10	5.79	289.57
07.08.2013	16:00:01	960	37.00	5.43	-1.95	-0.10	5.77	289.74
07.08.2013	16:00:01	960	39.00	5.40	-1.95	-0.11	5.74	289.88
07.08.2013	16:00:01	960	41.00	5.36	-1.95	-0.11	5.70	289.99
07.08.2013	16:00:01	960	43.00	5.31	-1.94	-0.11	5.65	290.07
07.08.2013	16:00:01	960	45.00	5.25	-1.92	-0.12	5.59	290.13
07.08.2013	16:00:01	960	47.00	5.17	-1.90	-0.12	5.51	290.17
07.08.2013	16:00:01	960	49.00	5.08	-1.87	-0.12	5.41	290.18
07.08.2013	16:00:01	960	51.00	4.97	-1.83	-0.12	5.29	290.18
07.08.2013	16:00:01	960	53.00	4.84	-1.78	-0.12	5.16	290.16
07.08.2013	16:00:01	960	55.00	4.70	-1.72	-0.11	5.00	290.12
07.08.2013	16:00:01	960	57.00	4.54	-1.66	-0.08	4.83	290.05
07.08.2013	16:00:01	960	59.00	4.37	-1.59	-0.02	4.65	290.00

T	dT/dt	q	q.rel	Km.vert	Km.vert.rel	Km.hor	E	Eps
33.35	0.61	13.96	45.07	1.38103	77.84	1.38103	6.8558	3.74371
33.28	0.62	13.96	45.26	1.32750	24.94	1.32750	5.7295	2.72010
33.19	0.63	13.96	45.46	1.29381	14.58	1.29381	4.8774	2.02250
33.11	0.65	13.95	45.67	1.27933	10.30	1.27933	4.2446	1.54912
33.02	0.66	13.95	45.89	1.28066	8.02	1.28066	3.7876	1.23224
32.75	0.69	13.93	46.53	1.42912	5.37	1.42912	2.8512	0.62572
32.38	0.71	13.89	47.38	1.87413	4.23	1.87413	2.7506	0.44407
32.07	0.72	13.84	48.03	2.23433	3.60	2.23433	2.9934	0.44114
31.82	0.71	13.79	48.56	2.45528	3.08	2.45528	3.3093	0.49065
31.58	0.70	13.74	49.03	2.58182	2.65	2.58182	3.6401	0.56452
31.36	0.68	13.69	49.44	2.64482	2.29	2.64482	3.9765	0.65765
31.15	0.66	13.63	49.83	2.65773	2.00	2.65773	4.3078	0.76806
30.95	0.63	13.57	50.19	2.61154	1.73	2.61154	4.5362	0.86673
30.77	0.60	13.51	50.48	2.38720	1.42	2.38720	4.0023	0.73811
30.62	0.58	13.47	50.81	2.13320	1.15	2.13320	2.8586	0.42139
30.43	0.57	13.43	51.19	2.01271	0.99	2.01271	2.1215	0.24597
30.22	0.55	13.39	51.62	2.13344	0.96	2.13344	1.6946	0.14807
30.02	0.53	13.34	52.04	2.61637	1.09	2.61637	1.4897	0.09330
29.84	0.52	13.29	52.40	3.48472	1.35	3.48472	1.4165	0.06334
29.69	0.50	13.25	52.71	4.65462	1.69	4.65462	1.4019	0.04645
29.56	0.49	13.22	52.97	6.00801	2.05	6.00801	1.4093	0.03637
29.45	0.48	13.19	53.19	7.43827	2.40	7.43827	1.4245	0.03001
29.35	0.47	13.16	53.39	8.86409	2.70	8.86409	1.4420	0.02580
29.26	0.46	13.14	53.58	10.23040	2.96	10.23040	1.4600	0.02292
29.17	0.45	13.12	53.75	11.50398	3.16	11.50398	1.4775	0.02087
29.09	0.44	13.10	53.91	12.66751	3.32	12.66751	1.4938	0.01938
29.02	0.43	13.08	54.06	13.71434	3.44	13.71434	1.5082	0.01824
28.94	0.43	13.06	54.21	14.64462	3.51	14.64462	1.5192	0.01734
28.88	0.42	13.04	54.35	15.46319	3.56	15.46319	1.5248	0.01654
28.81	0.41	13.02	54.49	16.17919	3.58	16.17919	1.5218	0.01574
28.74	0.40	13.00	54.62	16.80794	3.57	16.80794	1.5059	0.01484
28.68	0.40	12.99	54.75	17.37745	3.56	17.37745	1.4721	0.01372
28.62	0.39	12.97	54.87	17.94504	3.55	17.94504	1.4151	0.01227
28.56	0.39	12.95	54.99	18.65576	3.56	18.65576	1.3221	0.01031

