

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



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المعمارية  
المرجع: .....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de  
**Doctorat en Architecture**

**Spécialité : Architecture, environnement et patrimoine**

**Étude et optimisation de la façade pour un  
confort thermique et une efficacité énergétique  
(Cas des bâtiments tertiaires dans un climat  
chaud et aride)**

Présentée par :  
**KHADRAOUI Mohamed Amine**

Soutenue publiquement le : 07 Février 2019

**Devant le jury composé de :**

Dr. ALKAMA Djamel

Dr. SRITI Leila

Dr. MOUMMI Abdelhafid

Dr. HAMOUDA Abida

Professeur

Maitre de Conférences 'A'

Professeur

Maitre de Conférences 'A'

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

Université de Guelma

Université de Biskra

Université de Biskra

Université de Batna

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, les premiers qui m'ont encouragé et soutenu durant ce long chemin.*

*Aux chercheurs du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB-Grenoble pour leurs aides constructives et les réponses précieuses à mes questions qui m'ont beaucoup servies.*

*A l'ensemble du personnel de la société " Energyx-Alger" spécialement le directeur M. OUCHERIF Aboubakr.*

*Aux personnels des cas d'étude pour leurs accueils et leurs contributions.*

## **Remerciements**

*« La louange est à DIEU, seigneur et maitre des univers »*

*Je m'adresse à DIEU, le tout puissant pour le remercier de m'avoir donné le courage, le soutien, la patience pour mener à terme ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma directrice de thèse Dr. SRITI Leila pour son aide, ses conseils, ses encouragements et sa confiance.*

*Mes remerciements sincères vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : Pr. ALKAMA Djamel, Pr. MOUMMI Abdelhafid et Dr. HAMOUDA Abida.*

*Ma gratitude la plus vive à tous mes enseignants : Pr. ZEMMOURI Nouredine, Pr. MAZOUZ Said, Pr. BELAKEHAL Azeddine, Dr. MERAD Yacine, M. BENFARHAT Mohamed Adoui, M. DJOUAMAA Ahmed, Dr. HOUDA Malik, Mme BELARBI Samia, M. HAMI Abderrahmane et enfin à M. BOULENOUAR Kamel que DIEU lui accorde sa sainte miséricorde et l'accueille en son vaste paradis.*

*J'exprime aussi ma reconnaissance au Dr. QUENARD Daniel de m'avoir accueilli au sein du laboratoire du CSTB-Grenoble, M. COSNIER Matthieu et le Pr. YOUNSI Zohir de l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur-Université de Lille pour leurs conseils très concluants.*

*Je tiens à remercier M. ABBACI Tarek et Sami et M. TIBERMACHINE Islam.*

*Je remercie profondément mon père, ma mère, mes sœurs, mon épouse et toute ma famille pour leur soutien indéfectible.*

*Mes amis et tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer cette recherche.*

## Résumé

La maîtrise de l'ambiance thermique des bâtiments à travers la façade tout en minimisant la consommation énergétique est considérée comme un défi pour les concepteurs. De nos jours, ce défi est d'autant plus difficile à relever particulièrement avec les conditions climatiques et économiques actuelles qui ont fait de la performance énergétique une exigence mondiale dans tous les domaines en particulier dans celui du bâtiment.

A l'instar d'autres pays, le secteur tertiaire en Algérie est considéré comme un secteur énergivore par excellence, puisqu'il détient à lui seul un taux non négligeable de la consommation énergétique. A ce titre, les immeubles de bureaux qui constituent l'essentiel du cadre bâti tertiaire, sont marqués non seulement par leur manque de confort thermique mais aussi par leur caractère énergivore à outrance dont une grande partie de l'énergie est utilisée principalement pour répondre aux besoins du confort thermique (chauffage et climatisation). Cette situation est le résultat d'une pratique architecturale indifférente au contexte où très souvent les aspects thermiques, énergétiques et les spécificités climatiques sont négligés lors de la conception. Il en résulte des impacts négatifs sur l'ambiance thermique, l'homme et l'environnement.

Pour pallier à cette situation, la présente recherche s'est fixée comme objectif d'évaluer puis d'optimiser le comportement thermique des façades des immeubles de bureaux situés dans les zones chaudes et arides en prenant comme cas d'étude la ville de Biskra. Le travail d'investigation s'est focalisé précisément sur les éléments de la façade (matériaux, ouvertures, surfaces et dispositifs) afin de maîtriser et d'améliorer leurs performances thermiques et énergétiques dans un contexte climatique chaud et aride.

Pour ce faire, la méthodologie utilisée a été fondée sur une approche empirique (prise de mesures in situ combinée à une enquête par questionnaires) afin d'étudier le fonctionnement thermique d'un corpus de bâtiments existants. Un travail expérimental a été entrepris à travers la réalisation de quatre cellules tests à une échelle réduite a permis d'étudier les différents types de façade sous des conditions réelles. Enfin, une étude paramétrique par le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS a été réalisée afin d'étudier et d'optimiser

l'influence de certains paramètres. Les impacts de différents éléments de la façade sur le plan thermique et énergétique ont été étudiés, notamment : les matériaux, les dispositifs, la composition des parois, les caractéristiques des ouvertures ainsi que les propriétés surfaciques de la façade.

L'étude sur terrain a été effectuée sur un corpus de neuf bâtiments représentant les typologies de façades les plus récurrentes et représentatives dans la ville de Biskra (simple, vitrée, double peau, ventilée,...). Ces bâtiments ont permis d'étudier l'influence des choix conceptuels et matériels des éléments de la façade sur le comportement thermique des constructions et la sensation des usagers. Pour sa part, l'étude expérimentale a porté sur l'exploitation d'une cellule de référence en testant trois paramètres dans les autres cellules (la performance de la surface extérieure, la double peau et la façade ventilée). Enfin, la simulation numérique a donné la possibilité d'élaborer une série de modèles pour étudier l'impact des propriétés des fenêtres (ratio, type de vitrage et facteur d'ombrage) ainsi que les propriétés surfaciques (couleur et texture) de la façade. A l'issue de ce travail, les paramètres matériels les plus influant des éléments de la façade ont pu être optimisés.

Finalement, les résultats obtenus ont confirmé que la façade représente la surface d'interaction et d'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur dont la performance relève de plusieurs facteurs conceptuels, matériels et techniques. Des choix conceptuels appropriés relativement aux éléments de la façade qui prendraient en considération les spécificités climatiques du contexte permettent d'améliorer les ambiances thermiques des bâtiments tout en réduisant les besoins énergétiques.

## **Mots clés**

Façade, optimisation, confort thermique, efficacité énergétique, matériaux, bâtiments tertiaires, climat chaud et aride.

## ملخص

إن التحكم في الأجواء الحرارية للمباني عن طريق الواجهة مع خفض استهلاك الطاقة يعتبر تحدي للمصممين. في أيامنا هذه، من الصعب مواجهة هذا التحدي خاصة في ظل الظروف المناخية والاقتصادية الحالية التي جعلت من الفعالية الطاقوية مطلباً عالمياً في جميع الميادين خاصة قطاع البناء.

كغيره من البلدان الأخرى، يعتبر قطاع الخدمات في الجزائر قطاعاً مستهلكاً للطاقة بامتياز، كونه لوحده يمثل نسبة كبيرة من استهلاك الطاقة. في هذا السياق، إن مباني المكاتب التي تمثل الجزء المهم لقطاع الخدمات، لا تتميز فقط بغياب الراحة الحرارية ولكن أيضاً بطابعها المفرط في استهلاك الطاقة أين جزء كبير منها يستخدم أساساً من أجل الاستجابة لمتطلبات الراحة الحرارية (التدفئة والتبريد). هاته الوضعية هي نتيجة ممارسة معمارية غير متلائمة مع المحيط، حيث في أغلب الأحيان يتم إهمال الأبعاد الحرارية والطاقوية والخصائص المناخية أثناء عملية التصميم مما يؤثر سلباً على الأجواء الحرارية والانسان والبيئة.

للتخفيف من هذا الوضع، الهدف الذي حدد لهذا البحث هو تقييم وتحسين السلوك الحراري لواجهات مباني المكاتب الواقعة في المناطق الحارة والجافة مع أخذ مدينة بسكرة كحالة دراسة. بحيث ركز العمل بالضبط على عناصر الواجهة (المواد، الفتحات، المساحات والعناصر) من أجل التحكم في السلوك الحراري وتحسين الفعالية الحرارية والطاقوية في المحيط المناخي الحار والجاف.

لقيام بذلك، استندت المنهجية المستخدمة على الطريقة التجريبية (قياسات ميدانية مقترنة باستقصاء عن طريق استبيانات) من أجل دراسة السلوك الحراري لمجموعة من المباني الموجودة. تم إجراء عمل تجريبي وذلك عن طريق إنجاز أربعة نماذج اختبار ذات مقياس مصغر مما سمح بدراسة مختلف أنواع الواجهات في ظروف واقعية. وأخيراً، تم القيام بدراسة حاسوبية باستخدام برنامج محاكاة الديناميكية الحرارية TRNSYS وذلك من أجل دراسة وتحسين تأثير بعض العناصر. تمت دراسة تأثير مختلف عناصر الواجهة على المستوى الحراري والطاقوي، خاصة: المواد، العناصر، تركيبة الجدران، خصائص الفتحات بالإضافة إلى الخصائص السطحية للواجهة.

أجريت الدراسة الميدانية على مجموعة مكونة من تسعة مباني تمثل نماذج الواجهات الأكثر استعمالاً في مدينة بسكرة (بسيطة، مزججة، مزدوجة، مهواة...). سمحت هذه المباني بدراسة تأثير الاختيارات التصميمية واختيارات المواد لعناصر الواجهة على السلوك الحراري للمباني بالإضافة إلى شعور المستخدمين. من جانبها، اعتمدت الدراسة التجريبية على استغلال نموذج تجريبي مرجعي بالإضافة إلى اختبار ثلاثة خصائص في النماذج الثلاثة الأخرى (فعالية المساحة الخارجية، الواجهة المزدوجة والواجهة المهواة). وأخيراً، أعطت المحاكاة الرقمية إمكانية القيام بسلسلة من النماذج الافتراضية المتعلقة بتأثير

العديد من العناصر مثل خصائص النوافذ (نسبة الزجاج، نوع الزجاج ومعامل التظليل) بالإضافة إلى الخصائص السطحية (اللون والحبكة) للواجهة. في نهاية هذا العمل، يمكن تحسين العناصر المادية الأكثر تأثيراً على الواجهة.

أخيراً، أظهرت النتائج المتحصل عليها بأن الواجهة تمثل مساحة التفاعل والتبادل الحراري بين الداخل والخارج، والتي يعتمد أدائها على العديد من العوامل التصميمية والمادية والتقنية. الاختيارات التصميمية المناسبة لعناصر الواجهة وخصائصها والتي تأخذ بعين الاعتبار الخصائص المناخية للمنطقة تسمح بتحسين الأجواء الحرارية للمباني مع تقليل الاحتياجات الطاقوية.

## الكلمات المفتاحية

الواجهة، التحسين، الراحة الحرارية، الفعالية الطاقوية، المواد، المباني الخدمائية، المناخ الحار والجاف.

## **Abstract**

The mastering of the thermal ambient in buildings across the facade while minimizing the energy consumption is considered a challenge for designers. Nowadays, this challenge has become more difficult to meet especially with the current climatic and economic conditions that have made energy performance a global requirement in all areas, particularly in the building sector.

Like many other countries, the tertiary sector in Algeria is considered as an energy-intensive sector with excellence, since it alone holds a significant rate of energy consumption. As such, the office buildings that constitute the bulk of the tertiary building frame are marked not only by their lack of thermal comfort, but also by their excessive energy consumption of which much of the energy is used mainly to meet the thermal comfort needs (heating and cooling). This situation is the result of an indifferent architectural practice to the context where very often the thermal, energetic aspects and the climatic specificities are neglected during the design. This results negative impacts on the thermal environment, man and the environment.

To mitigate this situation, the present research has set itself the objective of evaluating and then optimizing the thermal behavior of the facades of office buildings located in hot and arid zones, taking as a case study the city of Biskra. The work of investigation focused precisely on the facade elements (materials, windows, surfaces and devices) in order to control and improve their thermal and energetic performance in a hot and arid climatic context.

To do this, the methodology used was based on an empirical approach (in situ measurements combined with a questionnaire survey) to study the thermal functioning of existing buildings. An experimental work was undertaken through the realization of four test cells on a reduced scale, which allowed us to study the different types of facade under real conditions. Finally, a parametric study using the dynamic thermal simulation software TRNSYS was carried out in order to study and optimize the influence of certain parameters. The impacts of different facade elements on the thermal and energetic planes were studied, in

particular: the materials, the devices, the composition of the walls, the characteristics of the windows as well as the surface properties of the facade.

The field study was carried out on a corpus of nine buildings representing the typologies of the most recurrent and representative facades in the city of Biskra (simple, glazed, double skin, ventilated, ...). These buildings allowed us to study the influence of the conceptual and material choices of the elements of the facade on the thermal behavior of constructions and the sensation of the users. For its part, the experimental study focused on the exploitation of a reference cell by testing three parameters in the other cells (the performance of the outer surface, the double skin and the ventilated facade). Finally, the numerical simulation gave the possibility to elaborate a series of models to study the impact of the windows' properties (ratio, type of glazing and shading factor) as well as the surface properties (color and texture) of the facade. At the end of this work, the most influential material parameters of the facade elements could be optimized.

Finally, the results obtained have confirmed that the facade represents the surface of interaction and heat exchange between the inside and the outside, whose performance depends on several conceptual, material and technical factors. Appropriate design choices for facade elements that take into consideration the climatic specificities of the context can improve the thermal environments of buildings while reducing energy requirements.

### **Key words**

Facade, optimization, thermal comfort, energy efficiency, materials, tertiary buildings, hot and arid climate.

## Table des matières

Résumés .....	i
Table des matières .....	vii
Liste des figures .....	xiv
Liste des tableaux .....	xxii
Nomenclature .....	xxiii
Productions scientifiques.....	xxiv

### **CHAPITRE INTRODUCTIF**

1. Introduction .....	1
2. Problématique.....	4
3. Hypothèses .....	6
4. Contexte et objectifs de la recherche.....	6
5. Analyse conceptuelle.....	7
6. Méthodologie .....	8
7. Structure de la thèse .....	9

### **PREMIÈRE PARTIE :**

## **L'INFLUENCE DU CLIMAT SUR L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT ET LE CONFORT THERMIQUE DES USAGERS**

### **CHAPITRE I : Le climat et l'architecture bioclimatique**

Introduction .....	12
I.1. Le Climat .....	12
I.1.1. Les facteurs du climat .....	13
I.1.2. Les éléments du climat.....	13
I.1.3. La classification du climat mondial .....	14
I.1.4. Le climat désertique .....	16

I.2. L’approche bioclimatique .....	17
I.2.1. L’architecture bioclimatique .....	18
I.2.2. Les objectifs de l’architecture bioclimatique .....	20
I.2.3. Les stratégies de l’architecture bioclimatique .....	20
I.2.3.1. La stratégie du chaud .....	20
I.2.3.2. La stratégie du froid.....	21
I.2.3.3. La stratégie de l’éclairage naturel.....	22
I.2.4. Les principes de l’architecture bioclimatique .....	23
I.2.4.1. L’implantation et orientation du bâtiment .....	24
I.2.4.2. La morphologie du bâtiment.....	26
I.2.4.3. Les matériaux de construction .....	27
I.2.4.4. La distribution des espaces intérieurs .....	29
I.2.5. Les outils d’aide à l’intégration du bâtiment dans son environnement.....	30
I.2.6. Exemples des conceptions et constructions bioclimatiques .....	33
Conclusion.....	35

## **CHAPITRE II : La façade des bâtiments tertiaires comme modulateur thermique**

Introduction .....	36
II.1. Les bâtiments tertiaires .....	36
II.2. Les façades .....	38
II.2.1. Les fonctions de la façade.....	39
II.2.2. La genèse de la façade .....	41
II.2.3. Les critères du choix d’une façade.....	43
II.2.4. Les typologies de façades .....	45
II.2.4.1. Les façades porteuses .....	45
II.2.4.2. Les façades non porteuses .....	45
II.2.5. Classification des façades et leurs caractéristiques.....	46
II.2.5.1. La façade selon la forme .....	46
II.2.5.1.1. La façade géométrique droite .....	46
II.2.5.1.2. La façade inclinée .....	46
II.2.5.1.3. La façade organique.....	47
II.2.5.1.4. La façade mixte .....	47
II.2.5.2. La façade selon les matériaux .....	48

II.2.5.2.1. La façade en pierre .....	48
II.2.5.2.2. La façade en brique.....	48
II.2.5.2.3. La façade en béton armé ou en bloc du béton .....	48
II.2.5.2.4. La façade en bois .....	49
II.2.5.2.5. La façade en verre.....	49
II.2.5.2.6. La façade en métal .....	50
II.2.5.2.7. La façade en textile.....	50
II.2.5.2.8. La façade en plastique .....	51
II.2.5.2.9. La façade mixte .....	51
II.2.5.2.10. La façade avec des matériaux à changement de phase.....	51
II.2.5.2.11. La façade selon la couleur, la texture et le type de la peinture.....	56
II.2.5.3. La façade selon le type de l'enveloppe .....	57
II.2.5.3.1. La façade simple peau ou monocouche .....	57
II.2.5.3.2. La façade double peau ou multicouche .....	58
II.2.5.4. La façade selon le principe de fonctionnement.....	61
II.2.5.4.1. La façade standard simple .....	61
II.2.5.4.2. La façade ventilée.....	61
II.2.5.4.3. La façade respirante.....	65
II.2.5.4.4. La façade végétalisée.....	66
II.2.5.4.5. La façade photovoltaïque.....	68
II.2.5.4.6. La façade adaptative .....	69
II.3. La thermique du bâtiment.....	71
II.3.1. Les notions de bases de la thermique du bâtiment et les caractéristiques des matériaux de construction.....	72
II.3.2. Les différents modes de transfert de la chaleur .....	75
II.3.3. Les ponts thermiques .....	76
II.3.4. La thermographie .....	77
II.3.5. L'isolation thermique.....	78
Conclusion.....	78

## **CHAPITRE III : Confort thermique et efficacité énergétique**

Introduction .....	79
III.1. Le confort thermique intérieur .....	79
III.1.1. Les paramètres influant sur le confort thermique.....	80
III.1.1.1. Les paramètres liés à l'individu .....	81

III.1.1.1.1. Le métabolisme .....	81
III.1.1.1.2. L'habillement .....	82
III.1.1.2. Les paramètres liés à l'environnement .....	83
III.1.1.2.1. La température ambiante de l'air .....	83
III.1.1.2.2. La température des parois .....	83
III.1.1.2.3. L'humidité relative .....	84
III.1.1.2.4. La vitesse de l'air .....	84
III.1.2. Les échanges de la chaleur entre le corps et son environnement .....	85
III.1.3. L'équilibre thermique de l'occupant avec le bâtiment et l'environnement.....	87
III.1.4. La plage de confort température-humidité .....	89
III.1.5. L'interdisciplinarité du confort thermique .....	90
III.1.6. Les approches et les modèles d'évaluation du confort thermique.....	91
III.1.6.1. L'approche analytique .....	91
III.1.6.1.1. Le modèle de Fanger PMV et PPD .....	92
III.1.6.1.2. Le modèle de Gagge.....	93
III.1.6.1.3. Le modèle de Stolwijk et Hardy.....	94
III.1.6.2. L'approche adaptative.....	95
III.2. L'efficacité énergétique des constructions .....	97
III.2.1. La consommation énergétique mondiale.....	98
III.2.2. La consommation énergétique en Algérie .....	99
III.2.3. Les mesures de l'efficacité énergétique.....	101
III.2.4. La performance énergétique des constructions .....	101
III.2.5. Les facteurs de performance énergétique .....	104
III.2.6. Les méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment.....	105
Conclusion.....	105

## **DEUXIÈME PARTIE :**

### **LE COMPORTEMENT THERMIQUE DES BÂTIMENTS TERTIAIRES DANS UN CLIMAT CHAUD ET ARIDE**

#### **CHAPITRE IV : État de l'art et positionnement épistémologique**

Introduction .....	106
IV.1. État de l'art sur les façades et ses éléments .....	106

IV.1.1. Les matériaux .....	107
IV.1.2. Les ouvertures .....	111
IV.1.3. Les propriétés surfaciques .....	118
IV.1.4. Les dispositifs.....	123
IV.1.4.1. Les protections solaires.....	123
IV.1.4.2. La façade double peau .....	125
IV.1.4.3. La façade ventilée .....	126
IV.1.4.4. La façade végétalisée .....	127
IV.1.4.5. La façade photovoltaïque.....	129
IV.1.4.6. Le Core-Skin-Shell .....	130
IV.1.4.7. La façade intelligente.....	131
IV.2. Les méthodes utilisées pour l'étude des façades.....	133
IV.2.1. La méthode analytique .....	133
IV.2.2. L'étude sur terrain .....	134
IV.2.3. La méthode expérimentale .....	134
IV.2.3.1. La méthode expérimentale avec modèles réels .....	136
IV.2.3.2. La méthode expérimentale avec modules ou cellules tests à une échelle réelle .....	138
IV.2.3.3. La méthode expérimentale avec cellules à une échelle réduite .....	138
IV.2.4. La méthode numérique .....	139
IV.3. Le positionnement épistémologique .....	142
IV.3.1. L'étude in situ.....	143
IV.3.2. L'expérimentation par des cellules tests .....	143
IV.3.3. La simulation.....	143
IV.4. Les conférences internationales sur la façade .....	144
Conclusion.....	144

## **CHAPITRE V : Etude empirique du fonctionnement thermique des immeubles de bureaux à Biskra**

Introduction .....	145
V.1. Présentation du contexte climatique et les immeubles de bureaux à Biskra.....	145
V.1.1. Le contexte climatique de la ville étudiée .....	145
V.1.2. Les immeubles de bureaux de la ville de Biskra .....	146
V.2. Etude quantitative des immeubles de bureaux à Biskra .....	148

V.2.1. Présentation des cas d'étude .....	148
V.2.2. Protocole de la prise de mesures.....	151
V.2.3. Étalonage des instruments de la prise de mesures .....	153
V.3. Etude qualitative des immeubles de bureaux à Biskra .....	154
V.4. Résultats de l'étude sur terrain .....	155
V.4.1. Résultats de l'étude quantitative .....	156
V.4.1.1. Résultats de la saison froide.....	156
V.4.1.2. Résultats de la saison chaude .....	159
V.4.1.3. Résultats de l'impact des ouvertures.....	161
V.4.2. Résultats de l'étude qualitative .....	165
Conclusion.....	175

## **CHAPITRE VI : Etude expérimentale des éléments de la façade par des cellules tests**

Introduction .....	176
VI.1. L'exploitation de cellules tests dans le domaine du bâtiment.....	176
VI.2. Présentation de cellules tests réalisées .....	178
VI.2.1. Présentation de la cellule de référence .....	181
VI.2.2. Étude de l'impact des propriétés surfaciques extérieures de la façade .....	181
VI.2.3. Étude de l'impact de la façade ventilée.....	185
VI.2.4. Étude de l'impact de la façade double peau .....	187
VI.3. Protocole de la prise de mesures et les instruments utilisés.....	188
VI.4. Résultats de l'étude expérimentale .....	189
VI.4.1. Résultats de la période hivernale.....	189
VI.4.2. Résultats de la période estivale .....	192
Conclusion.....	196

## **CHAPITRE VII : Etude et optimisation des éléments de la façade par une simulation paramétrique**

Introduction .....	197
VII.1. La simulation numérique .....	197
VII.1.1. Présentation du logiciel de la modélisation.....	198
VII.1.2. Présentation du logiciel de simulation TRNSYS et les logiciels exploités.....	198

---

VII.2. Étude paramétrique des éléments de la façade .....	205
VII.2.1. Étude de l'impact de la surface vitrée et le type de vitrage .....	205
VII.2.1.1. Présentation du modèle numérique et le protocole de la simulation .....	206
VII.2.1.2. Validation du modèle numérique .....	209
VII.2.1.3. Résultat de l'impact de la surface vitrée et le type de vitrage .....	210
VII.2.1.3.1. Résultat de l'impact de la surface vitrée .....	211
VII.2.1.3.2. Résultat de l'impact du type de vitrage .....	212
VII.2.2. Étude de l'impact des propriétés surfaciques .....	215
VII.2.2.1. Présentation du modèle numérique et le protocole de la simulation .....	215
VII.2.2.2. Résultat de l'impact des propriétés surfaciques .....	216
VII.2.3. Étude de l'impact du facteur d'ombrage des ouvertures .....	219
VII.2.3.1. Présentation du modèle numérique et le protocole de la simulation .....	219
VII.2.3.2. Résultat de l'impact du facteur d'ombrage des ouvertures .....	220
VII.3. Optimisation paramétrique des éléments de la façade .....	224
VII.3.1. L'optimisation de la surface vitrée et le type de vitrage .....	224
VII.3.2. L'optimisation du facteur d'ombrage .....	229
VII.3.3. L'optimisation de l'absorption de la surface extérieure .....	233
Conclusion .....	237
Coclusion générale .....	238
Recommandations .....	241
Les limites de la recherche .....	241
Perspectives de recherche .....	242
Bibliographie .....	243
Annexes .....	269
Annexe A .....	269
Annexe B .....	276
Annexe C .....	285
Annexe D .....	287
Annexe E .....	294
Annexe F .....	305

## Liste des figures

Figure 1: Schéma de l'analyse conceptuelle .....	7
Figure 2: Structure de la thèse.....	11
Figure 1.1 : La carte climatique mondiale.....	14
Figure 1.2 : La carte climatique mondiale selon la température et l'humidité.....	15
Figure 1.3 : La carte de classification climatique de Köppen-Geiger avec la mise à jour de Kottek.....	16
Figure 1.4 : La relation entre l'usager, le climat et le bâtiment selon l'approche bioclimatique .....	19
Figure 1.5 : La trilogie de l'architecture bioclimatique .....	19
Figure 1.6 : La stratégie du chaud .....	21
Figure 1.7 : La stratégie du froid.....	22
Figure 1.8 : La stratégie de l'éclairage naturel.....	23
Figure 1.9 : L'impact du site et l'environnement immédiat sur le bâtiment.....	24
Figure 1.10 : Exemple des principaux paramètres de l'implantation et du choix de l'orientation .....	25
Figure 1.11 : Schéma des interactions énergétiques entre le bâtiment et son environnement .	25
Figure 1.12 : L'impact de la forme sur la surface d'échange.....	26
Figure 1.13 : Les variations de la compacité selon la forme, la taille et le mode de contacte .	27
Figure 1.14 : L'utilisation des matériaux locaux dans l'architecture traditionnelle.....	27
Figure 1.15 : Exemple des matériaux bioclimatiques .....	28
Figure 1.16 : Comparaison de l'utilisation des matériaux selon la méthode moderne et bioclimatique.....	28
Figure 1.17 : Exemple d'un zonage bioclimatique d'un projet à usage d'habitation.....	29
Figure 1.18 : Exemple de la distribution des espaces intérieurs d'une maison selon l'approche bioclimatique.....	30
Figure 1.19 : Diagramme de la charte bioclimatique d'Olgyay.....	31
Figure 1.20 : Variante du diagramme de la charte bioclimatique (a) de Givoni et (b) de Szokolay.....	31
Figure 1.21 : Simulation à l'échelle d'un quartier .....	32
Figure 1.22 : Simulation à l'échelle architecturale .....	32
Figure 1.23 : Exemple d'une étude bioclimatique d'une construction durant la phase d'esquisse .....	33
Figure 1.24 : Exemples des constructions réalisées selon les stratégies de l'architecture bioclimatique.....	34
Figure 1.25 : Exemples d'un immeuble de bureaux réalisé à travers l'application des stratégies de l'architecture bioclimatique.....	35

Figure 2.1 : Exemples des façades des bâtiments tertiaires .....	37
Figure 2.2 : Définition de l'enveloppe selon différents acteurs .....	38
Figure 2.3 : Les fonctions de la façade.....	39
Figure 2.4 : Les éléments de protections des premiers abris.....	41
Figure 2.5 : Exemple des façades avec des éléments décoratifs .....	41
Figure 2.6 : Exemples des façades du mouvement moderne .....	42
Figure 2.7 : L'évolution de l'exploitation du vitrage dans les façades entre 1940 et 2018 .....	42
Figure 2.8 : Exemple des formes des façades .....	43
Figure 2.9 : Type d'une façade intelligente dynamique.....	43
Figure 2.10 : Les critères du choix d'une façade .....	44
Figure 2.11 : Exemple d'une manière conceptuelle des éléments de la façade .....	44
Figure 2.12 : Exemples de façades porteuses.....	45
Figure 2.13 : Exemples de façades légères .....	45
Figure 2.14 : La façade géométrique droite .....	46
Figure 2.15 : La façade inclinée .....	47
Figure 2.16 : La façade organique.....	47
Figure 2.17 : Façade avec des formes mixtes.....	47
Figure 2.18 : Façade en pierre .....	48
Figure 2.19 : Façade en brique .....	48
Figure 2.20 : Façade en béton armé .....	49
Figure 2.21 : Façade en bois.....	49
Figure 2.22 : Façade en verre .....	49
Figure 2.23 : Façade en métal .....	50
Figure 2.24 : Façade en textile .....	50
Figure 2.25 : Façade en plastique.....	51
Figure 2.26 : Les façades mixtes.....	51
Figure 2.27 : Exemples des matériaux à changement de phase .....	52
Figure 2.28 : Les formes des matériaux à changement de phase .....	52
Figure 2.29 : Principe de fonction des matériaux à changement de phase.....	53
Figure 2.30 : Classification des matériaux à changement de phase .....	53
Figure 2.31 : Comparaison de l'inertie thermique en fonction de l'épaisseur et le type du matériau.....	55
Figure 2.32 : Exemple de l'intégration des matériaux à changement de phase dans les parois .....	55
Figure 2.33 : Exemple de la peinture en poudre et la plateforme d'essais de ce produit.....	56
Figure 2.34 : Projets utilisant la peinture en poudre .....	56
Figure 2.35 : Image thermique comparative de l'impact de la peinture fraîche "cool paints".	57
Figure 2.36 : Façade monocouche ou simple peau .....	57
Figure 2.37 : Exemples de façades type double peau .....	58
Figure 2.38 : Les composants d'une façade double peau.....	59
Figure 2.39 : Classification de la façade double peau.....	60
Figure 2.40 : Façade simple .....	61
Figure 2.41 : Façades ventilées avec joints fermés .....	61

Figure 2.42 : Schéma représentatif des composants d'une façade ventilée et son principe de fonctionnement thermique.....	62
Figure 2.43 : Le comportement thermique d'une façade ventilée durant une journée chaude	63
Figure 2.44 : Le comportement thermique d'une façade ventilée durant une journée froide ..	63
Figure 2.45 : Exemples des choix multiples de la façade ventilée.....	64
Figure 2.46 : Les avantages de la façade ventilée .....	64
Figure 2.47 : Principe de fonctionnement d'une façade respirante.....	65
Figure 2.48 : Exemple d'une façade respirante.....	65
Figure 2.49 : Façade respirante .....	66
Figure 2.50 : Façades végétalisées .....	67
Figure 2.51 : Façade verte directe et indirecte .....	67
Figure 2.52 : Façade vivante .....	67
Figure 2.53 : Image thermique d'une façade végétalisée et une autre sans végétation.....	68
Figure 2.54 : Les façades photovoltaïques .....	69
Figure 2.55 : Les fenêtres photovoltaïques semi-transparentes .....	69
Figure 2.56 : Exemple des façades adaptatives.....	70
Figure 2.57 : Comparaison entre la façade adaptative et les façades classiques.....	70
Figure 2.58 : Les éléments de l'équilibre thermique d'un bâtiment .....	71
Figure 2.59 : Les problèmes et les solutions thermiques de l'enveloppe du bâtiment.....	72
Figure 2.60 : La conductivité thermique des matériaux.....	73
Figure 2.61 : La résistance thermique d'un mur .....	73
Figure 2.62 : La résistance thermique des matériaux.....	74
Figure 2.63 : Le changement journalier de la température selon l'inertie thermique .....	74
Figure 2.64 : Les différents modes de transfert de la chaleur .....	75
Figure 2.65 : La variation du sens des transferts de la chaleur selon la saison .....	76
Figure 2.66 : Les types des ponts thermiques .....	77
Figure 2.67 : Exemples des images thermiques .....	77
Figure 2.68 : Les isolants thermiques.....	78
Figure 3.1 : Les paramètres influant sur le confort thermique .....	80
Figure 3.2 : L'impact de l'activité et du métabolisme sur la température du confort.....	81
Figure 3.3 : Valeurs de l'isolement vestimentaire de différents vêtements .....	82
Figure 3.4 : L'influence de la température de l'air et des parois sur la température de confort .....	83
Figure 3.5 : La plage de taux d'humidité ambiante et ses différents impacts .....	84
Figure 3.6 : La variation de la température de confort en fonction de la vitesse de l'air.....	85
Figure 3.7 : Les échanges thermiques entre le corps et son environnement .....	86
Figure 3.8 : L'évolution des températures dans deux bâtiments au cours de l'année sans chauffage et sans climatisation.....	87
Figure 3.9 : Caractéristiques structurelles d'un modèle du confort thermique.....	88
Figure 3.10 : L'impact de la température ambiante et surfacique sur l'équilibre thermique des occupants.....	88
Figure 3.11 : La plage de confort hygrothermique.....	89
Figure 3.12 : La répartition du PPD en fonction du PMV .....	93

Figure 3.13 : Représentation du modèle physiologique de Gagge.....	93
Figure 3.14 : Un schéma du modèle thermique de Stolwijk et Hardy .....	95
Figure 3.15 : Diagramme du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE 55-2017	69
Figure 3.16 : Représentation des mécanismes adaptatifs .....	97
Figure 3.17 : La consommation énergétique au niveau mondial en 2017.....	98
Figure 3.18 : Exemple de la consommation énergétique par secteur d'un pays européen .....	99
Figure 3.19 : La consommation énergétique de l'Algérie entre 1990 et 2017.....	100
Figure 3.20 : La Consommation énergétique finale de l'Algérie par secteur .....	100
Figure 3.21 : Les aspects conceptuels nécessaires pour une construction performante énergétiquement .....	102
Figure 3.22 : L'impact des caractéristiques architecturales sur la charge du chauffage .....	102
Figure 3.23 : L'impact des caractéristiques architecturales sur la charge de la climatisation	103
Figure 3.24 : Les solutions passives et actives de l'efficacité énergétique des bâtiments .....	103
Figure 3.25 : Les facteurs de performance énergétique .....	104
Figure 4.1 : Exemple des exigences de la façade .....	106
Figure 4.2 : Étude expérimentale sur l'optimisation de l'enveloppe par l'intégration des matériaux à changement de phase .....	108
Figure 4.3 : La maison tests réalisées et les instruments utilisés pour la mesure.....	109
Figure 4.4 : Étude expérimentale de l'impact des matériaux à changement de phase .....	110
Figure 4.5 : Analyse numérique du facteur de la transmittance thermique de différentes configurations de blocs de béton creux .....	110
Figure 4.6 : Étude expérimentale du fonctionnement thermique d'une paroi de brique massive .....	111
Figure 4.7 : Étude de l'influence de la surface vitrée d'une construction.....	112
Figure 4.8 : L'impact du type de vitrage sur la répartition de l'énergie solaire.....	114
Figure 4.9 : L'influence du double vitrage avec gaz sur la répartition de l'énergie solaire...	115
Figure 4.10 : Dispositif expérimental pour l'étude des vitrages .....	115
Figure 4.11 : L'utilisation d'aérogel de silice dans la cavité d'un double vitrage .....	116
Figure 4.12 : Deux types de fenêtres réversibles .....	116
Figure 4.13 : Principe de fonctionnement des fenêtres réversibles en hiver et en été .....	117
Figure 4.14 : Les caractéristiques surfaciques des matériaux .....	119
Figure 4.15 : Plateforme de l'étude expérimentale de l'impact des peintures .....	120
Figure 4.16 : Les modèles expérimentaux et numériques exploités pour étudier l'impact des matériaux de l'enveloppe .....	121
Figure 4.17 : Les modèles réalisés pour étudier l'influence des surface de l'enveloppe.....	121
Figure 4.18 : Les échantillons réalisés pour étudier l'influence du cool-béton sur les températures surfaciques .....	122
Figure 4.19 : Les types des protections solaires fixes .....	123
Figure 4.20 : L'impact des protections solaires sur la durée d'exposition de la façade.....	124
Figure 4.21 : Les cinq types des persiennes étudiés avec différentes dispositions .....	124
Figure 4.22 : Étude expérimentale et numérique de la vitesse d'air au niveau du canal d'une façade double peau en fonction de l'inclinaison des lamelles .....	125

Figure 4.23 : Étude numérique de l'écoulement aéroulrique et la distribution de la température dans la cavité d'une façade double peau .....	125
Figure 4.24 : Étude empirique et numérique du comportement thermique d'une façade ventilée .....	126
Figure 4.25 : Étude thermodynamique de l'impact des composants de la façade ventilée sur son comportement .....	127
Figure 4.26 : Transfert de chaleur dans une façade végétalisée .....	127
Figure 4.27 : Les modèles tests exploités pour l'étude de la façade végétalisée .....	128
Figure 4.28 : Les petites cellules tests utilisées dans l'étude expérimentale.....	128
Figure 4.29 : La façade photovoltaïque et l'impact de l'émissivité sur les lignes de courant de la cavité d'air .....	129
Figure 4.30 : Étude expérimentale et numérique sur l'intégration des capteurs photovoltaïques semi-transparents dans le vitrage .....	129
Figure 4.31 : La façade double peau avec des capteurs photovoltaïques semi-transparents .	130
Figure 4.32 : Exemple du concept Core-Skin-Shell.....	130
Figure 4.33 : Schématisation du concept Core-Skin-Shell .....	131
Figure 4.34 : Modèles simulés sur l'impact des panneaux coulissants .....	131
Figure 4.35 : Modèles numériques d'étude des impacts de Moucharabieh .....	132
Figure 4.36 : Exemple des façades adaptatives des projets réalisés.....	132
Figure 4.37 : Exemple des éléments de calcul de la méthode analytique .....	133
Figure 4.38 : Exemple des études in situ sur des cas réels.....	134
Figure 4.39 : Vue et plan d'une cellule garde avec une cellule test.....	135
Figure 4.40 : Appareil de mesure du facteur solaire des éléments translucides de l'enveloppe du bâtiment.....	135
Figure 4.41 : Vue de la plateforme d'essais INCAS de l'INES et les modèles tests réalisées .....	136
Figure 4.42 : Vue aérienne du site de concours Solar Decathlon Europe en 2010 .....	137
Figure 4.43 : Modèles réels "full-scale models" .....	137
Figure 4.44 : Exemple d'une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réelle	138
Figure 4.45 : Une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réduite.....	139
Figure 4.46 : Simulation de l'impact de l'ombrage de moucharabieh sur la performance énergétique .....	140
Figure 4.47 : Graphe de Hossdorf de la relation entre la difficulté du projet et le coût relatif .....	141
Figure 4.48 : Nuage de mots et de mots-clés relatifs aux recherches effectuées .....	142
Figure 5.1 : La carte géographique de l'Algérie indiquant la situation de Biskra .....	146
Figure 5.2 : Un échantillon des immeubles de bureaux de la ville de Biskra .....	147
Figure 5.3 : Les immeubles de bureaux étudiés .....	149
Figure 5.4 : Les instruments utilisés pour la prise de mesures.....	153
Figure 5.5 : Les appareils exploités pour la vérification des instruments utilisés pour la prise de mesures .....	154
Figure 5.6 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 08 Janvier 2017 .....	156

Figure 5.7 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 09 Janvier 2017	157
Figure 5.8 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 10 Janvier 2017	158
Figure 5.9 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 07 Juillet 2017	159
Figure 5.10 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 08 Juillet 2017	160
Figure 5.11 : Façade et plan du siège de l'Agence Foncière de Biskra	161
Figure 5.12 : Les deux espaces de bureaux étudiés	161
Figure 5.13 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 10-01-2017 dans les deux bureaux	162
Figure 5.14 : Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 08-07-2017 dans les deux bureaux	163
Figure 5.15 : La sensation thermique des usagers dans des conditions naturelles	166
Figure 5.16 : La satisfaction thermique des usagers dans des conditions naturelles	167
Figure 5.17 : L'ouverture des fenêtres afin de régler la température du bureau	168
Figure 5.18 : La fréquence de l'utilisation du chauffage dans les bureaux	169
Figure 5.19 : La satisfaction thermique des usagers avec l'utilisation du chauffage	170
Figure 5.20 : La fréquence de l'utilisation de la climatisation dans les bureaux	170
Figure 5.21 : La satisfaction thermique des usagers avec l'utilisation de la climatisation	171
Figure 5.22 : La moyenne journalière de l'utilisation du chauffage	172
Figure 5.23 : La moyenne journalière de l'utilisation de la climatisation	172
Figure 5.24 : Les mois de l'utilisation des équipements de chauffage et de la climatisation	173
Figure 5.25 : La taille des fenêtres des bureaux étudiés selon l'avis des usagers	174
Figure 5.26 : Les ratios de la surface vitrée préférée par les usagers	174
Figure 6.1 : Exemples des études expérimentales à différentes échelles	178
Figure 6.2 : Les quatre cellules tests réalisées à l'échelle de "1/50"	179
Figure 6.3 : Les ouvertures de la façade Nord des cellules tests	179
Figure 6.4 : Plan, coupe et façades des cellules tests réalisées	180
Figure 6.5 : La cellule de référence "C1"	181
Figure 6.6 : La performance énergétique de la peinture isolante	182
Figure 6.7 : La cellule "C2" avec une peinture isolante	183
Figure 6.8 : La composition de la peinture isolante utilisée	184
Figure 6.9 : Comparaison de la réflexion de la peinture ordinaire et la peinture isolante utilisée	184
Figure 6.10 : Principe du fonctionnement de la façade avec la peinture isolante exploitée	185
Figure 6.11 : La cellule "C3" avec une façade ventilée	186
Figure 6.12 : La cavité d'air de la cellule "C3"	186
Figure 6.13 : La cellule "C4" avec une façade double peau	187
Figure 6.14 : La cavité d'air de la cellule "C4" et le principe du fonctionnement de la façade double peau	188
Figure 6.15 : Les instruments exploités dans l'étude expérimentale	189

Figure 6.16 : Graphes de températures surfaciques externes mesurées le 12 Décembre 2017 .....	189
Figure 6.17 : Graphes de températures surfaciques internes mesurées le 12 Décembre 2017 .....	190
Figure 6.18 : Graphes de températures ambiantes mesurées le 12 Décembre 2017 .....	191
Figure 6.19 : Graphes de températures surfaciques externes mesurées le 10 Août 2017 .....	192
Figure 6.20 : Graphes de températures surfaciques internes mesurées le 10 Août 2017 .....	193
Figure 6.21 : Graphes de températures ambiantes mesurées le 10 Août 2017 .....	194
Figure 7.1 : La création de la géométrie des modèles étudiés .....	198
Figure 7.2 : Le logiciel exploité pour la simulation et les développeurs de cet outil .....	198
Figure 7.3 : Les types et les connexions utilisés pour la simulation numérique .....	199
Figure 7.4 : Les facteurs thermiques influençant sur le nœud d'air .....	199
Figure 7.5 : Les inputs du « Type 56 » .....	200
Figure 7.6 : Le comportement thermique des éléments du bâtiment selon le type exploité ..	201
Figure 7.7 : Le logiciel exploité pour générer le fichier climatique .....	202
Figure 7.8 : Les inputs et les outputs du modèle simulé .....	202
Figure 7.9 : L'interface de « TRNBuild » .....	203
Figure 7.10 : Schéma de synthèse de l'étude numérique .....	204
Figure 7.11 : La composition matérielle des murs .....	207
Figure 7.12 : La plage de température selon la norme NF EN 15251 .....	208
Figure 7.13 : Comparaison des graphes de températures mesurées et simulées le 08 Juillet 2017 .....	209
Figure 7.14 : L'indice « PMV » et « PPD » simulés pendant une année .....	210
Figure 7.15 : Graphes de températures surfaciques internes simulées du (Msv) .....	211
Figure 7.16 : Graphes des températures ambiantes simulées du (Msv) .....	212
Figure 7.17 : Graphes des températures surfaciques internes des vitrages obtenues par simulation du (Mtv) .....	213
Figure 7.18 : Graphes du coefficient de gain de chaleur solaire du vitrage des modèles (Mtv) .....	214
Figure 7.19 : Graphes de températures ambiantes simulées avec différents types de vitrages (Mtv) .....	215
Figure 7.20 : Graphes de températures surfaciques externes simulées du (Mab) .....	216
Figure 7.21 : Graphes de températures surfaciques internes simulées du (Mab) .....	217
Figure 7.22 : Graphe de températures ambiantes simulées pendant une année du (Mab) .....	217
Figure 7.23 : Graphes des besoins énergétiques durant trois jours d'hiver et d'été du (Mab) .....	218
Figure 7.24 : La géométrie de quelques modèles relatifs à l'étude du facteur d'ombrage (Mfo) .....	220
Figure 7.25 : Graphes de températures surfaciques internes simulées du modèle (Mfo) .....	221
Figure 7.26 : Graphes de températures ambiantes simulées du modèle (Mfo) .....	221
Figure 7.27 : Graphes du rayonnement total absorbé du modèle (Mfo) .....	222
Figure 7.28 : Graphes des radiations solaires directes du modèle (Mfo) .....	222
Figure 7.29 : Graphes des radiations solaires diffuses du modèle (Mfo) .....	223

Figure 7.30 : Graphes des besoins énergétiques du modèle (Mfo) .....	223
Figure 7.31 : Graphes de températures surfaciques internes des vitrages simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv)] .....	225
Figure 7.32 : Graphes de températures ambiantes simulées du [(Mt) et (Mo_sv_tv)].....	225
Figure 7.33 : Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv)].....	226
Figure 7.34 : Isothermes simulées du (Mt) et (Mo_sv_tv) pendant une année.....	227
Figure 7.35 : Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo_sv_tv).....	228
Figure 7.36 : Graphes de températures surfaciques internes des murs simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo)] .....	229
Figure 7.37 : Graphes de températures surfaciques internes des vitrages simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo)].....	230
Figure 7.38 : Graphes de températures ambiantes simulées du [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo)] .....	230
Figure 7.39 : Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo)] .....	231
Figure 7.40 : Isothermes simulées du (Mt) et (Mo_sv_tv_fo) pendant une année.....	231
Figure 7.41 : Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo_sv_tv_fo) .....	232
Figure 7.42 : Graphes de températures surfaciques internes des murs simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo_ab)].....	233
Figure 7.43 : Graphes de températures ambiantes simulées du [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo_ab)]	234
Figure 7.44 : Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [(Mt) et (Mo_sv_tv_fo_ab)] .....	235
Figure 7.45 : Isothermes simulées du (Mt) et (Mo_sv_tv_fo_ab) pendant une année.....	235
Figure 7.46 : Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo_sv_tv_fo_ab).....	236

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Une comparaison entre le climat désertique froid-sec et chaud-sec .....	17
Tableau 3.1 : L'impact de l'activité sur les valeurs du métabolisme .....	81
Tableau 3.2 : Les valeurs de l'isolement vestimentaire en fonction des tenues vestimentaires .....	82
Tableau 3.3 : La sensation thermique exprimée selon l'échelle de l'ASHRAE .....	92
Tableau 3.4 : La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique .....	94
Tableau 5.1 : La composition des façades des cas d'étude .....	150
Tableau 7.1 : La transmission thermique "U" des vitrages utilisés.....	206
Tableau 7.2 : Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés pour la simulation.....	207
Tableau 7.3 : Les propriétés surfaciques des modèles simulés et leurs coefficients d'absorption.....	216

## Nomenclature

### Abréviation

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

Cf : Coefficient de forme.

FDP : Façade double peau.

FV : Façade ventilée.

CSS : Core-Skin-Shell.

Fo : Facteur d'ombrage.

PMV : Predicted Mean Vote (Vote Moyen Prévisible).

PPD : Predicted Percentage Dissatisfied (Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits).

### Indices

CLO Unité d'isolement vestimentaire.

M Le métabolisme ( $w/m^2$ ).

R La résistance thermique ( $m^2.k/w$ ).

S La surface ( $m^2$ ).

Ta La température ambiante de l'air ( $^{\circ}C$ ).

Tp La température des parois ( $^{\circ}C$ ).

Trs Température résultante sèche ( $^{\circ}C$ ).

HR L'humidité relative de l'air (%).

U Le coefficient de transmission surfacique ( $w/m^2.k$ ).

Vair La vitesse de l'air (m/s).

C Chaleur spécifique (Kj/kg.k).

D Densité ( $Kg/m^3$ ).

### Symboles

$\lambda$  Conductivité thermique (W/m.k).

$\mu$  Résistance à la diffusion de vapeur d'eau (grandeur sans dimension).

$\rho$  Réflectance solaire (%).

$\varepsilon$  Émittance thermique (%).

## **Productions scientifiques**

## Publications

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2018). Study and optimization of the windows' impact on thermal comfort and energy efficiency (Case of offices in a hot and arid climate). *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 4 (1), 89-99.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L., Besbas, S.** (2018). The impact of facade materials on the thermal comfort and energy efficiency of offices buildings. *Journal of Building Materials and Structures*, 5 (1), 55-64.

**Khadraoui, M.A., Bensaci, C.E., Sriti, L., Moummi, A.** (2018). The influence of natural convection of a ventilated cavity on the thermal operation of buildings (Case of a hot climate). *Revue des Matériaux et Energies Renouvelables*, 3 (1), 45-50.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2017). Etude expérimentale du comportement thermique d'une façade ventilée dans un climat chaud et aride. *Revue des Energies Renouvelables*, 20 (4), 626-634.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2017). Facades' thermal behavior of the office buildings in a hot and arid climate. *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism*, 1 (2), 28-38.

## Communications internationales

**Khadraoui, M.A., Bensaci, C.E., Sriti, L., Moummi, A.** (2017, Décembre). *The Effect of Convection in the Ventilated Facade of Buildings in a Desert Climate*. Communication présentée au First Arab Conference on Mechanical Engineering ARCME'17, Biskra, Algérie.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2017, Novembre). *L'impact des matériaux sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des constructions*. Communication présentée au Premier Séminaire International sur la Stratégie et l'Innovation SIM1-2017, Relizane, Algérie.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L., Besbas, S.** (2017, Novembre). *The impact of facade materials on the thermal comfort and energy efficiency of offices buildings*. Communication présentée au 3<sup>rd</sup> International Symposium on Materials and Sustainable Development ISMSD2017, Boumerdes, Algérie.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2017, Octobre). *L'impact des caractéristiques matérielles de la façade sur son comportement thermique : cas des bureaux dans un climat chaud et aride.* Communication présentée aux 18<sup>ème</sup> Journées internationales de thermique JITH, Monastir, Tunisie.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L., Merad, Y.** (2016, Mars). *L'impact de la façade ventilée sur le confort thermique et l'esthétique de l'enveloppe architecturale en zones arides et semi-arides (cas de la ville de Biskra).* Communication présentée au X<sup>th</sup> International Congress on Renewable Energy and the Environment, Sousse, Tunisie.

### **Communications nationales**

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2018, Février). *L'impact du dispositif de La façade ventilée sur Le comportement hygrothermique des bâtiments dans un climat humide.* Affiche présentée au Workshop Zones Humides et Villes Durables, Biskra. Algérie.

**Khadraoui, M.A., Sriti, L.** (2016, Février). *Etude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique.* Affiche présentée aux Premières journées BIM, Biskra, Algérie.

# Chapitre introductif

*« L'architecture est une merveilleuse expression du processus de découverte. C'est comme un scientifique qui ne connaît pas la réponse, mais qui sait le chemin qui y mène. C'est cela qui me fait agir : la joie du chemin, la découverte »*

*Glenn Murcutt*

*Architecte, récipiendaire du prix Pritzker d'architecture en 2002*

## Chapitre introductif

### 1. Introduction

La conception architecturale est une étape fondamentale dans la production du cadre bâti ; c'est également une étape très complexe vue ses aspects hyper-interférés. En amont, cette phase influe considérablement sur plusieurs plans : thermiques, énergétiques et plus globalement environnementaux. A ce titre, elle nécessite l'étude et l'évaluation des choix et des alternatives de départ afin de mieux répondre aux différentes exigences et résoudre les problèmes qui pourraient se poser ultérieurement (Hall, 2010). Cette évaluation porte sur tous les composants du bâtiment notamment l'enveloppe, qui est considérée comme un élément crucial afin d'aboutir à une conception architecturale efficace (Kontoleon et al., 2007). En effet, l'objectif primordial de la conception est de fournir aux occupants des ambiances intérieures confortables quelle que soit la nature des conditions extérieures (Lavoye et al., 2015), et il serait faux de restreindre la dimension environnementale du bâtiment au seul souci de réduire la facture énergétique (Arnal, 2013 ; Zemella et al., 2014).

Au fil du temps, la conception architecturale a connu de grands changements sous l'influence de plusieurs paramètres (l'essor technologique, l'évolution des modes de vie, l'émergence de nouvelles tendances, le développement de nouveaux matériaux et techniques de construction, etc.). Inévitablement, le projet architectural a subi l'influence parfois négative de ces bouleversements. Ainsi, le mouvement moderne a contribué à la production d'une architecture parfaitement indifférente au climat en surestimant les possibilités technologiques et en les considérant aptes à remplacer l'enseignement des « anciens ». Avec le mouvement moderne, la notion même d'architecture s'était profondément modifiée, elle n'était plus l'art de bâtir comme définie primitivement, elle était devenue un exercice plastique où les paramètres environnementaux et contextuels n'avaient plus leur place (style international, production rapide de bâtiments, architecture de fer et de verre,...).

Jusqu'à la première crise pétrolière de 1973, la consommation énergétique n'était pas un problème. La confiance aveugle que les architectes ont voué à la société technologique a eu pour résultat la production d'une architecture « énergivore » à outrance (Gallo et al., 1998), où le bien-être physiologique de l'utilisateur a été délégué à des installations techniques dépendant de sources épuisables, non renouvelables et polluantes (Heiselberg, 2009 ; Kjell, 2014 ; Alwetaishi et al., 2017). Souvent, l'utilisation excessive de l'énergie et le recours systématique aux équipements et installations techniques ont servi à cacher d'innombrables défauts conceptuels en rapport avec le confort thermique des occupants (Seoud, 2012 ; Lavoye et al., 2015). Plus grave encore, dans certain cas, l'emploi de systèmes sophistiqués et très chers s'est avéré peu efficace pour résoudre les problèmes liés au confort thermique et à la qualité des ambiances (Gratia et De Herde, 2006). A partir de la crise pétrolière de 1973, tout fut remis en question. Cette crise énergétique fut considérée comme un déclic et un facteur de changement au niveau mondial. Il y eut une prise de conscience vis-à-vis des excès en matière de consommation énergétique et une réelle mobilisation afin de rationaliser cette consommation et protéger l'environnement. A ce propos, Wannous (2013), souligne que la crise pétrolière de 1973 a provoqué une remise en cause de la société de consommation et du modèle économique des pays industrialisés, ce qui a bouleversé la vision relative à l'exploitation des énergies fossiles.

Une relation de cause à effet fut établie entre cette surexploitation énergétique et les changements climatiques, notamment le réchauffement de la planète. La sonnette d'alarme fut tirée et de nouveaux concepts tels que la protection de l'environnement, le développement durable, les énergies renouvelables furent largement médiatisés. Sous la pression de l'opinion publique, les décideurs politiques commencèrent à prendre conscience de la nécessité de protéger le milieu naturel et des actions réelles furent entreprises notamment dans le cadre des Sommets de la Terre. Le plus célèbre de ces sommets est certainement celui organisé en 1992 par les Nations Unies à Rio de Janeiro et qui a eu le mérite d'alerter l'opinion sur les conséquences du pillage des matières premières, sur l'augmentation inquiétante de l'effet de serre et sur la dégradation rapide et spectaculaire des équilibres écologiques. Depuis, les mesures en faveur de la qualité environnementale sont déjà institutionnalisées dans plusieurs pays, sous forme de normes (standards, labels), réglementations et incitations financières. Mais malgré la politique mondiale contre le gaspillage de l'énergie, la consommation universelle reste très élevée en particulier au niveau des pays industrialisés.

Depuis son indépendance, l'Algérie a connu un développement croissant ce qui a influé sur l'augmentation de la demande énergétique d'une manière colossale, particulièrement durant la dernière décennie. En effet, des centres spécialisés dans l'énergie tel que « The Global Energy Statistical Yearbook<sup>1</sup> » soulignent ce phénomène en indiquant qu'en Algérie, la valeur de la consommation énergétique en 2016 est passée à 60 Twh (Térawat-theure), soit environ deux fois plus que la consommation en 2006. Le problème de la consommation énergétique en Algérie est donc bien réel et les données précédentes posent beaucoup de questions et d'inquiétudes notamment à long terme. Pour faire face à cette situation, il est évident qu'une réflexion sur l'adoption de stratégies adéquates dans tous les secteurs devrait être engagée dans l'immédiat. Du fait de ses spécificités, le secteur du bâtiment (surtout tertiaire et résidentiel) devrait faire l'objet d'une attention particulière.

Plusieurs chercheurs considèrent, en effet, le secteur du bâtiment comme l'un des gros consommateurs d'énergie dans le monde (Valderrama-Ulloa, 2013 ; Velázquez-Romo, 2015 ; Omrany et al., 2016). Ce secteur représente une part très importante de la consommation énergétique, il est responsable d'environ 40 % de la consommation énergétique mondiale (Pérez-Lombard et al., 2008 ; Chesné, 2012 ; Mishra et al., 2016 ; Prieto et al., 2017).

En Algérie, le secteur du bâtiment est considéré comme un secteur énergivore par excellence détenant à lui seul un taux faramineux de la consommation énergétique dont une grande quantité est utilisée principalement pour répondre aux besoins du confort thermique (chauffage et climatisation). D'après le rapport de l'APRUE<sup>2</sup> (2009), la consommation énergétique des bâtiments tertiaires et résidentiels en Algérie représente 41% de la consommation finale et surpasse de loin les autres secteurs.

Dans le sillage des bâtiments administratifs, les immeubles de bureaux qui constituent l'essentiel du parc immobilier tertiaire en Algérie, sont caractérisés par leur manque de confort thermique flagrant (excès de chaleur en été, problème de froid en hiver). Ils sont, de fait, de gros consommateurs d'énergie et dépendent exclusivement des installations électriques pour assurer leur climatisation. Cette situation est le résultat d'une pratique architecturale indifférente au contexte, où très souvent les paramètres thermiques, énergétiques et climatiques sont ignorés, surtout lors de la conception et le choix des éléments de l'enveloppe (matériaux, façade vitrée et dispositifs inappropriés au contexte climatique). La façade des bâtiments à

---

<sup>1</sup> Annuaire statistique de l'énergie mondiale d'Enerdata, [www.yearbook.enerdata.net](http://www.yearbook.enerdata.net)

<sup>2</sup> APRUE : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

usage de bureaux, en particulier, constitue un enjeu majeur aussi bien pour l'architecte que pour l'ingénieur car elle représente un lieu d'interaction et d'échange entre l'intérieur et l'extérieur dont la performance relève de facteurs à la fois formels, matériels et techniques.

Afin de corriger l'écart conceptuel existant entre les éléments de la façade et le contexte climatique, plusieurs recherches se sont inscrites dans une démarche visant à optimiser le fonctionnement thermique de l'enveloppe architecturale d'une manière passive en agissant sur les parois verticales, autrement dit, les murs de la façade (Hernández-Pérez et al., 2014 ; Pisello et al., 2014 ; Rosso et al., 2017a). Ces recherches se sont penchées sur les caractéristiques matérielles de l'enveloppe, notamment la façade pour évaluer et améliorer leurs rôles dans la performance énergétique d'un bâtiment. Dans ce contexte, Sozer (2010), affirme que le choix adéquat des caractéristiques de l'enveloppe permet de maîtriser les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur et ainsi d'améliorer l'efficacité thermique et énergétique du bâtiment. Néanmoins, pour assurer ces objectifs, il est nécessaire que la démarche conceptuelle soit inscrite dans une approche environnementale propre à un contexte climatique et qu'elle y réponde efficacement (Pisello et al., 2016).

La présente recherche relève de cette approche ; elle s'inscrit dans une démarche qui se base sur l'optimisation des éléments de la façade d'une manière passive afin d'améliorer les ambiances thermiques et réduire les besoins énergétiques des immeubles de bureaux situés dans un climat chaud et aride.

## **2. Problématique**

La façade est un élément architectural très important qui influe sur plusieurs dimensions du bâtiment, notamment, l'apparence, le confort des usagers et la durabilité de la construction. Du point de vue environnemental, elle est, par excellence, un lieu d'interaction et d'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur dont la performance est tributaire de facteurs à la fois, matériels conceptuels et techniques. De ce fait, la façade constitue un enjeu majeur aussi bien pour l'ingénieur que pour l'architecte. Ce dernier, en tant que premier responsable de l'œuvre architecturale, doit avoir une idée précise des impacts que peuvent avoir ses décisions conceptuelles et matérielles relatives à la façade sur les conditions thermiques générées et les dépenses énergétiques nécessaires pour le fonctionnement du bâtiment.

Plusieurs chercheurs considèrent la façade comme zone de contradictions, elle représente à la fois la zone des pertes et des gains thermiques et en même temps, si elle est bien conçue, la clé de la performance thermique et énergétique des constructions. Faure (2007), assimile

l'enveloppe à un véritable échangeur thermique. Ce point de vue est, par ailleurs, confirmé par Moreno-Sierra (2012), qui signale que les déperditions surfaciques des éléments de l'enveloppe représentent 75 % des pertes énergétiques. Pour sa part, Westphal (2016), affirme que les grands échanges thermiques se font à travers l'enveloppe.

Paradoxalement, le nombre de recherches qui traitent de la performance thermique et énergétique à l'échelle urbaine (morphologie) dépassent de loin les recherches traitant ce sujet à l'échelle architecturale (enveloppe). De même que les études relatives au confort thermique et l'efficacité énergétique au niveau de la façade du bâtiment où s'opèrent les grandes déperditions énergétiques sont, relativement, peu nombreuses.

Suite à une analyse préliminaire par observation sur des façades de bâtiments tertiaires, des choix conceptuels et matériels inappropriés ont été constatés, ils sont le résultat de la négligence du contexte climatique. L'utilisation aléatoire des éléments de façades (matériaux, dispositif, ratio, etc.) dans les immeubles de bureaux prend de l'ampleur et suscite d'innombrables questions quant aux graves conséquences d'une telle pratique. Il faut dire qu'il n'est pas rare de trouver les mêmes types de façades aussi bien au Nord (climat méditerranéen) qu'au Sud du pays (climat chaud et aride). Bien entendu, les mêmes caractéristiques conceptuelles et matérielles sont utilisées indifféremment et quelle que soit la zone climatique. Cette situation est le résultat des choix conceptuels indifférents au contexte où, non seulement, les aspects thermiques et énergétiques ne sont pas pris en considération dès la phase d'esquisse du projet, mais aussi, les données climatiques et les spécificités du contexte sont tout simplement négligées. Il en résulte des immeubles de bureaux à caractère énergivore et démunis de confort thermique.

Tout ceci nous incite à poser la question suivante :

**Quels sont les éléments et les paramètres à optimiser dans la façade afin d'assurer le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride ?**

### **3. Hypothèses**

Afin de répondre à la problématique mise en perspective, les hypothèses suivantes ont été proposées :

- Il semble que les caractéristiques matérielles de la façade combinées avec un choix adéquat des dispositifs de protection ont un impact prépondérant sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments dans un climat chaud et aride.
- Les caractéristiques matérielles et proportionnelles des ouvertures ont un impact déterminant sur la performance thermique et énergétique du bâtiment et le confort thermique des usagers.

### **4. Contexte et objectifs de la recherche**

La présente recherche porte sur les bâtiments tertiaires et plus précisément sur les immeubles de bureaux situés dans un contexte climatique chaud et aride. La ville de Biskra a été choisie comme cas d'étude (ville du Sud Algérien classée parmi les zones chaudes et arides).

L'objectif de cette recherche est de maîtriser le comportement thermique des façades des immeubles de bureaux situés dans un climat chaud et aride. Elle consiste à optimiser une façade contextuellement appropriée et performante en termes de confort thermique et d'efficacité énergétique à travers l'exploitation des stratégies passives (matériaux et dispositifs).

Cette recherche s'inscrit dans une optique visant à :

- Analyser la situation actuelle relative à la consommation énergétique du secteur des bâtiments tertiaires en Algérie ;
- Étudier le comportement thermique des façades des bâtiments tertiaires situés dans un climat chaud et aride (à Biskra) et ses impacts sur le confort thermiques des usagers ;
- Déterminer l'impact des éléments de la façade et de leurs caractéristiques sur le confort thermique et l'efficacité énergétique ;
- Optimiser le confort thermique et l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux de manière passive à travers les éléments de la façade ;
- Agir sur différents paramètres en développant une conception de façade adéquate pour un climat chaud et aride.

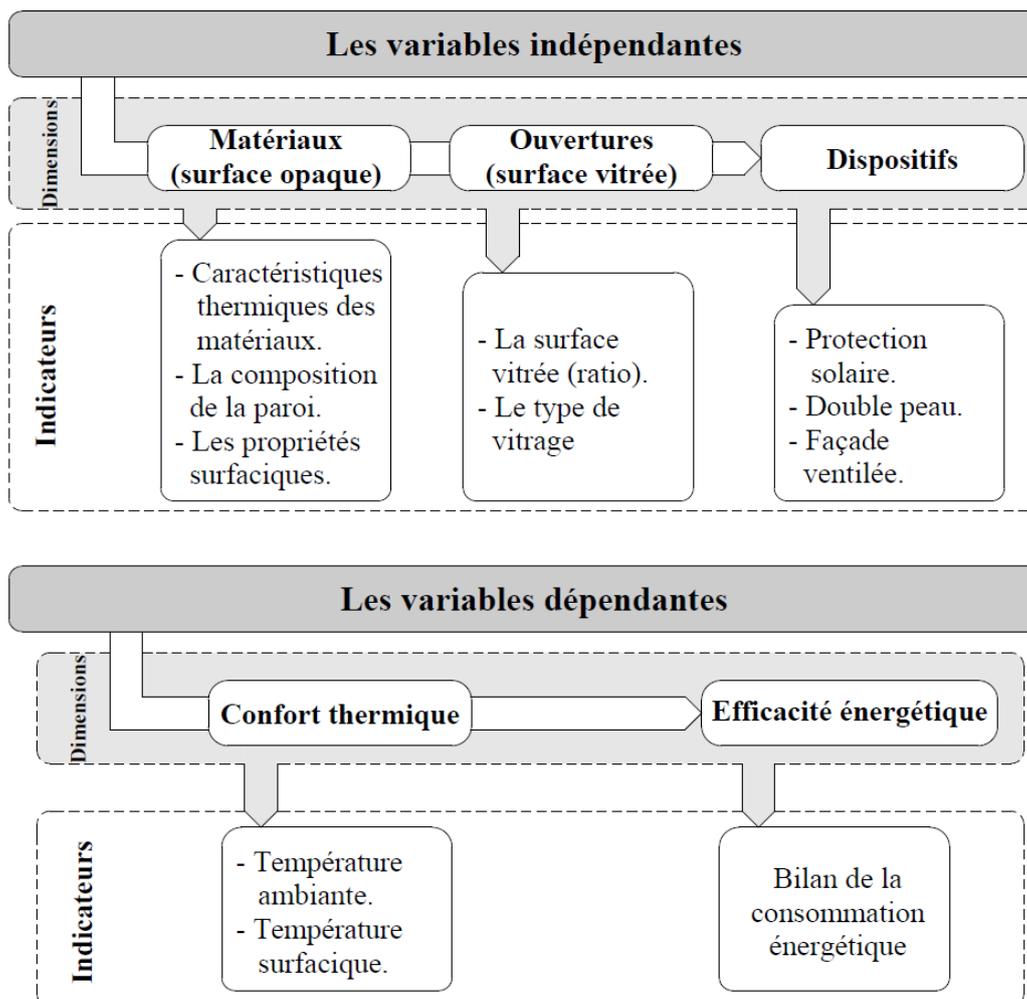
A travers un ensemble de recommandations, cette étude tente de développer une façade performante qui puisse répondre de façon optimale aux exigences d'un bâtiment tertiaire dans

un climat chaud et aride tout en assurant une ambiance thermique agréable et une basse consommation énergétique.

## 5. Analyse conceptuelle

L'analyse conceptuelle de la recherche a permis de concrétiser les concepts figurant dans les hypothèses en vue de les transformer en phénomènes mesurables. Par ailleurs, les variables indépendantes et dépendantes ont été dégagées (Figure 1) :

- Il semble que **les caractéristiques matérielles de la façade** combinées avec un choix adéquat **des dispositifs de protection** ont un impact prépondérant sur **le confort thermique** et **l'efficacité énergétique** des bâtiments dans un climat chaud et aride.
- Les caractéristiques matérielles et proportionnelles **des ouvertures** ont un impact déterminant sur la performance **thermique** et **énergétique** du bâtiment et le **confort thermique** des usagers.



**Figure 1** : Schéma de l'analyse conceptuelle (Source: Auteur, 2018)

## 6. Méthodologie

Cette recherche s'appuie sur une combinaison de techniques relevant à la fois de méthodes quantitatives et qualitatives.

Ainsi, la partie théorique est basée sur une étude bibliographique afin de cerner l'état de l'art de la thématique étudiée. Différents documents (livres, thèses, articles, etc.) ont été exploités.

Le travail de terrain consacré à l'évaluation thermique de bâtiments existants a nécessité une approche empirique (mesures prises in situ sur des cas réels) et explicative (causale) visant à lier entre les éléments de la façade et le comportement thermique engendré. Cette évaluation a été accompagnée d'une étude qualitative à travers une enquête (questionnaire auto-administré) qui a permis d'étudier la sensation et la satisfaction des utilisateurs vis-à-vis des conditions thermiques internes.

La partie pratique relative à l'étude et l'optimisation des éléments de la façade a été fondée sur une étude expérimentale à travers la réalisation de cellules tests à une échelle réduite ainsi qu'une simulation numérique par le logiciel de la simulation thermique dynamique TRNSYS.

Le choix de ces différentes méthodes a pour objectif de mieux comprendre les éléments étudiés en traitant plusieurs paramètres et en recoupant les techniques. Chaque technique présente des points forts et des points faibles, aussi, l'exploitation d'une méthode d'analyse (par exemple la simulation) complète le manque ou l'inconvénient d'une autre (par exemple les mesures in situ). Le travail sur terrain et les mesures accompagnées par des questionnaires ont permis de prendre des valeurs réelles avec des constats et des observations tout en exploitant la sensation et la satisfaction des usagers.

Comme tout travail de terrain, cette partie de l'étude a dû surmonter beaucoup d'obstacles liés aux conditions de faisabilité de l'enquête (possibilité de mesure pendant une seule journée dans les conditions naturelles c'est-à-dire sans chauffage ou climatisation car il est impossible de mesurer durant plusieurs jours dans des bureaux occupés et donc utilisant des appareils de conditionnement d'air). En comparaison, l'étude expérimentale offre une grande liberté concernant la période de mesure thermique (mesures pendant trois jours consécutifs afin de choisir la journée représentative), mais elle pose des difficultés pour étudier des paramètres précis influençant l'aspect énergétique. Pour ces raisons, la simulation a constitué un outil

performant qui combine entre la précision du calcul, la variabilité dans les conditions de mesures et la possibilité d'effectuer des études paramétriques ciblées en isolant l'influence de chaque élément.

## 7. Structure de la thèse

Afin d'aboutir aux objectifs escomptés, cette recherche fut scindée en deux parties réparties en sept chapitres constituant le corps du manuscrit en plus d'un chapitre introductif et d'une conclusion générale. La première partie est théorique-conceptuelle, elle englobe les trois premiers chapitres consacrés à la compréhension des concepts et des notions de base à travers une analyse bibliographique. La seconde s'étale du 4<sup>ème</sup> au 7<sup>ème</sup> chapitre. Le quatrième chapitre est considéré comme un point d'articulation et de passage entre la partie théorique et pratique, il consiste à établir un état de l'art sur les recherches effectuées sur le sujet, les différentes méthodes utilisées puis il situe le positionnement épistémologique de cette recherche dans le domaine scientifique. Les chapitres 5, 6 et 7 sont méthodologiques, pratiques et analytiques. Ils décrivent le contexte et le corpus de l'étude, la partie expérimentale et expliquent le protocole de la prise de mesures, la simulation et l'interprétation des résultats afin de répondre à la problématique posée en amont et vérifier les hypothèses qui la fondent.

La structure de cette thèse se décline comme suit :

- **Un chapitre introductif** : consacré à l'introduction générale qui synthétise le champ de l'étude, présente la formulation de la problématique et les hypothèses de la recherche. Il définit le contexte et les objectifs de la recherche puis il décrit l'analyse conceptuelle, explique la méthodologie utilisée et enfin il expose la structure de la thèse.
- **Le premier chapitre** : aborde la notion du climat d'une façon générale et se focalise sur le climat désertique chaud et aride. Il souligne la relation de l'architecture bioclimatique au contexte climatique. Il décrit les principes et les stratégies de l'approche bioclimatique et ses impacts sur la conception architecturale et la performance thermique et énergétique des bâtiments.
- **Le deuxième chapitre** : est scindé en deux parties ; dans la première, il donne un aperçu sur les bâtiments tertiaires et les immeubles de bureaux. Dans la seconde, il se concentre sur l'analyse et la classification de différents types de façades. A la fin, il aborde le sujet de la thermique du bâtiment et les aspects thermiques liés à la façade.

- **Le troisième chapitre** : aborde, en premier lieu, la notion du confort thermique selon différentes approches. Ensuite, il traite la problématique énergétique du secteur du bâtiment et décrit la relation entre les ambiances thermiques et la performance énergétique des constructions.

- **Le quatrième chapitre** : présente l'état des publications sur le sujet traité, notamment la question de la performance thermique et énergétique de la façade et ses éléments. Il dévoile le positionnement épistémologique de cette étude par rapport au champ des recherches existantes.

- **Le cinquième chapitre** : définit le contexte climatique de l'étude, décrit le corpus analysé ainsi que le protocole empirique élaboré pour la prise de mesures. Il analyse le comportement thermique de différentes variantes typologiques des façades figurant dans la ville étudiée (Biskra). Il évalue quantitativement l'impact des éléments de la façade sur le fonctionnement thermique du bâtiment. L'évaluation est également qualitative à travers une enquête qui accompagne les mesures de températures (la distribution d'un questionnaire durant les journées de la prise de mesures) l'objectif étant d'explorer la sensation thermique des utilisateurs.

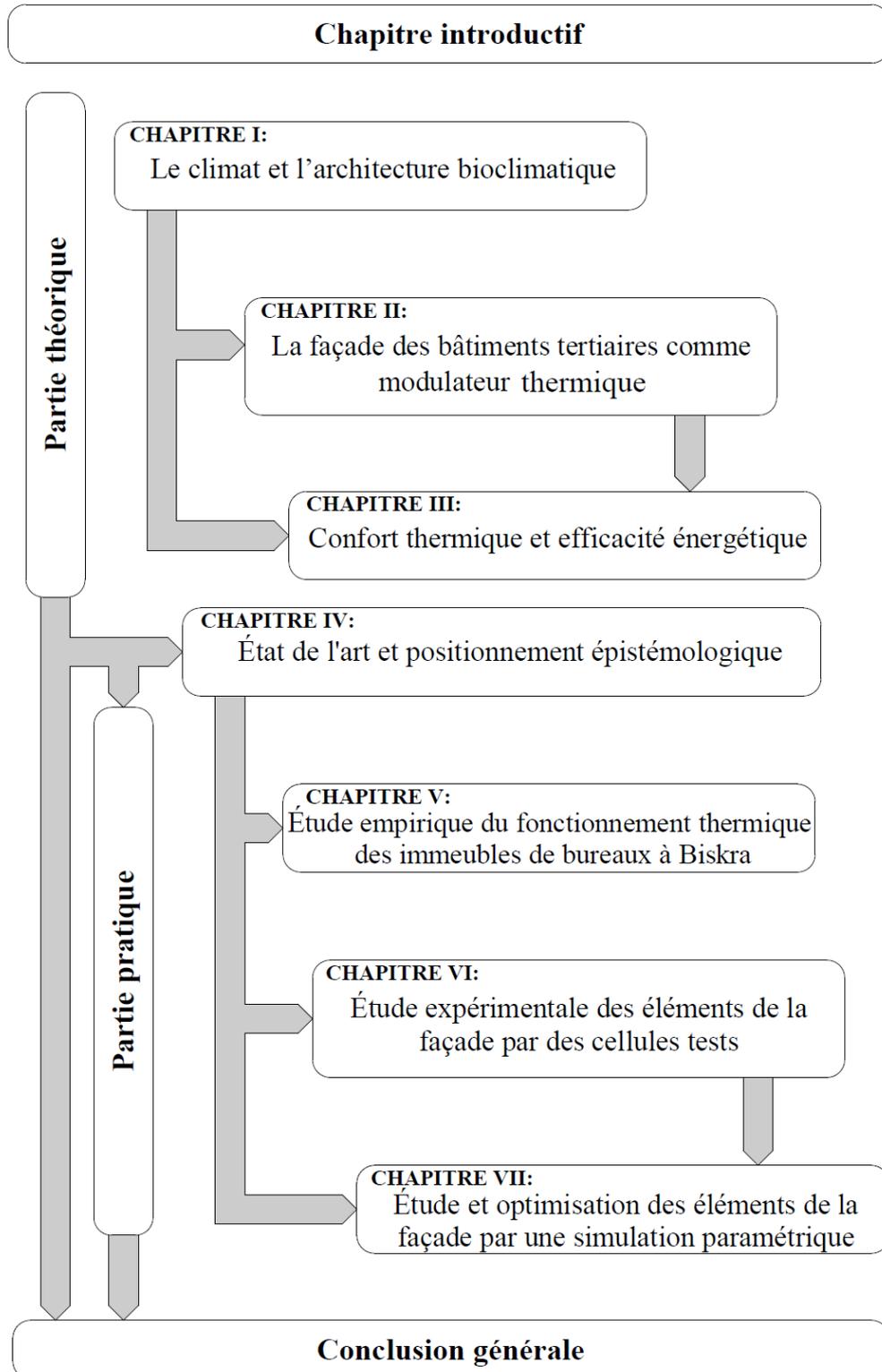
- **Le sixième chapitre** : fut consacré à l'étude expérimentale par des modèles réduits à travers la réalisation de cellules tests. Il donne un aperçu sur les études expérimentales par l'exploitation de cellules tests effectuées sous différents climats. Il décrit ensuite les détails relatifs au protocole expérimental élaboré pour les besoins de l'étude. Enfin, il analyse les résultats obtenus sur la base d'une comparaison entre le comportement thermique des quatre cellules réalisées.

- **Le septième chapitre** : est dédié au travail de simulation. En premier lieu, il définit le programme de la simulation thermique dynamique utilisé (TRNSYS) et décrit les modèles numériques simulés ainsi que les détails de l'étude et l'optimisation paramétrique effectuée sur les éléments de la façade. Par la suite, il analyse les résultats obtenus afin de démontrer l'impact de chaque élément sur le confort thermique des usagers et la performance énergétique du bâtiment.

Finalement, cette thèse est parachevée par une **conclusion générale** qui résume toutes les étapes de la recherche et donne un ensemble de recommandations propices et probantes pour optimiser le comportement de la façade des bâtiments tertiaires sous un climat chaud et aride

tout en assurant une ambiance thermique confortable et une consommation énergétique rationnelle.

La figure 2 illustre un schéma qui synthétise la structure de cette thèse.



**Figure 2 :** Structure de la thèse (Source : Auteur, 2018)

**PREMIÈRE PARTIE :**

**L'INFLUENCE DU CLIMAT SUR L'ENVELOPPE  
DU BÂTIMENT ET LE CONFORT THERMIQUE  
DES USAGERS**

# **CHAPITRE I :**

## **Le climat et l'architecture bioclimatique**

Ce chapitre est consacré à l'analyse du climat à l'échelle mondiale puis il focalise sur le climat désertique chaud et sec et ses spécificités. Il aborde la relation de l'architecture avec le climat à travers l'étude de l'approche de l'architecture bioclimatique tout en définissant ses différentes stratégies ainsi que les principes utilisés afin d'assurer le bien-être de l'occupant, la performance de la construction et l'équilibre avec l'environnement.

*« La compréhension des phénomènes physiques de base liés au climat est essentielle à la bonne gestion d'un projet d'architecture »*

Fernandez et Lavigne (2009)

*« L'architecture bioclimatique est l'un des éléments les plus intéressants pour redresser la barre et redonner à l'architecture sa qualité vitale »*

*Alain GUYOT*

## **CHAPITRE I : Le climat et l'architecture bioclimatique**

### **Introduction**

Une nécessité sine qua non s'impose à tout concepteur de s'enquérir d'avance sur les conditions climatiques du contexte où il intervient vu leurs impacts déterminants sur la performance climatique et énergétique du futur bâtiment. Selon Givoni (1978), avoir une idée précise sur les spécificités climatiques du contexte et les prendre en considération pendant la conception, est le seul moyen pour le concepteur d'assurer une réponse architecturale réussie en termes d'intégration dans l'environnement et de la maîtrise des potentiels disponibles. Cette approche conceptuelle « climatique » ou encore « bioclimatique » a fini par s'imposer en tant que démarche qui se fonde sur une relation étroite et harmonieuse entre le climat et l'architecture à la recherche de la meilleure adéquation entre l'occupant, la construction et l'environnement. Le présent chapitre présente les différentes notions relatives au climat, à l'approche bioclimatique et aux stratégies conceptuelles fondamentales pour réaliser un bâtiment climatiquement intégré.

### **I.1. Le Climat**

Le climat regroupe plusieurs paramètres et phénomènes météorologiques tels que la température, l'humidité de l'air, les précipitations, l'ensoleillement, la pression, les vents et tout ce qui caractérise un lieu. Il varie selon plusieurs paramètres comme les reliefs, la latitude, la couverture végétale et la présence de l'eau.

Il existe plusieurs définitions du climat. D'après Givoni (1978), le climat est le résultat de la combinaison de plusieurs éléments climatiques. Dans le dictionnaire la rousse<sup>1</sup>, le climat désigne l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné. Selon le GIEC<sup>2</sup>, le climat est une moyenne des variables

---

<sup>1</sup> Définition du climat. (2018). Dictionnaire la rousse. Repéré à : [www.larousse.fr/dictionnaires/francais/climat](http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/climat)

<sup>2</sup> GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

(température, précipitation, etc.) durant une longue période. Cette période est au moins de 30 ans selon l'OMM<sup>3</sup> (2011).

L'ensemble des paramètres climatiques composent un système climatique. D'après le « guide des pratiques climatologiques » élaboré par l'OMM (2011), le système climatique est très complexe, interactif et englobe plusieurs composants (l'atmosphère, la surface terrestre, l'eau, etc.).

Selon Swingedouw (2014), le système climatique constitue plusieurs composantes en interaction (atmosphère, l'océan, banquise, surfaces continentales, végétations, calottes glaciaires, etc.). De son côté, il est considéré comme un système ouvert et dynamique à travers les échanges avec l'extérieur.

### **I.1.1. Les facteurs du climat**

Dans le domaine de la climatologie, il existe plusieurs classifications des facteurs du climat dans la littérature. Parmi ces classifications, il y a celle qui englobe les deux facteurs suivants :

- Des facteurs cosmiques (l'atmosphère, la latitude et les mouvements de la terre) ;
- Des facteurs géographiques (l'altitude, les reliefs et la végétation).

Une autre classification qui regroupe trois facteurs :

- Des facteurs énergétiques (rayonnement et température) ;
- Des facteurs hydrologiques (hygrométrie et précipitations) ;
- Des facteurs mécaniques (les vents).

### **I.1.2. Les éléments du climat**

Le climat est composé de plusieurs éléments variant d'un endroit à un autre. D'après l'Organisation Météorologique Mondiale (2011), les éléments les plus utilisés en climatologie sont les suivants :

- La température de l'air ;
- Les précipitations (pluie et neige) ;
- L'humidité ;
- Les mouvements atmosphériques (vitesse et direction des vents) ;

---

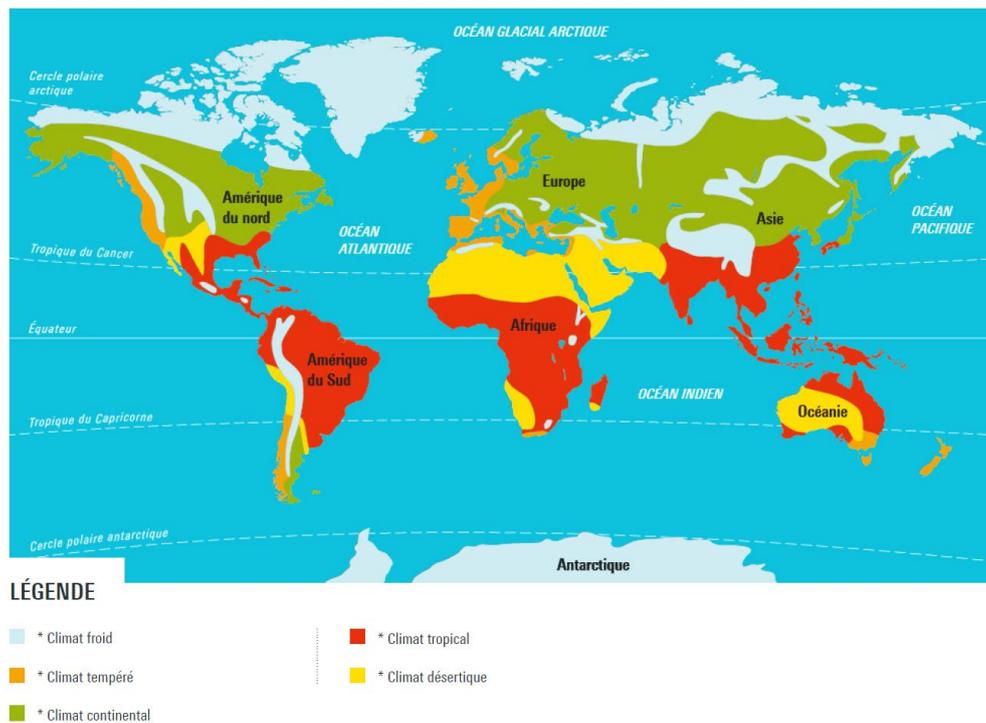
<sup>3</sup> OMM : Organisation Météorologique Mondiale, Repéré à : [www.library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_100\\_fr.pdf](http://www.library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_fr.pdf)

- L'insolation ;
- La pression.

L'analyse des zones climatiques consiste à prendre ces éléments climatiques en considération afin de comprendre le système climatique de la zone d'étude.

### I.1.3. La classification du climat mondial

La classification mondiale du climat est basée sur certains paramètres tels que la température, les précipitations, l'humidité et la végétation. La plus part des classifications utilisent principalement la température et les précipitations. Sur la base de ces deux paramètres, il existe plusieurs classifications du climat dans le monde sous forme de cartes climatiques. L'une de ces cartes répartit le monde en cinq grandes zones climatiques : le climat froid, tempéré, continental, tropical et désertique (Figure 1.1).

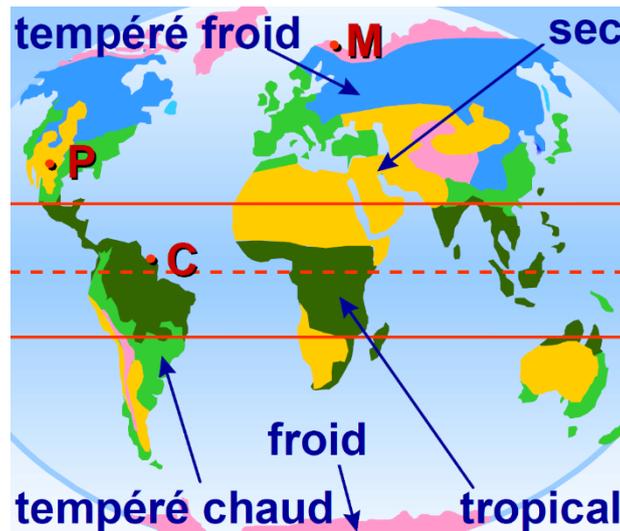


**Figure 1.1** : La carte climatique mondiale (Source : [www.carte-du-monde.net](http://www.carte-du-monde.net))

- Le climat froid : se trouve dans les deux pôles et les montagnes où l'altitude est très élevée, il est caractérisé par des températures froides (très basse) pendant toute l'année ;
- Le climat tempéré : se localise près des océans, il est caractérisé par des températures moyennes durant toute l'année ;
- Le climat continental : caractérisé par un hiver très froid ;

- Le climat tropical : se situe près de l'équateur, il est caractérisé par des températures très chaudes ;
- Le climat désertique : est caractérisé par la sécheresse.

Liébard et De Herde (2005) voient qu'il existe cinq types de climat selon la température et l'humidité : climat tropical, climat sec, climat tempéré chaud, climat tempéré froid et climat froid (Figure 1.2).



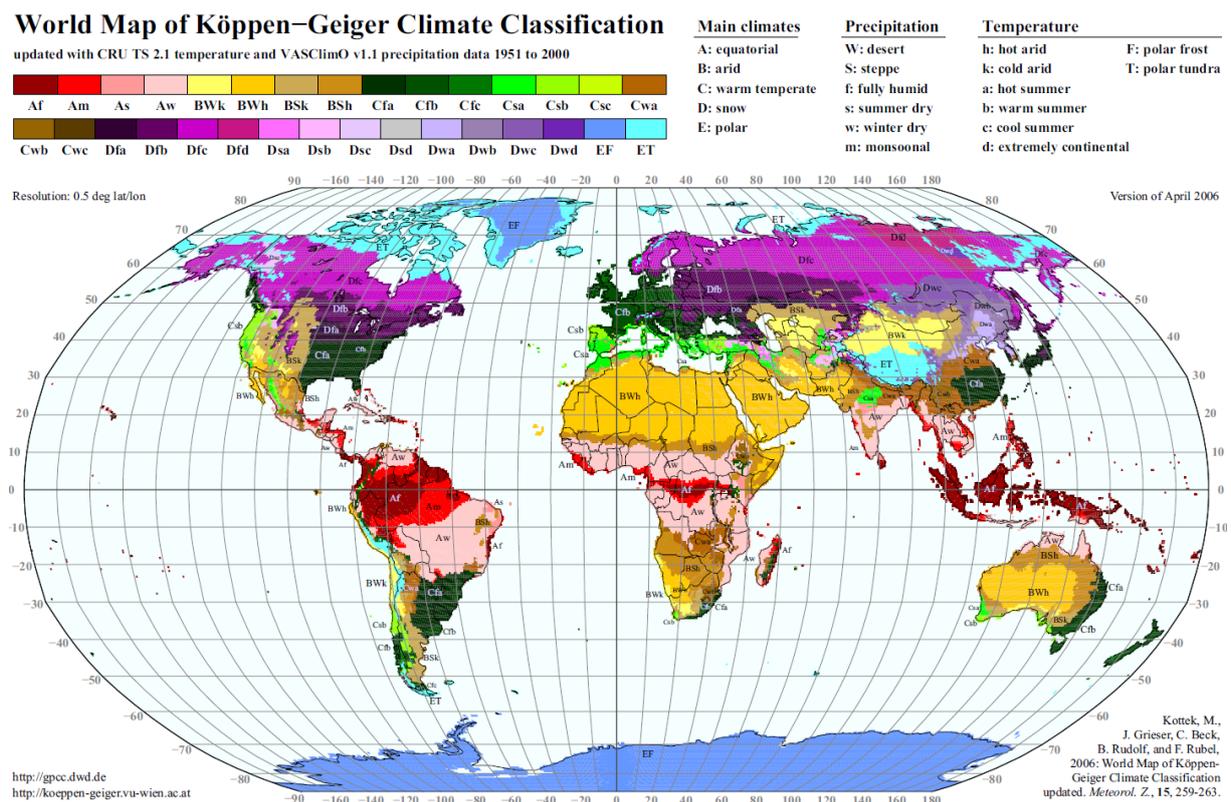
**Figure 1.2** : La carte climatique mondiale selon la température et l'humidité  
(Source : Liébard et De Herde, 2005)

- Le climat tropical : caractérisé par des valeurs de températures assez élevées et un taux d'humidité très élevé ;
- Le climat sec : caractérisé par des températures très élevées et une humidité très faible ;
- Les climats tempérés : sont caractérisés par des températures moyennes et un taux d'humidité très élevé ;
- Le climat froid : caractérisé par des températures très basses et un taux d'humidité très élevé.

Dans le domaine de la climatologie, la classification la plus utilisée dans le monde est la classification de Köppen-Geiger. C'est une classification basée sur la température et les précipitations, elle est inventée par le scientifique Allemand « Wladimir Köppen » et présentée par « Rudolf Geiger ». Cette classification répartit la carte mondiale en cinq zones climatiques (tropical, sec, tempéré, continental et polaire) avec un codage de deux à trois lettres afin de caractériser chaque type d'une manière précise en terme de température et précipitation (Veltz, 2015) ce qui donne plus de trente sous-zones climatiques dans le monde.

Dans la même perspective, Kottek et al. (2006) confirment que la carte de classification climatique la plus fréquemment utilisée est celle de Köppen-Geiger. De leur côté, cette classification est considérée comme référence dans le domaine de la climatologie. Elle a connu plusieurs mises à jour publiées selon le site officiel de Köppen-Geiger tels que les travaux de (Kottek et al., 2006), (Rubel et Kottek, 2010) et (Rubel et al., 2017).

La figure 1.3 illustre la carte de classification climatique de Köppen-Geiger avec la mise à jour de (Kottek et al., 2006).



**Figure 1.3 :** La carte de classification climatique de Köppen-Geiger avec la mise à jour de Kottek (Source : Kottek et al., 2006)

#### I.1.4. Le climat désertique

D'après la classification climatique de Köppen-Geiger, le climat désertique est divisé en deux zones climatiques dans le monde selon les valeurs des températures et des précipitations comme suit :

- Un climat désertique froid et sec "BWk" ;
- Un climat désertique chaud et sec "BWh".

Le tableau 1.1 illustre une comparaison entre les deux climats désertiques froid et chaud.

**Tableau 1.1** : Une comparaison entre le climat désertique froid-sec et chaud-sec

(Source : Hufty, 2001)

	Climat désertique froid et sec (BWk)	Climat désertique chaud et sec (BWh)
La température	La température moyenne annuelle est inférieure à 18 °C	La température moyenne annuelle est supérieure à 18 °C
Les précipitations	-Les précipitations sont régulières durant toute l'année -Les précipitations du mois le plus sec sont supérieures à 60 mm	-Les précipitations sont rares et irrégulières -Les précipitations annuelles inférieures à 50 % du seuil
L'évaporation	L'évaporation annuelle est inférieure aux précipitations annuelles	L'évaporation annuelle est supérieure aux précipitations annuelles

## I.2. L'approche bioclimatique

L'histoire de l'humanité est un processus successif de plusieurs opérations de construction, de déconstruction et de reconstruction (Krummenacher, 2005) ce qui développe le savoir-faire humain. Depuis l'antiquité, l'homme construit son abri pour répondre à un besoin afin d'assurer son confort et ce n'est pas pour le mode ou le prestige (Dutreix, 2010). Avec cette manière, les anciens ont développé des expériences en termes d'intégration dans l'environnement ainsi que la maîtrise des potentiels disponibles (le site, les matériaux et les éléments locaux) ce qui ont permis de s'adapter avec le contexte quelles que soient les conditions.

L'architecture bioclimatique n'est pas une invention du siècle, c'est une architecture existante depuis longtemps, mais elle est négligée après l'apparition des nouvelles technologies et techniques tels que les équipements de chauffage et de climatisation (Fuchs, 2007). L'apparition des nouvelles tendances en architecture et le développement des matériaux et les techniques de construction influent également d'une manière négative sur cette architecture.

Chesné (2012) dans sa thèse, a donné une définition globale sur l'architecture respectueuse de l'environnement. De son côté, il voit que l'architecture bioclimatique est une

façon de construction qui prend en considération l'environnement et le concept global qui est appelé « architecture climatique » ou « architecture naturelle ». Selon lui, il existe plusieurs appellations selon l'élément traité. Si la prise en compte de l'environnement avec les matériaux, les émissions de gaz à effet de serre, la gestion de l'eau et des déchets c'est une « architecture écologique », « architecture durable » ou « architecture verte ». Si l'aspect prépondérant est l'exploitation des ressources énergétiques en particulier le soleil c'est une « architecture solaire » ou « architecture passive ».

### **I.2.1. L'architecture bioclimatique**

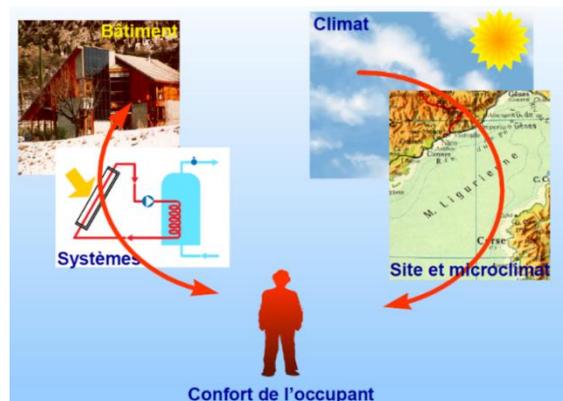
Le concept de l'architecture bioclimatique désigne une méthode de conception et de construction qui prend en considération les particularités contextuelles afin d'assurer le confort des occupants et établir une harmonie entre la construction et la nature. Selon l'architecte Krummenacher (2005), « *Le concept d'architecture bioclimatique est basé sur la recherche de la meilleure adéquation entre la conception et la construction de l'habitat, le climat, l'environnement dans lequel il s'implante ainsi que l'habitant et ses rythmes de vie* ». Il insiste sur l'importance du contexte qui est approprié à chaque lieu et les expériences développées au fil du temps, pour lui « *L'architecture bioclimatique est très contextuelle ; elle met au premier plan les ressources et les savoir-faire locaux* ». Ce point de vue a été confirmé par Gamboa (2016) où il voit que l'architecture bioclimatique exploite au maximum le meilleur parti du site et du savoir-faire.

Fernandez et Lavigne (2009), dans leur livre « *Concevoir des bâtiments bioclimatiques* » donnent des bonnes explications sur l'approche bioclimatique. Ils voient que « *le terme bioclimatique fait référence à une partie de l'écologie qui étudie plus particulièrement les relations entre les êtres vivants et le climat* ».

Belkacem (2017) définit l'architecture bioclimatique comme discipline qui s'inspire du site et de l'environnement afin d'assurer le confort des utilisateurs de l'espace. Elle voit que cette architecture se réfère à la bioclimatologie qui étudie les effets entre le climat et les êtres vivants.

Selon l'architecte De Asiain (2010), le noyau central de l'architecture bioclimatique est basé sur le confort des usagers à travers l'exploitation des stratégies bioclimatiques et les ressources offertes par le site (la typologie, les matériaux et le système constructif). Cette architecture basée sur la détermination des besoins, les conditions locales et les potentiels disponibles.

D'après Liébard et De Herde (2005), l'architecture bioclimatique est une architecture qui place le confort de l'utilisateur au cœur de ses préoccupations (Figure 1.4).

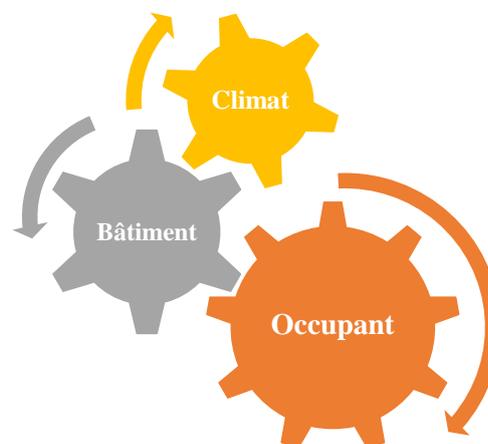


**Figure 1.4 :** La relation entre l'utilisateur, le climat et le bâtiment selon l'approche bioclimatique (Source : Liébard et De Herde, 2005)

De leur côté, le bien-être des occupants est placé au premier plan qu'il faut assurer d'une manière passive avant le recours à l'intégration des installations techniques. L'architecture bioclimatique est concrétisée uniquement si la conception est adéquate sans qu'il y ait de situations d'inconfort.

À son tour Salomon (2000), voit que « *la conception bioclimatique c'est avant tout l'art de bâtir en associant au mieux l'homme et son environnement en s'appuyant sur une démarche cohérente* ».

Sur la base de toutes ces définitions, l'architecture bioclimatique est une manière conceptuelle et constructive qui cherche à garantir le confort de l'occupant et établir un bon rapport entre la trilogie « occupant, bâtiment et climat » (Figure 1.5).



**Figure 1.5 :** La trilogie de l'architecture bioclimatique (Source : Auteur, 2018)

Dans cette trilogie, l'occupant ou l'utilisateur de l'espace occupe une position importante. Il est considéré comme l'élément principal et le « moteur » de la démarche bioclimatique. Le bâtiment joue un rôle intermédiaire et d'interaction entre l'occupant et le climat (l'environnement) où à travers sa conception et les stratégies bioclimatiques adoptées va exploiter les avantages du climat et du site et résoudre les problèmes rencontrés afin d'assurer le bien-être de l'occupant tout en réduisant les impacts environnementaux indésirables.

### **I.2.2. Les objectifs de l'architecture bioclimatique**

L'objectif essentiel de l'architecture bioclimatique est d'assurer le confort des usagers à travers la réalisation des constructions contextuellement appropriées et performantes tout en minimisant la consommation énergétique et les impacts négatifs sur l'environnement.

À ce propos, Fernandez et Lavigne (2009), voient que l'objectif de l'architecture bioclimatique est l'amélioration du confort de l'utilisateur d'une manière naturelle tout en réduisant le recours aux sources épuisables et les effets négatifs sur l'environnement. De leur côté, l'architecture bioclimatique est « *le plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui en fait un élément fondamental de l'art de l'architecture* ».

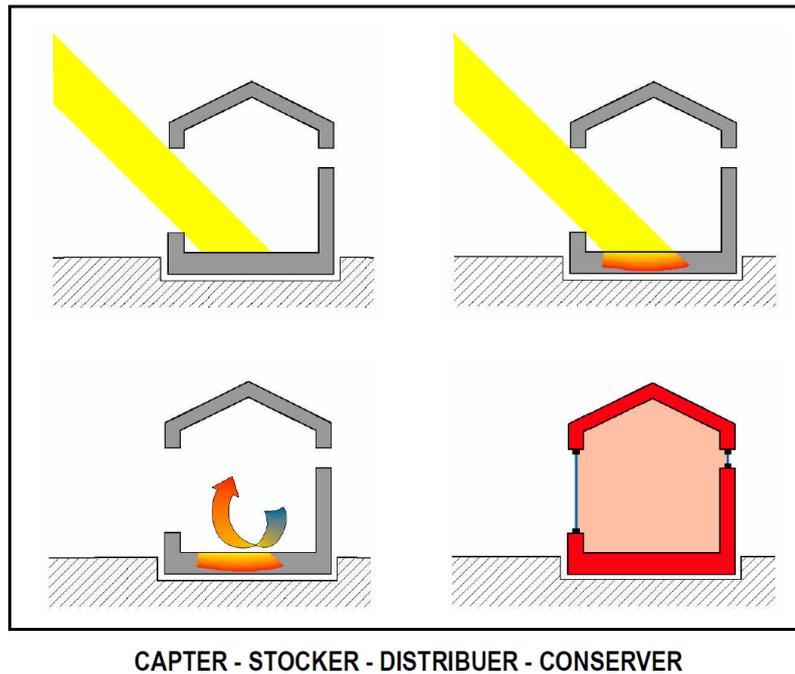
Selon Chesné (2012), l'objectif primordial de l'architecture bioclimatique est de concevoir des constructions naturelles bien intégrées dans l'environnement.

### **I.2.3. Les stratégies de l'architecture bioclimatique**

L'architecture bioclimatique est basée sur trois stratégies, la stratégie du chaud (ou d'hiver) lorsqu'il est nécessaire de chauffer la construction, la stratégie du froid (ou d'été) lorsqu'il est nécessaire de refroidir le bâtiment et la stratégie de l'éclairage naturel relative au captage et l'emploi de la lumière naturelle (Krummenacher, 2005).

#### **I.2.3.1. La stratégie du chaud**

Durant la période froide, la stratégie du chaud consiste à capter la chaleur du rayonnement solaire et la stocker dans la masse des matériaux de construction, la conserver par l'isolation et par la suite la distribuer dans le bâtiment ce qui permet de se protéger du froid et profiter aux maximum des apports solaires (Liébard et De Herde, 2005 ; Tixier, 2003 ; Belkacem, 2017) comme il est illustré dans la figure 1.6.