Tmrt	CO2	SW.dir	SW.dif	Press.p	E.mech	Rlw.warming	SVF.bldg
66.08	631.329	915.89	34.86	-25688.83	13.29	52.6815	0.339
65.36	631.329	915.89	34.86	-25688.83	0.25	15.9487	0.339
64.40	631.329	915.89	34.86	-25688.83	0.25	10.0767	0.339
63.59	631.329	915.89	34.86	-25688.83	0.25	7.2111	0.339
63.00	631.329	915.89	36.25	-25688.83	0.28	5.6426	0.353
61.87	631.329	915.89	36.34	-25688.83	0.31	3.5969	0.354
61.53	631.329	915.89	39.12	-25688.83	0.49	2.1756	0.381
60.95	631.329	915.89	41.89	-25688.82	0.68	1.5835	0.408
60.68	631.329	915.89	44.60	-25688.81	0.86	1.2541	0.434
60.48	631.329	915.89	47.05	-25688.84	1.05	1.0433	0.458
60.52	631.329	915.89	53.30	-25688.96	1.25	0.8966	0.519
60.37	631.329	915.89	57.41	-25689.25	1.50	0.7884	0.559
61.23	631.329	915.89	82.67	-25689.70	2.30	0.5458	0.805
62.03	631.329	915.89	102.73	-25687.75	0.57	0.7709	1.000
62.43	631.329	915.89	102.73	-25687.29	0.11	0.7056	1.000
63.00	631.329	915.89	102.73	-25687.06	0.08	0.6527	1.000
63.30	631.329	915.89	102.73	-25686.87	0.04	0.6090	1.000
63.72	631.329	915.89	102.73	-25686.69	0.01	0.5716	1.000
64.03	631.329	915.89	102.73	-25686.52	0.00	0.5385	1.000
64.36	631.329	915.89	102.73	-25686.36	0.00	0.5088	1.000
64.46	631.329	915.89	102.73	-25686.21	0.00	0.4820	1.000
64.89	631.329	915.89	102.73	-25686.08	0.01	0.4578	1.000
65.36	631.329	915.89	102.73	-25685.96	0.01	0.4359	1.000
65.79	631.329	915.89	102.73	-25685.85	0.01	0.4161	1.000
65.74	631.329	915.89	102.73	-25685.75	0.01	0.3980	1.000
65.81	631.329	915.89	102.73	-25685.66	0.02	0.3815	1.000
66.13	631.329	915.89	102.73	-25685.59	0.02	0.3664	1.000
66.54	631.329	915.89	102.73	-25685.52	0.03	0.3524	1.000
66.77	631.329	915.89	102.73	-25685.47	0.05	0.3396	1.000
66.89	631.329	915.89	102.73	-25685.43	0.07	0.3276	1.000
66.95	631.329	915.89	102.73	-25685.38	0.09	0.3166	1.000
66.95	631.329	915.89	102.73	-25685.28	0.12	0.3063	1.000
67.23	631.329	915.89	102.73	-25684.94	0.17	0.2972	1.000
67.39	631.329	915.89	102.73	-25684.94	0.00	0.3174	1.000

Légende des résultats

Symbole	Désignation	Unité
Date	Date de la simulation	-
Time	Heure de la simulation	-
Modtime (min)	Durée de la simulation	min
z(m)	Hauteur du modèle	m
u	Vitesse du vent pour la composante u	m/s
v	Vitesse du vent pour la composante	m/s
w	Vitesse du vent pour la composante	m/s
wSpeed	Vitesse totale du vent	m/s
wDir	Direction du vent (0 pour le Nord)	°
T	Température de l'air	°C
dT/dt	Changement de la température de l'air dans le temps	K/h
q	Humidité spécifique de l'air	g/kg
q.rel	Humidité relative de l'air	%
Km.vert	Coefficient d'échange d'impulsion vertical	m ² /s
Km.vert.rel	Km. vert normé avec la loi logarithmique	-
Km.hor	Coefficient d'échange d'impulsion horizontal	m ² /s
E	Turbulence de l'énergie cinétique	m ² /s ²
Eps	Dissipation de TKE	m ³ /s ²
Tmrt	Température radiante moyenne	clo
CO₂	Concentration du CO ₂	mg/m ³
SW.dir	Rayonnement solaire direct	W/m ²
SW.dif	Rayonnement solaire diffus	W/m ²
Press.p	Pression	Pa
E.mech	Production mécanique du TKE	-
Rlw.warming	Changement de la température de l'air due à la divergence du flux des longues ondes	K/h
SVF.bldg	Coefficient d'ouverture au ciel des bâtiments	-