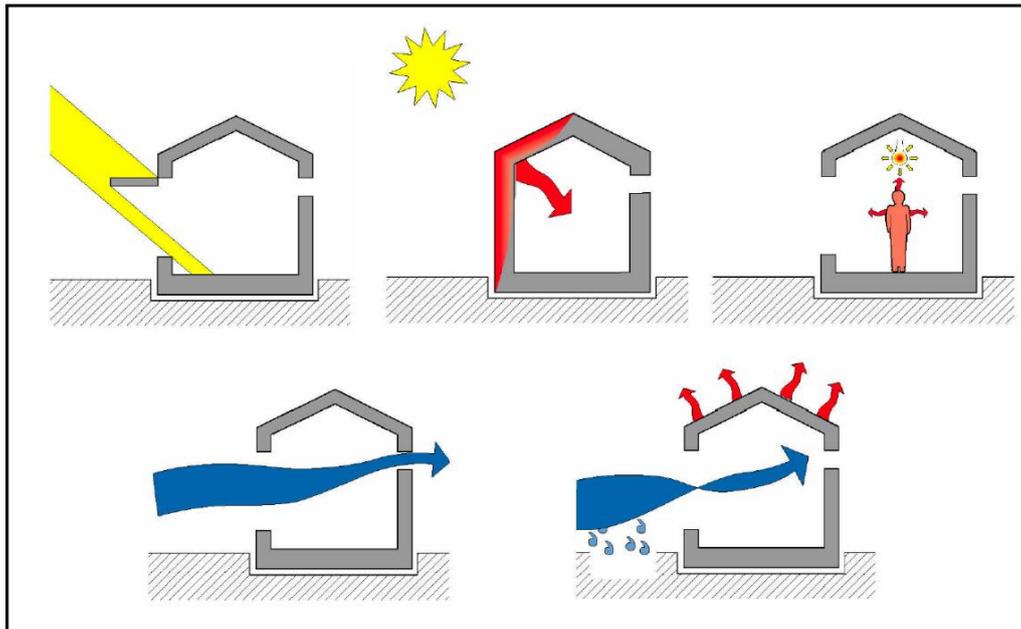
**Figure 1.6 :** La stratégie du chaud (Source : Tixier, 2003)

Selon Misse (2011), chaque étape nécessite une étude approfondie de quelques paramètres comme suit :

- Capter : il faut bien étudier les orientations, les ouvertures, les inclinaisons et les masques gênants (ou les obstructions) ;
- Stocker : il faut bien maîtriser l'inertie thermique par absorption ;
- Distribuer : il faut assurer une meilleure répartition possible dans les différents espaces et niveaux ;
- Conserver : à travers la prise en compte de l'utilisation de l'isolation thermique, la compacité du volume et l'emploi des espaces tampons.

### **I.2.3.2. La stratégie du froid**

Durant la période chaude, le bâtiment suit la stratégie du froid qui consiste à protéger le bâtiment du rayonnement solaire et les apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir à travers la ventilation naturelle, l'eau ou la végétation (Figure 1.7), ce qui permet de se préserver du rayonnements solaires (Liébard et De Herde, 2005 ; Tixier, 2003 ; Belkacem, 2017).



PROTEGER - EVITER - DISSIPER - RAFRAÎCHIR - MINIMISER

**Figure 1.7 :** La stratégie du froid (Source : Tixier, 2003)

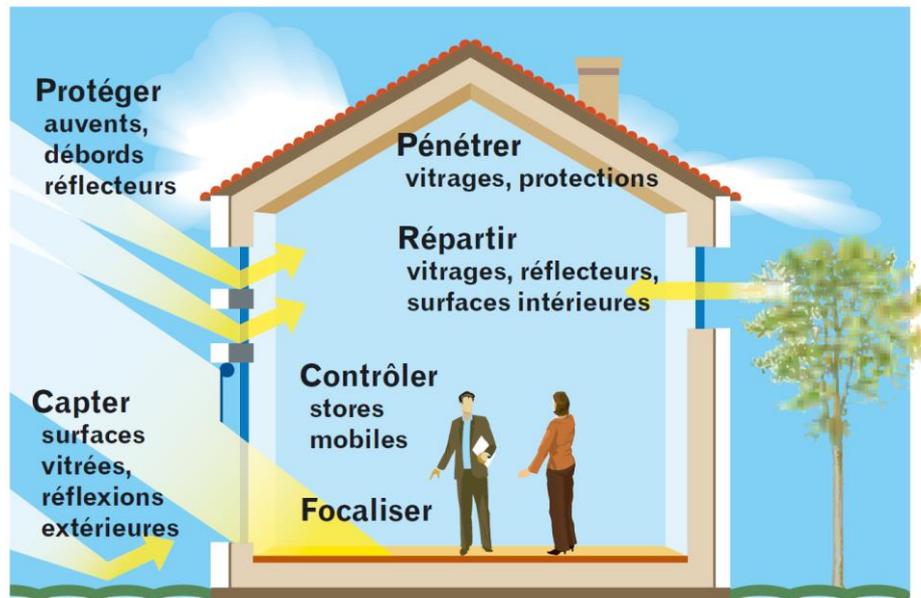
D'après Misse (2011), les paramètres qu'il faut prendre en considération dans chaque étape sont comme suit :

- Protéger ou contrôler : à travers l'étude de l'orientation, l'inclinaison et la protection des ouvertures et l'utilisation des dispositifs d'ombrage ;
- Éviter : par la prise en compte de la compacité du bâtiment (le rapport entre la surface et le volume), l'utilisation des espaces tampons et l'inertie thermique des matériaux ;
- Dissiper ou ventiler : à travers l'étude des possibilités de la ventilation, l'évacuation verticale, l'exploitation de l'inertie utile et les dispositifs de rafraîchissement particulier ;
- Rafraîchir ou refroidir : à travers l'évapotranspiration par l'utilisation des bassins d'eau et de la végétation, le puits canadien, etc. ;
- Minimiser : par la réduction des apports internes.

### I.2.3.3. La stratégie de l'éclairage naturel

L'architecture bioclimatique traite aussi l'aspect de l'éclairage naturel. Cette stratégie consiste à capter les rayonnements et assurer la pénétration de la lumière naturelle dans la construction. Puis elle vise à la répartir d'une manière homogène et la focalise selon des méthodes tout en évitant l'inconfort visuel (Figure 1.8). Cette stratégie offre l'exploitation de la

lumière naturelle et réduit la quantité de l'énergie électrique consacrée à l'éclairage (Liébard et De Herde, 2005 ; Belkacem, 2017).



**Figure 1.8** : La stratégie de l'éclairage naturel

(Source : Liébard et De Herde, 2005, infographie Fabrice Mathé)

D'après Liébard et De Herde (2005), les paramètres qu'il faut prendre en compte sont comme suit :

- Capter et pénétrer : à travers l'étude de la surface vitrée et le type de vitrage ainsi que la nature des surfaces de l'environnement extérieur (les réflexions extérieures) ;
- Répartir : par la prise en considération des caractéristiques du vitrage, les propriétés surfaciques internes (couleur et texture) et l'exploitation des dispositifs (réflecteurs, des obstacles, etc.) ;
- Protéger et contrôler : grâce à l'exploitation des protections solaires fixes et des éléments architecturaux (auvents, débords, réflecteurs, moucharabieh, light shelves) ou mobiles (stores, volets, etc.).
- Focaliser : à travers les différents types des ouvertures par un éclairage zénithale ou latérale afin de donner de l'importance à un élément.

#### **I.2.4. Les principes de l'architecture bioclimatique**

Chesné (2012) voit qu'il est impossible de donner une définition précise et détaillée des principes de la conception bioclimatique vu la nature de l'architecture bioclimatique elle-même, qui est basée sur l'adaptation à l'environnement local approprié à chaque lieu. Il ajoute que les

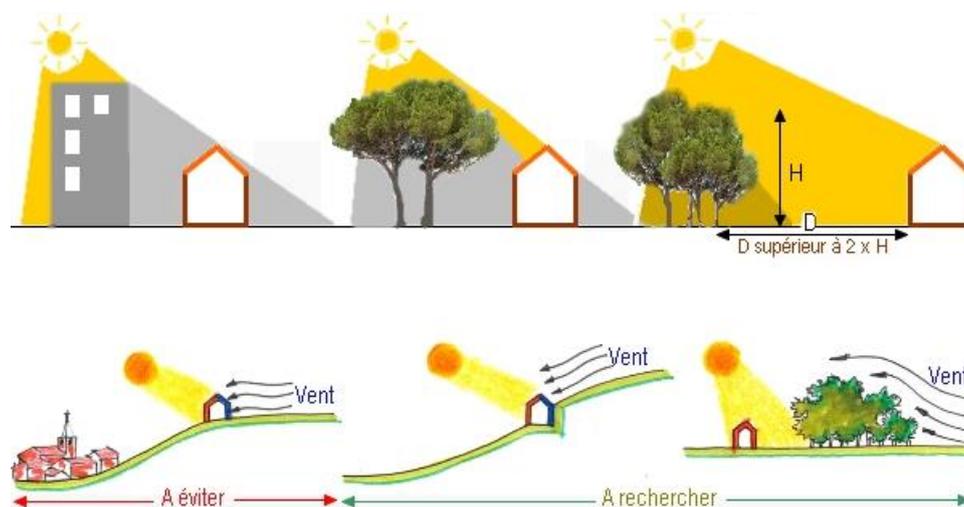
conseils disponibles dans les ouvrages de l'architecture bioclimatique ne sont pas applicables dans tous les cas mais uniquement dans des contextes spécifiques.

Dans la littérature, il existe plusieurs classifications des principes de l'architecture bioclimatique, d'une manière générale en rapport avec le contexte immédiat du projet, la forme de la construction, les matériaux de construction utilisés et leurs sources ainsi que la répartition spatiale interne du bâtiment. Selon Oliva et Courgey (2006), l'élément de base de l'architecture bioclimatique est de « *construire et vivre avec le climat et non contre lui* ».

Fernandez et Lavigne (2009), dans le livre « Concevoir des bâtiments bioclimatiques », ils voient que les principes de l'architecture bioclimatique sont regroupés dans quatre paramètres fondamentaux : l'implantation du bâtiment, la morphologie du bâtiment, les matériaux de construction et la distribution des espaces intérieurs.

#### I.2.4.1. L'implantation et orientation du bâtiment

L'intégration ou l'implantation de la construction dans un site (exposé ou protégé) et dans son environnement immédiat (naturel ou urbain) est une étape essentielle dans le processus de la conception architecturale qui influe d'une manière importante sur le fonctionnement de la bâtisse et sa performance sur plusieurs plans (Figure 1.9).

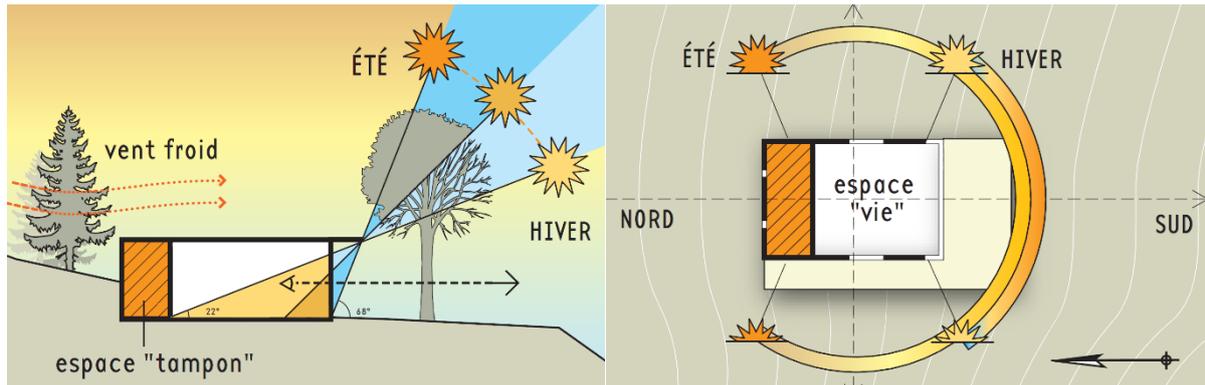


**Figure 1.9 :** L'impact du site et l'environnement immédiat sur le bâtiment

(Source : Miquey, 2010)

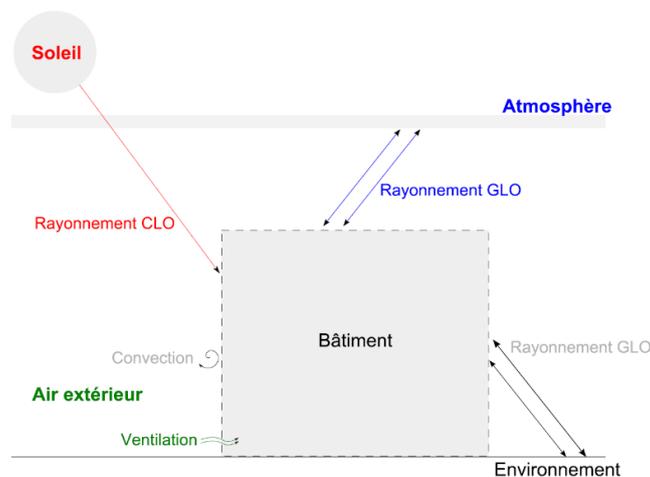
Cette étape fondamentale nécessite une analyse approfondie sur les caractéristiques du site et ses spécificités, la détermination des potentielles et les problèmes (les avantages et les inconvénients) afin d'aboutir à une conception adéquate et performante en harmonie avec le climat, l'environnement et les besoins des occupants.

L'implantation et le choix de l'orientation nécessite la prise en considération de plusieurs éléments : le climat (température, humidité, les vents, etc.), le relief (le sens de la pente), le contexte (naturel ou urbain), la végétation (à feuillage caduc ou persistant), le type du terrain (les caractéristiques du sol, l'albédo, etc.) ainsi que l'évolution possible avec le temps comme les extensions et la croissance de la végétation (Fernandez et Lavigne, 2009). La figure 1.10 illustre quelques paramètres qu'il faut prendre en compte dans l'implantation et le choix de l'orientation d'un bâtiment.



**Figure 1.10 :** Exemple des principaux paramètres de l'implantation et du choix de l'orientation (Source : Misse, 2011)

Cette figure donne une idée globale sur l'importance du choix du site de l'implantation et l'orientation du bâtiment pendant l'hiver et l'été. L'implantation détermine les apports solaires, l'éclairage et les déperditions (Liébard et De Herde, 2005). Du point de vue énergétique, le bâtiment est influencé par son environnement où il est implanté sous l'impact de plusieurs paramètres climatiques et contextuels (Chesné, 2012) comme il est présenté dans la figure 1.11.

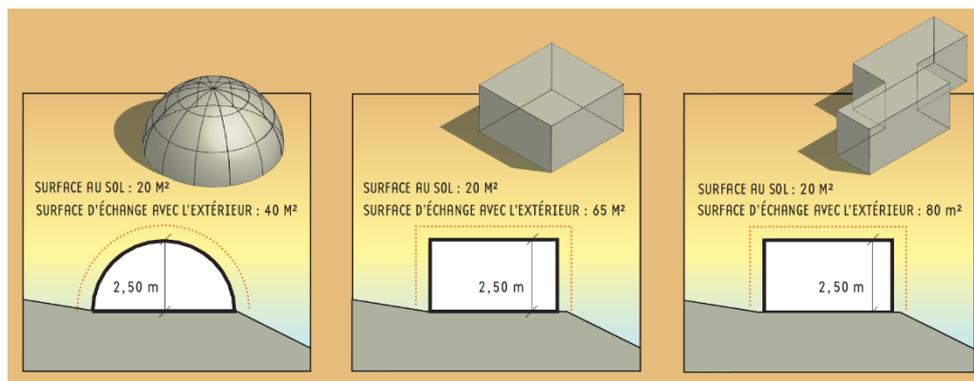


**Figure 1.11 :** Schéma des interactions énergétiques entre le bâtiment et son environnement (Source : Chesné, 2012)

La quasi-totalité des échanges énergétiques entre la construction et l'environnement se font par un transfert radiatif. Ce transfert est effectué soit par un rayonnement en courtes longueurs d'ondes (CLO : principalement le soleil) ou par un rayonnement en grandes longueurs d'ondes (GLO : la voûte céleste, le sol, la végétation, les constructions avoisinantes) (Chesné, 2012).

### I.2.4.2. La morphologie du bâtiment

La morphologie du bâtiment est un paramètre très important qui détermine les surfaces d'échange entre l'intérieur et l'extérieur ce qui influe sur la performance énergétique de la construction. L'exploitation optimale de l'enveloppe du bâtiment est un principe essentiel de l'architecture bioclimatique (Chesné et al., 2012). La figure 1.12 illustre une démonstration relative à l'impact de différentes formes de la même surface du sol occupée sur le changement de la surface d'échange avec l'extérieur.



**Figure 1.12 :** L'impact de la forme sur la surface d'échange (Source : Misse, 2011)

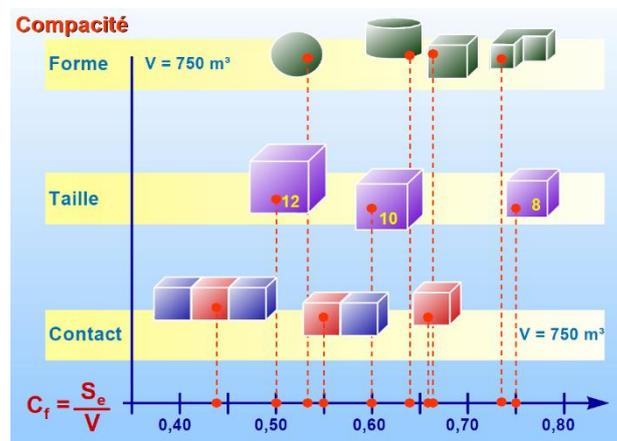
La forme qui représente moins de surfaces d'échange avec l'extérieur est celle qui est caractérisée par la compacité du volume.

La compacité ou le coefficient de forme (Cf) permet de qualifier les volumes construits et le degré de l'exposition de ses surfaces aux conditions climatiques (Liébard et De Herde, 2005). Ce coefficient est mesuré par le rapport entre les surfaces de l'enveloppe en contact avec l'extérieur sur le volume habitable comme le démontre la formule suivante :

$$Cf = \frac{S (m^2)}{V (m^3)}$$

Selon Liébard et De Herde (2005), la compacité des volumes est un critère d'évaluation thermique très important mais il est délicat car il varie selon plusieurs facteurs. Sur la base

d'une analyse géométrique, ils ont proposé un diagramme de comparaison présentant les variations de la compacité selon la forme, la taille et le mode de contact (Figure 1.13).



**Figure 1.13 :** Les variations de la compacité selon la forme, la taille et le mode de contact  
(Source : Liébard et De Herde, 2005)

Un coefficient de forme ( $C_f$ ) faible indique que la forme est compacte, donc moins de surfaces d'échange avec l'extérieur et moins de déperditions énergétiques. Le cas contraire, si le coefficient de forme ( $C_f$ ) est élevé, donc il y a plus de surfaces exposées qui engendrent de grandes déperditions énergétiques.

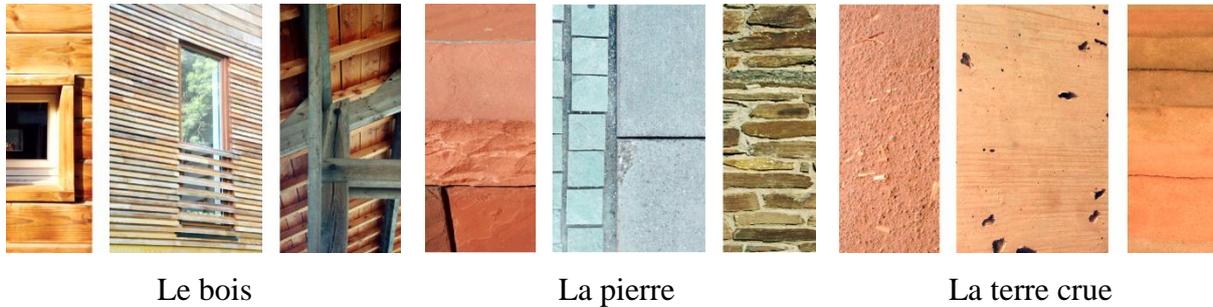
#### I.2.4.3. Les matériaux de construction

Les matériaux de construction sont un élément clé dans la conception bioclimatique. L'utilisation des matériaux de construction est déterminée par plusieurs paramètres tels que les caractéristiques thermiques (conductivité et résistance), les besoins, le type du bâtiment, le système constructif et la nature du climat (Cristina et al., 2011). L'architecture traditionnelle est caractérisée par l'utilisation des matériaux locaux (Kottas, 2016) (Figure 1.14).



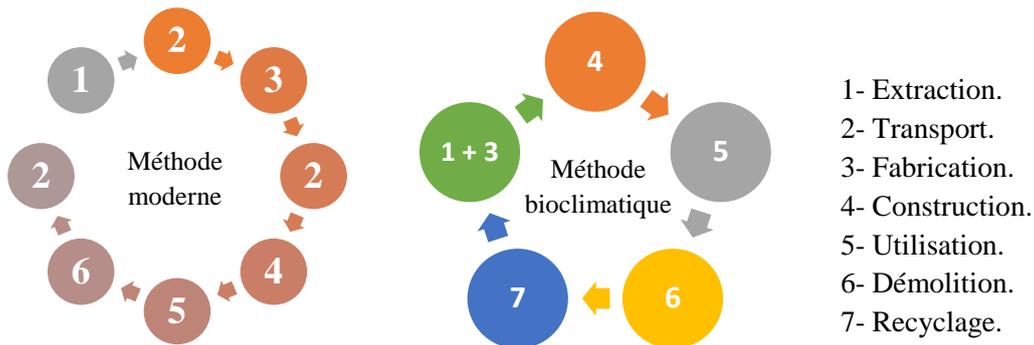
**Figure 1.14 :** L'utilisation des matériaux locaux dans l'architecture traditionnelle  
(Source : Misse, 2011)

L'architecture bioclimatique consiste à utiliser des matériaux locaux disponibles dans le site pour plusieurs raisons tels que le faible coût d'extraction et afin d'éviter l'utilisation des moyens de transport (coût et émission de gaz). La recherche des matériaux à moins d'impact sur l'environnement guide sûrement à l'exploitation des matériaux locaux tels que le bois, la pierre, la terre et l'argile (Fernandez et Lavigne, 2009) comme l'illustre la figure 1.15.



**Figure 1.15 :** Exemple des matériaux bioclimatiques (Source : Trachte, 2012)

La figure 1.16 présente une comparaison relative à l'exploitation des matériaux de construction selon une méthode moderne et une méthode bioclimatique.



**Figure 1.16 :** Comparaison de l'utilisation des matériaux selon la méthode moderne et bioclimatique (Source : Auteur, 2018)

La méthode moderne est basée sur l'utilisation des moyens de transport (N° 2) d'une manière excessive entre toutes les phases, ce qui influe directement sur l'augmentation du coût des matériaux et la dégradation de l'environnement (les émissions de gaz). Dans la plus part des cas, il n'existe pas une phase de recyclage après la démolition du bâtiment et si elle existe elle est très limitée.

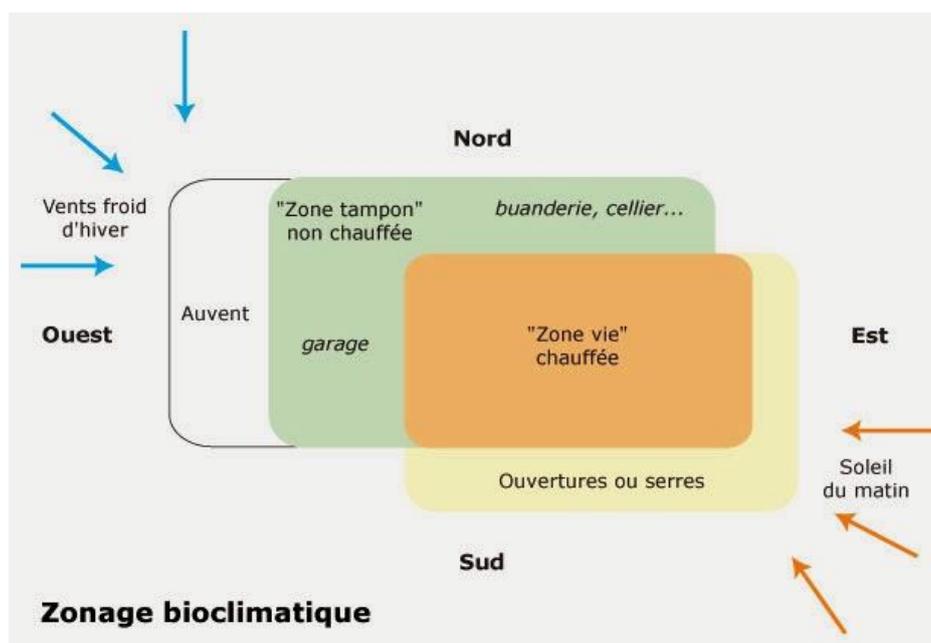
Par contre la méthode bioclimatique est basée sur l'utilisation des matériaux locaux pour éviter les impacts négatifs du transport où les opérations de l'extraction et la fabrication

(N° 1 et 3) se font près du site de la construction (N° 4) et après l'utilisation et la démolition de la construction (N° 5 et 6), le matériau est recyclé sur le site (N° 7) et réutilisé.

#### I.2.4.4. La distribution des espaces intérieurs

La distribution des espaces intérieurs ou le « zonage thermique » a des impacts sur les ambiances internes du bâtiment. Liébard et De Herde (2005), voient que le zonage thermique ou le « principe de cloisonnement des espaces » permet de créer des zones de protection et génère des ambiances thermiques adéquates. De leur côté Fernandez et Lavigne (2009), confirment que la qualité des ambiances internes est influencée par l'organisation des espaces du bâtiment (halles, espaces d'attentes, loggias, vérandas, etc.) et leurs caractéristiques formelles et dimensionnelles.

Oliva et Courgey (2006) dans leur livre « La conception bioclimatique » ont donné un exemple d'un zonage thermique bioclimatique d'une maison (Figure 1.17).



**Figure 1.17** : Exemple d'un zonage bioclimatique d'un projet à usage d'habitation

(Source : Oliva et Courgey, 2006)

Le zonage thermique est basé principalement sur l'utilisation des espaces tampons (ou de protection) et le positionnement des espaces d'une manière intelligente afin de mieux bénéficier et stocker les apports solaires ou protéger contre ces dernières selon les besoins saisonniers et la nature de l'occupation de l'espace (maximiser les gains et minimiser les pertes).

La figure 1.18 illustre un exemple de la distribution des espaces intérieurs d'une maison selon l'approche bioclimatique.



**Figure 1.18 :** Exemple de la distribution des espaces intérieurs d'une maison selon l'approche bioclimatique (Source : [www.ecop-habitat.fr](http://www.ecop-habitat.fr))

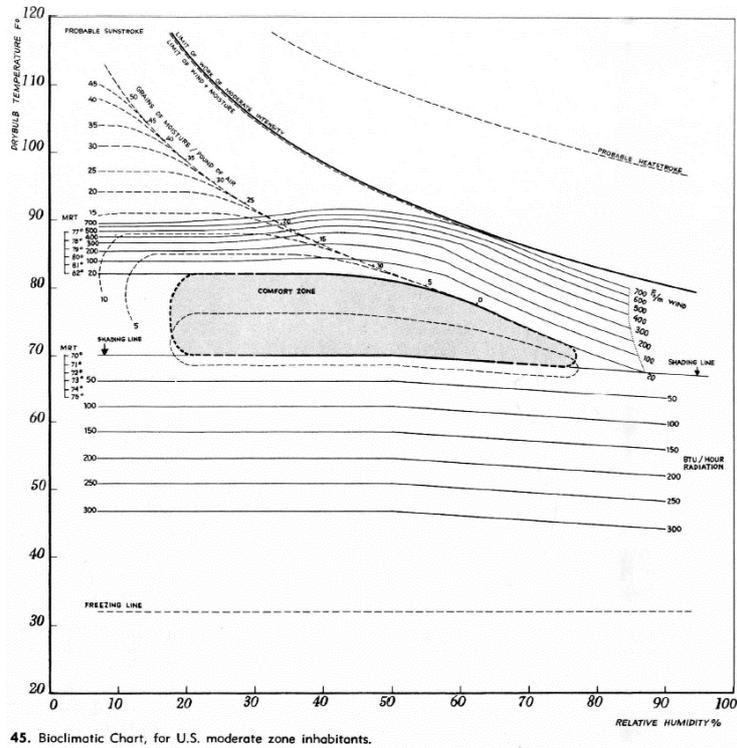
La partie Nord a été exploitée comme un espace tampon de protection (garage et cellier). L'espace de vie est localisé dans la partie Sud afin de capter au maximum du rayonnement solaire. Quelques principes de l'architecture bioclimatique ont été exploités (l'orientation, le captage, la protection, etc.).

### I.2.5. Les outils d'aide à l'intégration du bâtiment dans son environnement

Les outils d'aide à l'intégration du bâtiment dans son environnement physique sont des méthodes qui aident le concepteur à prendre des décisions conceptuelles adéquates et appropriées.

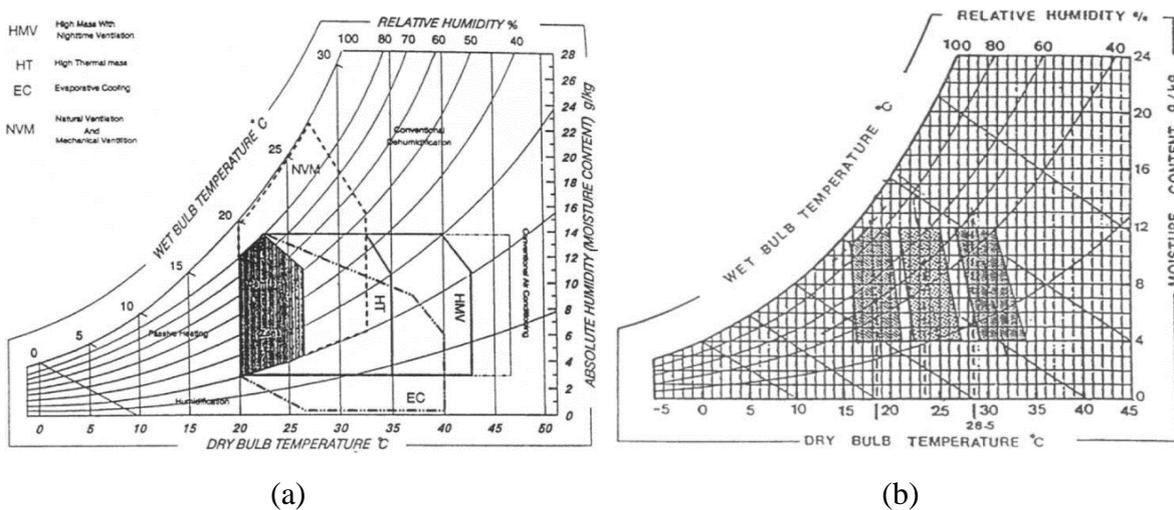
Selon Gallo et al. (1998) dans l'ouvrage « Architecture : confort and energy », il existe plusieurs tentatives qui ont été faites par des chercheurs afin de développer des méthodes et des outils d'aide à l'intégration des bâtiments dans l'environnement dont l'objectif est d'établir une harmonie entre les conditions climatiques et les besoins humains. Parmi ces outils, les chartes bioclimatiques d'Olgyay, de Givoni, de Szokolay et les tableaux de Mahony. La charte bioclimatique d'Olgyay (1963) est considérée comme l'une des premières tentatives de conception d'un bâtiment respectueux de l'environnement (Gallo et al., 1998). Ce point a été

confirmé par Gamboa (2016) où il voit que Victor Olgyay est le pionnier dans le domaine de l'architecture bioclimatique et le premier qui a décrit une zone de confort avec la « charte bioclimatique ». La figure 1.19 présente le diagramme de la charte bioclimatique d'Olgyay.



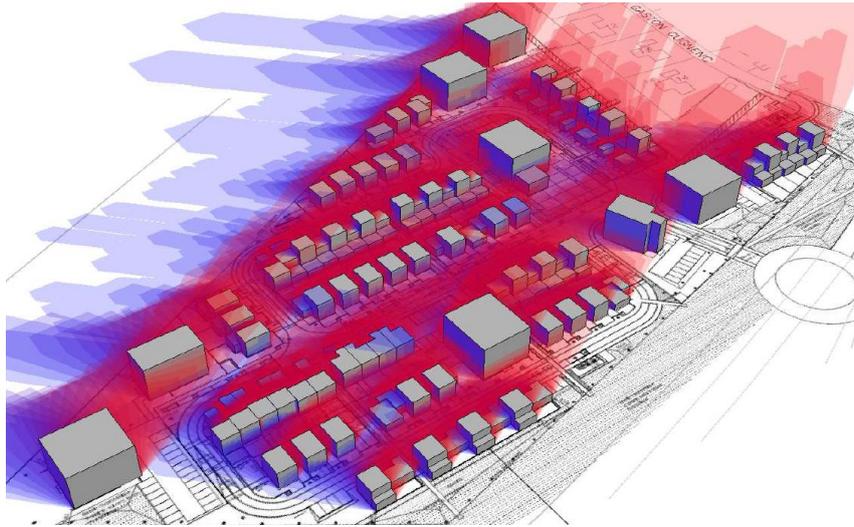
**Figure 1.19 :** Diagramme de la charte bioclimatique d'Olgyay (Source : Gamboa, 2016)

Le diagramme de la charte bioclimatique d'Olgyay fut considéré comme la base et la référence pour les variantes bioclimatiques de Givoni et de Szokolay (Figure 1.20).



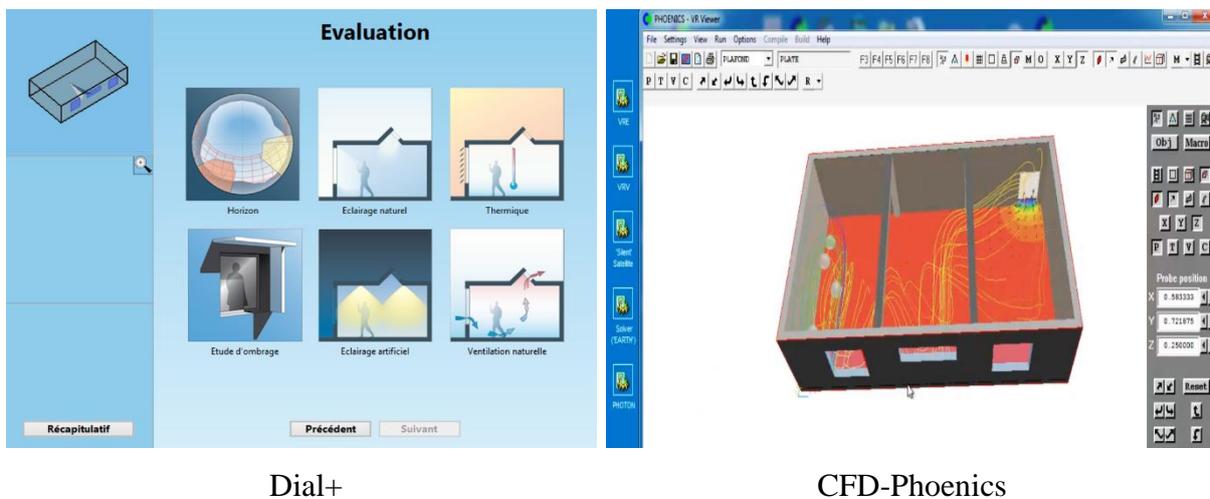
**Figure 1.20 :** Variante du diagramme de la charte bioclimatique (a) de Givoni et (b) de Szokolay (Source : Gallo et al., 1998)

Avec le développement du domaine informatique, les tentatives des chercheurs ont été focalisées vers le développement des outils numériques d'aide à la décision. Aujourd'hui, les logiciels de simulation sont considérés comme des outils très puissants indispensables pour l'évaluation et l'optimisation des choix conceptuels dès la phase de l'esquisse. L'essor du champ de la simulation numérique avec un grand nombre des avantages rend la simulation numérique une étape incontournable dans toutes les conceptions quelles que soient les conditions. La figure 1.21 illustre un exemple d'une simulation numérique à l'échelle urbaine.



**Figure 1.21** : Simulation à l'échelle d'un quartier (Source : Miquey, 2010)

Grâce à ces outils, la simulation a été possible à l'échelle du bâtiment et même au niveau des éléments du bâtiment sous plusieurs types (simulation statique ou dynamique) comme il est présenté dans la figure 1.22.



Dial+

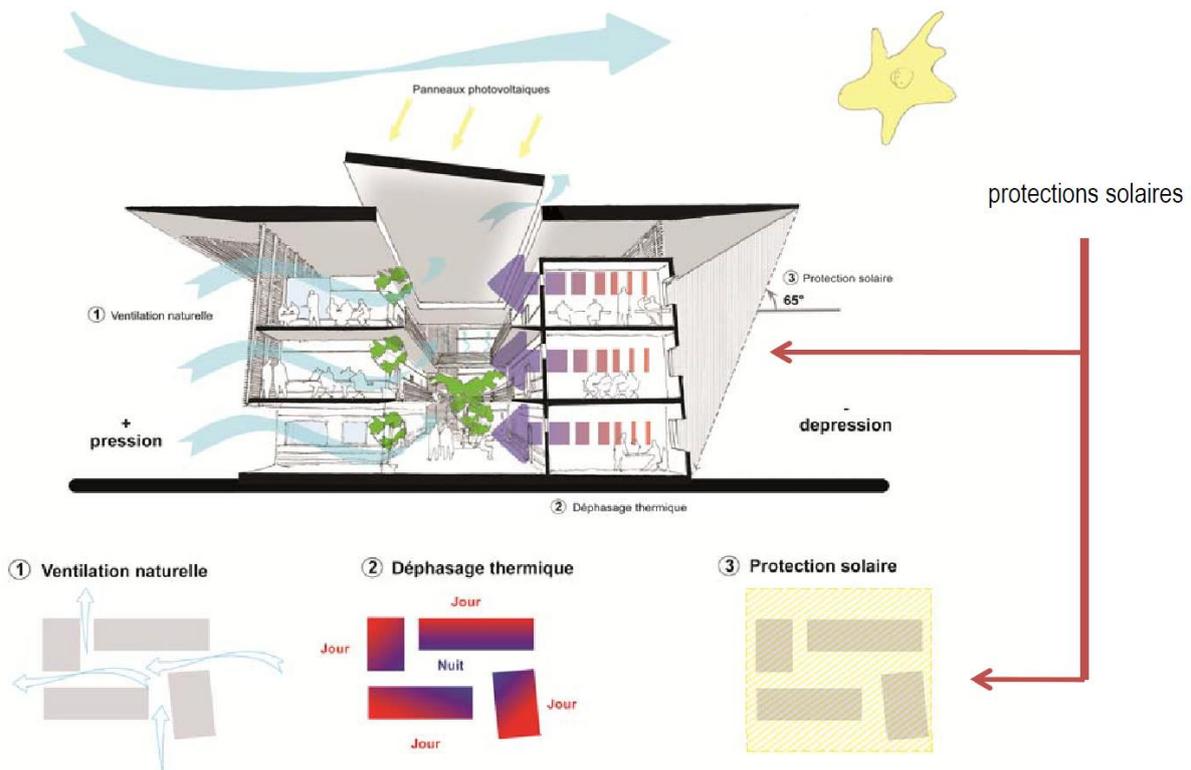
CFD-Phoenics

**Figure 1.22** : Simulation à l'échelle architecturale (Source : Auteur, 2015)

### I.2.6. Exemples des conceptions et constructions bioclimatiques

La conception architecturale bioclimatique nécessite de prendre en compte les stratégies et les principes de l'approche bioclimatique dès la première ébauche de l'esquisse.

La figure 1.23 illustre un exemple d'une étude bioclimatique d'une construction durant la phase d'esquisse.



**Figure 1.23 :** Exemple d'une étude bioclimatique d'une construction durant la phase d'esquisse (Source : BECICE<sup>4</sup>, 2017)

Le concepteur a appliqué quelques stratégies et principes de l'architecture bioclimatique dans le projet. Il a pris en considération l'orientation du bâtiment afin de ventiler le bâtiment naturellement (orientation, volumes, inclinaisons, zones de pression et de dépression), le côté thermique et le déphasage des matériaux (l'inertie thermique) ainsi que la protection de la construction contre les rayonnements solaires à travers des auvents. En plus de ces principes, il a intégré des panneaux photovoltaïques afin de produire de l'énergie solaire renouvelable gratuite.

<sup>4</sup> BECICE : est un Bureau d'étude technique certifié spécialisé en fluides appliqués au bâtiment, document : la conception architecturale (atelier du développement durable), 2017, tiré de : [www.becice.com](http://www.becice.com)

La figure 1.24 démontre des exemples des constructions réalisées à travers l'utilisation des stratégies bioclimatiques (la stratégie du chaud et la stratégie du froid).



La stratégie du chaud : Capter- Stocker- Distribuer- Conserver



La stratégie du froid : Protéger- Éviter- Dissiper- Rafraîchir

**Figure 1.24** : Exemples des constructions réalisées selon les stratégies de l'architecture bioclimatique (Source : Misse, 2011)

La première photo (a), présente un élément vitré de captage des rayonnements solaires (serre bioclimatique) près d'un matériau qui stocke cette énergie. En plus, il y a un dispositif de ventilation au niveau de la toiture. La photo (b) illustre une construction en pierre qui a une grande capacité de stockage et de conservation de la chaleur. Dans la photo (c), l'utilisation des surfaces opaques pour éviter la pénétration des rayonnements solaires, la stratégie de la protection a été exploitée par l'utilisation des arcades, les surfaces d'eau et de la végétation pour rafraîchir l'espace et dissiper la chaleur.

La figure 1.25 illustre un immeuble de bureaux conçu à travers l'application de quelques paramètres de l'architecture bioclimatique (la forme compacte, le zonage thermique).



**Figure 1.25 :** Exemples d'un immeuble de bureaux réalisé à travers l'application des stratégies de l'architecture bioclimatique (Source : Heiselberg, 2009)

La conception de cet immeuble a été faite sur la base des besoins des usagers afin d'assurer les meilleures conditions de travail. Un atrium a été intégré au centre de l'édifice afin d'assurer la ventilation naturelle et minimiser la charge de la climatisation, une façade double peau avec une zone thermique au niveau de la façade Nord et Sud avec un espace tampon. Une toiture végétalisée a été intégrée afin de réduire le transfert de la chaleur.

## Conclusion

Chaque zone dans le monde est caractérisée par un climat bien déterminé, lequel est le résultat de l'interférence de plusieurs paramètres climatiques (température, humidité, précipitations, vent, etc.). Au fil du temps, et suite au long processus de l'essai-erreur, l'homme a pu s'adapter à son environnement même dans les conditions climatiques les plus dures. Le savoir-faire acquis au fil des siècles et transmis de génération en génération s'est traduit par l'harmonie que l'homme a réussi à établir entre son habitat et l'environnement qui l'englobe. Cette harmonie relève de l'application de certaines stratégies et principes conceptuels qui participent à la relation entre le bien être de l'occupant, le bâtiment et l'environnement.

Parmi ces principes figurent quatre paramètres fondamentaux : l'implantation du bâtiment, sa morphologie, les matériaux de construction et la distribution des espaces intérieurs qui sont au cœur de l'approche bioclimatique. L'enveloppe architecturale et particulièrement la façade avec ses paramètres constitue l'un des composants les plus influents sur le fonctionnement du bâtiment, sa performance thermique et énergétique.

## **CHAPITRE II :**

# **La façade des bâtiments tertiaires comme modulateur thermique**

Ce chapitre donne un aperçu sur les bâtiments tertiaires et les immeubles de bureaux au niveau mondial. Par la suite, il explore et analyse les différents types de façades afin d'établir une classification selon les typologies existantes dans ce domaine, dont l'objectif est de comprendre le principe de fonctionnement de cet élément de l'enveloppe ainsi que ses impacts sur le plan thermique et énergétique du bâtiment. A la fin, il dénote les notions de bases de la thermique du bâtiment, les différents modes de transfert de chaleur et les aspects thermiques liés à la façade des constructions.

*« La façade est l'élément régulateur le plus important dans un bâtiment. Elle agit comme un intermédiaire entre les demandes et les besoins des utilisateurs de l'intérieur et les facteurs environnementaux de l'extérieur. A la conception, elle est donc analogue à notre propre peau naturelle »*

*Mahmoud Mohamed Elghawaby (2013)*

## **CHAPITRE II : La façade des bâtiments tertiaires comme modulateur thermique**

### **Introduction**

Les bâtiments tertiaires constituent le cadre bâti majoritaire dans le secteur du bâtiment. Les immeubles de bureaux en particulier, sont en plein expansion et représentent une grande partie de ce secteur. Malheureusement, la quasi-totalité des façades de ces immeubles témoignent d'un mode conceptuel caractérisé par l'utilisation excessive du vitrage avec des ratios d'ouverture très élevés ; de même que l'utilisation du mur rideau est très fréquente. Considérant que les façades représentent avec la toiture le lieu des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, elles sont donc responsables de l'ensemble des pertes et des gains de chaleur d'un bâtiment. De ce point de vue, elles peuvent être considérées comme des modulateurs thermiques influant aussi bien sur le comportement thermique de la construction et sa performance énergétique, que sur le confort de l'utilisateur. Le présent chapitre est consacré à la présentation de l'objet de la recherche à savoir la façade du bâtiment tertiaire. Il met en exergue les critères qui permettent de caractériser la façade et définit les principaux facteurs qui déterminent sa performance thermique.

### **II.1. Les bâtiments tertiaires**

Le secteur tertiaire est dominé par les services. Selon le dictionnaire Larousse<sup>1</sup>, le secteur tertiaire regroupe l'ensemble des activités qui fournissent des services comme les hôpitaux, les écoles, les hôtels, les banques, etc. D'après L'INSEE<sup>2</sup>, ce secteur recouvre un grand domaine d'activités qui s'étale du commerce à l'administration, la santé, l'éducation, etc.

---

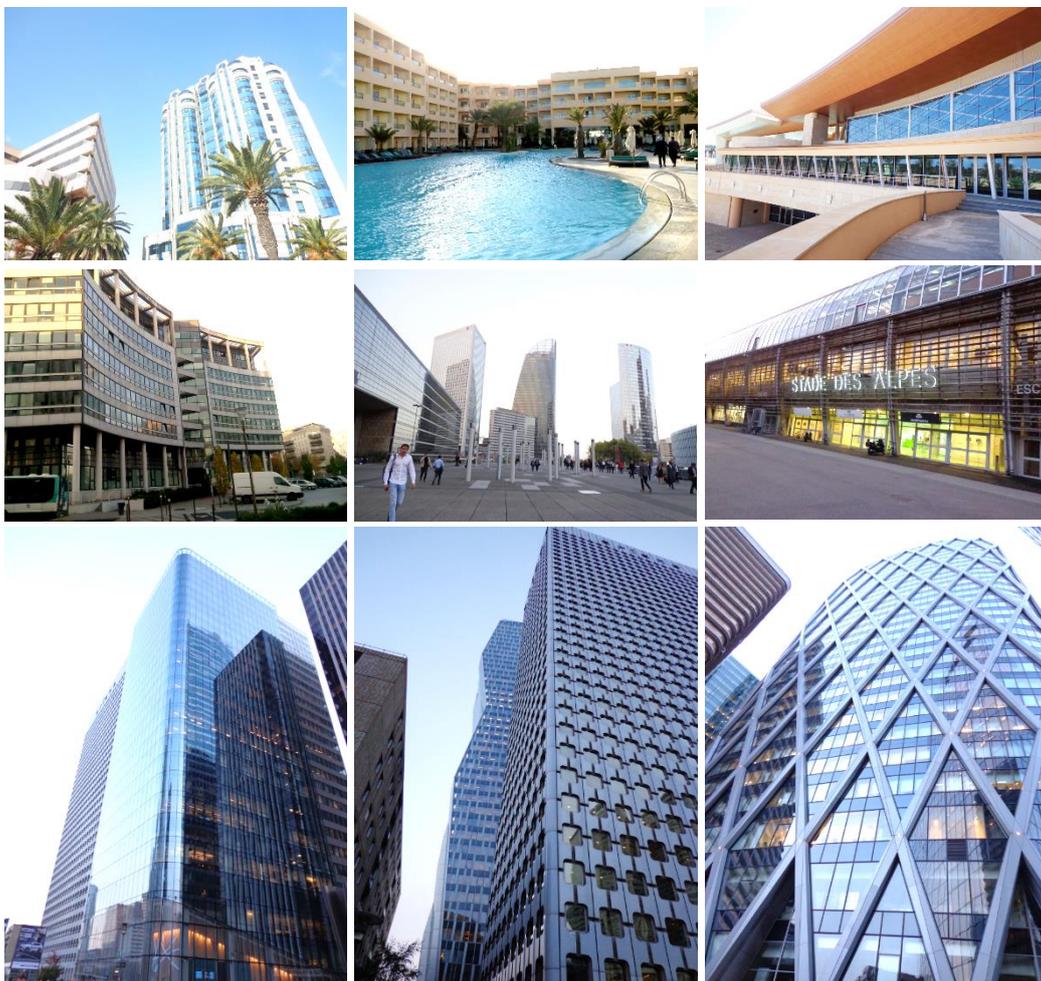
<sup>1</sup> Le secteur tertiaire. (2018). Dictionnaire Larousse. Repéré à : [www.larousse.fr/archives/economie/page/224](http://www.larousse.fr/archives/economie/page/224)

<sup>2</sup> L'Institut National de la Statistique et des Études Économiques françaises, [www.insee.fr](http://www.insee.fr)

Les bâtiments tertiaires englobent l'ensemble des constructions occupées par les activités du secteur tertiaire. De son côté Mandallena (2006), voit que ce secteur représente un parc diversifié qui regroupe les domaines suivants :

- Le commerce, les bureaux, l'enseignement ;
- La santé et l'action sociale ;
- Le sport et les loisirs ;
- Les hôtels, les cafétérias et les restaurants.

La figure 2.1 illustre des exemples des façades des bâtiments tertiaires dans des zones géographiques et climatiques différentes.



**Figure 2.1** : Exemples des façades des bâtiments tertiaires (Source : Auteur, 2017)

L'aspect prépondérant dans la plus part des bâtiments tertiaires au niveau mondial est la grande utilisation du vitrage dans ces façades. Cette utilisation est principalement pour des raisons esthétiques et lumineuses mais elle influe négativement sur le côté thermique et énergétique de la construction. Cette situation nécessite la compréhension du principe de

fonctionnement des différents types de façades et leur comportement thermique selon le contexte climatique afin d'aboutir à un choix adéquat.

## II.2. Les façades

L'enveloppe architecturale désigne l'élément de contact qui sépare entre le bâtiment (ambiance interne) et l'environnement extérieur (le climat). D'après Herant (2004), l'enveloppe peut être définie comme une limite, une interface ou une frontière séparant entre différents milieux, comme elle peut être considérée comme une zone de liaison et un espace de transition entre le dedans et le dehors. De son côté, il voit que l'enveloppe présente un lieu de jonction entre plusieurs facteurs et sa définition varie selon l'acteur sous différents aspects (Figure 2.2).



**Figure 2.2** : Définition de l'enveloppe selon différents acteurs

(Source : Herant, 2004 - adaptée par l'auteur, 2017)

Faure (2007), pour lui, l'enveloppe ressemble à une carte d'identité de la construction, de l'architecture et du concepteur, pour lui, cet élément de transition entre l'intérieur et l'extérieur est très important du point de vue social, humain, architectural et énergétique. De son côté Zemella et al. (2014) dans leur livre « Evolutionary Optimisation of Façade Design », voient que l'enveloppe est la frontière entre l'esthétique et la performance où les architectes et les ingénieurs ont une tâche très importante afin de concevoir une bonne enveloppe. De leur côté Ibañez-Puy et al. (2018), voient que l'enveloppe du bâtiment est considérée comme l'élément déterminant sur la consommation énergétique globale de la construction.

Pour plus de détails, l'enveloppe d'un bâtiment est composée par une toiture, une façade et un plancher. Dans la plus part des cas, la façade représente la grande partie de l'enveloppe

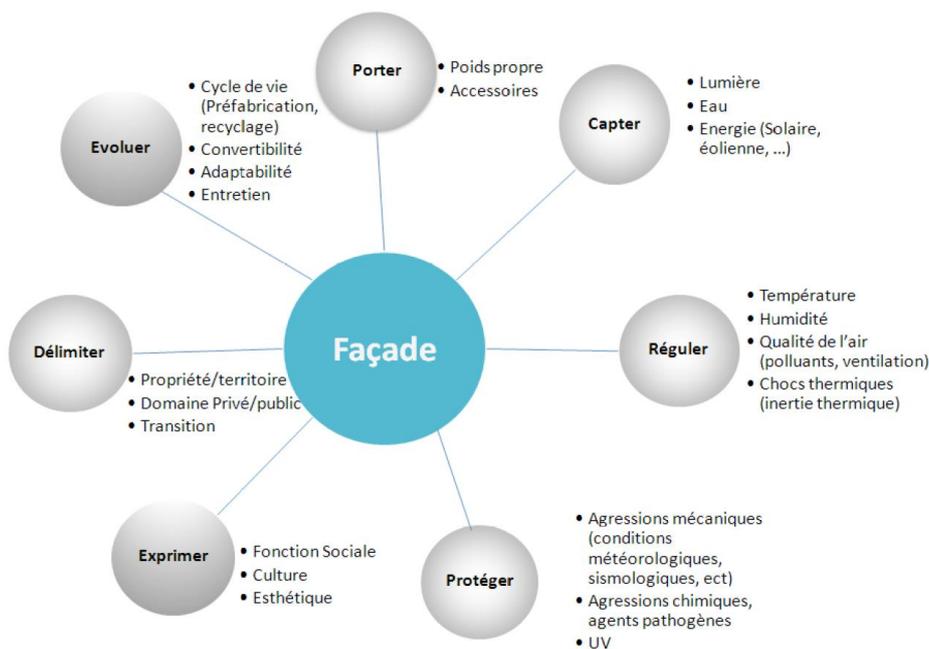
architecturale. À ce propos, Dugué (2013), considère la façade comme élément clé multifonctionnelle vu ses multiples fonctions de protection, de captage des apports solaires et de la lumière naturelle ainsi que la participation à l'esthétique du projet. Dans la même perspective, Sozer (2010) voit que la façade détermine les échanges énergétiques entre l'intérieur et l'extérieur et influe sur la performance globale de la construction.

L'origine du mot façade est le terme latin « Facies » qui désigne l'apparence et l'aspect perceptible de l'extérieur d'une construction (Menzel, 2012). De leur côté Koolhaas et al. (2014) dans leur livre « Façade », voient que le terme "façade" est un concept qui désigne la surface extérieure d'un bâtiment, elle est dominée par l'ordre, la composition, la rigidité et la signification mais après le développement technologique, la façade a été transformée en un « emballage étanche » sous forme de murs rideaux.

En effet, la façade représente un élément important très complexe vu ses multiples fonctions de natures différentes et contradictoires qu'il faut assurer.

### II.2.1. Les fonctions de la façade

La façade est une composante essentielle dans le bâtiment, elle a plusieurs fonctions de natures dissemblables. Selon Chabi (2012), les fonctions de la façade sont regroupées en quatre fonctions, la fonction protectrice, structurelle, transitaire et visuelle (ou esthétique). Dans la même perspective et pour plus de détails, Bucchianeri (2012) a déterminé sept grandes fonctions de la façade (Figure 2.3).



**Figure 2.3 :** Les fonctions de la façade (Source : Bucchianeri, 2012)

Bucchianeri (2012) et Arantes (2013) ont classifié ses sept fonctions en catégorie de nature mécaniques, énergétiques, architecturales et sociales comme suit :

➤ Délimiter et exprimer :

Ces deux fonctions regroupent l'aspect architectural et social car la délimitation de la propriété engendre l'expression de l'esthétique et de la culture (et parfois la symbolique) ;

➤ Porter et évoluer :

Cette catégorie regroupe la fonction structurelle porteuse (mécanique) de la façade « porter » et la fonction temporelle relative aux changements avec le temps et le cycle de vie de la façade « évoluer » ;

➤ Réguler, protéger et capter :

Ces trois catégories sont liées principalement à la fonction thermique et énergétique de la façade à travers la régulation de la qualité des ambiances (température, humidité, la qualité de l'air, etc.), la protection des occupants contre les éléments agressifs et le captage des apports solaires.

Quelle que soit la nature ou la catégorie de la fonction, l'objectif primordial de la façade est d'assurer aux occupants des ambiances confortables. Dans cette optique, O'Shaughnessy (2013) voit que les principales fonctions de la façade du point de vue techniques porte sur :

➤ La protection contre les intempéries (pluie, neige, etc.) ;

➤ La réduction des pertes et des gains de chaleur ;

➤ La réduction des infiltrations et des exfiltrations d'air ;

➤ La réduction des transferts de la vapeur d'eau (d'humidité) afin d'éviter les problèmes de condensation et les moisissures ;

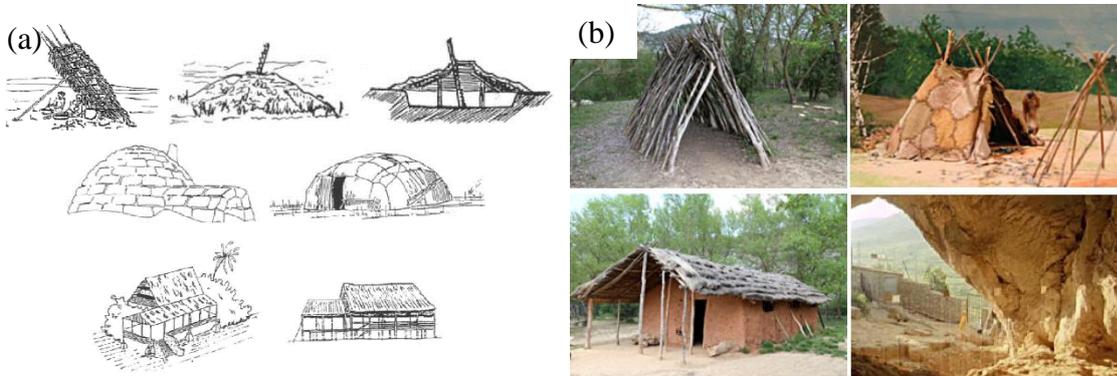
➤ La contribution à la solidité du bâtiment (protection de la structure) ;

➤ La diminution du passage des bruits ;

➤ Le contrôle de la pénétration de la lumière naturelle.

## II.2.2. La genèse de la façade

Avant l'apparition du terme "façade", l'élément de protection construit par l'homme était un simple abri soit une caverne, une grotte ou une hutte (Figure 2.4).



**Figure 2.4 :** Les éléments de protections des premiers abris

(Source : (a) Gallo et al., 1998 ; (b) www.hominides.com, 2017)

Au fil du temps, l'homme a pu développer son abri et a commencé à ajouter des motifs décoratifs et à traiter l'aspect esthétique. À ce propos, Chabi (2012), voit que depuis la civilisation égyptienne jusqu'à l'époque baroque, la façade a été constituée comme un moyen d'expression de l'esthétique caractérisé parfois par un excès décoratif. La figure 2.5 illustre des exemples des façades avec des éléments décoratifs.

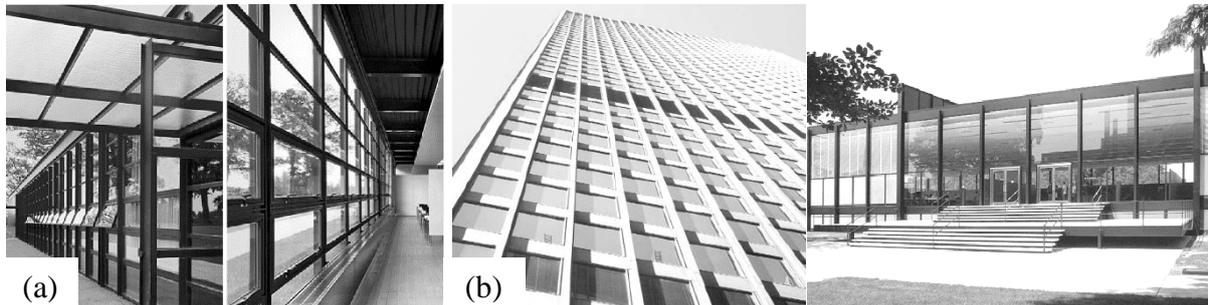


**Figure 2.5 :** Exemple des façades avec des éléments décoratifs (Source : Auteur, 2017)

En plus de la fonction décorative, durant cette période, la façade participe à la fonction structurelle et porteuse de ce qui influe sur le nombre et la taille des ouvertures (Arantes, 2013).

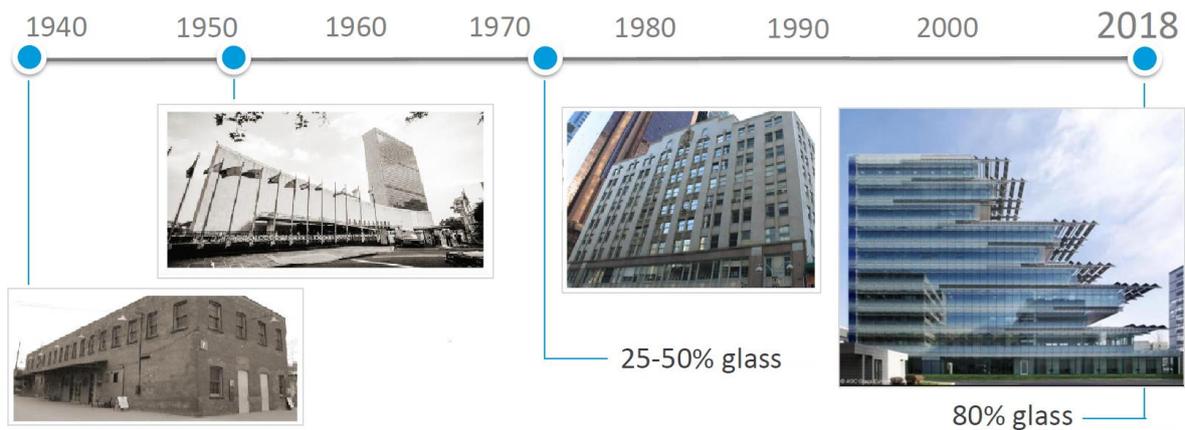
Après la grande exploitation des éléments décoratifs, la façade a connu un allègement de ces éléments puis l'élimination particulièrement avec le mouvement moderne. Selon Arantes (2013), avec la révolution de l'architecture moderne et l'apparition de l'acier et l'utilisation du béton armé, la conception des façades est complètement variée où elle est devenue un élément

libre sans fonction porteuse ce qui a conduit à l'utilisation d'un grand nombre d'ouvertures, des grandes surfaces vitrées et l'apparition du mur rideau (Figure 2.6).



**Figure 2.6 :** Exemples des façades du mouvement moderne  
(Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Knaack et al., 2014)

Les façades du mouvement moderne sont caractérisées par la liberté, la clarté, le rythme, la symétrie, la linéarité et la grande utilisation du vitrage. La figure 2.7 révèle un exemple relatif à l'évolution de l'exploitation du vitrage dans les façades entre 1940 et 2018.



**Figure 2.7 :** L'évolution de l'exploitation du vitrage dans les façades entre 1940 et 2018  
(Source : Domercq, 2018)

La façade des bâtiments a connu un accroissement colossal de la surface vitrée particulièrement durant la dernière période particulièrement sous forme d'un mur rideau.

Le type de vitrage utilisé au début est un simple vitrage qui influe sur le fonctionnement thermique des bâtiments ce qui a incité les chercheurs à trouver un autre modèle plus adéquat. D'après Arantes (2013), « à la fin des années 1950, les doubles vitrages constituent une nouvelle avancée dans la conception des façades », il est considéré comme un isolant thermique et donne des biens faits sur le plan thermique du bâtiment.

L'avancée structurelle et matérielle rend la façade comme une membrane légère séparant entre l'intérieur et l'extérieur et offre aux concepteurs une grande liberté conceptuelle et l'exploitation de formes dynamiques différentes (Figure 2.8).



**Figure 2.8 :** Exemple des formes des façades (Source : Herzog et al., 2004)

Avec le développement technologique dans plusieurs domaines tels que l'architecture et l'informatique, un type de façade intelligente (active) est apparu comme une façade dynamique adaptative selon les conditions internes, externes et les besoins des occupants de l'espace (Figure 2.9).



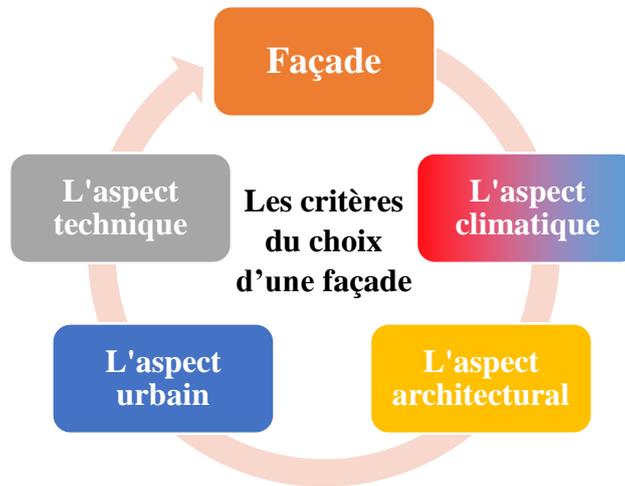
**Figure 2.9 :** Type d'une façade intelligente dynamique (Source : Menzel, 2012)

Selon Arantes (2013), la façade intelligente est à la fois transparente et isolante, offre l'éclairage et la protection et assure les objectifs relatifs à la maîtrise et l'économie de la consommation énergétique ainsi elle joue un rôle essentiel pour une conception durable du bâtiment.

### **II.2.3. Les critères du choix d'une façade**

Le choix d'une façade est une décision très importante voire déterminante dans le processus de la conception architecturale. Dans cette perspective, Hall (2010) voit que le concepteur est confronté à plusieurs questions lors de la conception de la façade, ces questions relatives à la performance, à la rentabilité et aux impacts des choix conceptuels.

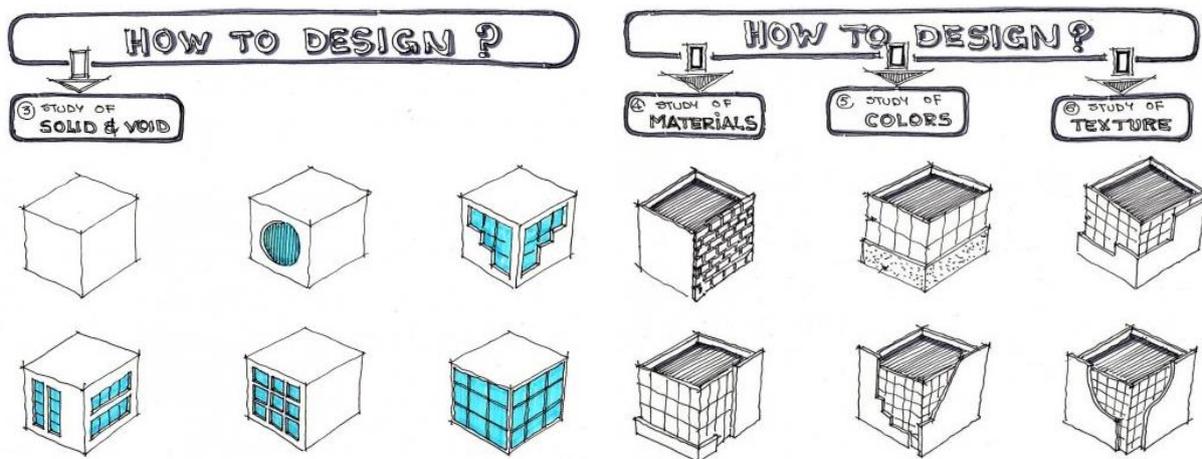
Généralement, le choix d'une façade dépend de plusieurs critères de natures différentes. Ces critères touchent l'aspect climatique, architectural, urbain et technique sous forme d'une boucle afin de concevoir une façade adéquate (Figure 2.10).



**Figure 2.10** : Les critères du choix d'une façade (Source : Auteur, 2017)

L'aspect le plus important est l'aspect climatique (température, humidité, Pluie, etc.), il est nécessaire de prendre en compte les spécificités climatiques de la région lors du choix de la façade. L'aspect architectural englobe le côté conceptuel, esthétique et symbolique de la façade. Concernant l'aspect urbain, il représente la relation entre la façade du bâtiment et le contexte urbain (hauteurs, orientation, obstacles, style, couleurs, textures, etc.). Finalement l'aspect technique porte sur la faisabilité et la manière de la réalisation dans la réalité.

La figure 2.11 illustre des schémas représentatifs d'un exemple relatif à la manière conceptuelle de quelques éléments de la façade (les ouvertures, les matériaux, les couleurs, ...).



**Figure 2.11** : Exemple d'une manière conceptuelle des éléments de la façade

(Source : Azzam, 2012- [mohandseen.blogspot.com/2012/02/blog-post\\_6992.html](http://mohandseen.blogspot.com/2012/02/blog-post_6992.html))

## II.2.4. Les typologies de façades

D'une manière générale, deux typologies de façades sont existantes du point de vue structurel, la façade porteuse (ou lourde) et la façade non porteuse (légère).

### II.2.4.1. Les façades porteuses

Les façades porteuses ou lourdes sont des composants qui participent à la fonction structurale et à la stabilité du bâtiment, elles portent les charges des toitures et des planchers (Certu<sup>3</sup>, 2003). La figure 2.12 présente des exemples des façades porteuses.



**Figure 2.12** : Exemples de façades porteuses (Source : Auteur, 2017)

Couramment les matériaux exploités dans ce genre de façades sont la pierre, la brique de terre cuite, le béton armé et les blocs du béton.

### II.2.4.2. Les façades non porteuses

Les façades non porteuses sont des composants légers qui ne participent pas à la fonction structurale ou la stabilité du bâtiment, cette typologie regroupe deux types : la façade légère (Figure 2.13) et la façade en remplissage maçonnée à faible épaisseur (Certu, 2003).



**Figure 2.13** : Exemples de façades légères (Source : Auteur, 2017)

---

<sup>3</sup> Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Mémento technique du bâtiment-Les façades (2003), [www.certu.fr](http://www.certu.fr)

## II.2.5. Classification des façades et leurs caractéristiques

Les façades des bâtiments sont réparties en un grand nombre de types selon plusieurs critères. Parmi ces critères : la forme, les matériaux, le type de l'enveloppe et le principe de fonctionnement (Broto, 2011 ; BIFF<sup>4</sup>, 2017).

### II.2.5.1. La façade selon la forme

Il existe principalement quatre types de façades selon la forme : une façade géométrique droite, une façade inclinée, une façade organique (courbée, bombée) et une façade mixte (Broto, 2011).

#### II.2.5.1.1. La façade géométrique droite

Ce type de façade est caractérisé par l'utilisation des formes géométriques droites claires, rigides et bien déterminées (Figure 2.14).



**Figure 2.14** : La façade géométrique droite (Source : Auteur, 2017)

D'après Broto (2011), dans la plus part des cas, cette forme représente la projection verticale des plans géométriques rectangulaires ou carrés.

#### II.2.5.1.2. La façade inclinée

Cette façade est caractérisée par une inclinaison ou des inclinaisons vers l'intérieur ou vers l'extérieur (Figure 2.15).

---

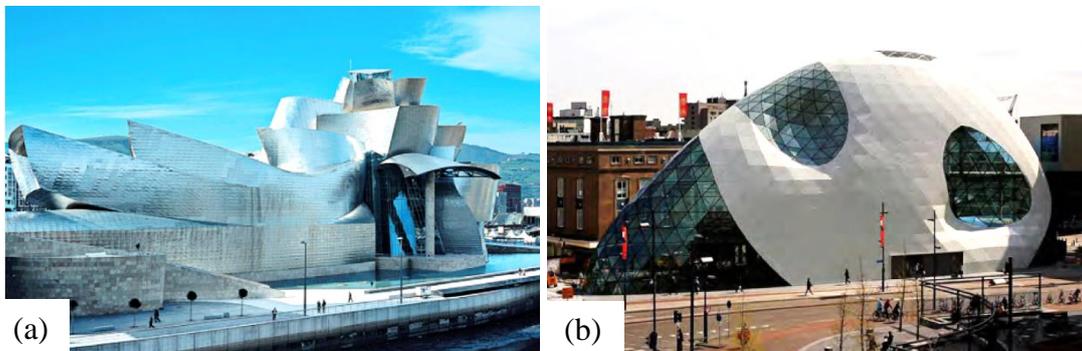
<sup>4</sup> Bureau d'ingénieurs fenêtres et façades, laboratoire spécialisé dans le domaine de l'enveloppe du bâtiment, Lausanne, [www.biffsa.com/ressource\\_types/view/9/Facade](http://www.biffsa.com/ressource_types/view/9/Facade)



**Figure 2.15** : La façade inclinée (Source : (a) Ronfini et al., 2016 ; (b) Auteur, 2017)

### II.2.5.1.3. La façade organique

Ce genre de façade est composé par des formes organiques fluides comme la présente la figure 2.16.



**Figure 2.16** : La façade organique (Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Ziegler et al., 2012)

Ces façades sont caractérisées par l'utilisation des lignes courbées avec un aspect dynamiques dans toutes les directions.

### II.2.5.1.4. La façade mixte

Ce type de façade réunit entre des parties géométriques et autres parties organiques (Figure 2.17).



**Figure 2.17** : Façade avec des formes mixtes (Source : Auteur, 2017)

### II.2.5.2. La façade selon les matériaux

La classification des façades selon les matériaux utilisés est très large vue le grand nombre des matériaux exploités (la pierre, la brique, le béton armée, le bois, le verre, le métal, le textile, le plastique, etc.).

#### II.2.5.2.1. La façade en pierre

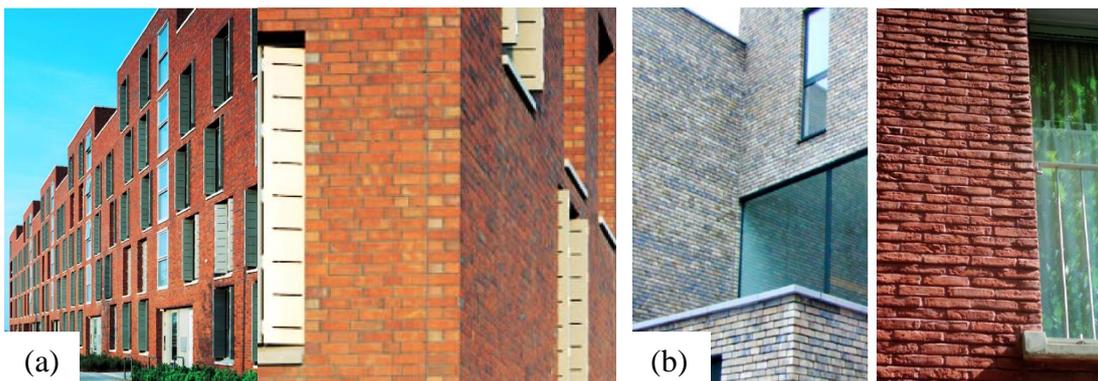
Cette façade est caractérisée par l'exploitation de la pierre de grande épaisseur comme élément porteur et de séparation (Figure 2.18).



**Figure 2.18** : Façade en pierre (Source : Auteur, 2017)

#### II.2.5.2.2. La façade en brique

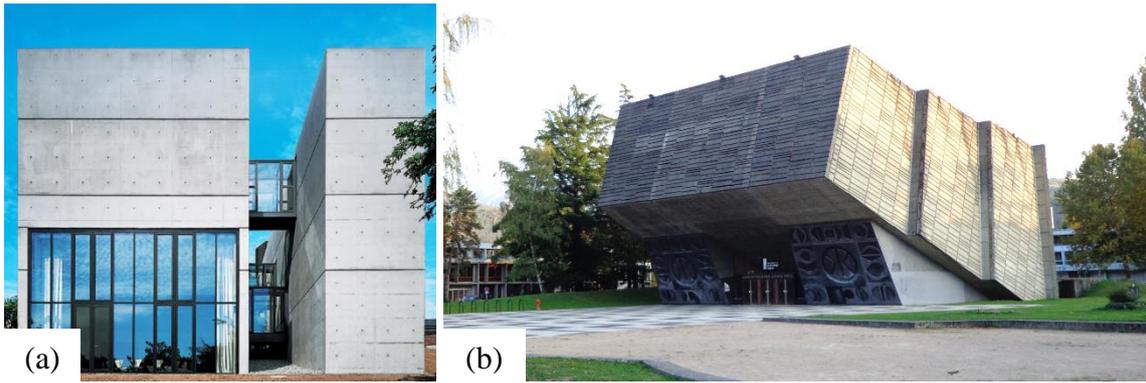
La brique représente le matériau le plus exploité au niveau de la façade depuis longtemps vue ses caractéristiques physiques et son aspect esthétique (Figure 2.19).



**Figure 2.19** : Façade en brique (Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Trachte, 2012)

#### II.2.5.2.3. La façade en béton armé ou en bloc du béton

Dans ce type, la façade est composée de blocs de béton préfabriqués ou en béton armé réalisé sur terrain (Figure 2.20).



**Figure 2.20** : Façade en béton armé (Source : (a) Hegger et al., 2011 ; (b) Auteur, 2017)

Généralement la façade en béton armé est caractérisée par des formes géométriques.

#### II.2.5.2.4. La façade en bois

Le bois constitue un matériau très utilisé dans les façades dans certaines régions vues ses caractéristiques sur plusieurs plans (Figure 2.21).



**Figure 2.21** : Façade en bois (Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Broto, 2011)

#### II.2.5.2.5. La façade en verre

La façade en verre ou mur rideau fut considérée comme le type le plus exploité au niveau mondial dans toutes les régions et dans des climats différents (Figure 2.22).



**Figure 2.22** : Façade en verre (Source : Maufay, 2018)

Cette façade a un aspect esthétique avec des atouts sur le plan lumineux mais elle est caractérisée par une mauvaise réputation sur le plan thermique et énergétique dans la plus part des cas.

#### II.2.5.2.6. La façade en métal

Dans ce type de façade, le métal (l'acier, l'aluminium, etc.) est utilisé comme élément d'étanchéité et de séparation entre l'intérieur et l'extérieur (Figure 2.23).



**Figure 2.23** : Façade en métal (Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Auteur, 2017)

Ce matériau offre plusieurs possibilités formelles vues ses caractérisés mécaniques.

#### II.2.5.2.7. La façade en textile

Le textile également est un matériau utilisé dans les façades comme une deuxième membrane (Figure 2.24).

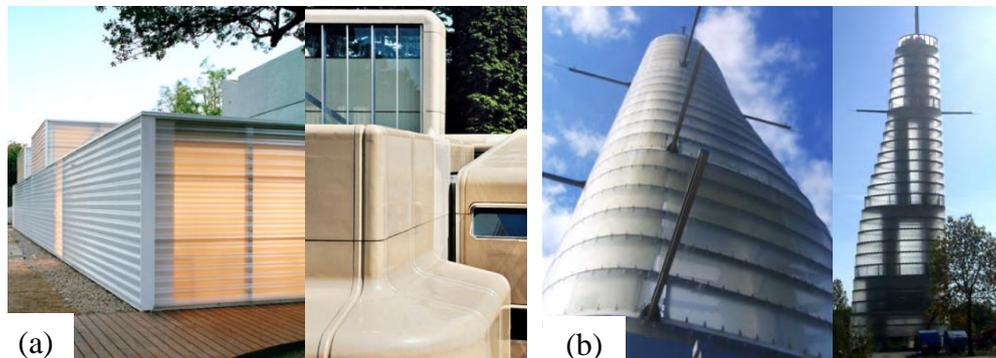


**Figure 2.24** : Façade en textile (Source : sergeferrari.com, 2018)

Ce type de matériaux donne une grande flexibilité formelle et matérielle.

### II.2.5.2.8. La façade en plastique

Le plastique est exploité dans la façade principalement comme une membrane de protection (Figure 2.25).



**Figure 2.25 :** Façade en plastique (Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Ries, 2012)

### II.2.5.2.9. La façade mixte

Ce type de façade englobe deux ou plusieurs matériaux de natures et techniques différentes tels que le béton, le verre et le métal (Figure 2.26).



**Figure 2.26 :** Les façades mixtes (Source : (a) Herzog et al., 2004 ; (b) Auteur, 2017)

### II.2.5.2.10. La façade avec des matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase MCP « phase change material PCM » sont des matériaux intelligents basés sur un principe physique simple, ils se liquéfient à travers l'absorption de la chaleur à partir d'une certaine température appropriée pour chaque matériau (déterminé pendant la fabrication du matériau) et se solidifient après la restitution de la chaleur absorbée lorsque la température de l'environnement est inférieure à celle-ci ; l'objectif est le stockage et le déstockage de l'énergie selon les besoins de chauffage et de refroidissement (Ekomy-Ango, 2011).

La figure 2.27 illustre des exemples des matériaux à changement de phase.



**Figure 2.27** : Exemples des matériaux à changement de phase (Source : Auteur, 2017)

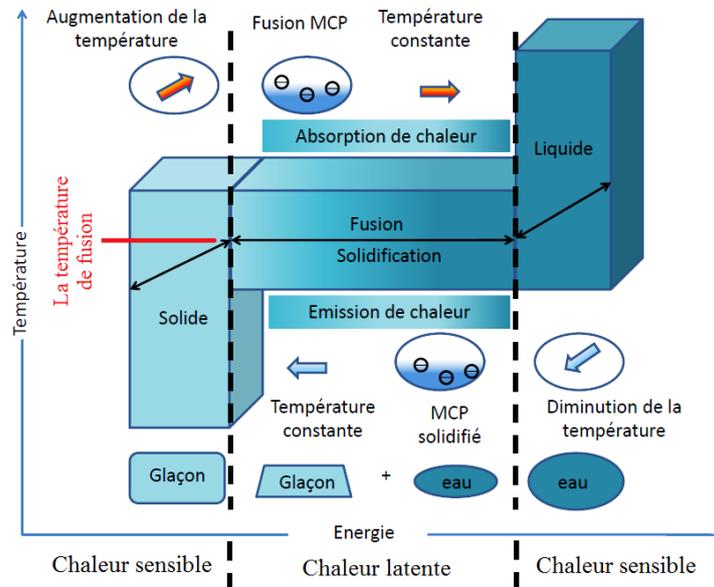
Où (a) sous forme granulaire, (b) sous forme d'une poudre et (c) sous forme d'une plaque avec un MCP incorporé.

Pour plus de détails, les matériaux à changement de phase sont des composants chimiques disponibles sous plusieurs formes soit en poudre mélangée et incorporée dans l'enveloppe, des plaques, des panneaux et des capsules (Figure 2.28).



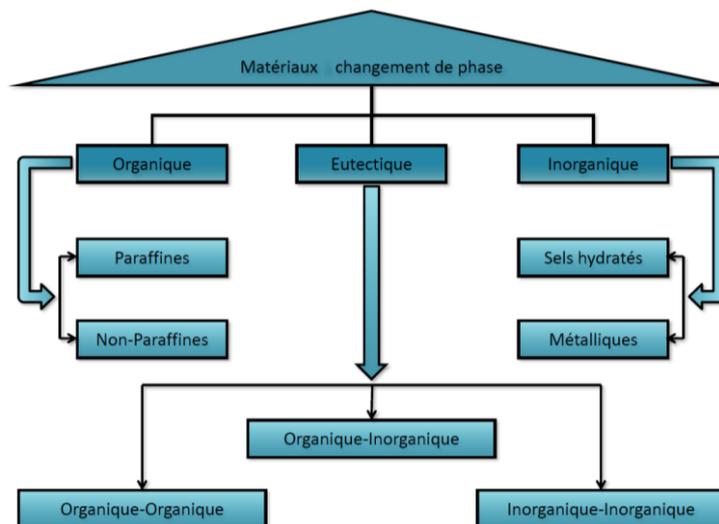
**Figure 2.28** : Les formes des matériaux à changement de phase  
(Source : (a) Drissi, 2012 ; (b) Basecq, 2015 ; (c) Kenisarin et al., 2016)

D'après Guichard (2013), les matériaux à changement de phase « sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante ». De son côté, le principe de fonctionnement est simple et basé sur la compréhension de la chaleur latente, la chaleur sensible et la température de fusion (Figure 2.29) qui est applicable pour tous les domaines entre autre le domaine du bâtiment.



**Figure 2.29 :** Principe de fonction des matériaux à changement de phase  
(Source : Guichard, 2013)

La classification des matériaux à changement de phase selon la nature chimique regroupe trois grands types : organique, inorganique et eutectique (Guichard, 2013 ; Soupart-Caron, 2015 ; Akeiber et al., 2016 ; Venkateswara-Rao, 2018) comme le démontre la figure 2.30.



**Figure 2.30 :** Classification des matériaux à changement de phase (Source : Guichard, 2013)

Les matériaux organiques sont des mélanges congruents telles que les paraffines «  $C_nH_{2n+2}$  » et les non-paraffines « acide D-Lactique, Trimyristine » avec une température de fusion de -100 à +1000 °C, les matériaux inorganiques (les sels hydratés " $CaCl_2.12H_2O$ " et les métaux comme le Gallium) avec une température de fusion entre 0 et 150 °C et concernant les matériaux eutectiques sont des matières composées par plusieurs matériaux à changement de phase organiques et inorganiques (Ekomy-Ango, 2011 ; Guichard, 2013).

En outre, le choix d'un matériau à changement de phase approprié est basé sur certaines critères principalement liées aux propriétés thermiques, physiques, chimiques et cinétiques du matériau ainsi que des critères technologiques et le côté économique (Guichard, 2013 ; Akeiber et al., 2016).

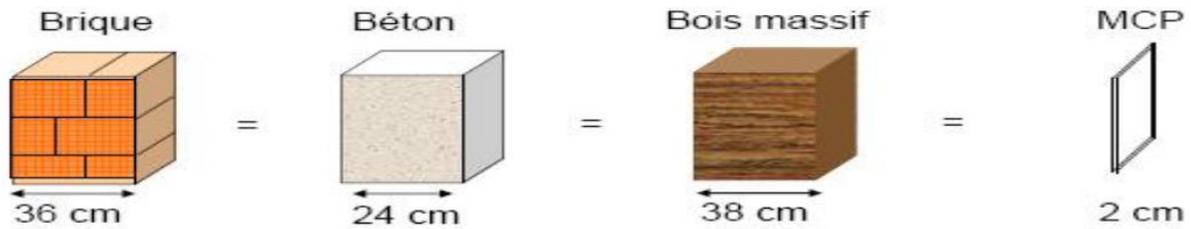
D'après Tyagi et al. (2011) et Laurie et al. (2013), actuellement, plusieurs recherches dans le domaine du bâtiment et le domaine thermique se focalisent sur les matériaux à changement de phase. De leur côté, l'utilisation de ces matériaux (MCP) dans le bâtiment est effectuée à travers plusieurs méthodes, soit :

- Par l'intégration directe ou par l'incorporation dans les matériaux de construction ;
- Par l'intégration de capsules avec MCP dans la construction ;
- Par la réalisation de panneaux avec MCP (préfabriqués).

Pour les bâtiments, « *dès que la température du matériau à changement de phase atteint sa température de fusion, il commence à fondre et va absorber une partie de l'énergie qui l'entoure afin de la stocker en grande quantité et dès que la température devient inférieure, l'énergie stockée est restituée* » (Guichard, 2013).

Pour plus de détails, l'exploitation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des constructions permet d'augmenter l'inertie thermique de l'enveloppe et le stockage de l'énergie dans les parois ce qui améliore le confort thermique des occupants et réduit la consommation énergétique (Guiavarch et al., 2008 ; Younsi, 2009 ; Guichard, 2015 ; Gounni et al., 2018).

La figure 2.31 illustre une comparaison de l'inertie thermique en fonction de l'épaisseur et le type de quatre matériaux.



**Figure 2.31** : Comparaison de l'inertie thermique en fonction de l'épaisseur et le type du matériau (Source : Ekomy-Ango, 2011)

L'inertie thermique d'un MCP de 2 cm d'épaisseur est équivalente à l'inertie thermique d'une brique de 36 cm d'épaisseur, d'un mur en béton de 24 cm d'épaisseur et un bois massif de 38 cm d'épaisseur.

Selon Ekomy-Ango (2011), dans le secteur du bâtiment, cette technique passive est orientée principalement sur :

- L'exploitation des matériaux à changement de phase intégrés dans l'enveloppe du bâtiment pour le chauffage ;
- L'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe à faible inertie thermique afin d'améliorer le confort en été.

La figure 2.32 illustre un exemple de l'intégration des matériaux à changement de phase dans la façade et la toiture d'un bâtiment.



**Figure 2.32** : Exemple de l'intégration des matériaux à changement de phase dans les parois (Source : Guichard, 2013)

Selon Tyagi et al. (2011), le choix adéquat des propriétés de ces matériaux a un grand potentiel sur l'amélioration de la température selon la plage de confort thermique de l'homme.

### II.2.5.2.11. La façade selon la couleur, la texture et le type de la peinture

Une gamme de couleurs est exploitée dans la façade (claire ou foncée). Par rapport à la texture des façades, deux types sont existantes soit une texture lisse ou rugueuse. Concernant le type de la peinture utilisée au niveau des façades, trois types sont existants, la peinture ordinaire liquide, la peinture en poudre et la peinture isolante (cool paints).

Les peintures ordinaires sont appliquées directement sous forme d'un liquide. Les peintures en poudre est une technique basée sur la projection électrostatique de poudre grâce à un pistolet sur un objet, cette technique a connu un grand développement et une utilisation croissante (Lebreton, 2005). La figure 2.33 présente un exemple de la peinture en poudre et une plateforme d'essais de cette peinture.



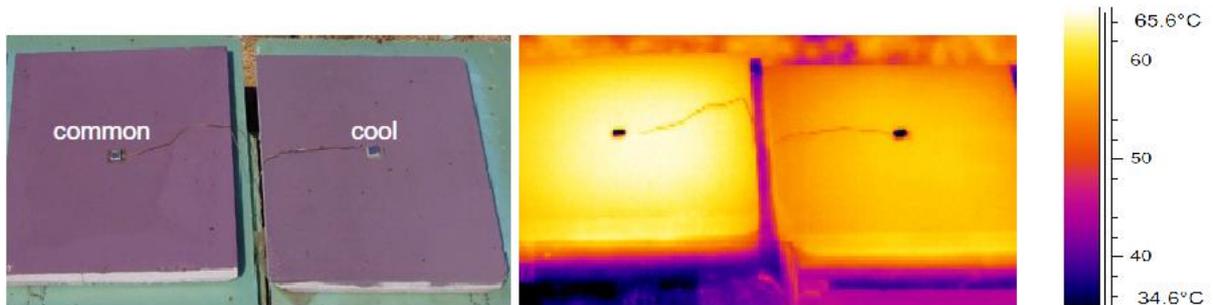
**Figure 2.33 :** Exemple de la peinture en poudre et la plateforme d'essais de ce produit  
(Source : Godan et al., 2018)

D'après Leonard (2010), la technique de la peinture en poudre a été exploitée au niveau mondial dans plusieurs projets renommés tels que le centre culturel Georges Pompidou en France, le stade olympique nid d'oiseau à Pékin, le musée de l'art islamique à Qatar, l'hotel Yas island marina à Abu Dhabi et Aldar Head Office à Abu Dhabi (Figure 2.34).



**Figure 2.34 :** Projets utilisant la peinture en poudre (Source : Leonard, 2010)

Les peintures isolantes ou fraîches (cool paints) sont des produits avec une composition spéciale contenant des nanoparticules utilisées comme barrière thermique. Ces peintures ont une grande réflectance solaire et une émittance thermique très élevée ayant pour rôle de réduire la température surfacique de la façade de 5 à 13 °C par rapport à la même façade avec une peinture ordinaire (Uemoto et al., 2010 ; Hernández-Pérez et al., 2014). La figure 2.35 illustre une image thermique comparative de deux surfaces avec la même couleur, l'une avec une peinture fraîche (cool paints) et l'autre avec une peinture ordinaire.



**Figure 2.35 :** Image thermique comparative de l'impact de la peinture fraîche "cool paints"  
(Source : Santamouris et al., 2011)

La peinture fraîche (cool paints) diminue la température surfacique d'une manière colossale.

### II.2.5.3. La façade selon le type de l'enveloppe

Deux types de façades sont existants selon le type de l'enveloppe, une façade simple ou monocouche et une façade multicouche ou double peau.

#### II.2.5.3.1. La façade simple peau ou monocouche

La façade simple monocouche est caractérisée par une seule peau étanche qui sépare entre le dedans et le dehors (Figure 2.36).



**Figure 2.36 :** Façade monocouche ou simple peau (Source : Herzog et al., 2004)

### II.2.5.3.2. La façade double peau ou multicouche

La façade double peau comme l'indique son nom est une façade multicouche. Selon Poirazis (2006), la façade double peau (FDP) est une tendance architecturale européenne initiée principalement par le désir esthétique, le besoin d'améliorer l'environnement intérieur et la diminution de la consommation énergétique.

La quasi-totalité des recherches sur la façade double peau sont basées principalement sur le rapport du centre scientifique et technique de la construction (CSTC) élaboré par Loncour et al. (2004). Selon ce rapport, la façade double peau est une façade avec deux peaux et une cavité entre les deux où la deuxième peau externe est essentiellement vitrée.

Pour plus de détails, la façade double peau est un type de façade caractérisée par deux peaux, une intérieure vitrée ou mixte et autre extérieure vitrée avec un espacement entre les deux (une cavité d'air ventilée considérée comme un tampon thermique) d'une largeur de 20 cm à 2 m (Gaüzère et al., 2008 ; Barbosa et al., 2014 ; Parra et al., 2015 ; Shen et al., 2016 ; Ahmed et al., 2016). La figure 2.37 illustre des exemples de façades type double peau.



**Figure 2.37** : Exemples de façades type double peau

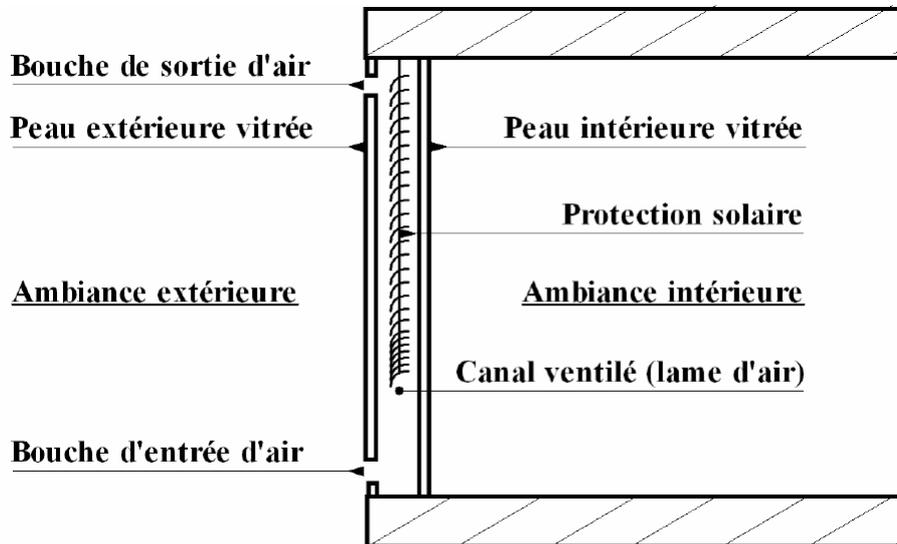
(Source : (a) Loncour et al., 2004 ; (b) Auteur, 2017)

D'après Poirazis (2006) et Safer (2006), la façade double peau est composée par les éléments suivants :

- Un vitrage extérieur : souvent en simple vitrage ;
- Un vitrage intérieur : la surface intérieure est partiellement ou complètement vitrée, dans la plus part des cas avec un double vitrage ;
- Une cavité d'air : située entre le vitrage extérieur et intérieur avec une largeur de 20 cm à plus de 2 m, elle est ventilée d'une manière naturelle, mécanique ou hybride ;

- Des fenêtres internes : permettent de ventiler l'espace naturellement ;
- Une protection solaire : intégrée au niveau de la cavité d'air.

La figure 4.38 présente un schéma synthétisant les composants d'une façade double peau.



**Figure 2.38** : Les composants d'une façade double peau

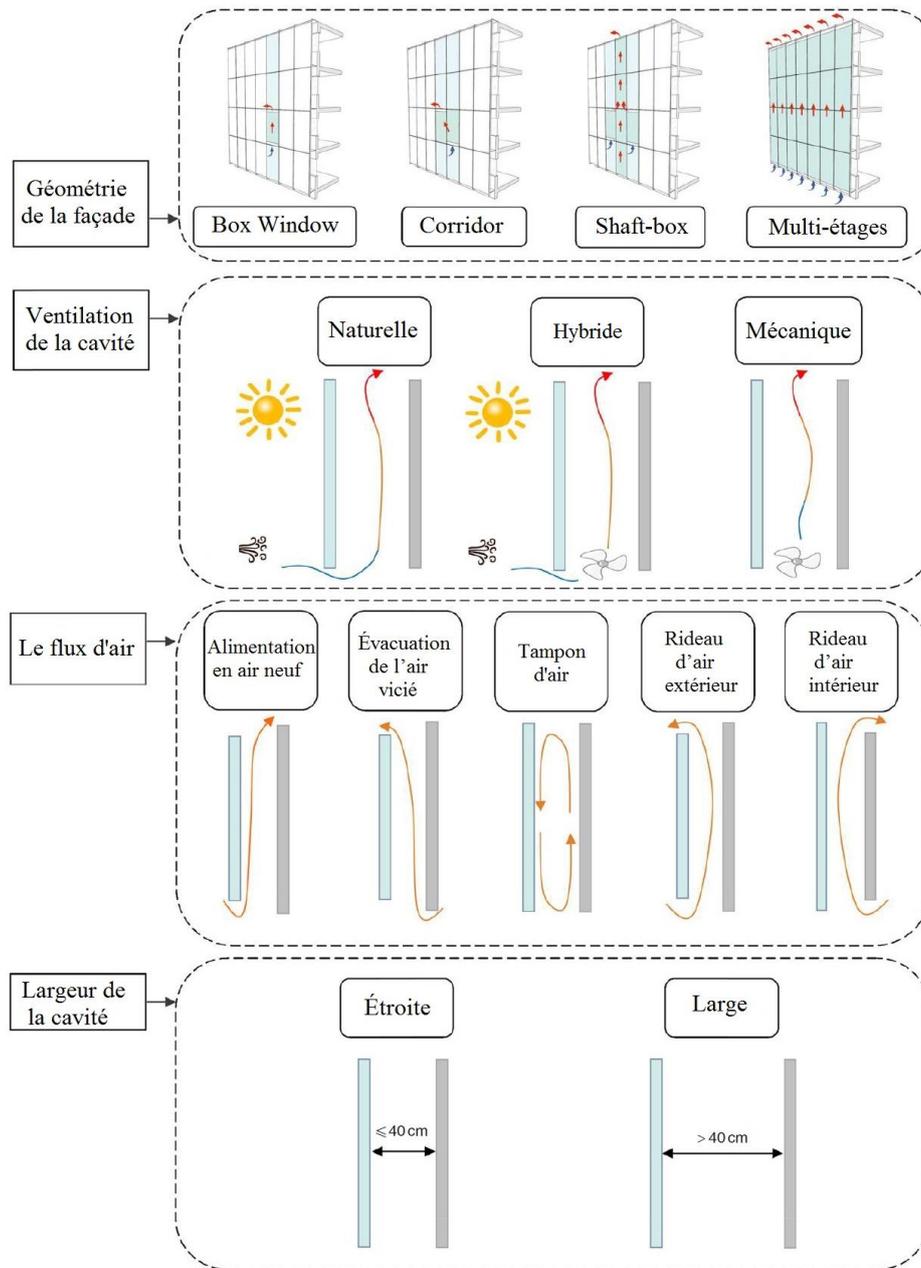
(Source : Safer, 2006)

La façade double peau a été exploitée pour des raisons multiples et des fonctions différentes englobant l'aspect esthétique et technique. Elle est utilisée pour améliorer l'éclairage naturel, optimiser le confort thermique et acoustique, assurer une ventilation naturelle et minimiser la consommation énergétique (Yazdizad, 2014 ; Gelesz et al., 2015 ; Yasa, 2015 ; Parra et al., 2015 ; Yang, 2016 ; Shen et al., 2016).

D'après Loncour et al. (2004), la classification de la façade double peau varie selon plusieurs critères tels que :

- La géométrie ou le compartimentage de la façade ;
- Le mode de ventilation de la cavité d'air (naturelle, mécanique ou hybride) ;
- La source et la nature du flux d'air (intérieure, extérieure) ;
- Les dimensions de la cavité d'air (étroite large).

La figure 2.39 présente un exemple de classification de la façade double peau.



**Figure 2.39 :** Classification de la façade double peau

(Source : Piroozfar, 2015 ; Loncour et al., 2004 - adaptée par l'auteur, 2017)

De leur côté, Gelesz et al. (2015), voient que la façade double peau a des biens faits selon le type du climat, pour le climat froid, l'espace tampon permet de réduire la charge du chauffage et pour le climat chaud elle permet de réduire la transmission de rayonnement et dissiper la chaleur par l'effet de cheminée. Ils ajoutent que la mauvaise conception et le choix inapproprié des composants de ce dispositif peuvent engendrer des situations défavorables et augmenter la consommation énergétique.

#### II.2.5.4. La façade selon le principe de fonctionnement

La classification des façades selon le principe de fonctionnement regroupe un grand nombre de façade soient simple (standard), ventilée, respirante, végétalisée, photovoltaïque et adaptative.

##### II.2.5.4.1. La façade standard simple

Cette façade représente un type ordinaire simple qui assure la séparation entre l'intérieur et l'extérieur grâce à une seule peau simple sans aucun dispositif (Figure 2.40).



**Figure 2.40** : Façade simple (Source : Auteur, 2018)

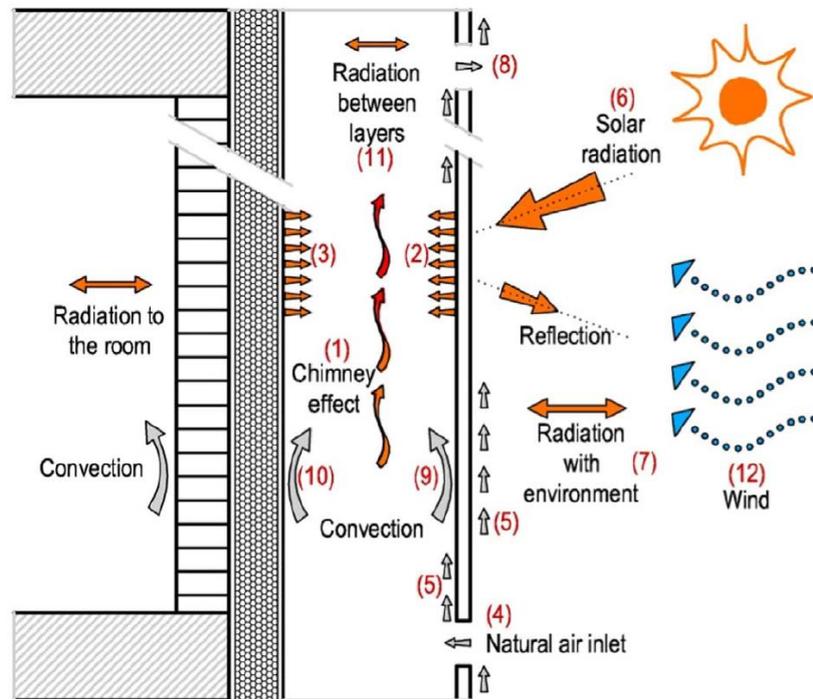
##### II.2.5.4.2. La façade ventilée

La façade ventilée est une façade multicouche spéciale, elle est composée par deux peaux opaques avec une distance entre eux qui forme un espacement entre le mur du bâtiment et le bardage ajouté qui crée une cavité ou un canal ventilé soit d'une manière naturelle par "l'effet de cheminée", d'une manière mécanique ou hybride (Loncour et al., 2004 ; Gracia et la., 2013 ; Diallo et al., 2017 ; Ibañez-Puy et al., 2018). La figure 2.41 présente deux exemples de façades ventilées avec joints fermés.



**Figure 2.41** : Façades ventilées avec joints fermés (Source : Auteur, 2015)

Pour plus de détails, Ibañez-Puy et al. (2017) dans leur article intitulé « Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review », ont donné des illustrations relatives au principe du fonctionnement de la façade ventilée ainsi que ses différents composants (Figure 2.42).

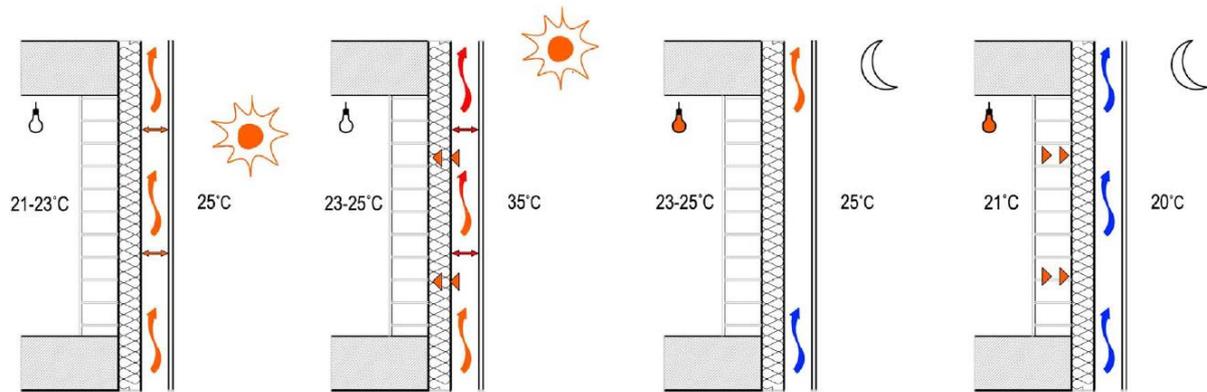


**Figure 2.42 :** Schéma représentatif des composants d'une façade ventilée et son principe de fonctionnement thermique (Source : Ibañez-Puy et al., 2017)

Ce schéma synthétise les composants de la façade ventilée ainsi que les différents phénomènes thermiques (conduction, convection et rayonnement) effectués au niveau de chaque élément.

Selon Ibañez-Puy et al. (2017), la différence de la température de l'air dans la cavité crée un mouvement d'air ascendant par l'effet de cheminée (1) sous l'influence de la température transférée par conduction à travers la couche externe (2) et la peau interne (3). Cette ventilation de la cavité engendre le tirage thermique et la pénétration de l'air à travers les ouvertures inférieures (4) où la température de l'air s'élève (5) sous l'influence des rayonnements solaires (6) et les radiations de l'environnement (7) et continue son mouvement en haut jusqu'à la sortie de l'air supérieure (8). La ventilation d'air engendre des contacts avec les surfaces de la façade et des phénomènes de convection avec le bardage (9) et le mur de la façade (10) et influence également sur les opérations thermiques par rayonnements (11) entre les deux surfaces de la façade. Le mouvement d'air dans la cavité est influencé également par les vents (12).

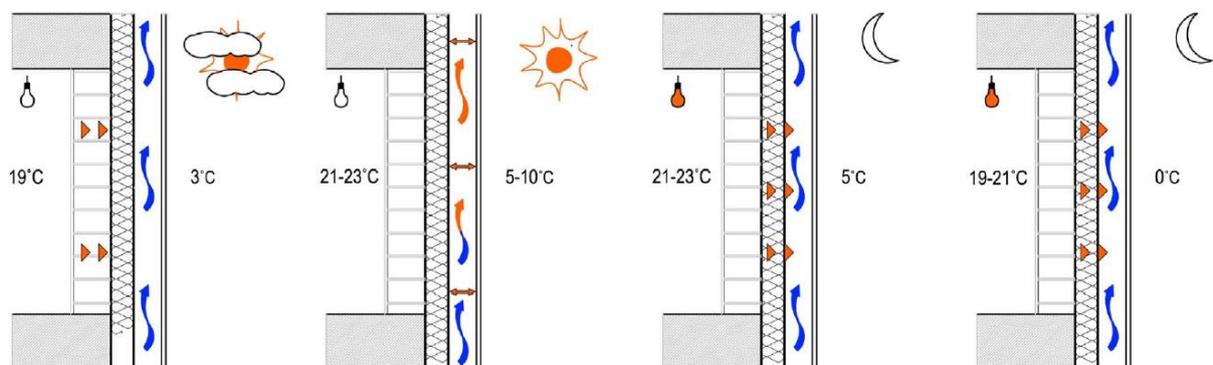
Le comportement thermique de la façade ventilée varie pendant toute la journée selon la saison chaude et froide. La figure 2.43 illustre un schéma sur le comportement thermique d'une façade ventilée pendant une journée typique d'été.



**Figure 2.43 :** Le comportement thermique d'une façade ventilée durant une journée chaude  
(Source : Ibañez-Puy et al., 2017)

Pendant les premières heures de la journée, le mouvement de l'air par l'effet de cheminée augmente au fur et à mesure avec la quantité des rayonnements solaires et par conséquent l'effet de refroidissement. Au fil du temps, en particulier à partir de midi, la température extérieure augmente et diminue le mouvement de l'air dans la cavité ce qui augmente le flux de la chaleur par conduction de l'extérieur vers l'intérieur. Pendant la nuit et avec l'absence des rayonnements solaires, les vents participent au refroidissement de différentes couches de la façade (Ibañez-Puy et al., 2017).

La figure 2.44 présente un schéma sur le comportement thermique d'une façade ventilée durant une journée typique d'hiver.



**Figure 2.44 :** Le comportement thermique d'une façade ventilée durant une journée froide  
(Source : Ibañez-Puy et al., 2017)

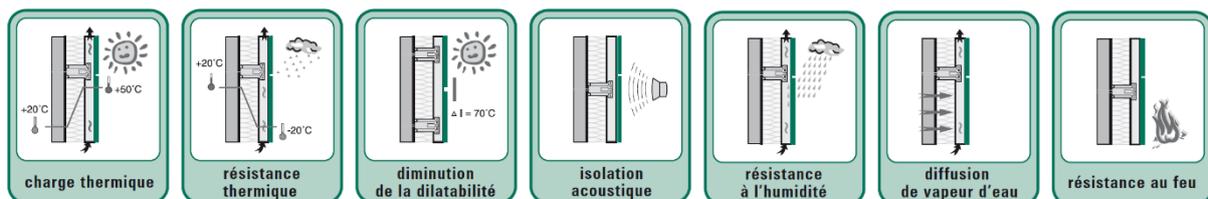
Avec l'existence des rayonnements solaires, la cavité d'air accumule la chaleur et minimise les pertes de la chaleur et l'écart de la température entre l'intérieur et l'extérieur. Durant la nuit et les jours avec des nuages (l'absence des rayonnements solaires), l'air circule dans la cavité sous l'effet des vents avec la même température extérieure faible ce qui engendre des pertes de la chaleur (Ibañez-Puy et al., 2017).

En outre, ce dispositif de protection est considéré comme une solution passive appropriée pour la rénovation et les nouveaux bâtiments afin d'améliorer la qualité des ambiances thermiques, minimiser la consommation énergétique et donner un aspect esthétique à la façade avec une grande variété des choix relatifs aux matériaux (terre, céramique, composite, fibre de ciment, etc.), aux couleurs et textures ainsi qu'aux dimensions des composants et le type des joints fermés ou ouverts (Verdonschot et al., 2009 ; Ibañez-Puy et al., 2017) comme le démontre la figure 2.45.



**Figure 2.45 :** Exemples des choix multiples de la façade ventilée (Source : Auteur, 2015)

Selon Diallo et al. (2017) et Ibañez-Puy et al. (2017), la façade ventilée représente la meilleure solution afin de gérer et maîtriser l'interaction entre l'ambiance interne et l'environnement externe où la surface extérieure fonctionne comme une couche qui protège la construction et la surface interne puis cette dernière fonctionne comme un isolant ou une masse thermique. La figure 2.46 illustre des schémas relatifs aux avantages de la façade ventilée.

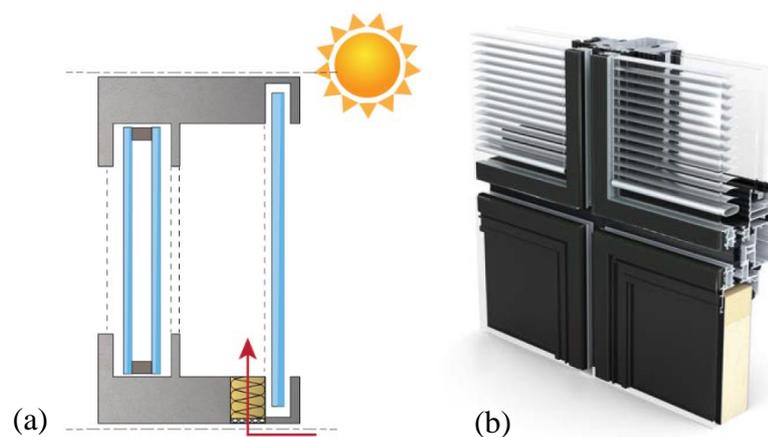


**Figure 2.46 :** Les avantages de la façade ventilée (Source : [www.cetris.cz](http://www.cetris.cz))

D'après les résultats de plusieurs recherches effectuées sur la façade ventilée, cette façade améliore le confort hygrothermique et peut réduire la consommation énergétique du refroidissement de plus de 40 % (Gracia et al., 2013 ; Ibañez-Puy et al., 2017).

#### II.2.5.4.3. La façade respirante

La façade respirante est une technique de façade multicouche composée par deux surfaces généralement vitrées (la surface extérieure en simple vitrage et la surface intérieure en vitrage isolant) avec une distance entre les deux de 4 à 40 mm qui forme une lame d'air, cette dernière est mise en contact avec l'environnement extérieur grâce à des orifices de respiration avec filtre qui permet d'équilibrer la pression partielle et diffuser la vapeur d'eau (Maugard, 2014, Martin, 2015). La figure 2.47 illustre un schéma sur le principe de fonctionnement de la façade respirante.



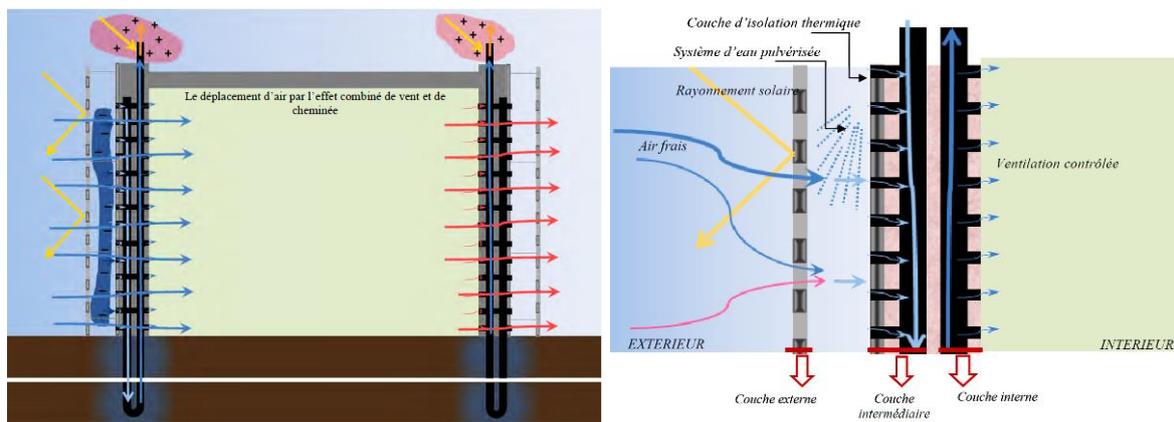
**Figure 2.47** : Principe de fonctionnement d'une façade respirante  
(Source : (a) Maugard, 2014 ; (b) www.wiconafinder.com)

Cette façade a des atouts, elle améliore le confort thermique et acoustique (Martin, 2015). La figure 2.48 présente un exemple d'une façade respirante.



**Figure 2.48** : Exemple d'une façade respirante (Source : www.wiconafinder.com)

De son côté, Elghawaby (2013), le mur respirant ou "breathing walls" « est un mur qui est capable de diffuser la vapeur d'eau ou réguler le taux d'humidité pour assurer la qualité de l'air intérieur », il voit que le concept du mur respirant a été exploité dans l'architecture traditionnelle, pour lui « la même définition de mur respirant introduite par Hassan Fathy qui signifie la capacité d'un mur à permettre au flux d'air de passer à travers sa surface ». Dans cette perspective, Elghawaby (2013) dans sa thèse a développé ce concept par l'inspiration (Biomimétisme) de la peau de l'être humain afin de réaliser une façade respirante thermiquement active (Figure 2.49).



**Figure 2.49** : Façade respirante (Source : Elghawaby, 2013)

De son côté, cette façade a pour objectif d'améliorer le fonctionnement thermique des constructions à travers l'intégration des orifices et la décomposition de la façade en plusieurs couches (externe, intermédiaire et interne).

#### II.2.5.4.4. La façade végétalisée

La façade végétalisée, la façade verte ou jardin vertical sont des termes utilisés pour décrire l'exploitation de la végétation dans les surfaces murales verticales (Perini et al., 2011 ; Ottelé et al., 2011 ; Djedjig, 2013). La façade végétalisée est considérée comme un système passif durable qui permet d'améliorer les ambiances thermiques et minimiser la consommation énergétique des constructions à travers quatre mécanismes : l'ombrage, l'isolation assurée par la végétation, le refroidissement par l'évaporation et l'évapotranspiration ainsi que l'effet de barrière contre les vents (Coma et al., 2014 ; Yuksel et al., 2017 ; Vox et al., 2018).

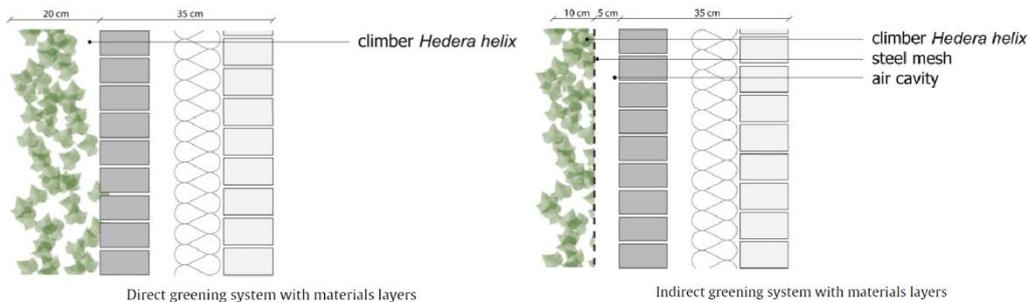
La figure 2.50 présente deux exemples des façades végétalisées.



**Figure 2.50 :** Façades végétalisées (Source : (a) Dugué, 2013 ; (b) Martin, 2015)

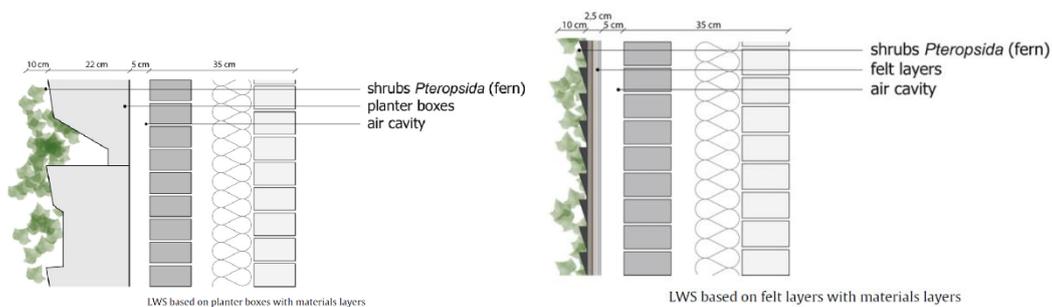
Selon la littérature et les travaux de (Perini et al., 2011 ; Ottelé et al., 2011 ; Djedjig, 2013 ; Madre et al., 2015 ; Yuksel et al., 2017), les façades végétalisées sont divisées en deux catégories, les façades vertes et les murs vivants « Living Wall ».

- Les façades vertes : basées sur l'utilisation des plantes grimpantes enracinées sur le sol liées avec le bâtiment soit d'une manière directe sur la façade ou d'une manière indirecte (sur des câbles ou des treillis) avec une distance entre le mur et le support de la plante (Martin, 2015 ; Yuksel et al., 2017) comme le démontre la figure 2.51.



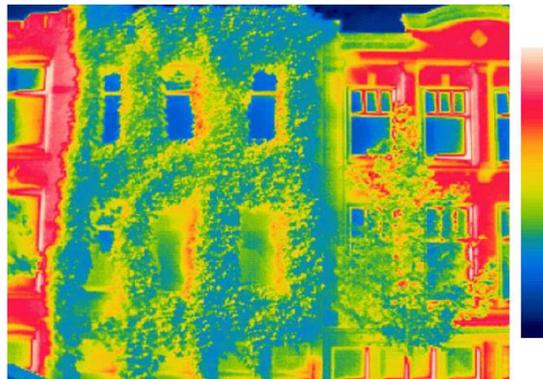
**Figure 2.51 :** Façade verte directe et indirecte (Source : Ottelé et al., 2011)

- Les façades vivantes : elles existent sous plusieurs formes, soit par des pots ou des panneaux pré-végétalisés fixés sur une structure indépendante (Martin, 2015 ; Yuksel et al., 2017) comme le présente la figure 2.52.



**Figure 2.52 :** Façade vivante (Source : Ottelé et al., 2011)

Plusieurs recherches ont prouvé que la façade végétalisée a des effets positifs sur le bâtiment à travers la réduction de la température surfacique et par la suite l'abaissement de la température ambiante ainsi que la consommation énergétique (Coma et al., 2014). La figure 2.53 révèle une image thermique comparative entre deux façades une végétalisée et une autre sans végétation.



**Figure 2.53** : Image thermique d'une façade végétalisée et une autre sans végétation  
(Source : Perini et al., 2011)

En plus de ses atouts à l'échelle du bâtiment, la façade végétalisée a des bienfaits à l'échelle urbaine à travers l'amélioration des conditions extérieures et la réduction des effets de l'îlot de chaleur urbain (Perini et al., 2011 ; Ottelé et al., 2011 ; Madre et al., 2015 ; Vox et al., 2018).

#### **II.2.5.4.5. La façade photovoltaïque**

En raison de la diminution des espaces dans les zones urbaines et l'augmentation de la demande énergétique, l'intégration des panneaux photovoltaïque dans les bâtiments a été commencée au niveau des toitures et des façades (Zoubir, 2013 ; Wang et al., 2017).

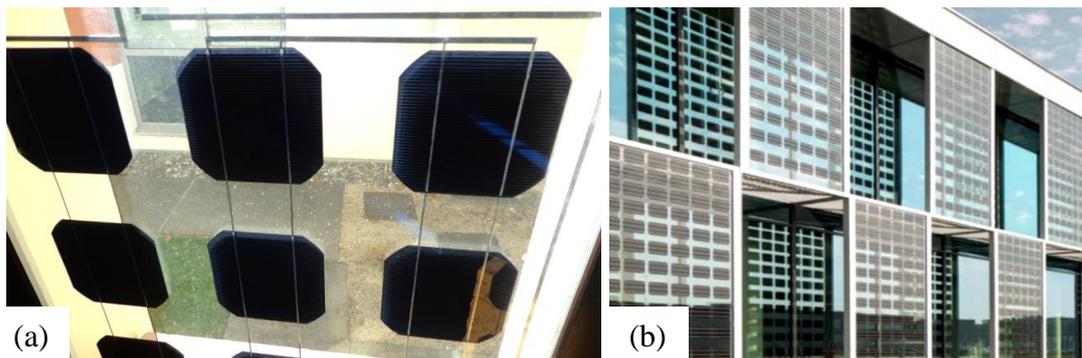
La façade photovoltaïque est considérée comme une technologie attractive et une solution intéressante englobant entre les fonctions de la façade double peau et ses bienfaits thermiques ainsi que la production de l'énergie solaire gratuite, cette façade est composée par deux parois verticales, une interne qui représente le mur de la construction et l'autre externe qui constitue la deuxième peau avec des panneaux photovoltaïque intégrés (Zoubir, 2013 ; Xu, 2014 ; Gaillard et al., 2015 ; Buonomano et al., 2017). En outre, cette technique permet d'assurer la fonction architecturale et la production de l'énergie renouvelable (Clua et al., 2016).

La figure 2.54 présente des exemples de la façade photovoltaïque où les capteurs photovoltaïques au niveau de la façade ont été exploités sous forme de panneaux (a) et comme des protections solaires (b).



**Figure 2.54 :** Les façades photovoltaïques (Source : (a) Duran, 2011 ; (b) Auteur, 2017)

Un autre type de capteurs photovoltaïques peut être intégré dans les fenêtres afin de constituer des fenêtres photovoltaïques semi-transparentes (Figure 2.55).



**Figure 2.55 :** Les fenêtres photovoltaïques semi-transparentes

(Source : (a) Auteur, 2017 ; (b) Domercq, 2018)

Ce type est obtenu par l'intégration ou l'incorporation des cellules photovoltaïques dans les fenêtres, afin qu'ils offrent un grand nombre d'avantages comme l'exploitation optimale et de la lumière naturelle, la production de l'électricité et la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation ainsi que l'aspect esthétique (Xu, 2014 ; Wang et al., 2017).

#### II.2.5.4.6. La façade adaptative

La façade adaptative est une façade intelligente et dynamique caractérisée par sa capacité d'adaptation et de changement de son comportement en temps réel selon les conditions externes, internes et les besoins des occupants dont l'objectif est d'assurer le confort des

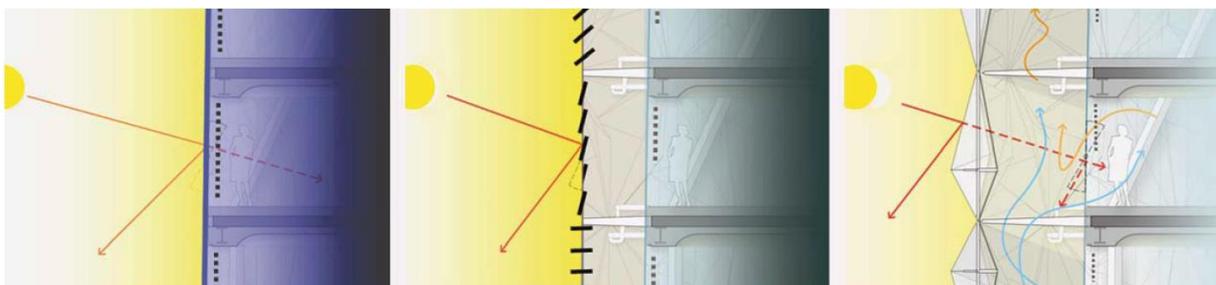
utilisateurs et améliorer la performance globale du bâtiment (Ghaffarian-Hoseini et al., 2012 ; Aelenei et al., 2016 ; Barozzi et al., 2016 ; Deljavan et al., 2017). Cette technologie active vise également à améliorer la durabilité des constructions à travers l'amélioration du fonctionnement de l'enveloppe afin de répondre d'une manière adéquate aux exigences de nature thermique, lumineuse, acoustique, aéraulique, énergétique et esthétique (Bakker et al., 2014 ; Aelenei et al., 2016 ; Ibañez-Puy et al., 2018). La figure 2.56 illustre des exemples des façades adaptatives.



**Figure 2.56** : Exemple des façades adaptatives

(Source : (a) Karanouh et al., 2015; (b) Auteur, 2017)

Karanouh et al. (2015) ont donné un schéma représentatif sur les effets du système dynamique du projet tours Al-Bahr (Figure 2.56-a) en comparaison avec d'autres systèmes (Figure 2.57).



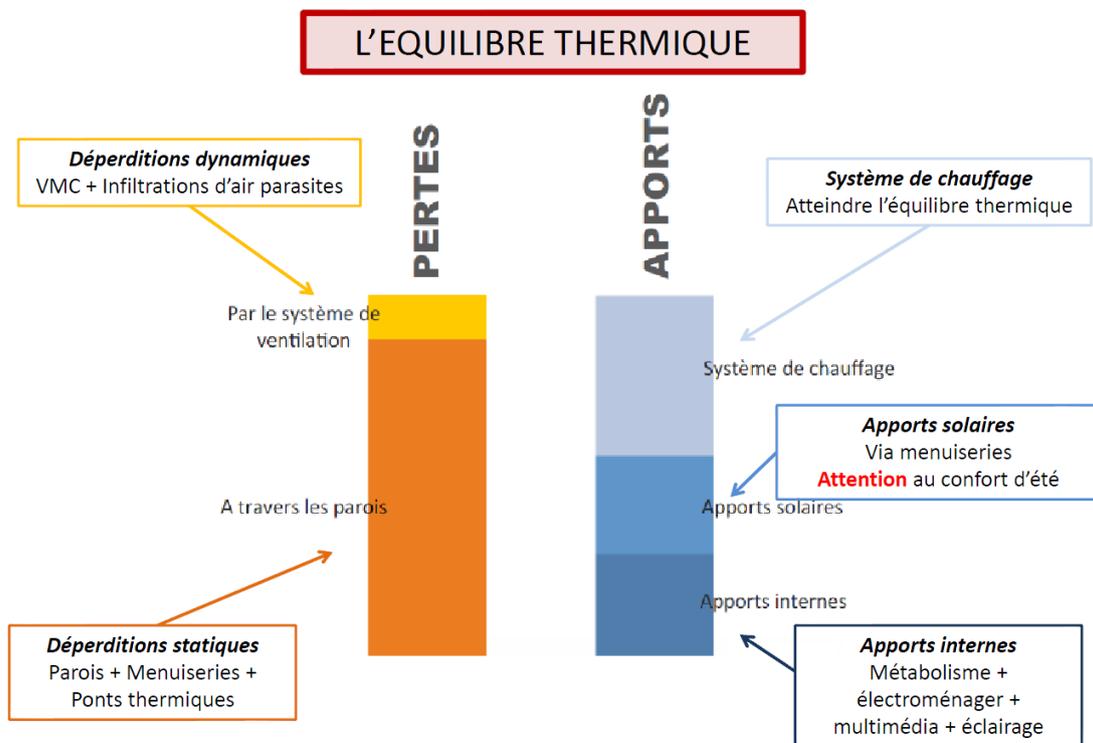
**Figure 2.57** : Comparaison entre la façade adaptative et les façades classiques

(Source : Karanouh et al., 2015)

La façade adaptative présente des biens faits sur plusieurs plans thermiques, lumineux et aérauliques (Karanouh et al., 2015). Ces systèmes dynamiques ont connu une exploitation croissante vu leurs atouts prouvés.

### II.3. La thermique du bâtiment

La thermique du bâtiment est un domaine très important qui traite les phénomènes thermiques relatifs aux constructions. L'objectif de l'étude de ce domaine est d'assurer l'équilibre thermique entre les pertes et les gains de la chaleur dans le bâtiment afin de fournir des ambiances confortables et des constructions performantes sur le plan thermique et énergétique (Figure 2.58).



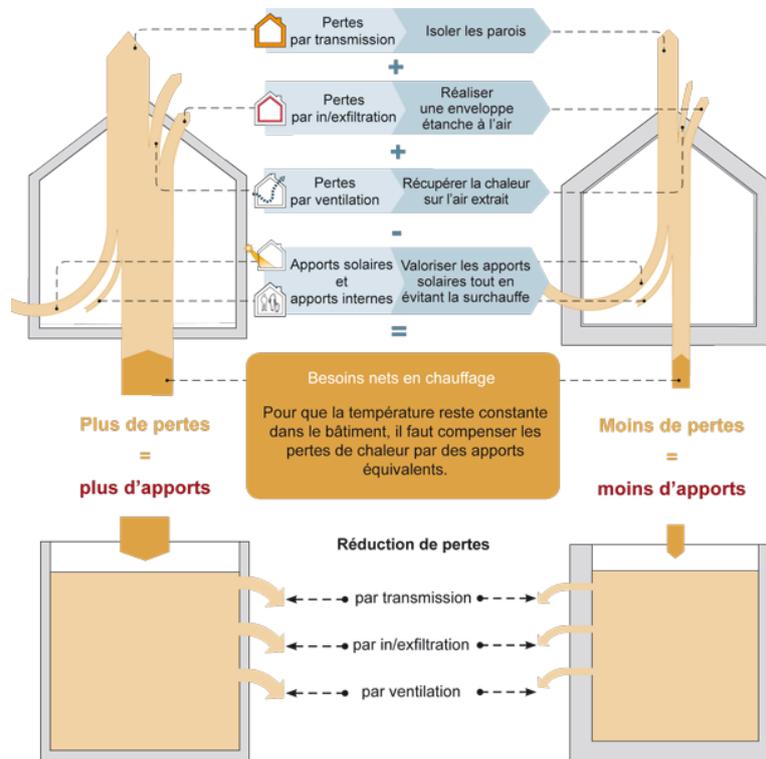
**Figure 2.58** : Les éléments de l'équilibre thermique d'un bâtiment (Source : BECICE<sup>5</sup>, 2017)

La grande quantité des pertes de la chaleur par rapport à la ventilation s'effectue par les parois (les ponts thermiques). Concernant les apports, les systèmes électriques sont responsables de la grande quantité.

La maîtrise des principes de ce domaine permettent de déterminer les différents problèmes et de trouver des solutions adéquates afin d'obtenir un bâtiment performant

<sup>5</sup> BECICE : est un Bureau d'étude technique certifié spécialisé en fluides appliqués au bâtiment, document : la conception architecturale (atelier du développement durable), 2017, repéré à : [www.becice.com](http://www.becice.com)

thermiquement et énergétiquement. La figure 2.59 illustre un schéma représentatif des problèmes et des solutions thermiques appropriées pour assurer la performance de l'enveloppe du bâtiment.



**Figure 2.59** : Les problèmes et les solutions thermiques de l'enveloppe du bâtiment  
(Source : Guillemeau et al., 2015)

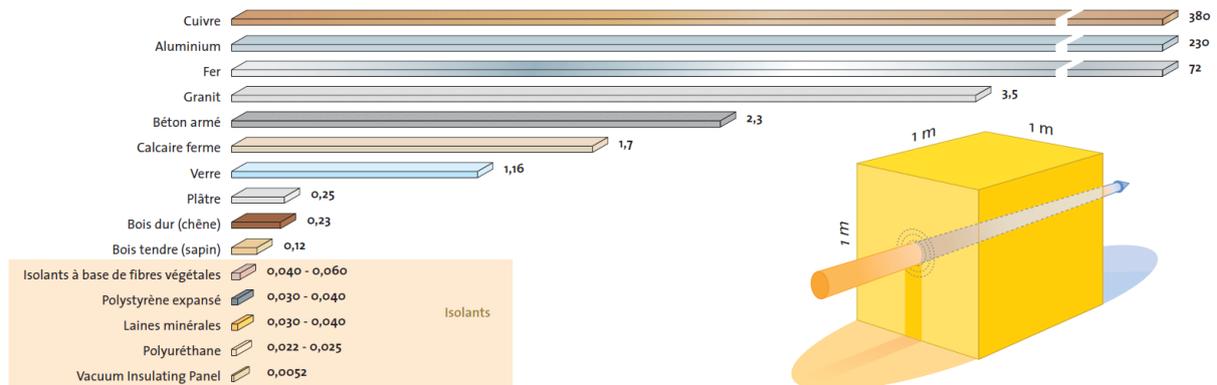
Cette figure présente un exemple pour le chauffage où il faut limiter les pertes et valoriser les gains afin d'assurer la performance thermique.

### II.3.1. Les notions de bases de la thermique du bâtiment et les caractéristiques des matériaux de construction

Le choix des matériaux de construction est une étape très importante dans le processus de la conception d'un bâtiment (Trachte, 2012). Cette étape déterminante nécessite la compréhension des notions de bases de la thermique du bâtiment et les caractéristiques thermiques des matériaux telles que la conductivité, la résistance, la transmission et l'inertie thermique.

La conductivité thermique ( $\lambda$  en W/m.K) est un paramètre qui caractérise la nature du matériau s'il est conducteur ou isolant, elle représente la quantité d'énergie traversant  $1 \text{ m}^2$  de matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré Celsius (Pajani,

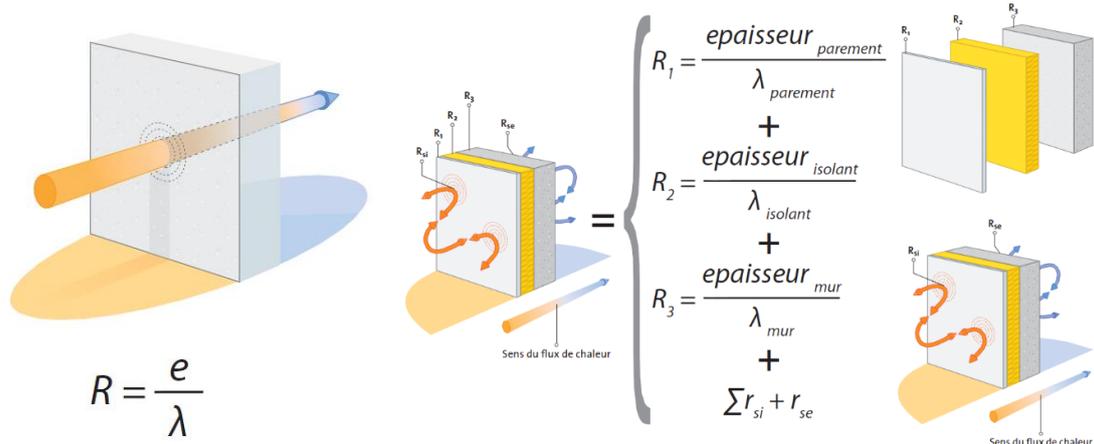
2012 ; Guillemeau et al., 2015 ; Saint-Gobain, 2016). La figure 2.60 présente un exemple des valeurs de la conductivité thermique de quelques matériaux.



**Figure 2.60 :** La conductivité thermique des matériaux (Source : Saint-Gobain, 2016)

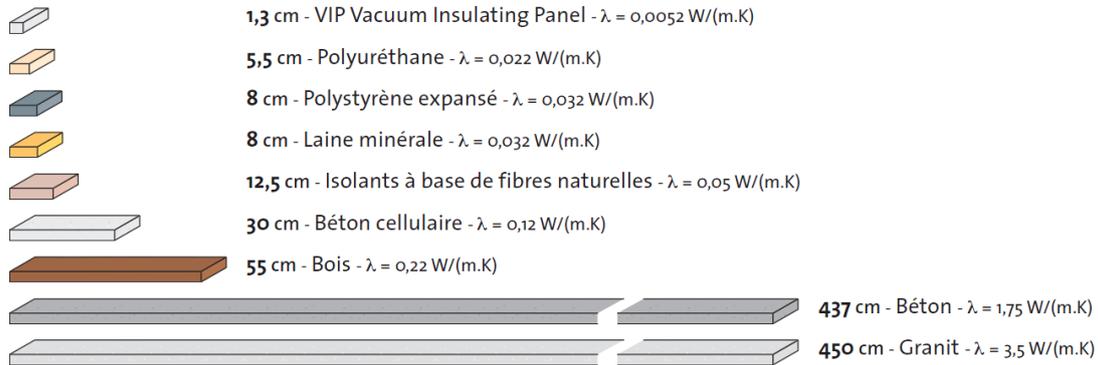
Plus la valeur de la conductivité thermique est faible ( $\lambda < 0,06 \text{ W/m.K}$ ), plus les matériaux sont isolants (Gallauziaux et Fedullo, 2010).

La résistance thermique ( $R$  en  $\text{m}^2.\text{K/W}$ ) représente la capacité du matériau à freiner le transfert de la chaleur par conduction, elle est calculée par le rapport de l'épaisseur du matériau sur sa conductivité thermique si le matériau est homogène ( $R = e / \lambda$ ), dans le cas d'un mur composé par plusieurs couches, elle se calcule par la somme de la résistance de chaque couche ( $R_{\text{mur}} = \sum R + R_{\text{si}} + R_{\text{se}}$ ) où  $R_{\text{si}}$  et  $R_{\text{se}}$  représentant les résistances thermiques superficielles des murs (Gallauziaux et Fedullo, 2010 ; Bouchié et al., 2013 ; Saint-Gobain, 2016) comme le démontre la figure 2.61.



**Figure 2.61 :** La résistance thermique d'un mur (Source : Saint-Gobain, 2016)

La figure 2.62 illustre un exemple des valeurs de la résistance thermique de quelques matériaux.

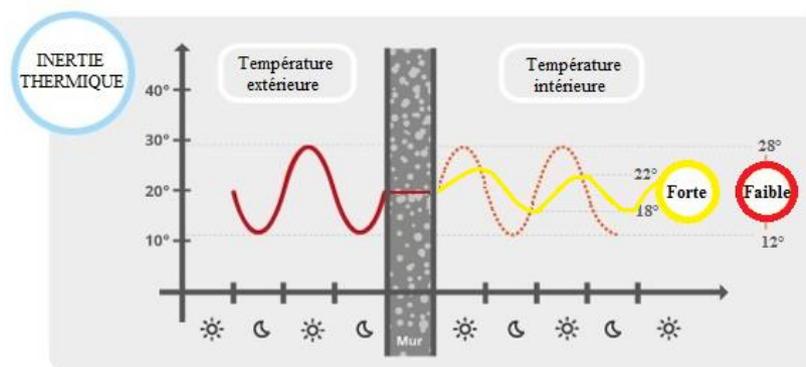


**Figure 2.62 :** La résistance thermique des matériaux (Source : Saint-Gobain, 2016)

Plus la valeur de la résistance thermique est élevée, plus le matériau est isolant (Gallauziaux et Fedullo, 2010).

La transmission thermique ( $U$  en  $\text{W/m}^2.\text{K}$ ) représente l'inverse de la résistance thermique ( $U_c = 1 / \sum R + R_{si} + R_{se}$ ), elle exprime la capacité du mur à échanger la chaleur entre deux ambiances adjacentes (Bouchié et al., 2013 ; Saint-Gobain, 2016).

L'inertie thermique correspond à la capacité du matériau à absorber, stocker et déstocker la chaleur emmagasinée (Fuchs et al., 2010 ; Gallauziaux et Fedullo, 2010). La figure 2.63 révèle le changement journalier de la température en fonction de l'inertie thermique (forte et faible).



**Figure 2.63 :** Le changement journalier de la température selon l'inertie thermique (Source : [www.inertie-vicat.shoot-the-moon.fr](http://www.inertie-vicat.shoot-the-moon.fr)- adaptée par l'auteur, 2017)

L'inertie thermique est caractérisée par la restitution de la chaleur après un certain temps (le temps de déphasage) et l'amortissement de sa valeur (Fuchs et al., 2010 ; Gallauziaux et Fedullo, 2010).

L'effusivité thermique ( $E_f$  en  $J/m^2.S.^{\circ}C$ ) ou chaleur subjective est la vitesse à laquelle la température surfacique du matériau varie, plus cette valeur est grande, plus la surface de la paroi se réchauffe ou se refroidit rapidement (Fuchs et al., 2010 ; Gallauziaux et Fedullo, 2010).

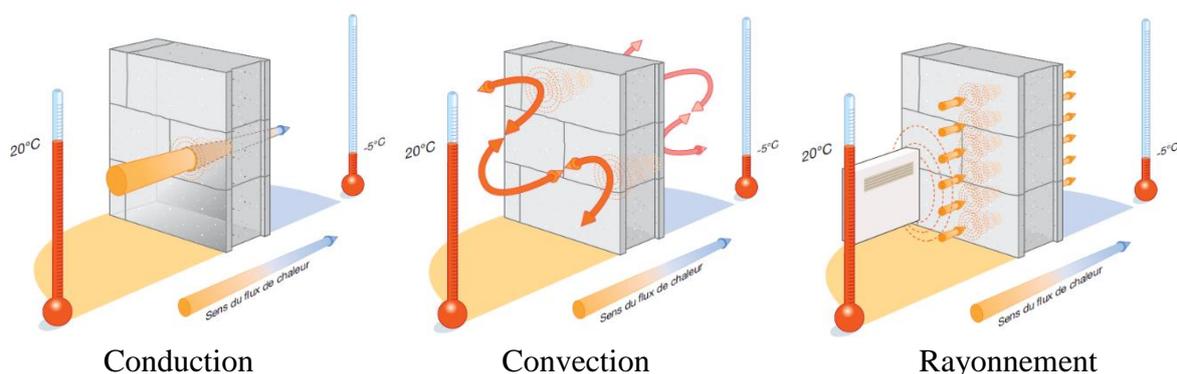
La diffusivité thermique ( $D$  ou  $\alpha$  en  $m^2/s$ ) représente la vitesse de pénétration de la chaleur dans un matériau (à l'intérieur du matériau), plus elle est élevée, plus le matériau s'échauffe et se refroidit rapidement (Fuchs et al., 2010 ; Pajani, 2012 ; Gallauziaux et Fedullo, 2010).

### II.3.2. Les différents modes de transfert de la chaleur

La différence de température entre deux ambiances ou deux éléments engendre des opérations de transition de la chaleur jusqu'à l'égalité des valeurs de températures. Selon Fuchs et al. (2010), Pajani (2012) et Saint-Gobain (2016), le transfert de la chaleur est effectué de la zone chaude vers la zone froide à travers trois modes :

- La conduction : représente le transfert ou la propagation de la chaleur en contact direct de proche en proche à travers les molécules d'un corps solide ;
- La convection : correspond au transfert de la chaleur entre un fluide (liquide ou gaz) et une surface d'un corps solide ;
- Le rayonnement : représente un transfert de chaleur sans aucun intermédiaire où la transition de la chaleur est effectuée par des ondes électromagnétiques.

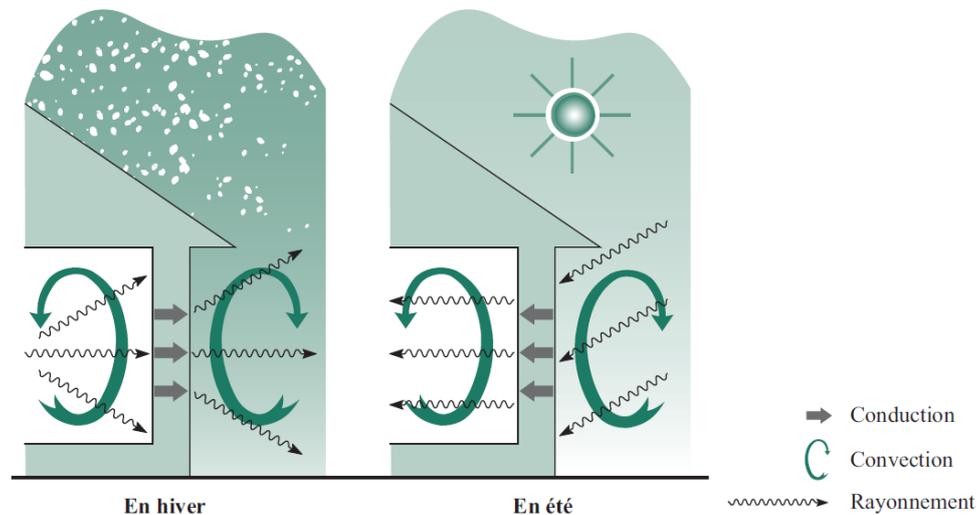
La figure 2.64 présente des schémas explicatifs de différents modes de transfert de la chaleur.



**Figure 2.64** : Les différents modes de transfert de la chaleur (Source : Saint-Gobain, 2016)

Les caractéristiques thermiques des matériaux et l'utilisation des isolants ont un grand rôle sur le comportement thermique des parois.

Le sens de transfert de la chaleur est influencé par la saison et les conditions climatiques (Figure 2.65).



**Figure 2.65 :** La variation du sens des transferts de la chaleur selon la saison  
(Source : Fuchs et al., 2010)

La différence de la température entre l'ambiance thermique interne et l'environnement externe change le sens de transfert de la chaleur.

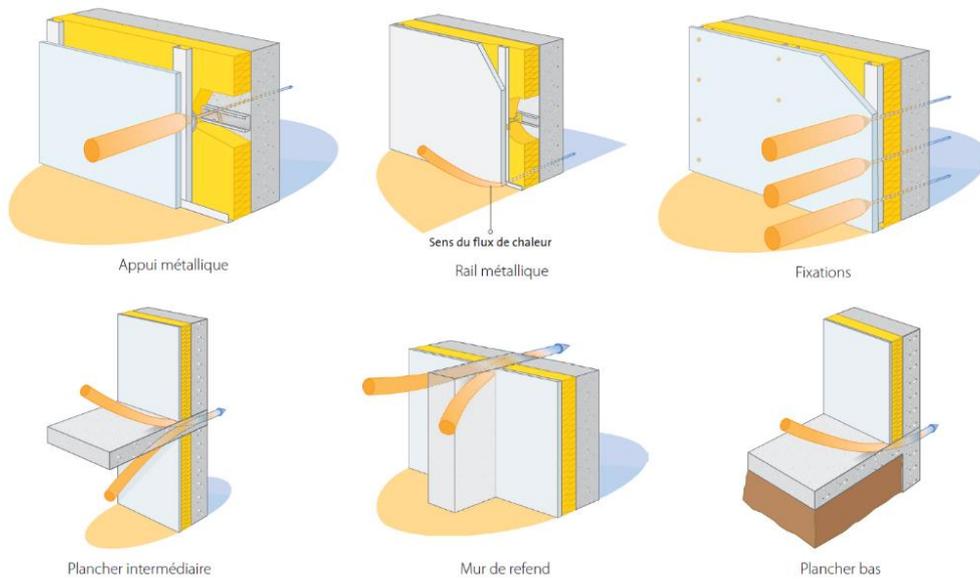
### II.3.3. Les ponts thermiques

Les ponts thermiques dans les bâtiments correspondent aux parties de l'enveloppe qui présentent une faiblesse de la résistance thermique et des fuites de la chaleur vers l'extérieur vu la rupture, l'absence ou la dégradation totale ou partielle de la couche isolante qui engendre de 10 à 20 % de déperdition énergétique (Pajani, 2012 ; Bouchié et al., 2013 ; Saint-Gobain, 2016).

Selon Bouchié et al. (2013) et Saint-Gobain (2016), il existe deux types de ponts thermiques :

- Les ponts thermiques intégrés PTI : ponctuels ou linéiques engendrés principalement par les appuis métalliques (les vis) et la structure métallique, ils sont exprimés par ( $\chi$  en W/m.K) ;
- Les ponts thermiques de liaison PTL : ou de liaisons structurelles, se situent principalement au niveau des décrochements, le changement de la géométrie de l'enveloppe, le changement du plan (vertical, horizontal) et le contact entre les éléments (mur, fenêtre, toiture, plancher), ils sont exprimés par un coefficient ( $\psi$  en W/m.K).

La figure 2.66 présente les types des ponts thermiques.

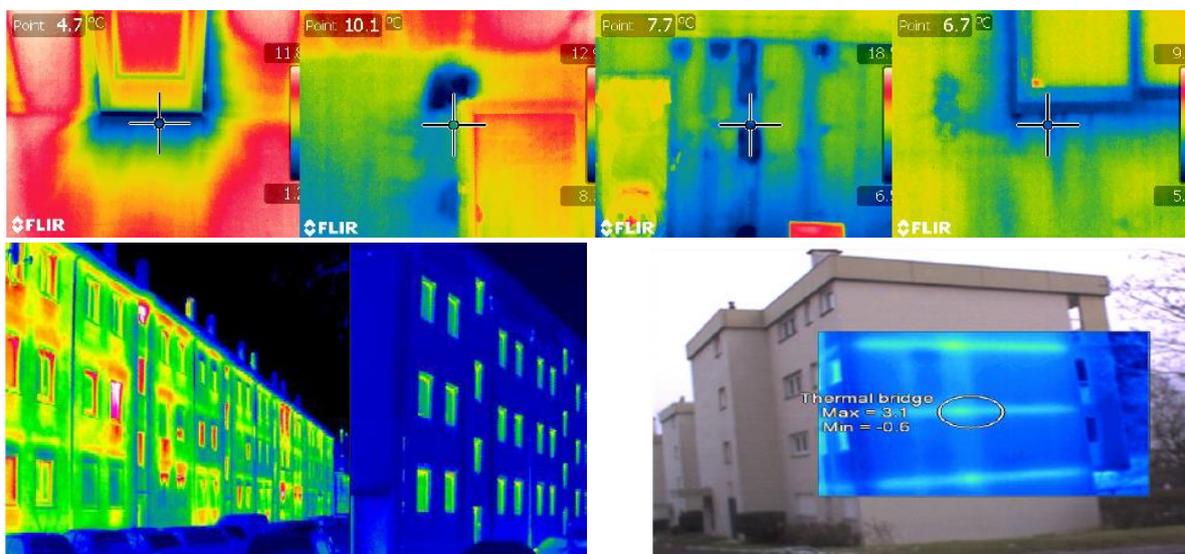


**Figure 2.66** : Les types des ponts thermiques (Source : Saint-Gobain, 2016)

La localisation des endroits des ponts thermiques est effectuée à travers une caméra thermique.

### II.3.4. La thermographie

La thermographie est une technique basée sur l'exploitation d'une caméra thermique infrarouge, elle donne des images thermiques ou thermogrammes comme une cartographie avec des valeurs de la température de l'objet étudié telle que l'enveloppe du bâtiment (Pajani, 2012). L'application au niveau de la façade permet de détecter les défauts de l'isolation thermique et d'étanchéité (Litvak et al., 2012). La figure 2.67 illustre des exemples des images thermiques.



**Figure 2.67** : Exemples des images thermiques (Source : Litvak et al., 2012)

### II.3.5. L'isolation thermique

L'isolation thermique de l'enveloppe est une opération qui consiste à mettre un matériau isolant de faible conductivité thermique (Figure 2.68) sur la paroi soit à l'intérieur ou à l'extérieur, elle est indispensable afin d'assurer le confort des occupants (Penu, 2015).



**Figure 2.68** : Les isolants thermiques (Source : Saint-Gobain, 2016)

Il existe plusieurs types d'isolants (minéraux, synthétiques, à base végétale, d'origine animale, etc.) où le choix du matériau isolant doit prendre en considération plusieurs paramètres thermiques, techniques, environnementaux et économiques (Penu, 2015 ; Saint-Gobain, 2016).

### Conclusion

Les bâtiments tertiaires et particulièrement les immeubles de bureaux représentent une part importante du secteur du bâtiment. Du point de vue de l'efficacité aussi bien thermique qu'énergétique de ces bâtiments, l'élément déterminant est certainement l'enveloppe. La façade, en particulier, représente un élément médiateur entre le bâtiment et son environnement. Elle peut être assimilée à une surface protectrice vis-à-vis des ambiances thermiques et une zone d'échange et de transfert thermique entre l'intérieur et l'extérieur. Son mode de fonctionnement thermique dépend de plusieurs facteurs conceptuels, matériels et techniques. L'évaluation de la performance climatique de la façade est basée principalement sur les principes de la thermique du bâtiment qui détermine son fonctionnement thermique propre et celui du bâtiment dans sa globalité. Implicitement, le confort des usagers ainsi que l'efficacité énergétique de l'édifice sont dépendant des attributs de la façade.

## **CHAPITRE III :**

# **Confort thermique et efficacité énergétique**

Ce chapitre porte à l'analyse des connaissances existantes sur le confort thermique intérieur selon différentes approches dans ce domaine. L'objectif est de mieux comprendre cette notion très importante avec ses divers paramètres et mécanismes. La deuxième partie aborde la consommation énergétique mondiale puis il focalise sur la consommation énergétique en Algérie par secteur d'activité. Par la suite, il traite le sujet de l'efficacité énergétique des constructions et leurs relations avec le confort thermique et leurs impacts sur la performance des bâtiments.

*« Il est plus simple d'évaluer le manque de confort que le confort »*

*W. Rybczynski*

*« La maîtrise de l'énergie n'est pas un médicament que l'on prend en période de crise, de maladie, mais une hygiène de vie qui permet de rester en bonne santé »*

*Pierre Radanne*

*Ancien directeur de Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME*

## CHAPITRE III : Confort thermique et efficacité énergétique

*« Man is the measure of all things » Protagoras*

### Introduction

Le confort thermique est une thématique très importante vu ses impacts sur la qualité de l'espace produit et la satisfaction des usagers vis-à-vis de ce dernier. Le confort thermique est une sensation de bien-être physique générée par la combinaison de plusieurs paramètres et facteurs liés au bâtiment, au climat et aux utilisateurs. Cette notion constitue, aujourd'hui un grand champ de recherches car son importance et son caractère multidisciplinaire ont engendré l'apparition de plusieurs approches d'investigation et d'évaluation. La nature de l'ambiance thermique ressentie à l'intérieur de l'espace influe sur le comportement de l'occupant et ses gestes de régulation. Implicitement, l'ambiance inconfortable pousse les usagers à recourir à des moyens mécaniques de régulation thermique sous forme d'équipements de chauffage et de climatisation. Ceci engendre une augmentation de la consommation énergétique au dépend d'une exploitation irrationnelle des ressources non renouvelables et de la dégradation irréversible de l'environnement. Ce chapitre met en exergue les principales notions relatives au confort thermique et à l'efficacité énergétique.

### III.1. Le confort thermique intérieur

Le confort thermique est une notion très complexe vu le grand nombre de facteurs l'influençant et son caractère subjectif. En effet, il est difficile de donner une définition précise du confort thermique, mais d'une manière générale, il signifie l'existence d'un état de satisfaction de l'occupant dans une ambiance thermique.

À ce propos, il existe plusieurs études dans la littérature qui donne des éclaircissements sur cette notion. De son côté Givoni (1978), le confort thermique ne peut être établi que si les mécanismes d'autorégulation du corps humain soient à un niveau minimum d'activité. D'une manière plus simplifiée, Fanger voit que le confort thermique est l'absence d'inconfort.

D'après Liébard et De Herde (2005), le confort thermique *« est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique*

établi par échange thermique entre le corps et son environnement ». Dans la même perspective, Hall (2010), voit que le confort thermique explique un état positif souhaitable par les personnes. En outre, Faria-Neto et al. (2016), considèrent le confort thermique comme un concept subjectif représentant un bon état d'esprit des personnes relatif à la sensation de la chaleur et du froid.

À son tour, Moser (2009), voit que « *Le confort est lié aux sentiments, à la perception, à l'humeur et à la situation. Sa définition fait à la fois appel à une approche négative (absence d'inconfort, qui se caractérise par exemple par l'absence de douleur, d'anxiété, ...) et à une approche positive (bien-être, satisfaction)* ». Cette définition globale donne une idée sur la complexité du confort thermique vu ses multiples paramètres physiques, physiologiques, et psychologiques qui engendrent des recherches dans des disciplines différentes (Batier, 2016).

Selon Sassine (2017), le confort thermique est un terme très vaste et ambigu car l'aspect subjectif de cette notion varie d'un individu à un autre selon plusieurs paramètres.

### III.1.1. Les paramètres influant sur le confort thermique

Le confort thermique de l'être humain dépend principalement de six paramètres de nature physiologiques, comportementaux et environnementaux liés à l'individu et à l'environnement tels que le métabolisme, l'habillement, la température ambiante de l'air, la température des parois, l'humidité relative et la vitesse de l'air (Liébard et De Herde, 2005 ; Bonte, 2014 ; Jedidi et Benjeddou, 2016 ; Faria-Neto et al., 2016) comme de démontre la figure 3.1.

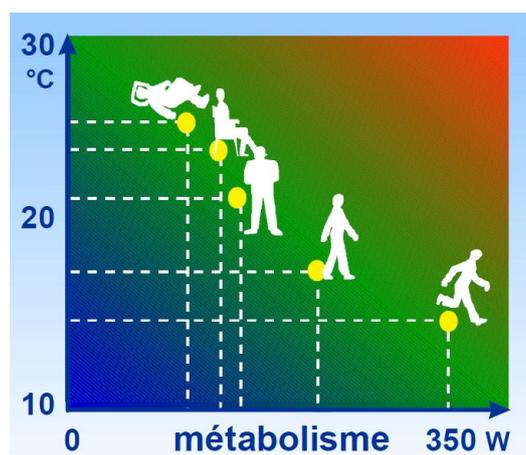


**Figure 3.1 :** Les paramètres influant sur le confort thermique  
(Source : www.pae-engineers.com - adaptée par l'auteur, 2018)

### III.1.1.1. Les paramètres liés à l'individu

#### III.1.1.1.1. Le métabolisme

Le métabolisme (M) du corps humain est l'opération de la production de la chaleur afin de maintenir la température du corps autour de 36,7 °C. Ce paramètre varie en fonction de l'activité qui influe directement sur la température du confort (Figure 3.2).



**Figure 3.2 :** L'impact de l'activité et du métabolisme sur la température du confort

(Source : Liébard et De Herde, 2005)

Le tableau 3.1 illustre l'impact de différentes activités sur les valeurs du métabolisme (M en met et en W/m<sup>2</sup>).

**Tableau 3.1 :** L'impact de l'activité sur les valeurs du métabolisme

(Source : Jedidi et Benjeddou, 2016)

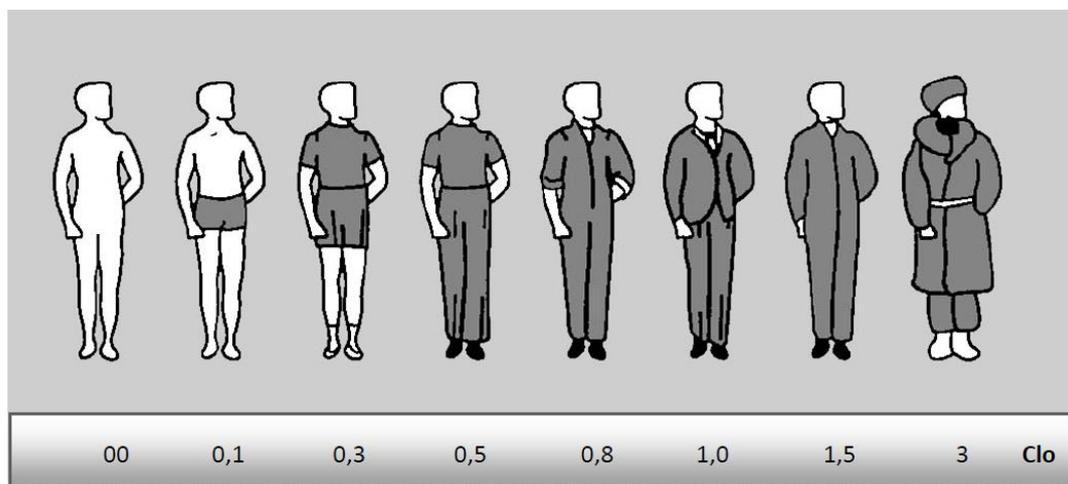
L'activité	met	W/m <sup>2</sup>
Repos, couché	0,8	45
Repos, assis	1,0	58
Activité légère, assis (bureau, école)	1,2	70
Activité légère, debout (laboratoire, industrie légère)	1,6	95
Activité moyenne, debout (travail sur machine)	2,0	115
Activité soutenue (travail lourd sur machine)	3,0	175

Le métabolisme (M) exprimé en "met" ou en "W/m<sup>2</sup>" où 1 met = 58,15 W/m<sup>2</sup> (Batier, 2016).

Les valeurs du métabolisme augmentent avec le renforcement du rythme d'activité ce qui engendre la production de la chaleur et l'augmentation des échanges thermiques entre le corps et l'environnement.

### III.1.1.1.2. L'habillement

L'habillement ou l'isolement vestimentaire, est considéré comme un élément de résistance thermique contre les échanges de la chaleur entre la surface de la peau et l'ambiance thermique (Figure 3.3), il est mesuré en "Clo" où  $1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ } ^\circ\text{C.m}^2/\text{W}$  (Mazari, 2012, Lavoye et al., 2015).



**Figure 3.3 :** Valeurs de l'isolement vestimentaire de différents vêtements

(Source : Mazari, 2012)

Le tableau 3.2 présente les valeurs de l'isolement vestimentaire en fonction des tenues vestimentaires en détail.

**Tableau 3.2 :** Les valeurs de l'isolement vestimentaire en fonction des tenues vestimentaires

(Source : Batier, 2016)

Clo	Description des tenues vestimentaires (comprenant les chaussures, les chaussettes ou les bas)
0,30	Slip, T-shirt, shorts, chaussettes, sandales
0,50	Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures
0,70	Slip, jupon, bas, robe, chaussures
0,70	Sous-vêtements, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures
1,00	Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures
1,10	Slip, bas, corsage, jupe longue, veste, chaussures
1,30	Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot, veste, chaussettes, chaussures
1,50	Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, gilet, veste, manteau, chaussettes, chaussures

Chaque élément de l'habillement influe directement sur la valeur de l'isolement vestimentaire qui influe pour sa part sur les échanges thermiques entre le corps et l'environnement.

### III.1.1.2. Les paramètres liés à l'environnement

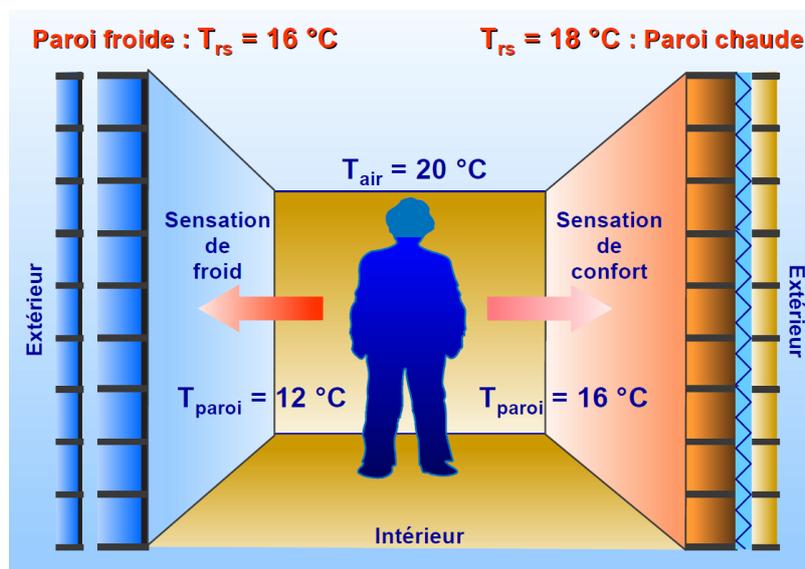
#### III.1.1.2.1. La température ambiante de l'air

La température ambiante de l'air ( $T_a$ ) est un paramètre très important qui influe sur la température du confort (Figure 3.4). Cette dernière appelée aussi la température opérative ou la température résultante sèche, elle est calculée par la moyenne de la température ambiante ( $T_a$ ) et la température des parois ( $T_p$ ) (Jedidi et Benjeddou, 2016) comme le démontre la formule suivante :

$$T_{rs} = \frac{T_a + T_p}{2}$$

#### III.1.1.2.2. La température des parois

La température des parois ( $T_p$ ) représente la température moyenne de toutes les parois internes (Figure 3.4). Ce paramètre influe sur la température opérative ainsi que sur le confort tactile par l'effet de la paroi froide ou la paroi chaude.

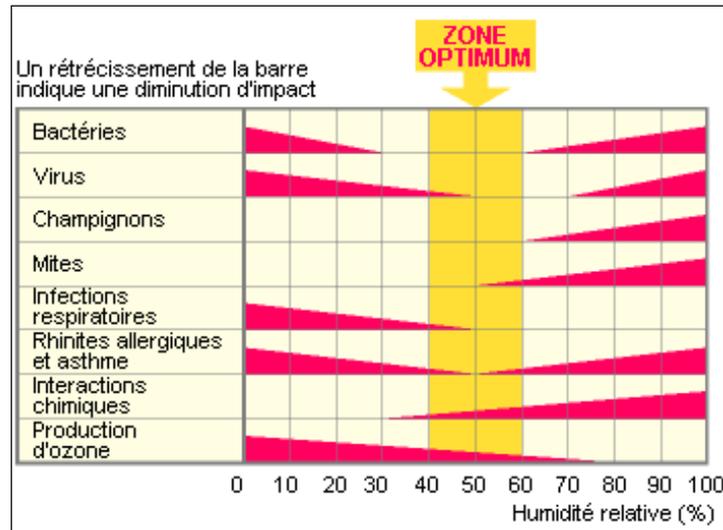


**Figure 3.4 :** L'influence de la température de l'air et des parois sur la température de confort  
(Source : Liébard et De Herde, 2005)

La prise en compte de la température de l'air et la température des parois permet d'assurer des ambiances confortables.

### III.1.1.2.3. L'humidité relative

L'humidité relative (HR) représente le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ( $T_a$ ) et la quantité maximale d'eau contenue à la même température (Jedidi et Benjeddou, 2016). La figure 3.5 illustre la plage de taux d'humidité ambiante exprimée en pourcentage (%) et ses différents impacts.



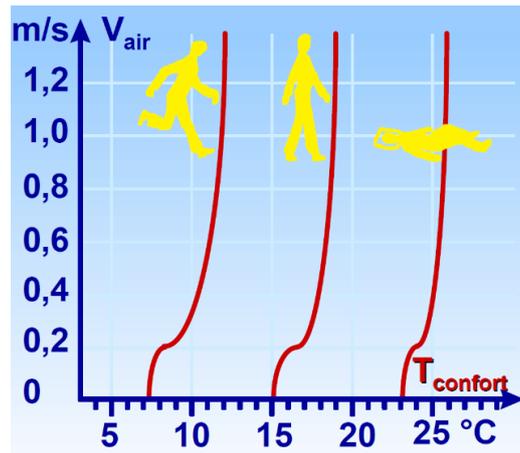
**Figure 3.5 :** La plage de taux d'humidité ambiante et ses différents impacts  
(Source : [www.energieplus.be](http://www.energieplus.be), d'après Scofield et Sterling, 2017)

La plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique se situe entre 40 et 60 %. Pour plus de détails, Jedidi et Benjeddou (2016), voient que les problèmes liés à l'humidité commencent hors de la plage d'humidité (de 40 à 60 %) avec deux manières :

- Un taux d'humidité inférieur à 30 % :  
Un milieu sec avec des problèmes respiratoires et l'augmentation de la concentration de la poussière dans l'air, etc. ;
- Un taux d'humidité supérieur à 70 % :  
Une ambiance très humide qui engendre des problèmes de la condensation, la croissance des microbes et des virus ainsi que l'apparition des champignons.

### III.1.1.2.4. La vitesse de l'air

La vitesse de l'air ( $V_{air}$ ) est un paramètre qui influe sur les échanges de la chaleur par convection et augmente l'évaporation de la surface de la peau, elle est mesurée en "m/s" (Liébard et De Herde, 2005). La figure 3.6 présente la variation de la température du confort selon la vitesse de l'air avec un habillement moyen.



**Figure 3.6 :** La variation de la température de confort en fonction de la vitesse de l'air  
(Source : Liébard et De Herde, 2005)

Après la vitesse de 0,2 m/s, l'air pousse l'individu à ressentir son mouvement et constitue une source de gêne (Jedidi et Benjeddou, 2016).

### III.1.2. Les échanges de la chaleur entre le corps et son environnement

Dans toutes ambiances thermiques, un ensemble d'échanges de chaleur se font entre le corps de l'occupant et l'environnement thermique. Cette interaction engendre des échanges cutanés et respiratoires (Mazari, 2012).

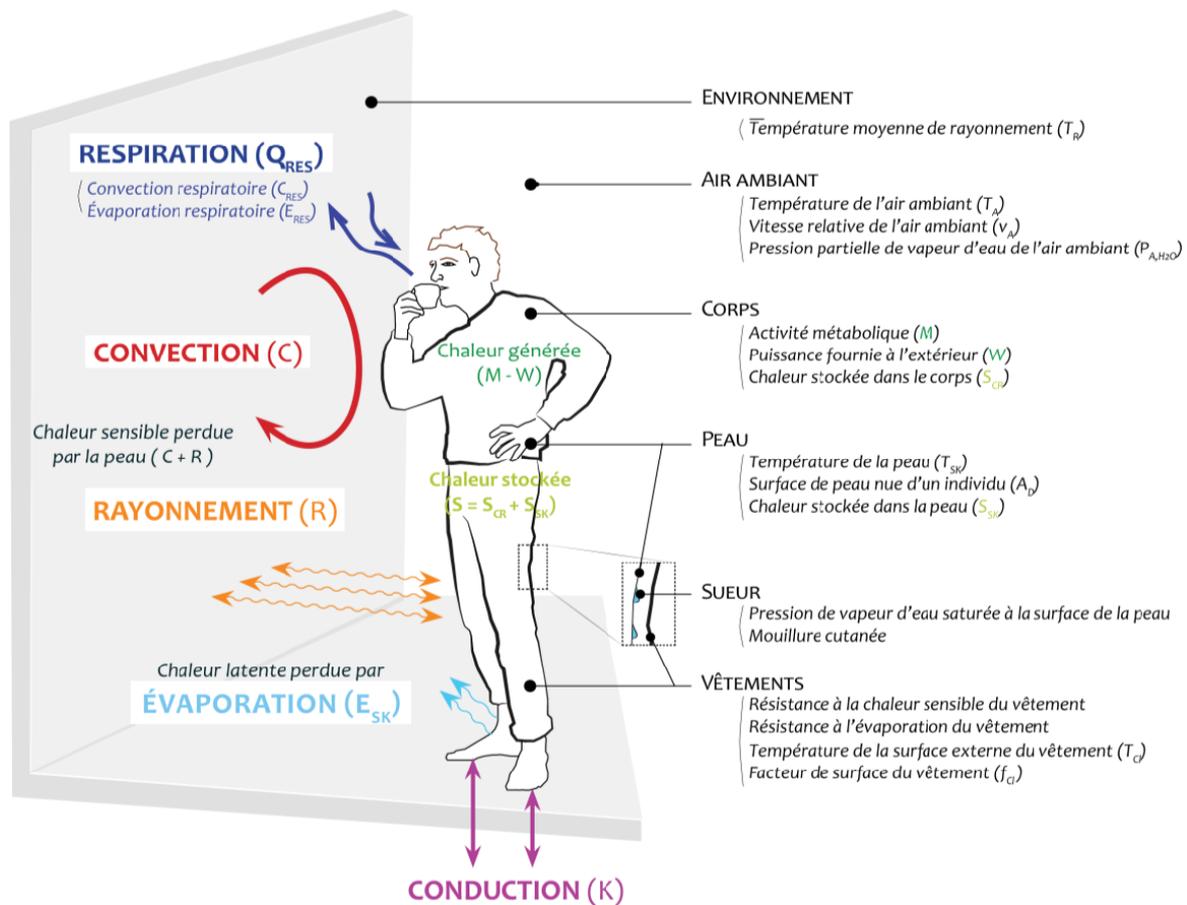
Dans cette optique, Batier (2016) dans sa thèse, a détaillé les échanges de chaleurs effectués entre la peau et l'ambiance thermique ( $Q_{SK}$ ) et les échanges respiratoires ( $Q_{RES}$ ). De son côté, les échanges cutanés sont composés d'échange de chaleur par convection, par conduction, par rayonnement et par évaporation de la sueur selon l'équation suivante :

$$Q_{SK} = C + R + K + E_{SK}$$

Où :

- $Q_{SK}$  : Le flux de chaleur échangé à la surface de la peau ( $W/m^2$ ) ;
- $C$  : L'échange de chaleur par convection ( $W/m^2$ ) ;
- $K$  : L'échange de chaleur par conduction ( $W/m^2$ ) ;
- $R$  : L'échange de chaleur par rayonnement ( $W/m^2$ ) ;
- $E_{sk}$  : L'échange de chaleur par évaporation de la sueur ( $W/m^2$ ).

La figure 3.7 résume les échanges de chaleurs effectués entre le corps et l'ambiance.



**Figure 3.7 :** Les échanges thermiques entre le corps et son environnement

(Source : Batier, 2016)

Selon Batier (2016), les échanges respiratoires ( $Q_{RES}$ ) s'effectuent par convection ( $C_{RES}$ ) et par évaporation ( $E_{RES}$ ) comme il est illustré par l'équation suivante :

$$Q_{RES} = C_{RES} + E_{RES}$$

Où :

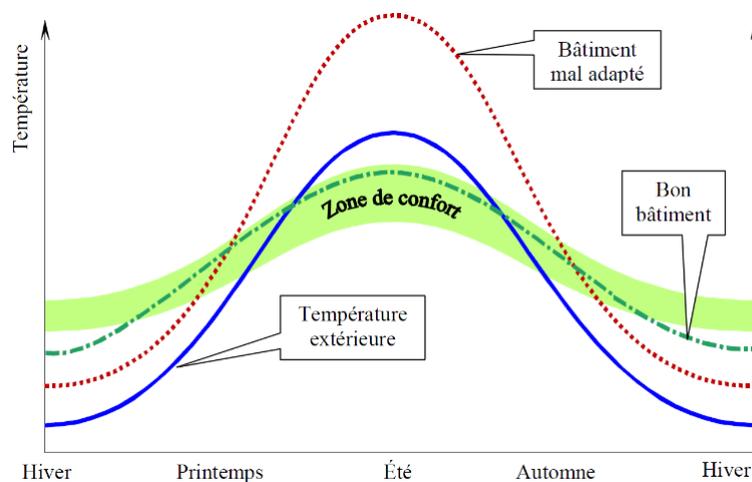
- $Q_{RES}$  : Le flux de chaleur échangé par la respiration ( $W/m^2$ ) ;
- $C_{RES}$  : Les échanges thermiques par la convection respiratoire ( $W/m^2$ ) ;
- $E_{RES}$  : Les échanges thermiques par l'évaporation respiratoire ( $W/m^2$ ).

Les pertes respiratoires sont relativement faibles par rapport aux pertes cutanées (Batier, 2016).

### III.1.3. L'équilibre thermique de l'occupant avec le bâtiment et l'environnement

La bonne conception d'un bâtiment signifie l'existence de bonnes relations harmonieuses entre l'utilisateur, tous les composants du bâtiment et l'environnement. La prise en compte du contexte climatique pendant la conception influe directement sur le fonctionnement de la construction au niveau de plusieurs plans entre autres ceux de nature thermique. Ce dernier pour sa part, influe sur le comportement thermique des occupants, leurs gestes et leurs satisfactions.

La figure 3.8 illustre l'évolution des températures dans deux bâtiments (un mal adapté et l'autre bien adapté) dans des conditions naturelles (sans chauffage ou climatisation) durant toute l'année.

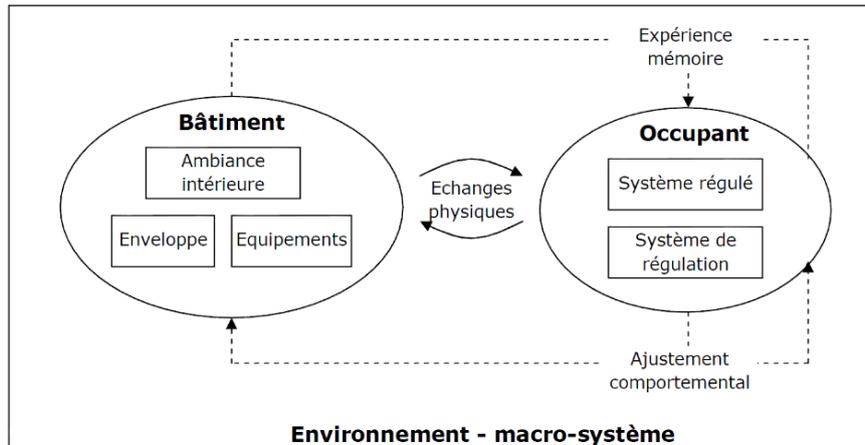


**Figure 3.8 :** L'évolution des températures dans deux bâtiments au cours de l'année sans chauffage et sans climatisation (Source : Roulet, 2004)

Le bâtiment mal adapté engendre une hausse considérable de la température pendant la période chaude avec des températures très basses durant la période froide. Par contre, le bâtiment bien adapté assure des températures confortables autour de la zone de confort thermique durant toute l'année. De son côté Roulet (2004), trouve que le bâtiment bien adapté est confortable naturellement. Par ailleurs, l'autre bâtiment nécessite des installations immenses afin d'assurer des ambiances thermiques acceptables. À ce propos, Gounni et al. (2018) voient que L'architecture actuelle mal adaptée (faible inertie thermique, grandes surfaces vitrées, etc.) favorise l'exploitation excessive de l'énergie afin d'établir le confort thermique des usagers.

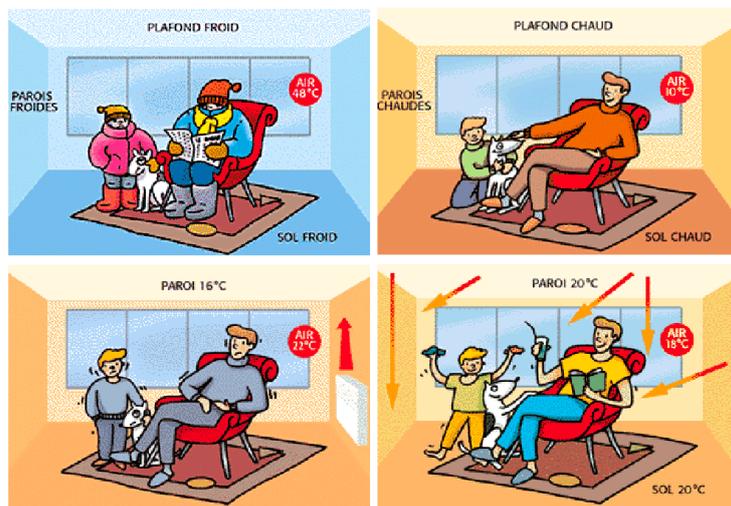
L'intégration du bâtiment dans son environnement a une grande influence sur les utilisateurs et la construction. L'interaction du bâtiment et l'environnement avec les occupants de l'espace influe sur leur sensation thermique et ses mécanismes d'ajustement et d'adaptation ce qui influe sur ses gestes (l'ouverture des fenêtres ou l'exploitation des équipements, etc.).

La figure 3.9 présente un schéma des caractéristiques structurales d'un modèle du confort thermique décrivant la relation entre l'environnement, le bâtiment et l'occupant.



**Figure 3.9 :** Caractéristiques structurales d'un modèle du confort thermique  
(Source : Moujalled, 2007)

La relation entre l'occupant et le bâtiment varie en fonction des composants de l'édifice (enveloppe et équipements) et les mécanismes du corps de l'occupant ce qui nécessite un choix adéquat des éléments de la construction (enveloppe, matériaux, isolation, etc.) en fonction des besoins de l'utilisateur afin d'assurer l'équilibre thermique de son corps (Figure 3.10).



**Figure 3.10 :** L'impact de la température ambiante et surfacique sur l'équilibre thermique des occupants (Source : Misse, 2011)

En effet, un bâtiment mal adapté avec un choix inapproprié des éléments de l'enveloppe engendre des situations thermiques inconfortables durant toute l'année sous l'influence des besoins paradoxaux des fonctions de l'enveloppe et ses impacts sur l'ambiance thermique à travers des gains et des pertes selon la saison.

D'après Moujalled (2007) et Batier (2016), le bilan thermique d'un individu englobe tous les mécanismes physiologiques comme il est présenté dans l'équation suivante :

$$M - W = Q_{SK} + E_{RES} + S$$

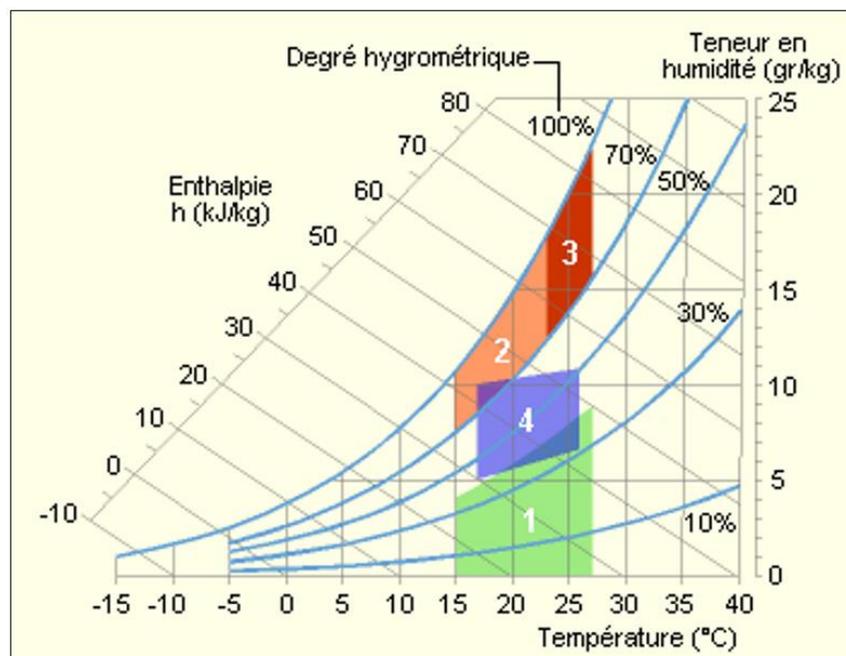
Où :

- M : Activité métabolique (W/m<sup>2</sup>) ;
- W : Puissance fournie à l'extérieur (W/m<sup>2</sup>) ;
- Q<sub>SK</sub> : Flux de chaleur échangé à la surface de la peau (W/m<sup>2</sup>) ;
- E<sub>RES</sub> : Flux de chaleur échangé par la respiration (W/m<sup>2</sup>) ;
- S : Chaleur stockée (W/m<sup>2</sup>).

De là s'impose l'importance de prendre en considération la relation entre l'occupant, le bâtiment et l'environnement (le climat) afin d'établir l'équilibre thermique de l'occupant et assurer la performance énergétique du bâtiment.

### III.1.4. La plage de confort température-humidité

Le confort température humidité est appelé un confort hygrothermique. La plage de confort hygrothermique est déterminée par un diagramme (Figure 3.11).



**Figure 3.11** : La plage de confort hygrothermique (Source : [www.energieplus.be](http://www.energieplus.be)<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> Extrait de l'article de Fauconnier, R. (1992). L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires parut dans le numéro. *Revue Chauffage Ventilation Conditionnement*, Vol. 10.

Grace à ce diagramme, la détermination de la plage de confort hygrothermique est possible par la lecture des valeurs des températures et de l'humidité relative (Jedidi et Benjeddou, 2016).

Les quatre zones suivantes sont déterminées dans ce diagramme :

1. zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse ;
2. zone à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons ;
3. zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens ;
4. polygone de confort hygrothermique.

### **III.1.5. L'interdisciplinarité du confort thermique**

Le confort thermique est une notion très vaste car elle englobe plusieurs domaines et elle touche plusieurs aspects. Il est très complexe et dépend de nombreux facteurs qui ont une incidence sur la sensation et la satisfaction des personnes (Huebner et al., 2016). Dans cette perspective, Moujalled (2007) dans sa thèse, voit que « *L'étude du confort thermique doit être menée en considérant ses différents aspects physiques, physiologiques et psychologiques pour prendre en compte les interrelations entre les conditions thermiques de l'environnement, les réponses physiologiques, et les phénomènes psychologiques (sensation, comportement)* ».

L'individu est considéré comme une machine thermique dans l'approche physique. L'approche physiologique étudie les mécanismes d'autorégulation et l'approche psychologique focalisant sur le côté psychologique. L'interaction entre toutes ces approches et mécanismes donne la réponse de la personne vis-à-vis de l'ambiance thermique (Moujalled, 2007).

La caractéristique essentielle de cette notion est sa pluridisciplinarité qui réunit plusieurs domaines comme l'énergie, l'informatique et la matière (Moujalled et al., 2008) ainsi que la physique, la psychologie, l'architecture et la biologie (Batier, 2016).

En effet, le confort thermique a constitué un grand champ de recherche dans le domaine de l'architecture, car l'objectif principal de la conception architecturale est de fournir des ambiances confortables aux usagers de l'espace. Pour cette raison, il est nécessaire pour l'architecte de cerner les paramètres du confort et les mécanismes du corps humain et les prendre en compte lors de la conception afin d'assurer le bien-être des occupants.

### III.1.6. Les approches et les modèles d'évaluation du confort thermique

Dans la littérature du confort thermique, il existe deux approches, l'approche analytique (ou statique) et l'approche adaptative (Moujalled, 2007 ; Richieri, 2008 ; Huebner et al., 2016).

Dans la même perspective, Cantin et al. (2005), voient que « *le domaine de recherche sur le confort thermique est partagé entre deux approches. La première étudie le confort thermique d'une façon analytique. La deuxième approche, basée sur l'incapacité de l'approche analytique à représenter la réalité du confort thermique dans les bâtiments, est l'approche adaptative* ».

Selon Moujalled (2007), ces deux approches sont complémentaires, de son côté il voit que « *Malgré le conflit apparent entre les deux approches, elles ne sont pas contradictoires dans le principe. Elles sont complémentaires. L'approche analytique se focalise sur l'aspect physique et physiologique du confort thermique. L'approche adaptative traite le confort thermique à travers les réactions comportementales et adaptatives de l'occupant dans son lieu de vie habituel* ».

#### III.1.6.1. L'approche analytique

Selon Santamouris (2006), les normes et les méthodes d'évaluation primaire du confort thermique sont axées essentiellement sur des conditions stables dans des laboratoires et basées particulièrement sur le transfert thermique entre le corps, l'environnement et le côté physiologique. De son côté, les méthodes les plus connues sont l'indice de confort thermique PMV de Fanger et le modèle de Gagge à deux nœuds.

Pour plus de détails, l'approche analytique ou statique est basée principalement sur le côté physique et physiologique à travers le calcul du bilan thermique du corps humain et ses échanges avec l'ambiance thermique, ce qui donne la possibilité de la prédiction du niveau du confort grâce à l'exploitation des indices déterminés expérimentalement dans des chambres climatiques (Moujalled, 2007 ; Moujalled et al., 2008 ; Batier, 2016).

Grâce à des recherches sur un grand nombre de personnes (environ 1300 personnes) au niveau des chambres climatiques, Fanger a rédigé un livre en 1970 sous le titre « Thermal Comfort », qui est considéré comme une référence très importante dans le domaine du confort thermique (Hall, 2010).

### III.1.6.1.1. Le modèle de Fanger PMV et PPD

D'après Robillart (2015), l'approche développée par Fanger (1967) avec les indices de PMV « Predicted Mean Vote ou Vote Moyen Prévisible » et PPD « Predicted Percentage Dissatisfied ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits » sont les plus exploités pour décrire le confort thermique de l'être humain. Dans cette approche, Fanger considère que le niveau du confort thermique varie en fonction de trois éléments, l'équilibre du bilan thermique, la température moyenne de la peau et la sudation située dans les limites du confort (Hall, 2010 ; Robillart, 2015).

L'indice de « PMV » donne le vote moyen des individus interrogés qui indique des avis sur leurs sensations thermiques moyennes selon l'échelle de l'ASHRAE<sup>2</sup> qui varie de (-3) à (+3) où chaque numéro exprime une sensation thermique (Moujalled, 2007, Richieri, 2008).

Le tableau 3.3 illustre l'échelle de l'ASHRAE et la sensation thermique de chaque valeur.

**Tableau 3.3** : La sensation thermique exprimée selon l'échelle de l'ASHRAE

(Source : Jedidi et Benjeddou, 2016)

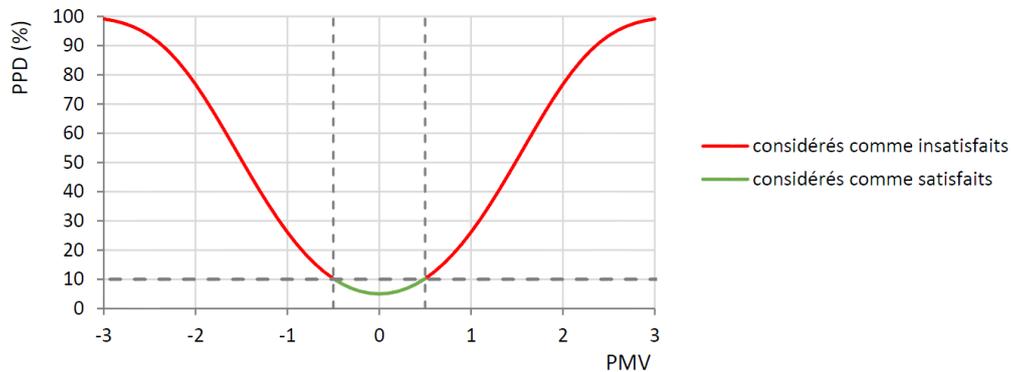
L'échelle de l'ASHRAE	Sensation thermique
+3	Chaud
+2	Tiède
+1	Légèrement tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

Les valeurs négatives expriment des températures très basses et les valeurs positives indiquent des températures très élevées. La zone du confort thermique se situe entre (-1) et (+1). Un indice du PMV égale à (0) exprime une sensation optimale du confort thermique (Robillart, 2015 ; Jedidi et Benjeddou, 2016).

A cause de l'insuffisance de l'indice du PMV à exprimer le confort et la satisfaction des personnes ainsi que l'existence des situations où les individus sont insatisfaits, Fanger a développé l'indice du PPD « Predicted Percentage Dissatisfied » qui complète le premier indice PMV et permet de déterminer le pourcentage des personnes insatisfaites vis-à-vis de

<sup>2</sup> American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

l'ambiance thermique (Cantin et al., 2005 ; Robillart, 2015). La figure 3.12 illustre la répartition de l'indice du PPD en fonction du PMV.



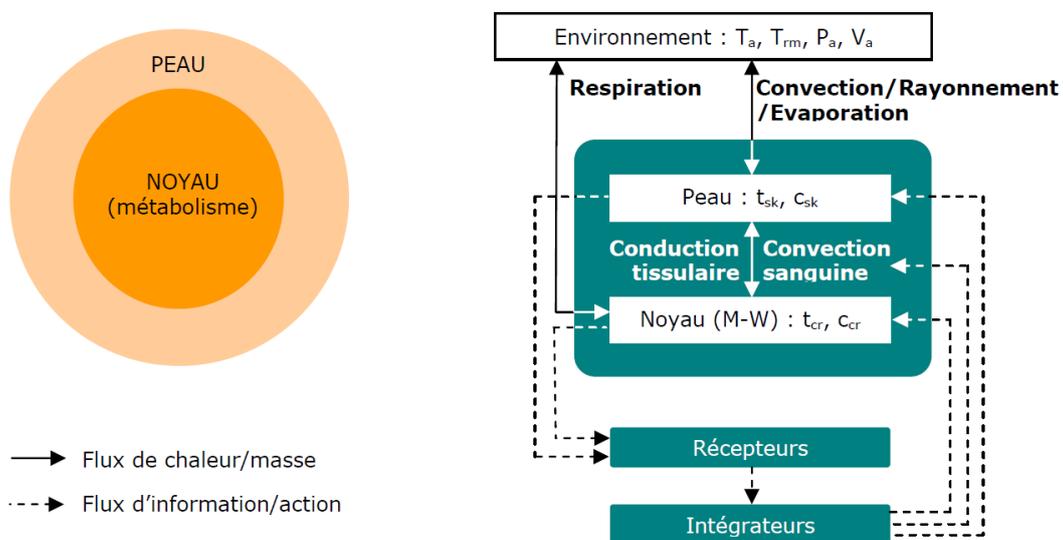
**Figure 3.12 :** La répartition du PPD en fonction du PMV (Source : Batier, 2016)

Malgré que l'indice du PMV soit égal à (0), il exprime une sensation idéale du confort thermique, il y a toujours un pourcentage de 5 % des personnes insatisfaites par rapport à l'environnement thermique comme le démontre l'axe du PPD.

En outre, l'application de l'indice du PMV reste valable uniquement pour des ambiances homogènes car ces études ont été effectuées dans des chambres climatiques avec des conditions stationnaires (Moujalled, 2007).

### III.1.6.1.2. Le modèle de Gagge

Gagge a développé un modèle dynamique simple de la thermorégulation, il partage le corps à deux parties (deux nœuds) présentant le centre du corps (le noyau) et la peau (Batier, 2016). La figure 3.13 présente le modèle physiologique à deux nœuds de Gagge.



**Figure 3.13 :** Représentation du modèle physiologique de Gagge (Source : Moujalled, 2007)

Contrairement au modèle de Fanger, le modèle de Gagge à deux compartiments concentriques et dynamiques qui permettent de compter les variables physiologiques (températures internes, températures cutanées et mouillure cutanée) dans des conditions transitoires instationnaires (Cantin et al., 2005 ; Moujalled, 2007).

Gagge a développé l'indice SET « Standard Effective Temperatur ou Température Standard Effective » par l'exploitation de la température cutanée et la mouillure cutanée (Cantin et al., 2005). À noter que cet indice représente la température sèche similaire à une isotherme à 50 % d'humidité relative, dans lequel l'individu aurait la même température de peau et la même mouillure cutanée (Moujalled, 2007 ; Batier, 2016).

Le tableau 3.4 présente la relation entre la température standard effective « SET » et la sensation thermique.

**Tableau 3.4** : La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique (Source : Parsons, 2003-Moujalled, 2007)

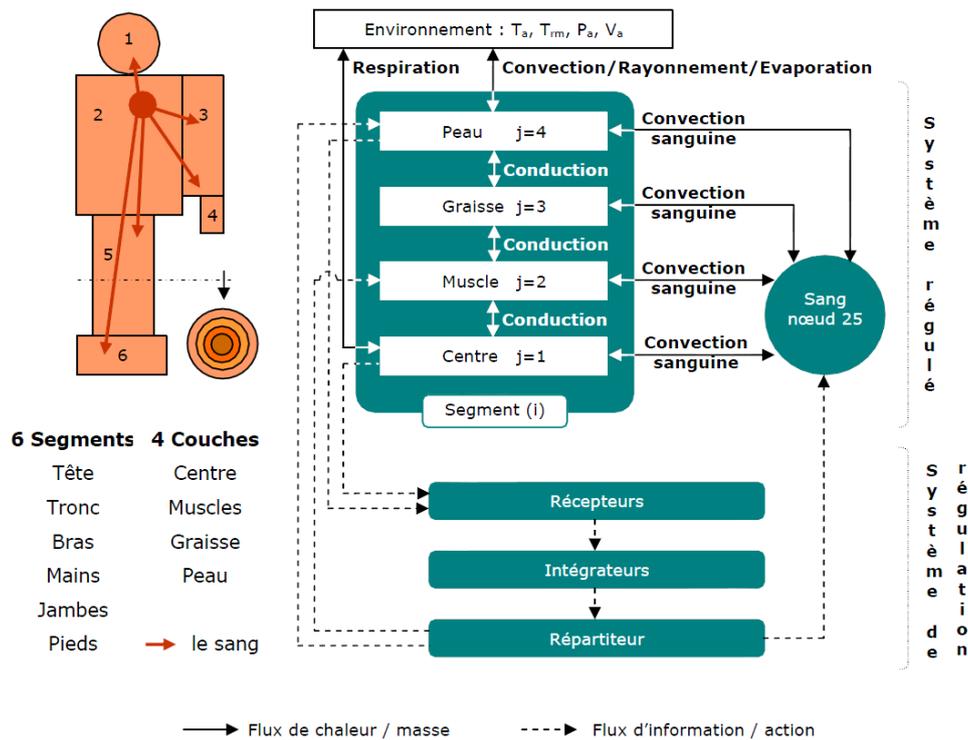
SET (°C)	Sensation	État physiologique d'une personne sédentaire
> 37,5	Extrêmement chaud, très inacceptable	Échec de la régulation
34,5-37,5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30,0-34,5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25,6-30,0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22,2-25,6	Confortable, acceptable	Neutralité
17,5-22,2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14,5-17,5	Froid, inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10,0-14,5	Très froid, très inacceptable	Frissons

Le modèle de Gagge à deux nœuds est considéré comme une version simplifiée du modèle de Stolwijk et Hardy (Cantin et al., 2005).

### III.1.6.1.3. Le modèle de Stolwijk et Hardy

Le modèle de Stolwijk et Hardy (1977) est un modèle très complexe, il est considéré comme un exemple de base et d'inspiration d'un grand nombre de travaux (Parsons, 2014 ; Batier, 2016).

La figure 3.14 illustre un schéma du modèle thermique de Stolwijk et Hardy.



**Figure 3.14** : Un schéma du modèle thermique de Stolwijk et Hardy

(Source : Moujalled, 2007)

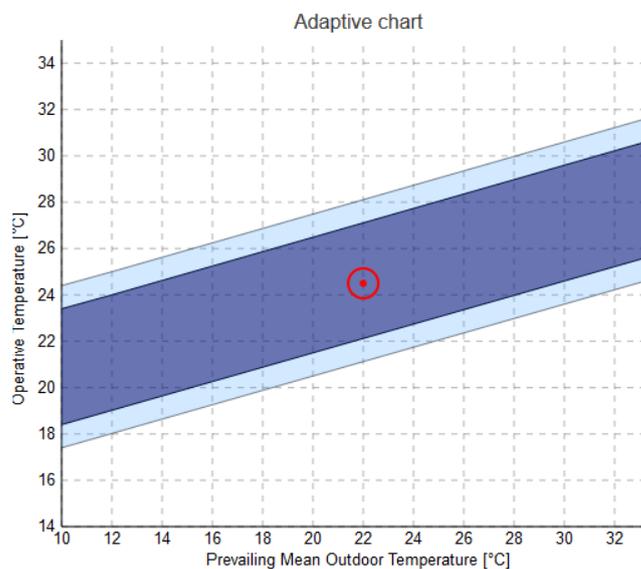
En effet, ce modèle a été conçu au début pour la NASA puis il a été exploité par les laboratoires, il constitue 25 nœuds et représente le corps humain en le divisant en six segments (la tête, le tronc, les bras, les mains, les jambes et les pieds) et chaque segment est composé de quatre couches (la peau, la graisse, les muscles et le noyau) en plus, le sang est considéré comme élément de liaison entre tous les compartiments on obtient les 25 nœuds (Moujalled, 2007).

### III.1.6.2. L'approche adaptative

L'approche adaptative traite le confort thermique selon les réactions comportementales et la propriété adaptative du corps humain dans l'ambiance thermique (Moujalled, 2007). De leur côté Mishra et al. (2016), voient que le concept du confort thermique adaptatif représente la capacité des occupants à l'adaptation dans leur environnement thermique. Dans cette optique, Humphreys et Nicol (2002) ont donné la définition suivante « *If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort* » qui signifie que dans le cas où il y a un changement produisant l'inconfort, les gens réagissent afin de rétablir leur confort.

Contrairement à l'approche analytique qui est basée sur des études en chambres climatiques traitant l'aspect physique et physiologique, l'approche adaptative est basée sur des études et des enquêtes sur terrain qui prennent en considération les aspects physiques, physiologiques et psychologiques en fonction des données climatiques extérieures (Moujalled, 2007 ; Batier, 2016). De son côté Hernandez (2014), voit que l'approche adaptative est fondée sur « *la relation qui existe entre la perception de l'ambiance intérieure et l'adaptation de l'individu en fonction d'une part des conditions intérieures, mais aussi du climat extérieur* ».

La figure 3.15 présente un diagramme du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE 55-2017.

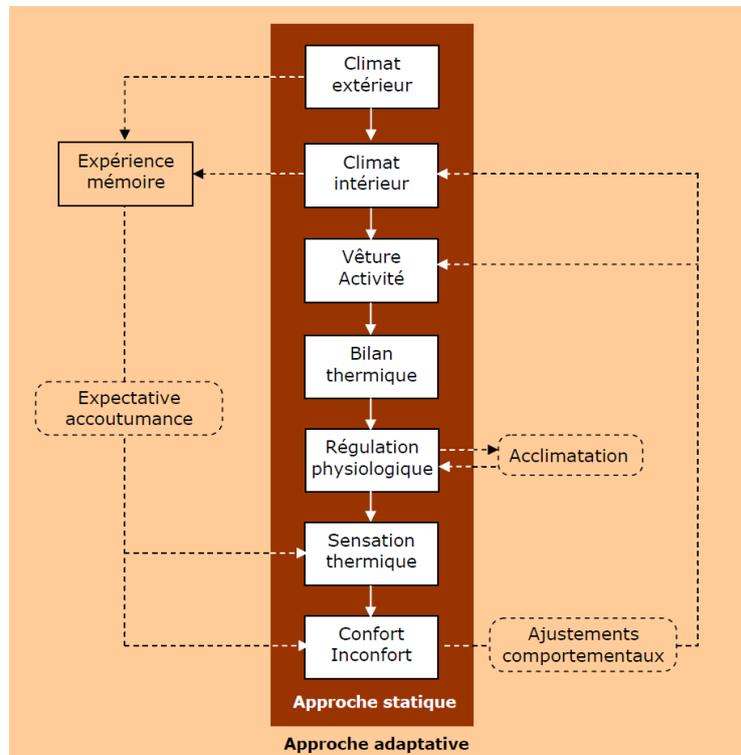


**Figure 3.15 :** Diagramme du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE 55-2017  
(Source : Auteur, 2017 - tiré de : [www.comfort.cbe.berkeley.edu](http://www.comfort.cbe.berkeley.edu))

Ce diagramme présente la relation entre la température extérieure et la température opérative et donne la possibilité de déterminer la zone du confort thermique. Deux zones différentes existantes dans le diagramme, la zone claire indique un taux de satisfaction à 80 % et la zone foncée exprime un taux de satisfaction de 90 % (Hernandez, 2014).

D'après le rapport final de l'ASHRAE RP- 884 élaboré par De Dear et al., (1997), l'adaptation thermique du corps humain est composée de trois processus distincts mais corrélés, l'adaptation comportementale, physiologique et psychologique.

Pour plus de détails, Moujalled et al., (2008), considèrent les mécanismes adaptatifs comme des boucles de rétroaction sous forme d'ajustement comportemental et d'expérience thermique et la mémoire de la personne (Figure 3.16).



**Figure 3.16 :** Représentation des mécanismes adaptatifs

(Source : De-Dear, 2003 - Moujalled, 2007)

Ces mécanismes adaptatifs ont un rôle très important sur l'adaptation de l'individu dans son environnement thermique.

### III.2. L'efficacité énergétique des constructions

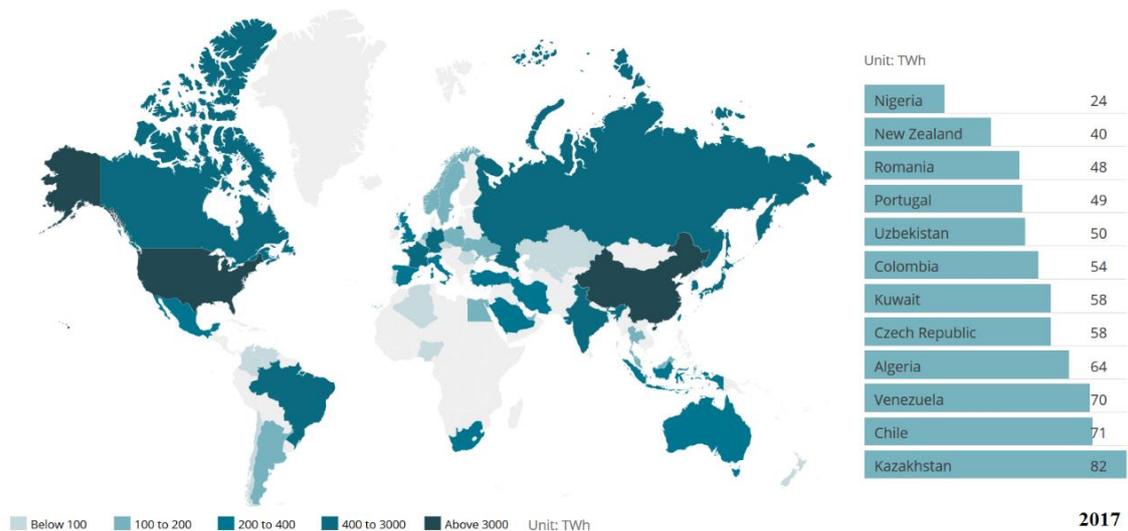
L'efficacité énergétique et le confort thermique sont deux attentes critiques pour le secteur du bâtiment (Hall, 2010). À ce propos, Seoud (2012), voit que « *L'énergie a toujours constitué une quête pour l'homme afin d'améliorer son confort* ». La notion de la consommation énergétique des constructions a été changée d'une manière considérable à partir de la première crise énergétique de 1973 qui est considérée comme un tournant crucial vers le changement.

Le sujet de l'efficacité énergétique est devenu une thématique d'actualité au niveau mondial vu son importance ainsi que les conditions environnementales et économiques actuelles. L'importance de ce sujet génère plusieurs recherches englobant tous les secteurs dans tous les domaines, particulièrement le secteur du bâtiment.

D'après un rapport élaboré par le Conseil Mondial de l'Énergie CME<sup>3</sup> (2014), « *Les systèmes énergétiques mondiaux sont parvenus à un seuil critique, et les décisions que nous prenons aujourd'hui influenceront indubitablement nos modes de vies sur plusieurs décennies* ».

### III.2.1. La consommation énergétique mondiale

En effet, après la première crise pétrolière de 1973 ainsi que l'apparition des problèmes environnementaux, la gestion des ressources épuisables est devenue un enjeu majeur (Chesné et al., 2012). Des actions politiques ont été faites afin de promouvoir de l'efficacité énergétique (El-Darwish et al., 2017) où la politique mondiale a été orientée vers la rationalisation de l'utilisation de l'énergie au niveau de tous les secteurs. Néanmoins, cette politique a été négligée dans la réalité, particulièrement dans les pays industriels, où la quantité d'énergie consommée reste très élevée. La figure 3.17 présente une carte de la consommation énergétique à l'échelle mondiale en 2017.



**Figure 3.17 :** La consommation énergétique au niveau mondial en 2017

(Source : The Global Energy Statistical Yearbook<sup>4</sup>, 2018)

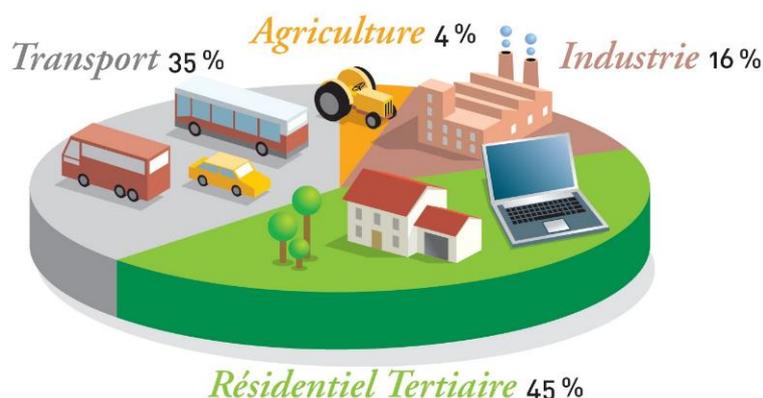
Pour plus de précision, la consommation énergétique dans la plus part des pays est estimée entre 100 et 400 TWh (Térawat-theure). Par contre, les pays industriels ont une immense consommation énergétique qui dépasse la valeur de 3000 TWh.

<sup>3</sup> Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council "WEC"), fondé en 1923 dont l'objectif est de donner l'aide aux décideurs politiques afin de mieux comprendre le domaine énergétique ainsi que pour promouvoir la fourniture et l'utilisation durables de l'énergie, il regroupe aujourd'hui plus de 90 pays ([www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org)).

<sup>4</sup> Annuaire statistique de l'énergie mondiale d'Enerdata, [www.yearbook.enerdata.net](http://www.yearbook.enerdata.net)

Au niveau mondial, la consommation énergétique du secteur du bâtiment représente un pourcentage très élevé par rapport aux autres secteurs. De leur côté, Chesné et al. (2012), voient que le secteur du bâtiment est responsable d'une part importante de 40 % de la consommation totale d'énergie. Ce point a été confirmé par Prieto et al. (2017), de leur côté, ils considèrent que les bâtiments ont un rôle crucial sur la consommation énergétique mondiale par rapport aux autres secteurs car ils sont responsables de 40 à 45 % de la consommation énergétique mondiale. Pour cette raison, Mishra et al. (2016), considèrent le secteur du bâtiment comme un consommateur d'énergie de premier plan. Dans la même perspective, Duran (2011) dans son livre « Architecture et énergie », considère que le bâtiment est « *le plus gourmand en ressources* ».

La figure 3.18 illustre un exemple de la consommation énergétique par secteur d'un pays européen.



**Figure 3.18** : Exemple de la consommation énergétique par secteur d'un pays européen  
(Source : OREMIP<sup>5</sup>, 2015)

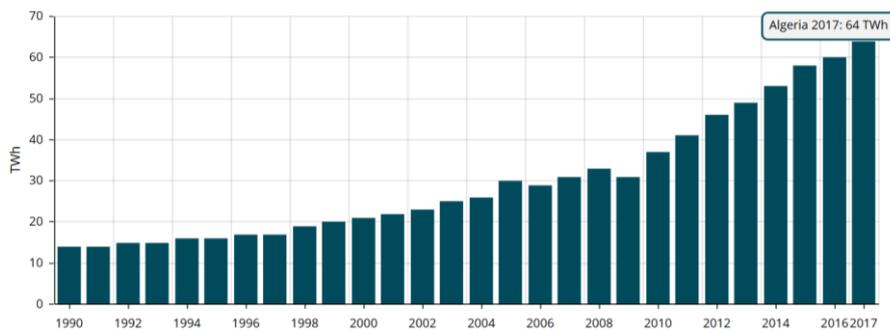
Malgré que le secteur du transport ou de l'industrie représentent des secteurs immenses, le taux de la consommation énergétique du secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) dépasse ces deux grands secteurs.

### III.2.2. La consommation énergétique en Algérie

Dans le même sens par rapport aux pays du monde, la consommation énergétique en Algérie a connu une augmentation considérable en particulier pendant la dernière décennie.

<sup>5</sup> Observatoire Régional de l'Énergie de Midi-Pyrénées, Les chiffres clés de l'énergie et des gaz à effet de serre en Midi-Pyrénées (2015), [www.oremip.fr](http://www.oremip.fr)

La figure 3.19 démontre la consommation énergétique de l'Algérie entre 1990 et 2017.

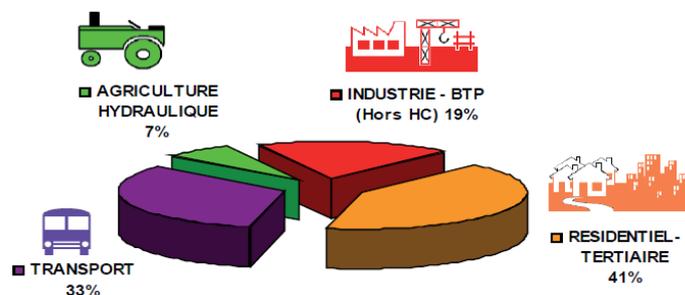


**Figure 3.19 :** La consommation énergétique de l'Algérie entre 1990 et 2017

(Source : The Global Energy Statistical Yearbook, 2018)

La consommation énergétique en 2017 est de l'ordre de 64 Twh (Térawattheure) ce qui représente une valeur qui dépasse le double de la consommation en 2007 (après dix ans) ce qui pose beaucoup de questions sur la consommation énergétique future et ses impacts. Cette situation nécessite la détermination du problème et l'exploitation des solutions et des stratégies efficaces au niveau de tous les secteurs.

Selon le rapport de l'APRUE<sup>6</sup> (2009), la consommation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires en Algérie représente 41 % de la consommation finale (Figure 3.20).



**Figure 3.20 :** La Consommation énergétique finale de l'Algérie par secteur

(Source: APRUE, 2009)

Le secteur du bâtiment en Algérie surpasse les autres secteurs concernant la consommation énergétique finale.

D'après Bouamama (2013), pour résoudre les problèmes énergétiques, il faut établir une politique environnementale d'efficacité énergétique des constructions qui nécessitent des choix adéquats afin de corriger l'erreur et le comportement des usagers.

<sup>6</sup> Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

### III.2.3. Les mesures de l'efficacité énergétique

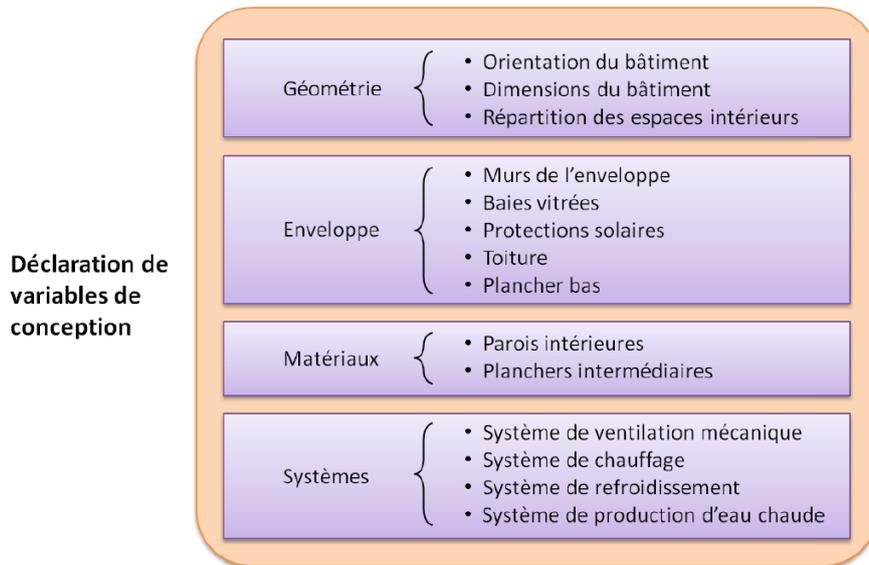
Dans la perspective de la réduction de la consommation énergétique mondiale, plusieurs mesures ont été prises afin de rationaliser la consommation énergétique. Beaucoup de pays se sont engagés dans un processus d'économie d'énergie et adoptent les politiques énergétiques du rapport du conseil mondial de l'énergie « CME » de 2004, ce rapport est considéré vital parmi les mesures de l'efficacité énergétique, il représente un projet commun entre le conseil mondial de l'énergie « CME », l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie « ADEME », Latin American Energy Organisation « OLADE » et l'Asia Pacific Energy Research Center « APERC » (Seoud, 2012).

### III.2.4. La performance énergétique des constructions

D'après Boudreau (2011), « *Traditionnellement, le problème de l'efficacité énergétique était vu plutôt comme un problème d'ingénierie. Les architectes faisaient la conception du bâtiment et les ingénieurs arrivaient ensuite avec des systèmes mécaniques pour conditionner la température et la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment* ». Après le choc pétrolier de 1973, plusieurs paramètres, notions et éléments ont changés, entre autres les conceptions architecturales des constructions et leurs consommations énergétiques. Dans cette optique, plusieurs initiatives ont été mises en place afin d'assurer le confort des occupants tout en minimisant la consommation énergétique du bâtiment (Mishra et al., 2016 ; Prieto et al., 2017).

Selon la directive européenne (2010/31/UE), l'efficacité énergétique d'une construction est définie comme la quantité d'énergie qui répond aux besoins relatifs à l'énergie indispensable pour le fonctionnement normal de la construction (Velázquez-Romo, 2015). En outre, Tittlein (2008), voit que l'efficacité énergétique des constructions consiste à établir une conception adéquate de tous les paramètres et un traitement bien adapté de l'enveloppe du bâtiment. À son tour, Boudreau (2011), voit que « *La conception d'un bâtiment performant commence par le contrôle des pertes thermiques, des gains solaires et l'utilisation efficace de la lumière naturelle* ». En effet, tous ces choix et décisions sont la tâche et la responsabilité de l'architecte.

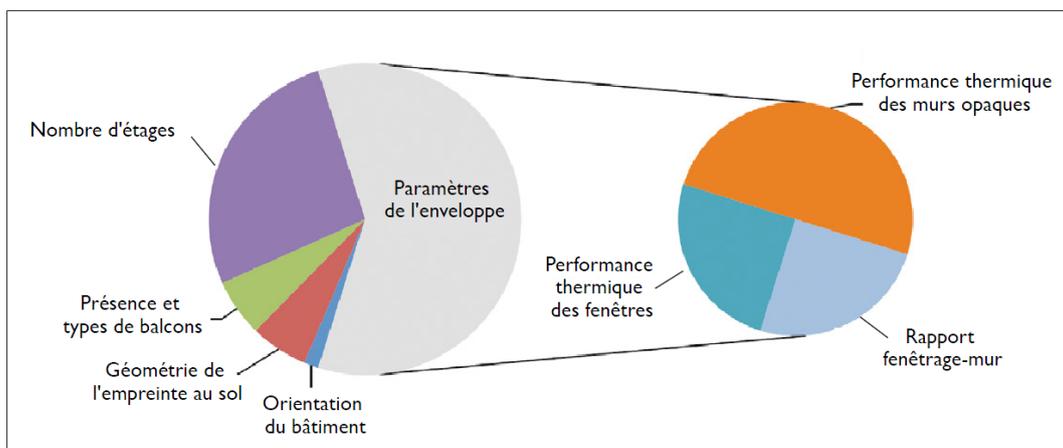
Pour plus de détails, Velázquez-Romo (2015), voit que la construction performante du point de vue énergétique et celle qui est bien conçue et prend en considération l'efficacité de quatre aspects suivants : la géométrie, l'enveloppe, les matériaux de construction et les systèmes (Figure 3.21).



**Figure 3.21** : Les aspects conceptuels nécessaires pour une construction performante énergétiquement (Source: Velázquez-Romo, 2015)

L'aspect géométrique englobe le volume du bâtiment, ses dimensions, l'orientation et la distribution spatiale interne. Concernant l'enveloppe, il faut prendre en compte les échanges thermiques avec l'extérieur (les gains et les pertes) et les différents dispositifs de protections. À propos des matériaux, il faut bien étudier leurs caractéristiques thermiques (l'inertie et l'isolation thermique). Par rapport aux systèmes, le but est d'exploiter un élément efficace et consomme moins d'énergie (systèmes de ventilation, de refroidissement, de chauffage, etc.).

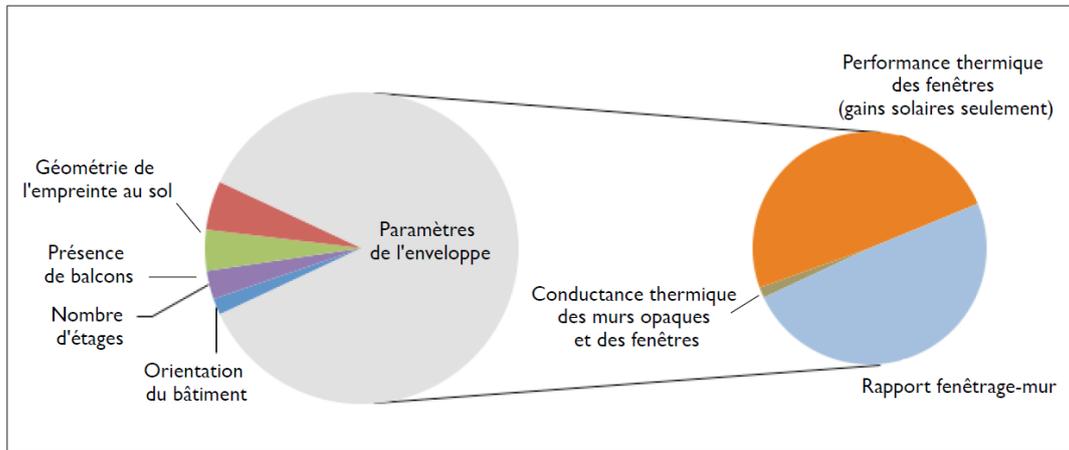
Dans la même perspective, Kujawski (2014), a détaillé les impacts des caractéristiques architecturales sur la consommation énergétique (la charge du chauffage et de la climatisation). La figure 3.22 illustre les résultats obtenus relatifs à la charge du chauffage.



**Figure 3.22** : L'impact des caractéristiques architecturales sur la charge du chauffage (Source : Kujawski, 2014)

Les plus gros portions représentent les éléments qui ont le plus d'impact sur la charge de chauffage. L'enveloppe du bâtiment influe d'une manière colossale sur la consommation énergétique du chauffage particulièrement les surfaces opaques de l'enveloppe.

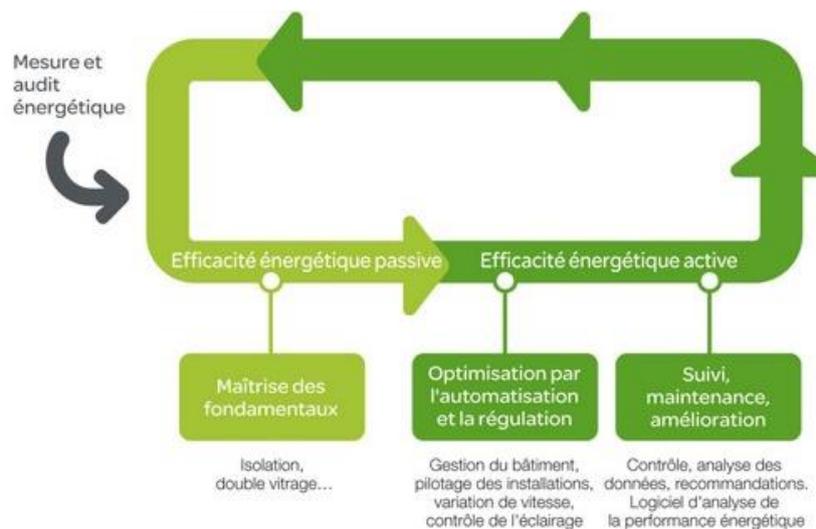
La figure 3.23 présente les résultats obtenus relatifs à la charge de la climatisation.



**Figure 3.23 :** L'impact des caractéristiques architecturales sur la charge de la climatisation  
(Source : Kujawski, 2014)

La même chose pour la charge de la climatisation, l'enveloppe du bâtiment est l'élément le plus influant sur la consommation énergétique du bâtiment en particulier le ratio d'ouverture et la performance thermique des fenêtres (la pénétration des apports solaires).

Selon les travaux de la littérature, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments dépend de deux solutions, une solution passive et autre active (Figure 3.24).



**Figure 3.24 :** Les solutions passives et actives de l'efficacité énergétique des bâtiments  
(Source : [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com))

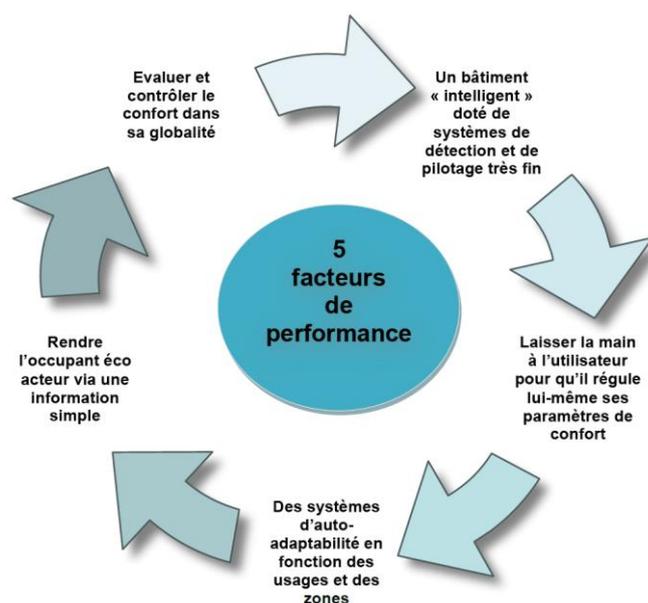
De leur côté Jousselein et al. (2008), voient que la réduction de la consommation énergétique par la solution passive basée sur l'augmentation de l'isolation thermique des parois extérieures. Pour plus de détails, les solutions passives consistent à maîtriser les paramètres suivants :

- L'orientation ;
- La forme et la compacité du bâtiment ;
- Les matériaux et l'isolation thermique ;
- La surface vitrée et la performance du type de vitrage (double, triple, etc.) ;
- La bonne étanchéité à l'eau et à l'air ;
- La maîtrise de la ventilation naturelle, etc.

Les solutions actives comportent l'intégration des équipements efficaces et des systèmes adéquats (les équipements de chauffage et de la climatisation) ainsi que le contrôle de leurs fonctionnements et de leurs régulations, etc.

### III.2.5. Les facteurs de performance énergétique

D'après Morillon et al. (2011), il existe cinq facteurs de performance énergétique comme le démontre la figure 3.25.



**Figure 3.25 :** Les facteurs de performance énergétique (Source : Morillon et al., 2011)

De leur côté, le premier facteur est la conception des bâtiments intelligents, le deuxième facteur consiste à donner la liberté aux utilisateurs afin d'ajuster leurs paramètres de confort. Le troisième facteur porte sur l'intégration des systèmes d'auto adaptabilité en fonction des

usagers et des zones afin de donner l'aide à l'utilisateur et effectuer des adaptations s'il a omis une opération quelconque. Le quatrième facteur est l'implication de l'occupant en tant que éco-acteur. Le dernier facteur tente sur l'évaluation et le contrôle du confort dans sa totalité (thermique, visuel, acoustique, qualité d'air, etc.).

### **III.2.6. Les méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment**

L'évaluation de la performance énergétique des constructions consiste à l'utilisation des outils et des méthodes d'expertise spécialisés. D'après Velázquez-Romo (2015), dans la littérature, il existe plusieurs méthodes dont l'objectif est l'aide du concepteur à prendre des décisions conceptuelles qui ont des impacts sur le côté énergétique. De son côté, voit que parmi les méthodes d'évaluation :

- Les certifications environnementales (BREEAM, LEED, HQE) ;
- Les outils d'aide à la décision ;
- Les outils numériques.

## **Conclusion**

Le confort thermique est une notion subjective très complexe qui dépend de plusieurs paramètres. Il représente un état de satisfaction des usagers vis-à-vis de l'ambiance thermique sous l'influence et l'interaction de facteurs multiples. L'absence du confort thermique, génère des gestes de régulation thermique et oblige les occupants à l'exploitation des équipements électriques de chauffage et de climatisation. L'exploitation excessive des équipements influe négativement sur la performance énergétique du bâtiment et lui donne un aspect énergivore. Pour remédier à cette situation qui s'est érigée en problème mondial, des études approfondies sur les composants des bâtiments sont menées pour tenter d'assurer le bien-être des utilisateurs et l'efficacité de la construction de manière passive. La façade compte parmi les composants du bâtiment les plus investis par les études sur l'efficacité énergétique, et le plus prometteur pour relever le défi d'une architecture climatiquement intégrée et énergétiquement performante.

**DEUXIÈME PARTIE :**  
**LE COMPORTEMENT THERMIQUE DES**  
**BÂTIMENTS TERTIAIRES DANS UN CLIMAT**  
**CHAUD ET ARIDE**

## **CHAPITRE IV :**

### **État de l'art et positionnement épistémologique**

Ce chapitre est considéré comme élément d'articulation et de passage entre la partie théorique et pratique. L'objectif assigné consiste à réaliser un état de l'art sur les recherches qui ont été faites dans le domaine de l'optimisation des façades afin d'améliorer les conditions du confort thermique des bâtiments et sa performance énergétique. Par la suite, il détermine le positionnement épistémologique de cette recherche par rapport au domaine du point de vue conceptuel et méthodologique ou pratique.

*« Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit »*

*Gaston Bachelard*  
*La formation de l'esprit scientifique (1938)*

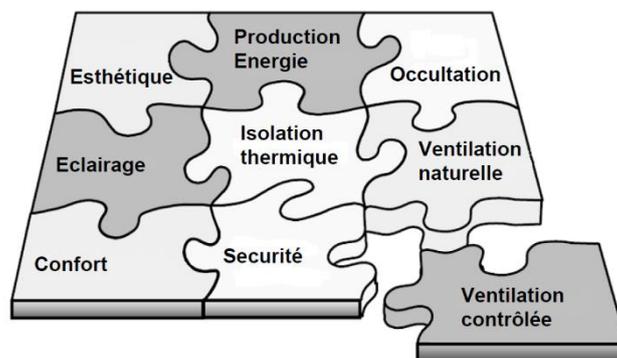
## CHAPITRE IV : État de l'art et positionnement épistémologique

### Introduction

Le sujet de la performance thermique et énergétique de la façade a fait l'objet de nombreuses recherches et ne cesse de capter l'attention des chercheurs dans ce domaine. Cet élément de l'enveloppe a connu un grand intérêt du fait de son importance dans le bâtiment et ce, quel que soit le type de climat. Cet intérêt croissant fut concrétisé par plusieurs études à l'échelle mondiale à travers l'exploitation de différentes méthodes de recherches. Le présent chapitre dresse un panorama des savoirs sur la façade en tant qu'élément architectural pertinent du point de vue de la performance thermique et énergétique d'un bâtiment.

### IV.1. État de l'art sur les façades et ses éléments

L'ambiance thermique intérieure est influencée par les éléments de la façade qui se répercutent sur la performance thermique et énergétique du bâtiment, tels que les matériaux et les surfaces opaques et vitrées de l'enveloppe (Heiselberg, 2009). La façade à travers ses éléments et attributs contribue pleinement à la performance thermique et énergétique du bâtiment. C'est la raison pour laquelle, le choix de ces éléments doit prendre en considération les interrelations du bâtiment avec son contexte (Diaz, 2014). La façade d'un bâtiment représente la grande partie (soient les parois verticales) de l'enveloppe qui a un contact avec l'extérieur. Cet élément le plus important et le plus complexe répond à des exigences différentes, entre autres celles de nature thermique et énergétique (Figure 4.1).



**Figure 4.1** : Exemple des exigences de la façade (Source : Batoul, 2007)

La façade est considérée comme une membrane séparative entre le dedans et le dehors ce qui lui confère un rôle crucial à jouer dans les échanges thermiques des constructions avec leur environnement (Salem, 2007). Cette partie de l'enveloppe, peut limiter les pertes et contrôler les gains qui influencent le confort thermique des utilisateurs (Richieri, 2008 ; Zelenay et al., 2011), comme elle peut augmenter les pertes et les gains d'une manière incontrôlable qui engendrent des ambiances thermiques inconfortables et des constructions énergivores.

Plusieurs recherches ont été menées sur le sujet de l'amélioration de la performance thermique et énergétique des façades. Rosso et al. (2016) et Ihara et al. (2016), voient que les recherches d'amélioration de la façade peuvent être effectuées à plusieurs niveaux grâce à l'utilisation de différentes méthodes appropriées à chaque zone climatique, car en réalité il n'existe pas de solutions universelles recommandées. Cette particularité appelle à la diversification et la contextualisation des recherches de manière à ce qu'elles répondent aux spécificités climatiques de chaque région.

Dans la littérature, des solutions passives et actives ont été développées sur la base des principaux attributs de la façade soient : les matériaux, les ouvertures, les propriétés surfaciques et les dispositifs. Les stratégies définies concernent les matériaux, les isolants, les matériaux à changement de phase, la façade double peau, la façade ventilée, la façade intelligente et les dispositifs de protection, ...etc. La partie qui suit donne un aperçu des principales recherches effectuées selon l'attribut concerné de la façade soient, respectivement, les matériaux, les ouvertures, les propriétés surfaciques et les dispositifs.

#### **IV.1.1. Les matériaux**

Les caractéristiques et les propriétés thermiques des matériaux de construction ont une relation directe avec le bien-être des utilisateurs ; en réalité, il n'existe pas un matériau idéal « *miracle* » ou une liste noire des matériaux (Diaz, 2014). Le bon matériau est celui qui est choisi d'une manière bien réfléchié selon ses propriétés, les spécificités climatiques, la nature du projet et les besoins des occupants.

De nombreuses recherches ont été effectuées sur les matériaux de la façade et leurs caractéristiques thermiques à l'échelle de la paroi (la composition du mur) et à l'échelle du composant lui-même (le matériau : la brique, l'isolant, le revêtement, etc.). L'ensemble de ces recherches ont été axées sur l'optimisation des propriétés thermiques des matériaux en fonction du contexte climatique de la région en traitant le sujet du comportement thermique des matériaux, le flux de chaleur, l'inertie thermique et le changement de phase.

Selon (Pisello et al., 2015 ; Alonso et al., 2017), les matériaux ont une influence très importante sur l'efficacité thermique et énergétique des constructions. Ils affirment que l'utilisation bien réfléchie des matériaux qui prennent en considération les facteurs climatiques de la région peut assurer le confort thermique et établir un équilibre entre les solutions passives et actives. De leur côté, Ihara et al. (2015), voient que la valeur de la transmission thermique « U » des matériaux des surfaces opaques et vitrées des façades est un facteur très important qu'il faut prendre en compte afin d'assurer la performance de l'enveloppe.

Faure (2007), a réalisé une thèse de doctorat sur l'optimisation de l'enveloppe à travers l'évaluation de l'impact des matériaux à changement de phase (MCP) et la ventilation de la cavité d'air de la façade sur le fonctionnement thermique de l'enveloppe. Il a exploité des cellules tests pour l'étude expérimentale, une cellule à une échelle réelle et d'autres cellules à une échelle réduite (Figure 4.2). Le logiciel de la simulation thermique dynamique TRNSYS a été utilisé pour réaliser une étude numérique. Dans cette recherche, il a confirmé le rôle crucial des matériaux à changement de phase sur le fonctionnement thermique du bâtiment.



**Figure 4.2 :** Étude expérimentale sur l'optimisation de l'enveloppe par l'intégration des matériaux à changement de phase (Source : Faure, 2007)

Hall (2010) dans son livre « Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings », a démontré le rôle très important des matériaux et affirme la possibilité de décrire le comportement thermique des constructions en fonction des matériaux et les principes de la physique du bâtiment. Il considère ces derniers comme des éléments déterminants sur la performance thermique et énergétique des bâtiments. À son tour, Penu (2015) dans son livre « La thermique du bâtiment », illustre l'impact très important des isolants, il voit que l'utilisation de l'isolation thermique est un élément indispensable qui permet à la fois d'assurer le confort des usagers et l'économie d'énergie. Cristina (2011) dans le livre « Architecture et matériaux », affirme l'importance du choix des matériaux et sa relation avec le type du projet, la zone et la nature du climat afin d'aboutir à une construction performante.

Chahwane (2011), a élaboré une thèse intitulée « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments », ce chercheur a utilisé une méthode expérimentale et numérique pour démontrer le rôle crucial de la maîtrise de l'inertie thermique sur le fonctionnement des bâtiments et leur efficacité énergétique (Figure 4.3).



**Figure 4.3 :** La maison test réalisée et les instruments utilisés pour les mesures

(Source : Chahwane, 2011)

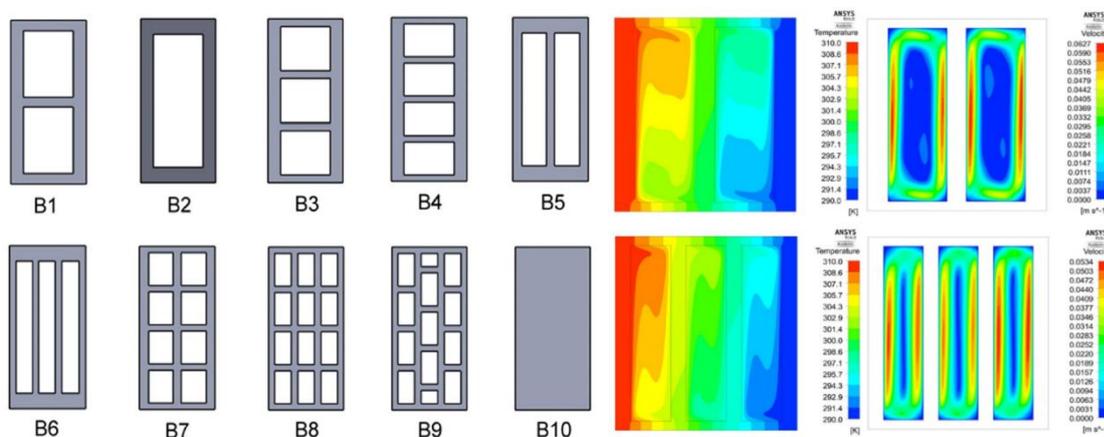
Cet aspect a fait l'objet de plusieurs recherches, notamment de la part de Munaretto (2014), qui a prouvé que la maîtrise de ce paramètre améliore la performance énergétique des constructions. Pour sa part, Benhouhou (2012), a réalisé une étude intitulée « L'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides » à travers une étude numérique, il a essayé d'optimiser le comportement thermique de l'enveloppe à travers les matériaux et les isolants. A partir de ses résultats, il démontre que les matériaux et les isolants ont un impact considérable mais il est nécessaire d'exploiter d'autres stratégies pour une bonne intégration du bâtiment dans son contexte.

Dans une thèse réalisée par Guichard (2013), une étude expérimentale a été effectuée sous forme de cellules tests à échelle réelle et réduite afin d'étudier l'impact des matériaux à changement de phase (Figure 4.4). Ce travail fut accompagné d'une série de simulation où il a été prouvé que ces matériaux ont des bienfaits sur le plan thermique et énergétique.



**Figure 4.4 :** Étude expérimentale de l'impact des matériaux à changement de phase  
(Source : Guichard, 2013)

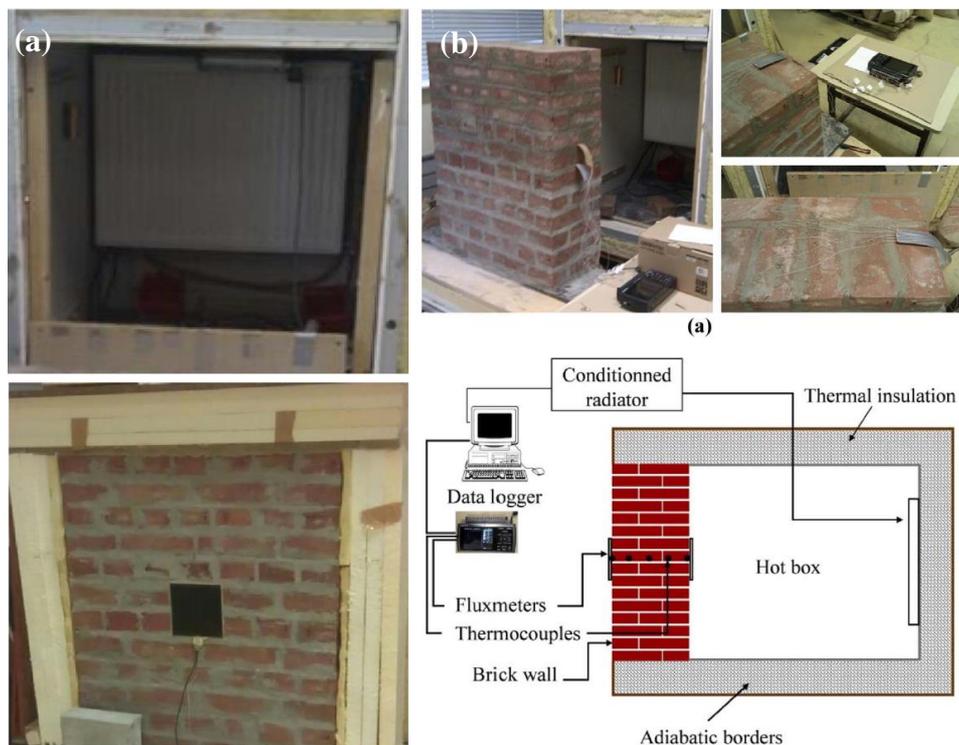
Parmi les recherches qui ont été faites pour étudier l'effet de la terre cuite (brique), on citera celle de Gossard, (2011). Ce dernier a réalisé une thèse intitulée « Impact de l'enveloppe sur la performance énergétique des bâtiments : de la caractérisation jusqu'à l'optimisation » où il a travaillé sur l'optimisation des caractéristique thermiques et physiques de la brique à travers une approche expérimentale et numérique. Dans la même perspective, Santos et al. (2017), ont réalisé une étude numérique détaillée sur l'influence des propriétés thermiques, formelles et dimensionnelles de plusieurs configurations de briques creuses sur leurs transmittance thermique (Figure 4.5).



**Figure 4.5 :** Analyse numérique du facteur de la transmittance thermique de différentes configurations de blocs de béton creux (Source : Santos et al., 2017)

Ils remarquèrent que la valeur de transmittance thermique est influencée par les configurations des cavités des blocs de béton creux. Une cavité d'air de grande dimension favorise un profil de vitesse de l'air plus élevé et par la suite un coefficient de transfert de chaleur par convection plus élevé (Santos et al., 2017).

Sassine et al. (2017a), dans un article intitulé « Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the Conduction Transfer function method », rendent compte d'une étude expérimentale par des modèles réduits afin d'évaluer la performance thermique d'une paroi de brique massive (Figure 4.6).



**Figure 4.6 :** Étude expérimentale du fonctionnement thermique d'une paroi de brique massive (Source : (a) Sassine et al., 2017a ; (b) Sassine et al., 2017b)

Ils ont pu évaluer la performance thermique d'un mur sur la base d'une analyse de fréquence ce qui a permis de déterminer la configuration optimale.

#### IV.1.2. Les ouvertures

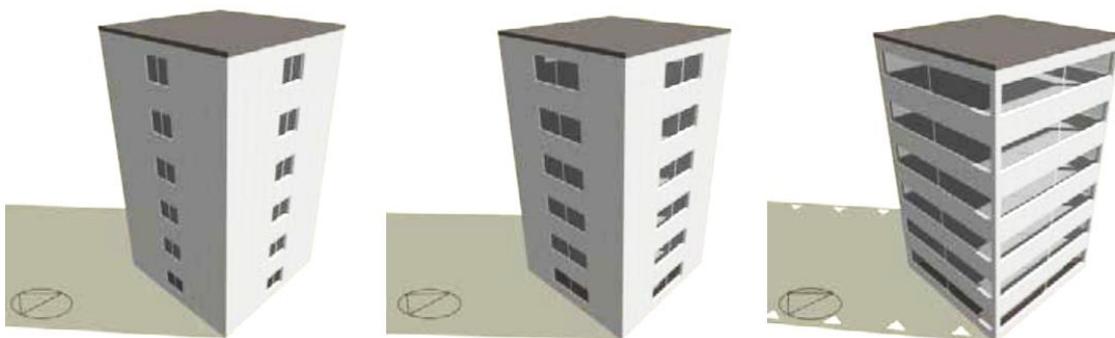
Les ouvertures de la façade sont des composants essentiels pour le bâtiment. En plus de leurs multiples rôles, ces éléments représentent la source principale des gains et des pertes thermiques (Liébard et De Herde, 2005 ; Catalina et al., 2008 ; Bouchahm et al., 2010 ; Belkacem, 2017). Les ouvertures ont connu de grands changements conceptuels sous l'influence de plusieurs paramètres. A titre d'exemple, depuis l'avènement de la façade libre en

architecture, le verre est devenu un matériau très prisé par les architectes qui l'utilisèrent indifféremment dans tous les types de bâtiments et sous différentes conditions climatiques. Ainsi, il n'est pas rare que des bâtiments tertiaires situés dans des régions très chaudes ou très froides, possédant de grandes surfaces vitrées (Morillon et al., 2011). Et souvent, l'utilisation des murs rideaux à la place de façade en maçonnerie avec des fenêtres, est considérée comme un signe de prouesse technique et un atout esthétique par les concepteurs (Boudhen, 2007). Malheureusement, cette architecture de verre est responsable de grandes déperditions thermiques et souvent elle engendre des ambiances thermiques défavorables (Nowak et al., 2014 ; Olissan, 2017).

Dans le domaine du bâtiment, les chercheurs considèrent les ouvertures comme la zone la plus faible dans la façade sur le plan thermique. D'après plusieurs auteurs, les besoins énergétiques d'un bâtiment sont tributaires de certains paramètres propres à la façade particulièrement le ratio (rapport de la surface vitrée à la surface du mur) d'ouverture (Shan, 2014 ; Konstantinou, 2014 ; Liang et al., 2015 ; Omrany, 2016). Il faut aussi préciser que l'influence du ratio d'ouverture est fonction d'autres paramètres, notamment, le type de verre dont les caractéristiques sont prépondérantes sur le fonctionnement thermique du bâtiment (Moreno-Sierra, 2012 ; Buratti et al., 2013 ; Westphal et al., 2016).

Pour ces raisons, plusieurs recherches se sont intéressées aux ouvertures, l'objectif étant d'améliorer les caractéristiques de ce composant le plus important de la façade, notamment, en maîtrisant les transferts de chaleurs (les pertes et les gains) effectués à travers le vitrage.

La figure 4.7 illustre une étude élaborée par (Moreno-Sierra, 2012) sur l'impact du ratio de la surface vitrée de la façade sur le fonctionnement thermique et le bilan énergétique d'une construction en (R+5) avec une variation des rapports de 10 %, 20 % et 50 %.



**Figure 4.7 :** Étude de l'influence de la surface vitrée d'une construction  
(Source : Moreno-Sierra, 2012)

Le logiciel de la simulation thermique dynamique « Design Builder » a été exploité pour étudier ces modèles. Les résultats de cette étude affirment que le vitrage est le point le plus faible dans la façade. L'augmentation de la surface vitrée engendre une hausse de déperdition énergétique et par la suite l'augmentation de la consommation énergétique.

Bien avant cette recherche, Lstiburek (2008), avait signalé que l'utilisation de moins de verre permet d'économiser l'énergie et l'argent. Pour lui, le mur-rideau constitue un élément très cher et inefficace. De son côté, Heiselberg (2009), voit que dans la plus part du temps, les architectes ne prennent pas les besoins de chauffage et de la climatisation en considération, ils conçoivent souvent des constructions avec des surfaces vitrées très importantes dans des zones climatiques très chaudes ou très froides. Par la suite les ingénieurs interviennent par l'intégration des équipements ce qui influe négativement sur la performance énergétique du bâtiment.

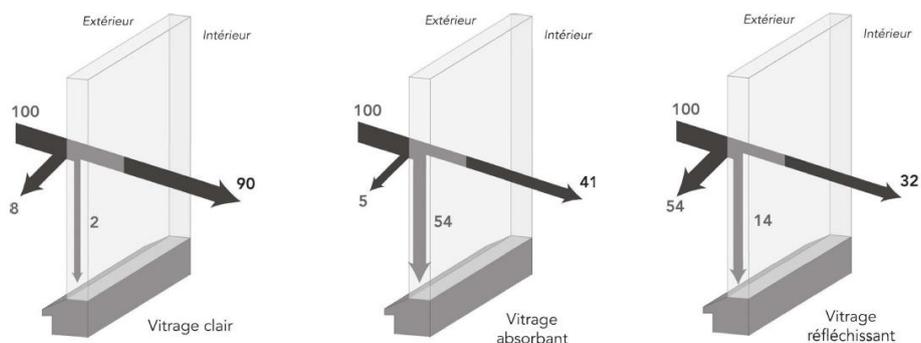
À ce propos, Hall (2010) dans son livre « Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings », insiste sur la nécessité de limiter l'étendue du vitrage dans les façades d'une manière pratique et rationnelle, afin de fournir de la lumière et éviter les pertes et les surplus des gains. Par ailleurs, il affirme l'importance du contrôle de la taille des ouvertures afin de prévenir de l'éblouissement et de la surchauffe. Cette position est partagée par (Velázquez-Romo, 2015) qui voit que la surface vitrée est l'élément déterminant qui influe sur tous les autres paramètres de la façade.

Jaber et al. (2011) dans leur article « Thermal and economic windows design for different climate zones », ont réalisé une étude numérique comparative (par le logiciel TRNSYS) pour évaluer l'impact de la surface vitrée et les différents types de vitrage sur la demande énergétique. Ils considèrent que le grand défi pour les concepteurs, est de trouver la conception optimale afin de minimiser à la fois les besoins de chauffage et de climatisation. Pour ces auteurs, tenir compte de ces aspects paradoxaux, font que les fenêtres ressemblent à un couteau à double tranchant, avec un côté utile et un autre nuisible.

À son tour, Law (2013) dans sa thèse « The Future of Thermal Comfort in an Energy-Constrained World », trouve que l'utilisation du vitrage d'une manière extensive est le paramètre principal responsable de l'augmentation des besoins énergétiques. La transparence, en effet, augmente les pertes de chaleur lors du chauffage et les gains de chaleur pendant la climatisation.

Zemella et al. (2014) dans leur livre « Evolutionary Optimisation of Facade Design A New Approach for the Design of Building Envelopes », abordent le sujet des ouvertures et l'importance de l'utilisation du verre ainsi que ses avantages escomptés sur le plan lumineux. En même temps, ils s'interrogent sur les types de façades vitrées qu'il faut éviter afin d'assurer la performance thermique du bâtiment. Ces auteurs considèrent le pourcentage de vitrage et le type de verre, la position de la fenêtre et les protections d'ombrage comme des éléments très importants constituant un champ d'étude et d'optimisation. Ibrahim (2014) pour sa part, démontre dans sa thèse l'importance de l'optimisation des caractéristiques surfaciques et les propriétés matérielles du vitrage tout en utilisant des dispositifs d'ombrage afin d'éviter la surchauffe. Ces points ont été confirmés par Binz et al. (2015) dans un ouvrage intitulé « Constructions efficaces Concepts, critères, systèmes », où furent énoncés les problèmes liés à la grande utilisation de la surface vitrée et ses impacts négatifs sur l'ambiance thermique et la consommation énergétique de la construction. Ces auteurs voient que le choix des caractéristiques de l'enveloppe (surface vitrée, type de vitrage et ombrage) a une influence déterminante sur la performance du bâtiment.

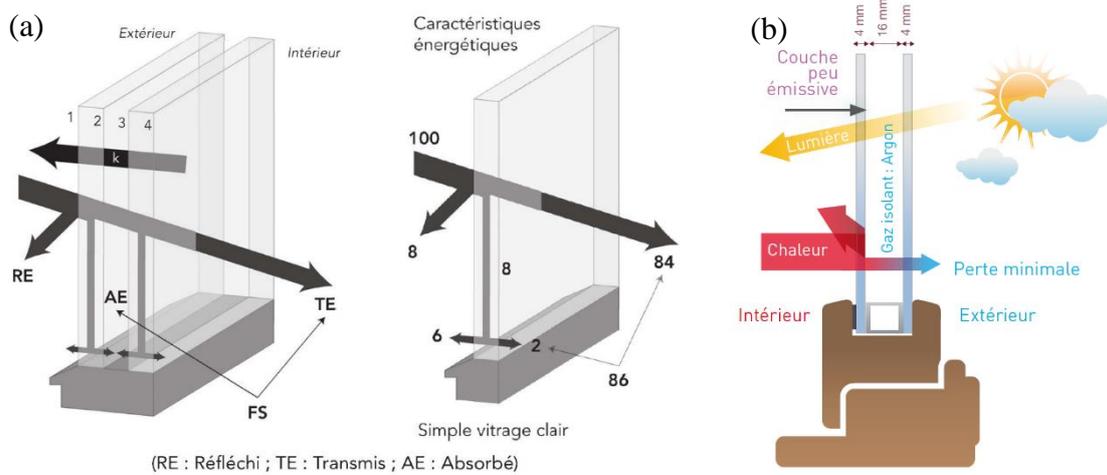
Jedidi et Benjeddou (2016) dans le livre « La thermique du bâtiment » donnent des éclaircissements sur l'influence du type de vitrage (clair, absorbant et réfléchissant) sur la répartition de l'énergie solaire (Figure 4.8).



**Figure 4.8** : L'impact du type de vitrage sur la répartition de l'énergie solaire  
(Source : Jedidi et Benjeddou, 2016)

Du point de vue de la quantité d'énergie transmise vers l'intérieur, le vitrage clair transmet 90 % d'énergie, le vitrage absorbant transmet 41 % de l'énergie et le vitrage réfléchissant transmet seulement 32 % de l'énergie ce qui influe considérablement sur l'ambiance thermique à l'intérieur du bâtiment. Le choix du type de vitrage devrait donc être basé principalement sur le coefficient de déperdition thermique « U », plus ce coefficient est faible plus le matériau est performant (Jedidi et Benjeddou, 2016).

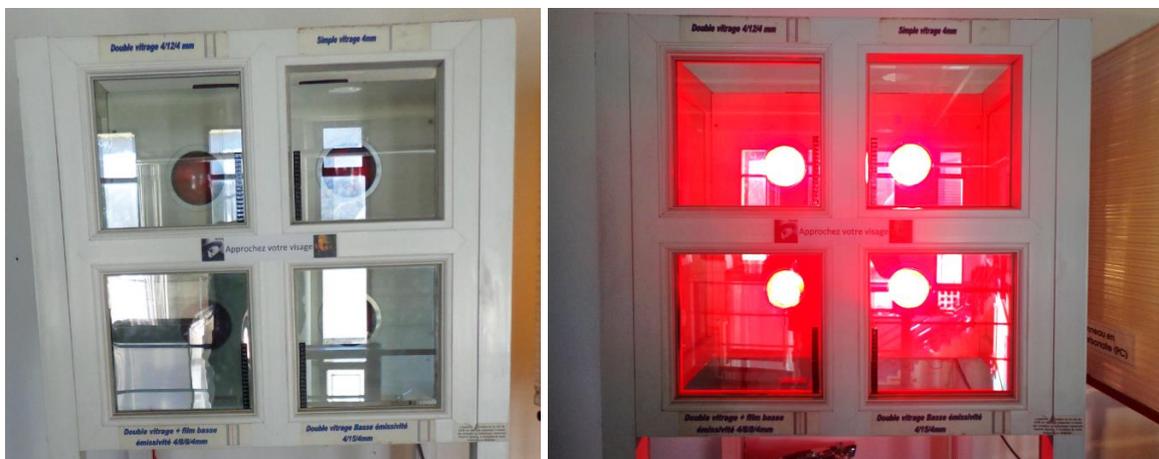
La figure 4.9 présente une comparaison de la répartition de l'énergie solaire entre un simple vitrage et un double vitrage avec un gaz.



**Figure 4.9 :** L'influence du double vitrage avec gaz sur la répartition de l'énergie solaire  
(Source : (a) Jedidi et Benjeddou, 2016 ; (b) www.bretagne-energie.fr)

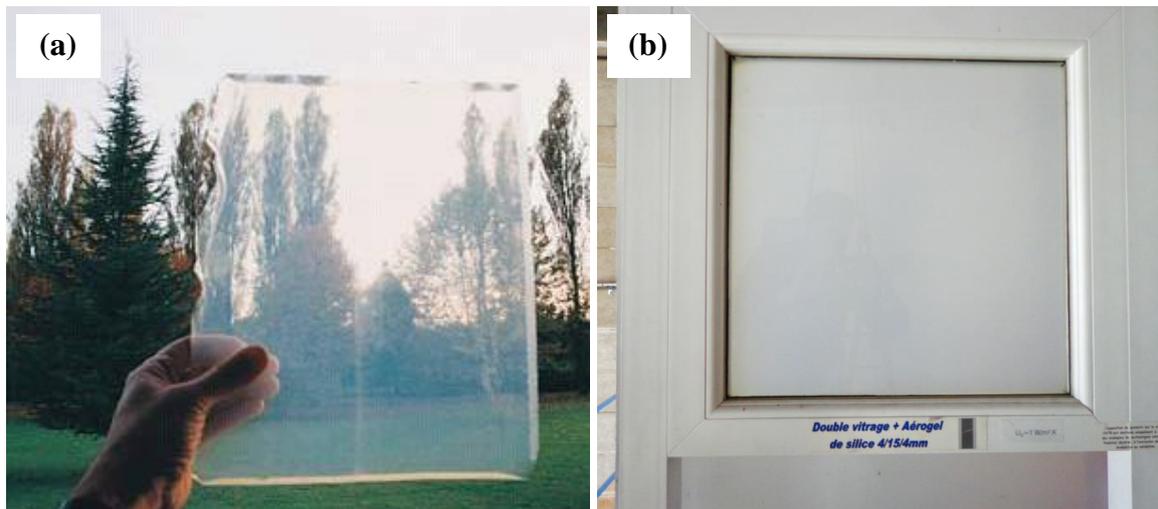
Les caractéristiques du double vitrage (principalement la couche basse émissivité et le gaz) influent directement sur la quantité d'énergie transmise vers l'intérieur selon les caractéristiques thermiques et dimensionnelles du double vitrage.

Au niveau du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB de Grenoble, de nombreuses études ont été faites pour étudier le transfert de l'énergie solaire à travers plusieurs types de vitrage. Un dispositif expérimental a été exploité avec une source de chaleur afin de mesurer les impacts thermiques d'un vitrage simple (4 mm), un double vitrage (4/12/4 mm), un double vitrage à basse émissivité (4/15/4 mm) et un double vitrage avec un film à basse émissivité (4/8/8/4 mm) comme il est présenté dans la figure 4.10.



**Figure 4.10 :** Dispositif expérimental pour l'étude des vitrages (Source : Auteur, 2017)

En plus de ces tests, l'influence de l'intégration d'un isolant thermique (aérogel de silice) dans la cavité d'un double vitrage "4/15/4 mm" a également été étudiée (Figure 4.11).



**Figure 4.11** : L'utilisation d'aérogel de silice dans la cavité d'un double vitrage

(Source : (a) Quenard, 2011 ; (b) Auteur, 2017)

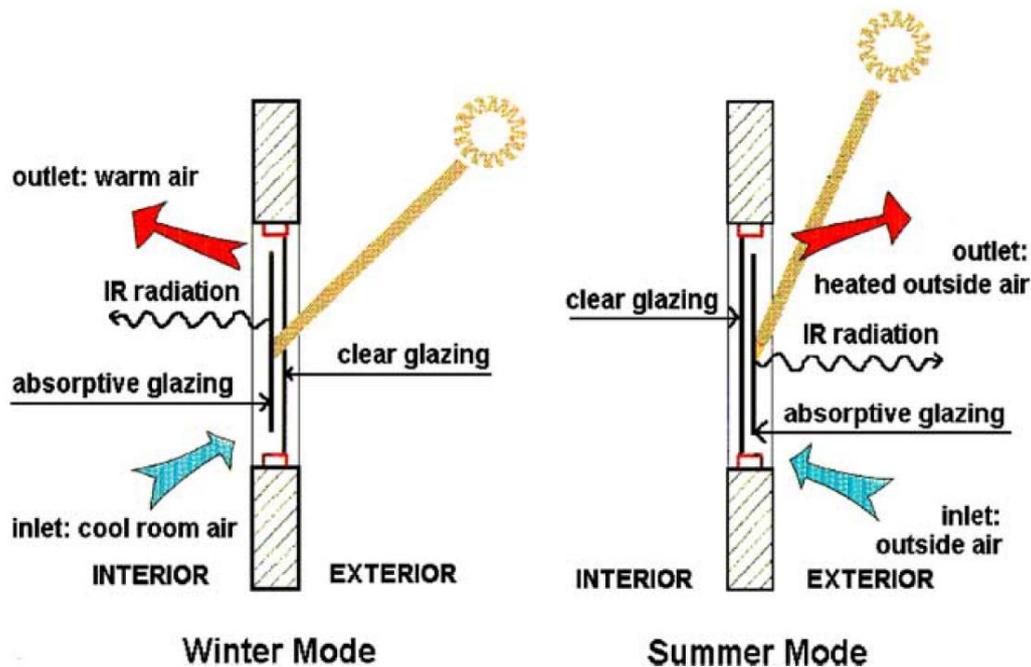
Les résultats montrent que l'utilisation de l'aérogel au niveau du double vitrage a des avantages considérables sur le plan thermique.

En outre, d'autres recherches ont été faites sur le comportement thermique des fenêtres dites adaptatives comme les fenêtres réversibles qui ont la capacité de contrôler le flux des rayonnements solaires (Chesné, 2012). À ce propos, Erell et al. (2004) ont élaboré un article intitulé « Development of a reversible solar-screen glazing system » où ils ont réalisé une fenêtre réversible et l'ont testée selon la période de l'année (chaude ou froide) et les besoins en rayonnements solaires (Figure 4.12).



**Figure 4.12** : Deux types de fenêtres réversibles (Source : Erell et al., 2004)

Chesné (2012), en décrivant ce système réversible dit qu'il « *s'agit d'une fenêtre double-vitrage au sein de laquelle sont placés deux autres vitrages : un verre clair et un verre teinté, la lame d'air entre les deux étant ventilée sous le mode "rideau d'air", les deux ouvertures étant placées du même côté* ». Ce type de fenêtre permet de contrôler la pénétration des rayonnements solaires à l'intérieur de l'espace selon un principe de fonctionnement qui varie selon la saison (Figure 4.13).



**Figure 4.13** : Principe de fonctionnement des fenêtres réversibles en hiver et en été  
(Source : Erell et al., 2004)

En hiver, le verre clair placé à l'extérieur permet aux rayonnements solaires (apports) de pénétrer à l'intérieur de l'espace et de réchauffer le rideau d'air intérieur, ce qui crée un chauffage solaire, diminue les pertes et évite la surchauffe (Erell et al., 2004 ; Chesné, 2012). En été, le verre teinté est placé à l'extérieur ainsi que le rideau d'air ce qui permet de rafraîchir le verre clair interne tout en réduisant la pénétration des rayonnements solaires à l'intérieur. D'où une amélioration du confort thermique et une réduction de la charge de la climatisation.

Toutes ces recherches démontrent l'importance de la maîtrise de la surface vitrée et ses impacts selon la variation des conditions climatiques. Buratti et al. (2013), à travers des mesures sur terrain et une série de simulations, affirme que le vitrage a un rôle crucial sur le comportement thermique des constructions. Ce point de vue a été confirmé par plusieurs chercheurs, notamment, Westphal (2016) dans son article « *Influence of Glazed Facades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings* », où il parvient à prouver à

travers une étude numérique que les éléments vitrés ont un grand impact sur les pertes thermiques, pour lui, ils sont responsables d'environ 45 % de la charge de refroidissement. De leur côté, Omrany et al. (2016), ont démontré que les fenêtres présentent de 20 à 40 % des pertes d'énergie. Pour (Konstantinou, 2014 ; Liang et al., 2015), les fenêtres engendrent de 30 à 50 % des pertes énergétiques.

Afin de résoudre les problèmes liés aux ouvertures, plusieurs études d'optimisation ont été réalisées à travers l'exploitation de plusieurs types de vitrages (double, triple, avec gaz, basse émissivité, etc.). Eicker et al. (2008), via des travaux in situ et expérimentaux, montrent que l'utilisation d'un vitrage avec une valeur « U » de transmission thermique très basse permet d'améliorer la performance des fenêtres. De son côté, Westphal (2016), trouve que l'emploi d'un vitrage sélectif peut minimiser la demande énergétique pour le refroidissement. Selon Jindong (2015), les fenêtres performantes et adéquates peuvent contribuer efficacement à la réduction de l'énergie utilisée pour chauffer ou refroidir l'espace. Cette optimisation nécessite de prendre en considération plusieurs paramètres tels que l'exposition au soleil, les dispositifs d'ombrage, la transmittance et les caractéristiques du verre ainsi que la taille des ouvertures (Hall, 2010 ; Lavoye et al., 2015 ; Jedidi et Benjeddou, 2016).

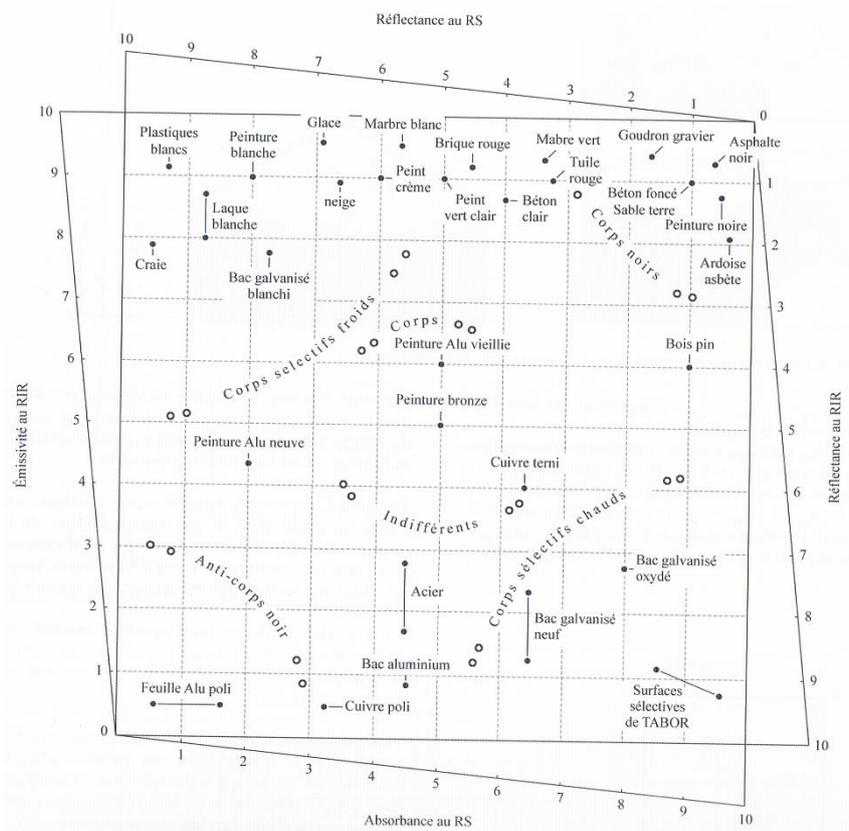
#### **IV.1.3. Les propriétés surfaciques**

Les surfaces de la façade ont été étudiées dans plusieurs travaux de recherche. Elles sont considérées comme des zones de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.

La couleur (claire ou foncée) et la texture (lisse ou rugueuse) sont deux propriétés surfaciques qui influent sur les phénomènes thermiques au niveau de l'enveloppe. Ces propriétés ont un rôle important sur l'absorption solaire et l'émittance thermique de la façade et par la suite le fonctionnement thermique du bâtiment et sa performance énergétique (Kontoleon et al., 2007 ; Hall, 2010 ; Azarnejad et al., 2015). Selon Bougiatioti et al. (2009), les variations de la température surfacique de la façade dépendent de l'orientation, la couleur de la surface ainsi que de plusieurs propriétés physiques. Ces assertions ont été confirmées par Ibañez-Puy et al. (2017) puisqu'ils ont démontré que le rayonnement solaire influe d'une manière considérable sur la façade, l'ambiance thermique et les besoins énergétiques.

De leur côté Alchapar et al. (2015) et Alonso et al. (2017), trouvent que l'augmentation de la température surfacique de l'enveloppe peut dépasser la valeur de 20 °C selon la nature du matériau utilisé.

Fernandez et Lavigne (2009) ont donné un diagramme relatif à la réflectance et l'absorbance des rayonnements solaires ainsi que l'émissivité et la réflectance aux rayonnements infrarouges de quelques matériaux (Figure 4.14).



**Figure 4.14 : Les caractéristiques surfaciques des matériaux**

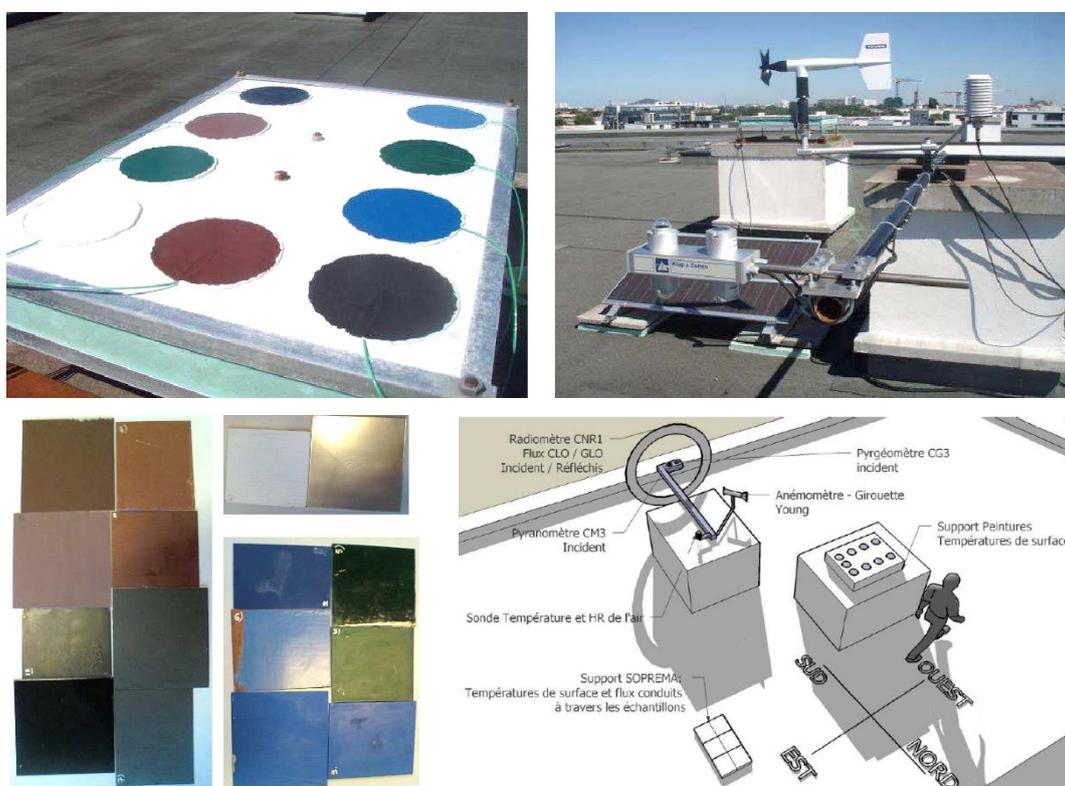
(Source : Fernandez et Lavigne, 2009)

Cette figure donne une idée sur les caractéristiques relatives aux caractéristiques surfaciques des matériaux et leurs capacités de la réflexion des rayonnements solaires.

Les stratégies d'optimisation liées aux surfaces de façades portent sur l'utilisation des surfaces de couleurs claires réfléchissantes (avec une grande réflectance solaire et une émittance thermique très élevée). Ceci permet d'éviter l'accumulation de la chaleur et, simultanément, de réduire la température surfacique. Une fois les gains de chaleur réduits, le confort thermique est amélioré avec un minimum de consommation énergétiques (Santamouris et al., 2011 ; Ihara et al., 2016 ; Alonso et al., 2017 ; Ibañez-Puy et al., 2017, Rosso et al., 2017b). Shi et al. (2011), ont réalisé une étude numérique pour évaluer l'impact de la réflectance solaire et l'émittance thermique de l'enveloppe sur la performance énergétique des bâtiments dans plusieurs pays. Ils ont trouvé que ces deux paramètres influent considérablement les besoins énergétiques dans différents types de climats.

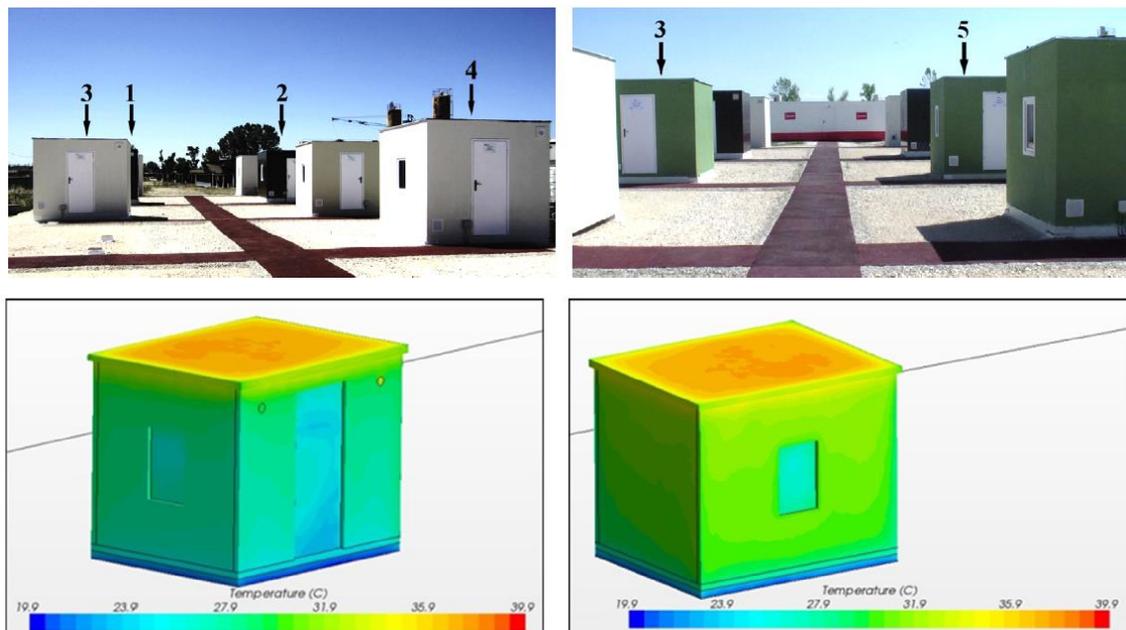
Les « cool paints » sont des matériaux radiatifs caractérisés par des valeurs très élevées de la réflectance solaire et de l'émissance infrarouge. Ces deux paramètres se trouvent être les plus importants quand il s'agit de contrôler la température superficielle d'un élément (Synnefa et al., 2007 ; Santamouris et al., 2008 ; Doya et al., 2012 ; Revel et al., 2014a ; Ihara, 2016 ; Rosso et al., 2017c).

Dans un travail de recherche portant sur l'« Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique des bâtiments d'un environnement urbain dense », Doya (2010), a réalisé une étude expérimentale ainsi que des simulations numériques sur les peintures rafraichissantes « cool paints » (Figure 4.15).



**Figure 4.15 :** Plateforme de l'étude expérimentale de l'impact des peintures "Standard et Cool" (Source : Doya, 2010)

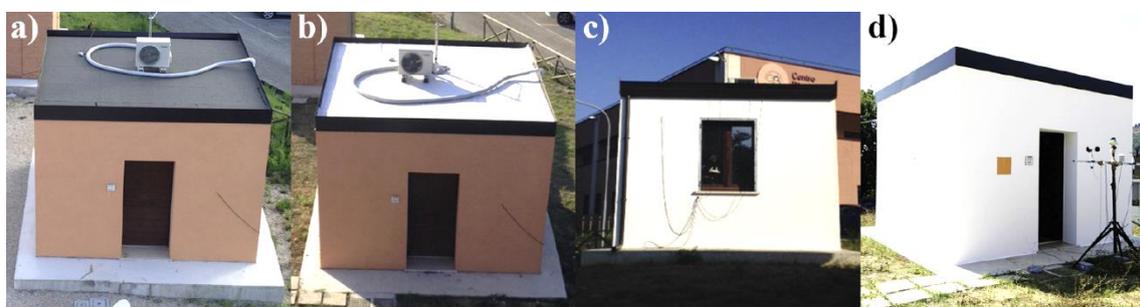
Dans cette recherche, il a démontré l'importance des propriétés superficielles réfléchissantes de la façade non seulement sur la performance du bâtiment lui-même mais aussi sur l'amélioration du microclimat à l'échelle urbaine. Dans le même contexte, Revel et al. (2014b), ont réalisé un article sous le titre « Cool products for building envelope » où ils ont exploité des modèles réalisés à l'échelle réelle ainsi qu'une série de simulation numérique afin d'étudier l'impact des produits froids (nanomatériaux) au niveau de l'enveloppe (Figure 4.16).



**Figure 4.16 :** Les modèles expérimentaux et numériques exploités pour étudier l'impact des matériaux de l'enveloppe (Source : Revel et al., 2014b)

Les résultats de cet essai affirment que les « Cool products » ont des avantages sur le plan thermique et énergétique avec une réduction de la température du mur jusqu'à 4,7°C et une réduction du flux de chaleur de 24 à 50 %.

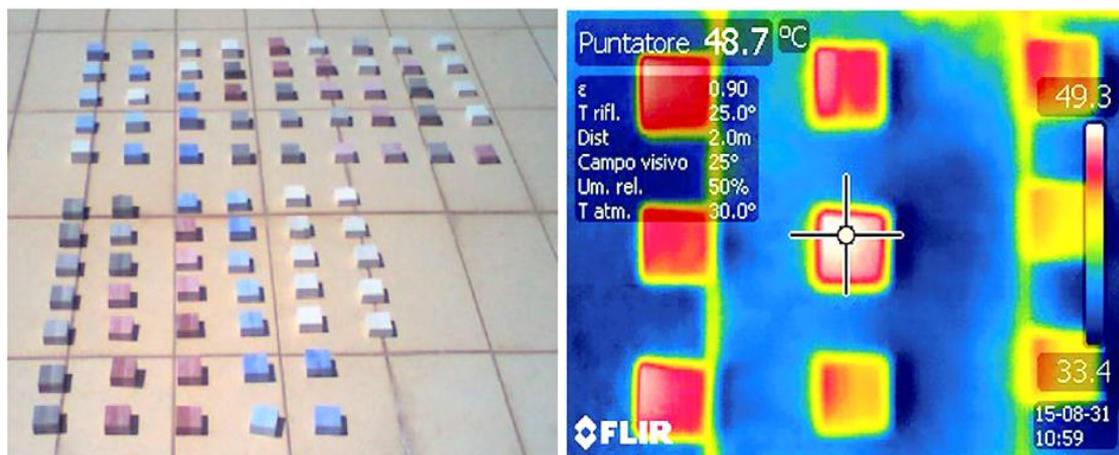
Dans le sillage des recherches qui portent sur les matériaux radiatifs « cool », Pisello avec son équipe sont considérés comme les pionniers dans le domaine des matériaux réfléchissants et les façades froides "cool facades". Ils ont effectué plusieurs recherches dans ce domaine et ont eu l'occasion d'expérimenter différentes approches dont des mesures sur terrain (bâtiments existants), des tests sur des modèles réduits et des simulations. Les recherches de Pisello et son équipe ont fait l'objet d'innombrables publications dont un article intitulé « Thermal performance of coupled cool roof and cool façade» (Pisello et al., 2017) (Figure 4.17).



**Figure 4.17 :** Les modèles réalisés pour étudier l'influence des surface de l'enveloppe (Source : Pisello et al., 2017)

Dans ce travail, des cellules tests ont servi à étudier l'impact des propriétés surfaciques de l'enveloppe sur la performance thermique et énergétique. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité thermique et énergétique des "cool painting" lors de leurs utilisations au niveau de l'enveloppe (façade et toiture).

De leur côté Rosso et al. (2017b), ont réalisé une étude intitulée « New cool concrete for building envelopes and urban paving ». Dans cette étude, plusieurs échantillons de béton ordinaire et de cool-béton ont été exploités dans le but de les comparer à travers l'utilisation d'une caméra thermique "la technique de la thermographie" (Figure 4.18).



**Figure 4.18** : Les échantillons réalisés pour étudier l'influence du cool-béton sur les températures surfaciques (Source : Rosso et al., 2017b)

Les résultats de cette étude démontrent les avantages de l'utilisation du « cool concrete » et le rôle important de la réflectance du matériau capable de réduire la température surfacique d'une valeur de l'ordre de 10,6 °C selon cette étude.

Plusieurs chercheurs considèrent les couleurs radiatives et les matériaux froids "cool materials" comme une solution passive efficace pour contrecarrer l'accumulation de la chaleur dans la surface de la façade et ainsi réduire la quantité de chaleur transférée vers l'intérieur (Rosso et al., 2017c). Ces matériaux radiatifs et/ou réfléchissants peuvent réduire la température surfacique selon plusieurs paramètres. D'après Hernández-Pérez et al. (2014), la réduction de la température enregistrée sous l'influence des matériaux réfléchissants est de l'ordre de 5 à 13°C. Alors que Uemoto et al. (2010), parlent d'une réduction de la température surfacique après l'utilisation d'une peinture "cool paint" supérieure à 10 °C. Pour sa part (Santamouris, et al., 2007), sont arrivés à une réduction pouvant atteindre 15 °C.

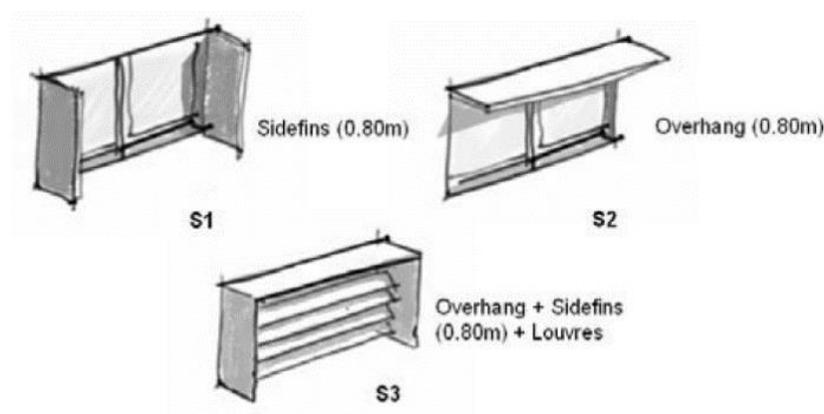
Concernant le côté énergétique, les surfaces réfléchissantes possèdent un grand potentiel de diminution de la consommation énergétique pour les besoins de refroidissement (Kokogiannakis et al., 2012 ; Revel et al., 2014b ; Ihara et al., 2016). Selon Ascione et al. (2010) dans leur article « Solar gain and building envelope : the surface factor », les peintures « cool » sont capables de réduire la consommation énergétiques de refroidissement jusqu'à 25 %. Hernández-Pérez et al. (2014), de leur côté, affirment que les matériaux réfléchissants deviennent de plus en plus importants vu leurs atouts thermiques et énergétiques. Bien évidemment, leur impact et performance varient en fonction des conditions climatiques qui nécessitent des études précises en fonction des spécificités climatiques de la région considérée.

#### IV.1.4. Les dispositifs

Au fur et à mesure du développement de la conception architecturale, la façade autrefois mur porteur s'est transformée donnant lieu à l'apparition de nouveaux dispositifs et concepts tels que la façade double peau, la façade ventilée, la façade végétalisée, la façade photovoltaïque, le Core-Skin-Shell et la façade intelligente (active ou adaptative). Ces façades font actuellement l'objet de plusieurs recherches au niveau mondial en termes d'efficacité thermique, lumineuse et énergétique.

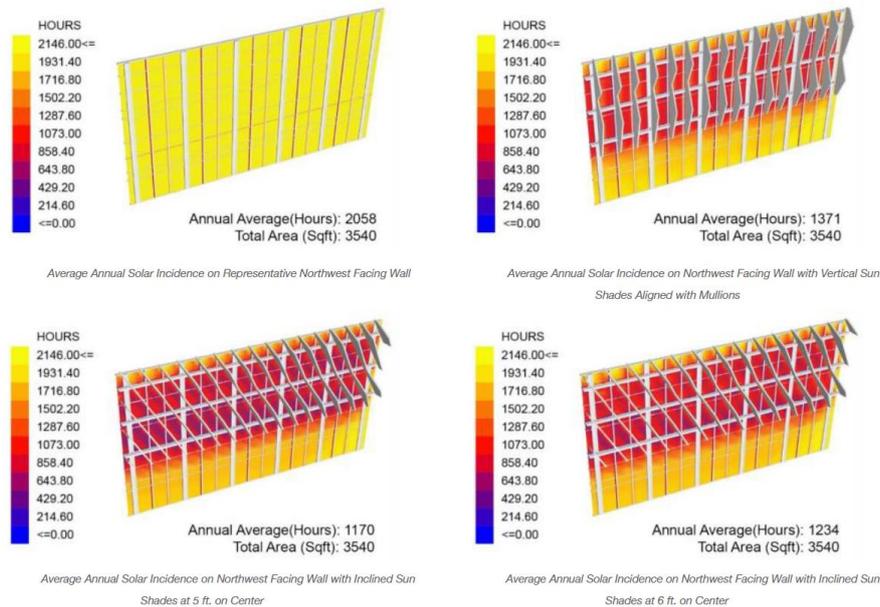
##### IV.1.4.1. Les protections solaires

Les protections solaires sont des éléments utilisés afin de minimiser la pénétration des rayonnements solaires directs et assurer un certain ombrage (occulter les grandes taches solaires). Il existe des protections solaires fixes ou mobiles soient horizontales, verticales ou mixtes choisies selon l'orientation (Figure 4.19).



**Figure 4.19** : Les types des protections solaires fixes  
(Source : Venancio et al., 2009)

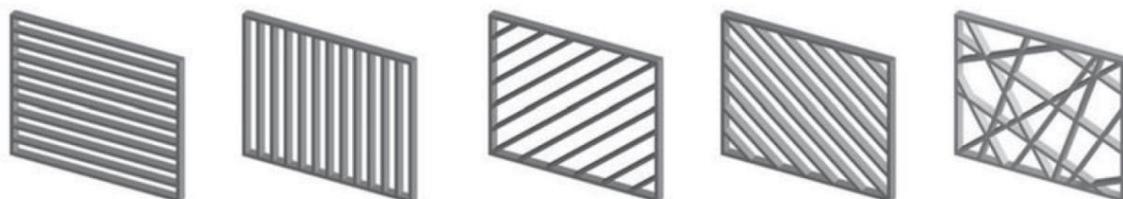
Kirschbaum (2016) a réalisé une étude sur l'efficacité des protections solaires fixes. A travers un travail de simulation numérique de plusieurs variantes de protection solaires fixes, il a démontré la grande influence de ces éléments sur la réduction de la période d'exposition de la façade aux rayonnements solaires (Figure 4.20).



**Figure 4.20** : L'impact des protections solaires sur la durée d'exposition de la façade  
(Source : Kirschbaum, 2016)

Ces résultats montrent que la durée moyenne annuelle d'exposition d'une façade sans protection est de 2058 heures. Par contre l'utilisation d'une protection solaire permet d'atténuer la durée d'exposition jusqu'à 1170 heures (soit un taux de réduction dépassant les 41 %).

Les persiennes, également, ont un rôle très important à jouer dans la protection des bâtiments. Misawa et al., (2015) qui réalisèrent une étude sur les protections solaires se sont basés sur la simulation numérique pour comparer cinq type de persiennes intégrés à l'extérieur de la façade avec plusieurs configurations (persienne : horizontale, verticale, diagonales) selon différentes orientations (Figure 4.21).

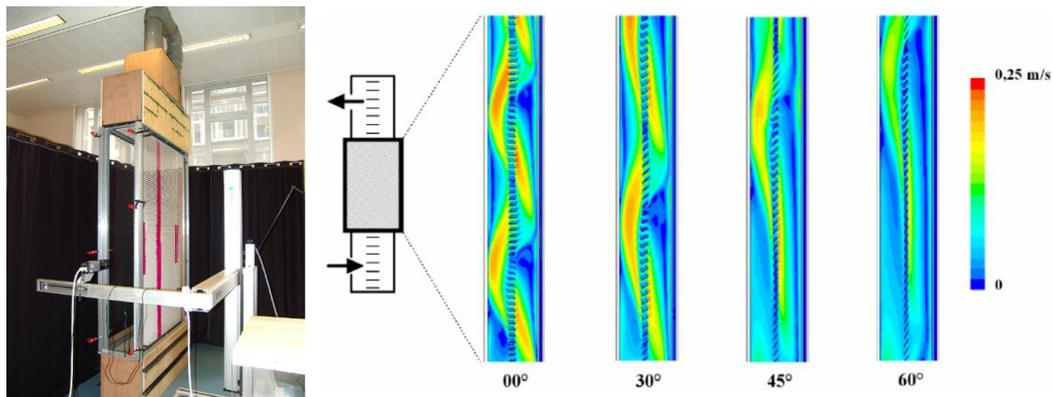


**Figure 4.21** : Les cinq types des persiennes étudiés avec différentes dispositions  
(Source : Misawa et al., 2015)

Les résultats ont montré que l'utilisation de persiennes externes intégrées minimise la quantité du rayonnement solaire de 47 à 76 % selon la saison et l'orientation, ce qui diminue les charges thermiques et améliore la performance énergétique du bâtiment.

#### IV.1.4.2. La façade double peau

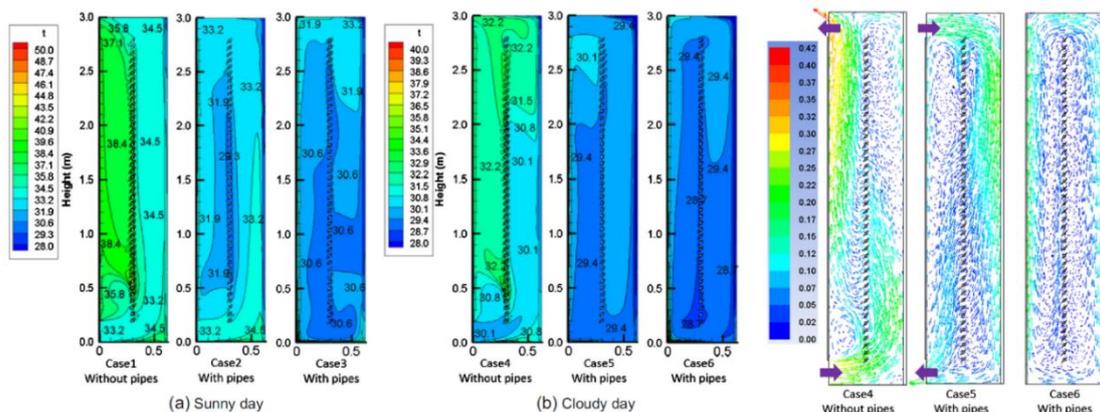
La façade double peau (FDP) a été largement étudiée. Safer (2006) dans sa thèse, a effectué une recherche détaillée sur ce type de façade et ses caractéristiques à travers des expérimentations et des simulations numériques (Figure 4.22).



**Figure 4.22 :** Étude expérimentale et numérique de la vitesse d'air au niveau du canal d'une façade double peau en fonction de l'inclinaison des lamelles (Source : Safer, 2006)

Il est apparu que chaque composant de ce dispositif influe sur son comportement, ce qui nécessite de faire des études paramétriques sur chaque élément.

De leur côté, Shen et al. (2016) ont réalisé une étude détaillée sur la performance thermique du dispositif de la façade double peau à travers l'étude de l'écoulement aéralique et la distribution de la température dans la cavité de la façade (Figure 4.23).



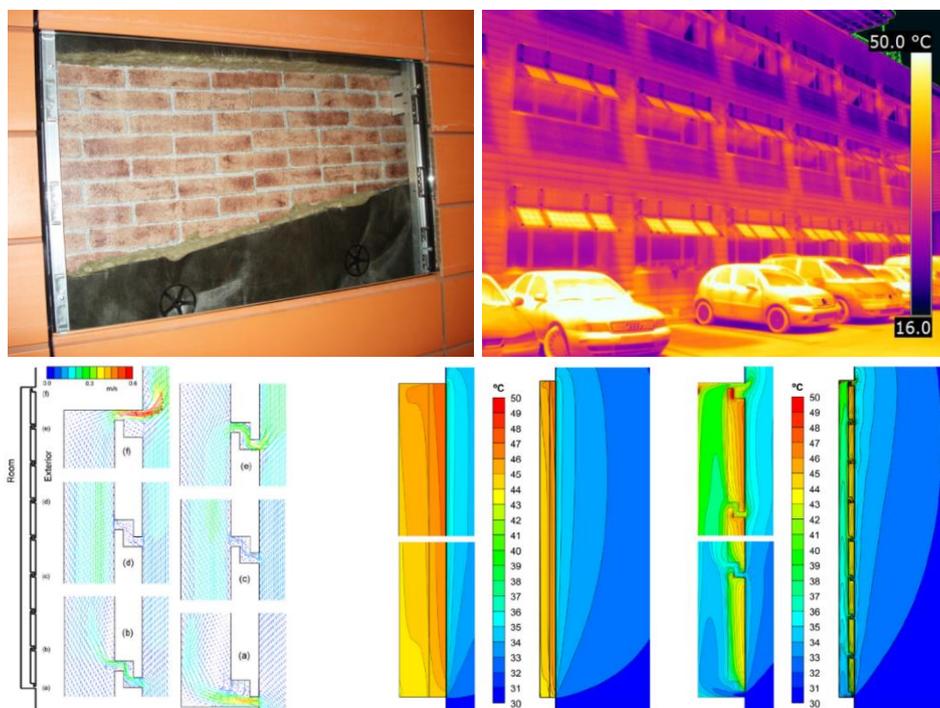
**Figure 4.23 :** Étude numérique de l'écoulement aéralique et la distribution de la température dans la cavité d'une façade double peau (Source : Shen et al., 2016)

Ils ont basé leur étude sur l'influence du climat, l'orientation et l'intégration des tubes avec fluide dans la cavité de la façade double peau afin d'étudier son comportement. Les résultats démontrent que ce dispositif a des atouts sur le plan thermique avec une réduction de la consommation énergétique dépassant les 20 % dans les conditions étudiées.

De même, Missoum et al. (2013), ont étudié numériquement le comportement thermique de cette façade, notamment, la convection naturelle de la cavité d'air. L'ensemble de ces recherches se rejoignent pour accorder à la façade double peau des atouts sur plusieurs plans.

#### IV.1.4.3. La façade ventilée

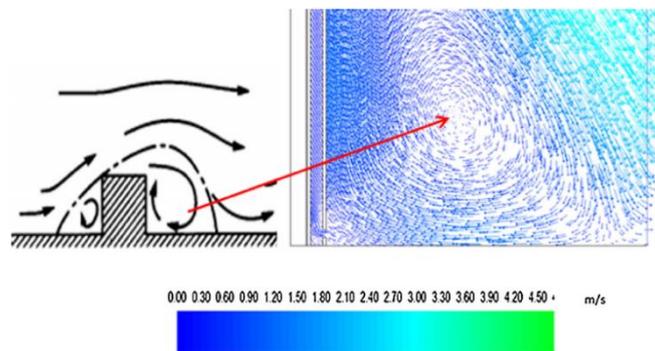
La façade ventilée (FV) fut l'objet de nombreuses recherches dans des climats différents. Brun (2011), a effectué dans sa thèse une étude sur l'impact de la ventilation de l'enveloppe. Pour ce faire, il a exploité une approche expérimentale avec une cellule test ainsi que des simulations numériques. Haase et al. (2009), ont réalisé un article intitulé « Simulation of ventilated facades in hot and humid climates » où ils ont étudié numériquement ce dispositif et ses impacts sur la performance thermique et énergétique. Pour sa part, Suárez et al. (2012), ont focalisé leur recherche sur les joints ouverts de ce dispositif dans un article intitulé « Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade » où ils ont utilisé une approche empirique à travers des mesures in situ ainsi qu'une simulation numérique (Figure 4.24).



**Figure 4.24 :** Étude empirique et numérique du comportement thermique d'une façade ventilée (Source : Suárez et al., 2012)

Ces résultats attestent que le dispositif de la façade ventilée a des avantages, à la fois, sur le fonctionnement thermique du bâtiment, ainsi que sur ses besoins énergétique. Ils ajoutent que l'efficacité d'une façade ventilée avec des joints ouverts est améliorée avec l'augmentation de la quantité des rayonnements solaires et la température de l'air ambiant.

Gagliano et al. (2016), ont étudié l'influence des vents sur le comportement thermodynamique des façades ventilées grâce à l'utilisation d'un logiciel de CFD "Computation Fluid Dynamics" (Figure 4.25).



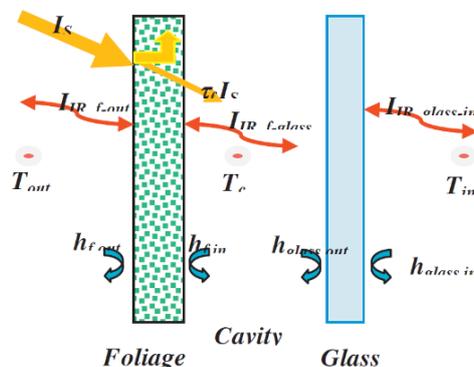
**Figure 4.25 :** Étude thermodynamique de l'impact des composants de la façade ventilée sur son comportement (Source : Gagliano et al., 2016)

Les résultats de leur étude démontrent que la façade ventilée peut améliorer la performance du bâtiment jusqu'à 50 % selon la nature du climat.

L'ensemble de ces recherches prouvent que la façade ventilée a des avantages sur le plan thermique et énergétique dans différents types de climat.

#### IV.1.4.4. La façade végétalisée

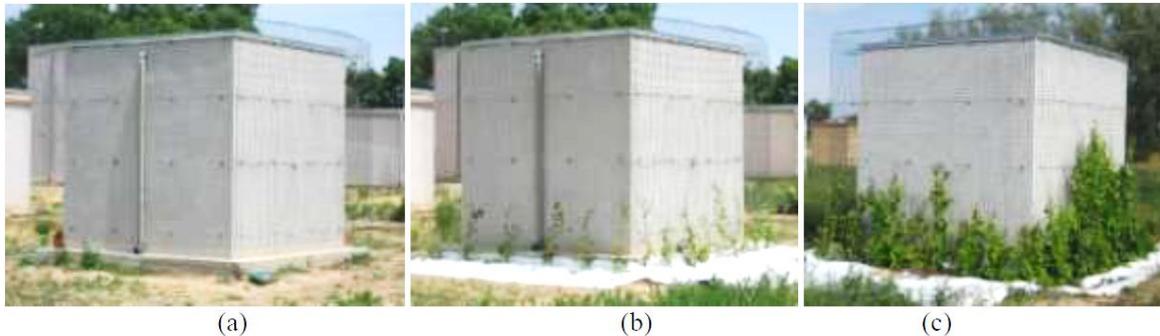
La façade végétalisée a été étudiée dans plusieurs travaux. Larsen et al. (2014), ont effectué une étude numérique sur les façades avec des plantes (Figure 4.26).



**Figure 4.26 :** Transfert de chaleur dans une façade végétalisée (Source : Larsen et al., 2014)

Ils ont trouvé que les plantes minimisent les gains et les pertes de 30 à 60 %.

De leur côté, Coma et al. (2014), ont réalisé une étude expérimentale via des modèles tests avec une façade végétalisée (Figure 4.27).



**Figure 4.27** : Les modèles tests exploités pour l'étude de la façade végétalisée  
(Source : Coma et al., 2017)

Il s'est avéré que la façade végétalisée est capable de réduire la température surfacique externe de la façade jusqu'à 14 °C du fait de la protection contre les rayonnements solaires qu'elle assure à la façade.

À ce propos, Vox et al. (2018), ont édité un article intitulé « Green façades to control wall surface temperature in buildings ». Ils ont réalisé de petites cellules tests avec une façade végétalisée (Figure 4.28). Les résultats démontrent que ce dispositif a des impacts sur le plan thermique et la valeur de réduction de la température peut atteindre jusqu'à 9 °C.

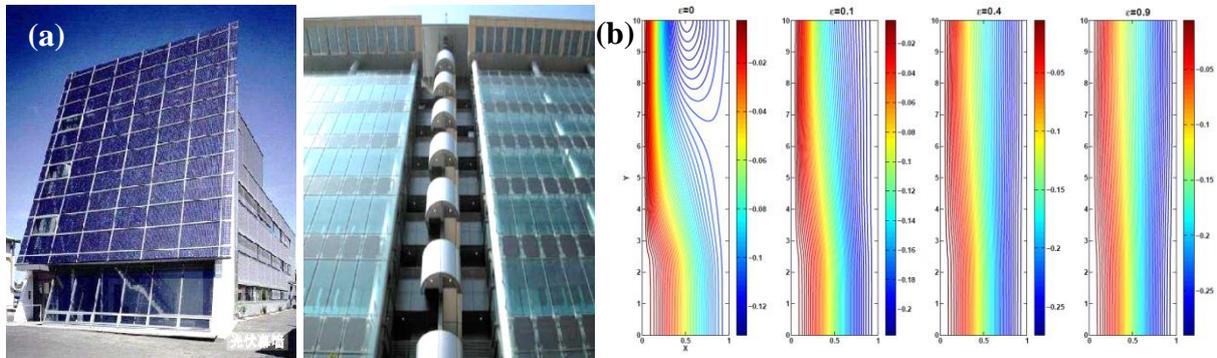


**Figure 4.28** : Les petites cellules tests utilisées dans l'étude expérimentale  
(Source : Vox et al., 2018)

Ces travaux affirment que la façade végétalisée a des impacts positifs sur l'efficacité thermique et énergétique des constructions.

#### IV.1.4.5. La façade photovoltaïque

La façade photovoltaïque a connu une grande utilisation dans la dernière décennie. Zoubir (2013), a réalisé une thèse sur l'intégration des panneaux photovoltaïque dans une façade double peau (Figure 4.29).



**Figure 4.29** : La façade photovoltaïque et l'impact de l'émissivité sur les lignes de courant de la cavité d'air (Source : (a) Hegger et al., 2011 ; (b) Zoubir, 2013)

Sur la base de ses résultats, il affirme que la façade photovoltaïque est une solution adéquate qui combine entre l'effet de la façade double peau et la production de l'énergie renouvelable.

À son tour, Xu (2014), a effectué une thèse de Doctorat basée sur des expérimentations et des simulations à travers l'intégration de capteurs photovoltaïques semi-transparents dans le vitrage des façades (Figure 4.30).



**Figure 4.30** : Étude expérimentale et numérique sur l'intégration des capteurs photovoltaïques semi-transparents dans le vitrage (Source : Xu, 2014)

De son côté, Daverat (2012) a réalisé une étude expérimentale à l'échelle réelle sur la façade double peau avec l'intégration des capteurs photovoltaïques semi-transparents dans la deuxième peau (Figure 4.31).



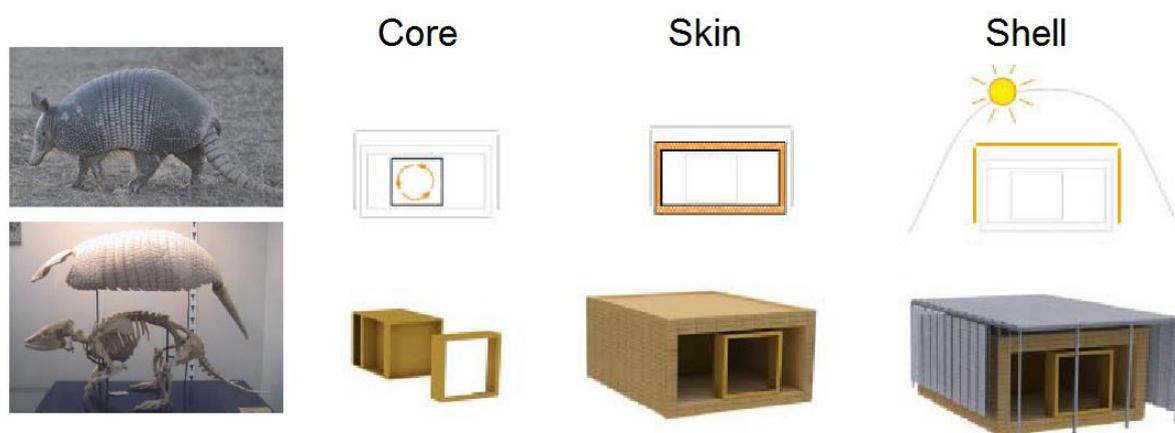
**Figure 4.31** : La façade double peau avec des capteurs photovoltaïques semi-transparents  
(Source : Daverat, 2012)

Les résultats obtenus démontrent que ce type de façade a de bons impacts sur le côté thermique, lumineux et énergétique. Les capteurs photovoltaïques semi-transparents intégrés dans le vitrage permettent à la fois la pénétration de la lumière naturelle, l'entrave au surplus des gains et la production de l'énergie.

Ce type de façade a montré ses avantages non seulement sur le plan thermique mais aussi sur le plan énergétique par la production de l'énergie renouvelable gratuite.

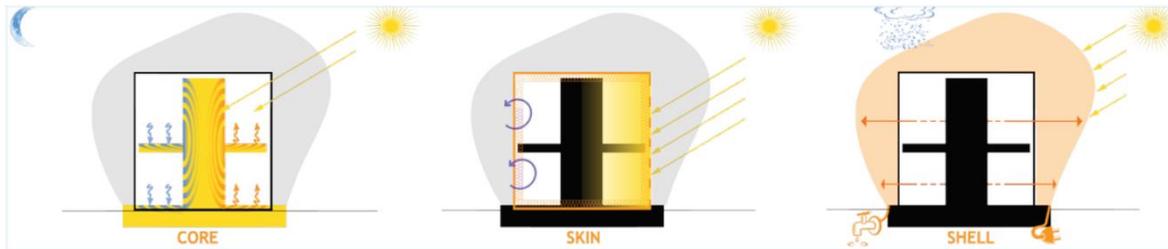
#### IV.1.4.6. Le Core-Skin-Shell

Core-Skin-Shell "CSS" est un nouveau concept de l'enveloppe qui décompose la construction en trois parties "Core-Skin-Shell" ou "Noyeu-Peau-Coquille". Inspiré de la nature (biomimétisme), ce concept selon Quenard (2009) et Bucchianeri (2012) porte sur l'intégration d'une coque intelligente autour de la construction afin de minimiser la consommation énergétique (Figure 4.32).



**Figure 4.32** : Exemple du concept Core-Skin-Shell (Source : Quenard, 2009)

Arantes (2013) dans sa thèse intitulée « L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située », a étudié ce concept d'une manière approfondie ; elle est considérée parmi les pionnières dans ce domaine (Figure 4.33).

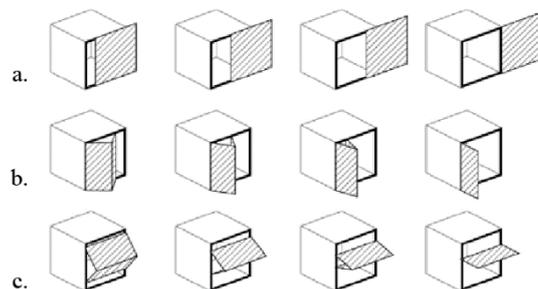


**Figure 4.33** : Schématisation du concept Core-Skin-Shell (Source : Arantes, 2013)

Elle voit que la décomposition de la construction en trois couches (le Core ou le cœur du bâtiment comme élément de structure, la Skin ou la peau comme couche d'isolation et la Shell comme bouclier de protection) permet de répondre d'une manière optimale à différentes exigences.

#### IV.1.4.7. La façade intelligente

La façade intelligente ou adaptative est un type de façade active basé sur une haute technologie (sondes, programmes et machines). Elle répond aux différentes exigences du bâtiment d'une manière automatique selon une ingéniosité et une programmation bien déterminée. Du Montier et al. (2013), ont effectué une recherche sur les façades adaptatives du point de vue lumineux et énergétique à travers des simulations de l'impact des panneaux coulissants (Figure 4.34).

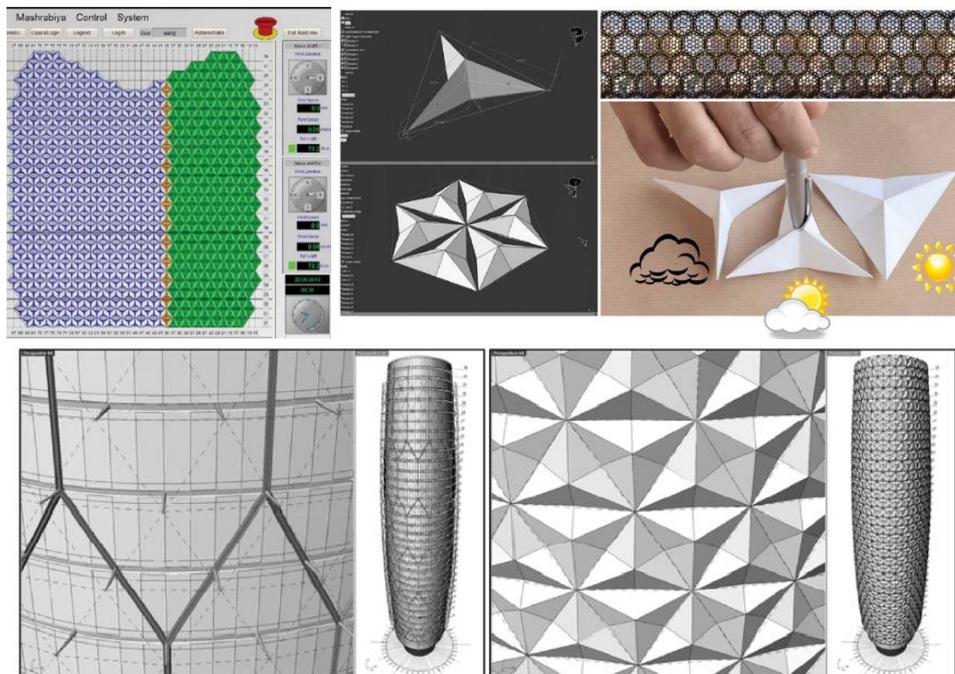


**Figure 4.34** : Modèles simulés sur l'impact des panneaux coulissants

(Source : Du Montier et al., 2013)

Les résultats de cette recherche montrent la fiabilité de la façade adaptative qui minimise la consommation énergétique de plus de 50 %. Ils considèrent cette technique comme une stratégie efficace afin de répondre aux différents besoins des utilisateurs quelques soient les conditions.

Karanouh et al. (2015), ont élaboré un travail numérique afin d'étudier l'influence des protections solaires (Moucharabieh) sur la performance du bâtiment (Figure 4.35).



**Figure 4.35 :** Modèles numériques d'étude des impacts de Moucharabieh  
(Source : Karanouh et al., 2015)

Ils trouvent que cette technique améliore considérablement le fonctionnement du bâtiment tout en assurant les besoins des occupants et en réduisant la consommation énergétique.

Ahmed (2015) dans son article « Development of intelligent facade based on outdoor environment and indoor thermal comfort », aborde le rôle des façades adaptatives sur le contrôle du confort thermique interne selon les conditions climatiques extérieures. La figure 4.36 illustre des exemples de projets réalisés avec des façades adaptatives.



**Figure 4.36 :** Exemple des façades adaptatives des projets réalisés  
(Source : Buffoni et al., 2015 ; Karanouh et al., 2015 ; Song et al., 2016)

Les recherches sur ce type de façades affirment leur performance sur plusieurs plans. Ces façades sont considérées comme une solution active mais aussi onéreuse et nécessite une grande technologie (installations, programmations).

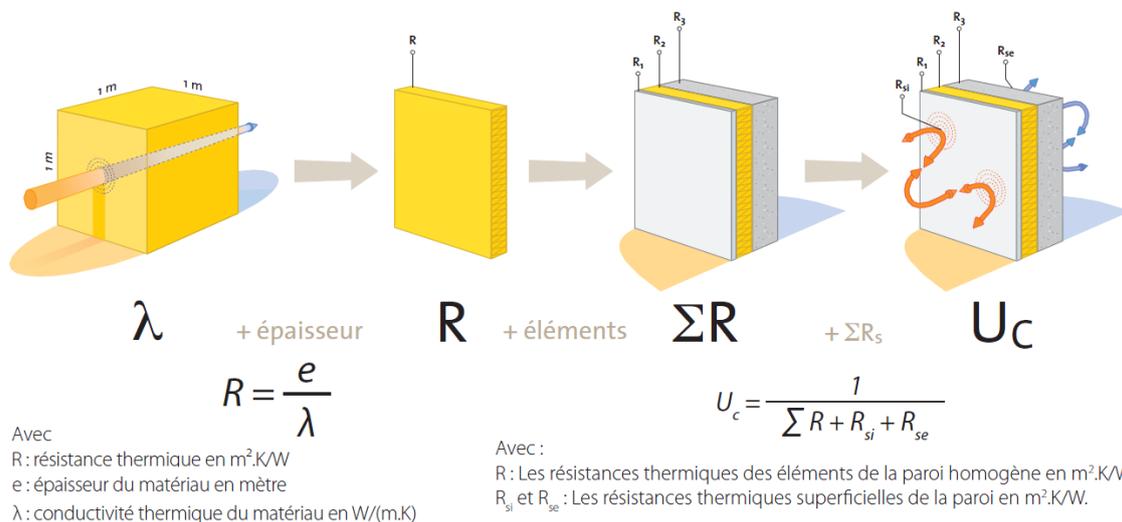
Pour toutes ces raisons, Ibrahim (2014), voit qu'il est indispensable d'optimiser l'enveloppe dans sa totalité. De son côté, Rapone (2012) affirme que la meilleure manière d'optimisation est celle qui répond en compromis aux différentes exigences.

## IV.2. Les méthodes utilisées pour l'étude des façades

Concernant la méthodologie utilisée dans les recherches qui se sont focalisées sur les façades, plusieurs méthodes ont été mentionnées dans la littérature : la méthode analytique (classique) sous forme de calcul mathématique, l'étude sur terrain (empirique, in situ), la méthode expérimentale soit par modèles réels ou réduits ainsi que par simulation numérique.

### IV.2.1. La méthode analytique

La méthode analytique est une méthode basée principalement sur des calculs relatifs aux composants de la façade, elle utilise des formules et des caractéristiques thermiques des matériaux telle que la conductivité thermique " $\lambda$ " pour calculer les aspects thermique des murs notamment, la résistance thermique " $R$ " et la transmission thermique " $U$ " (Figure 4.37).



**Figure 4.37** : Exemple de calculs employés dans la méthode analytique

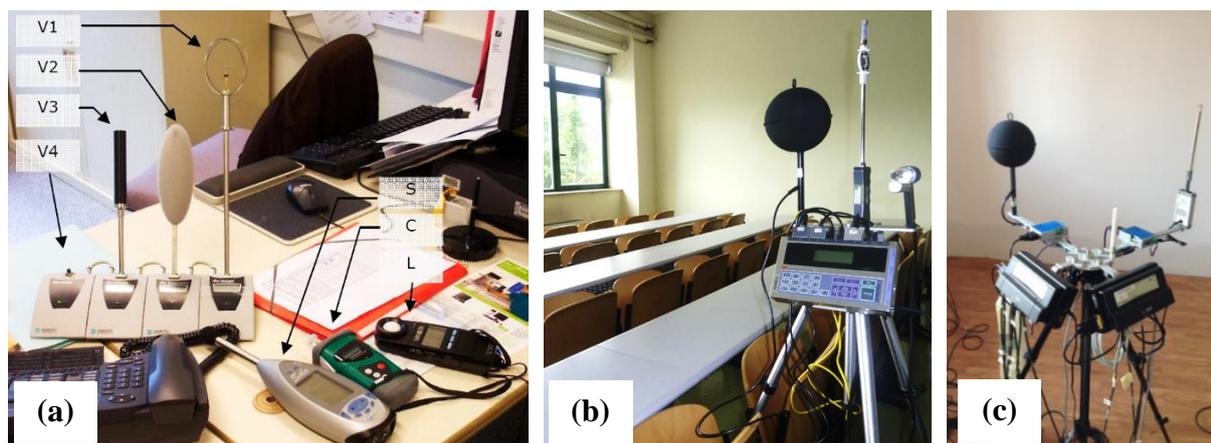
(Source : Saint-Gobain, 2016)

La méthode analytique permet de décrire le fonctionnement thermique de la construction à travers l'utilisation des principes de la physique du bâtiment (Hall, 2010). Cette méthode est

considérée comme un outil classique mais elle constitue la base des méthodes numériques développées (la simulation).

#### IV.2.2. L'étude sur terrain

L'étude sur terrain (empirique) est effectuée à travers des prises de mesures in situ (généralement sur des bâtiments existants), parfois ces mesures sont accompagnées d'enquêtes (questionnaires). Selon Pisello et al. (2015), l'analyse porte sur des composants de l'enveloppe des constructions (température, humidité) nécessitant des études sur des cas réels (Figure 4.38).



**Figure 4.38 :** Exemple des études in situ sur des cas réels

(Source : (a) Moujalled, 2007 ; (b) Buratti et al., 2013 ; (c) Pisello et al., 2015)

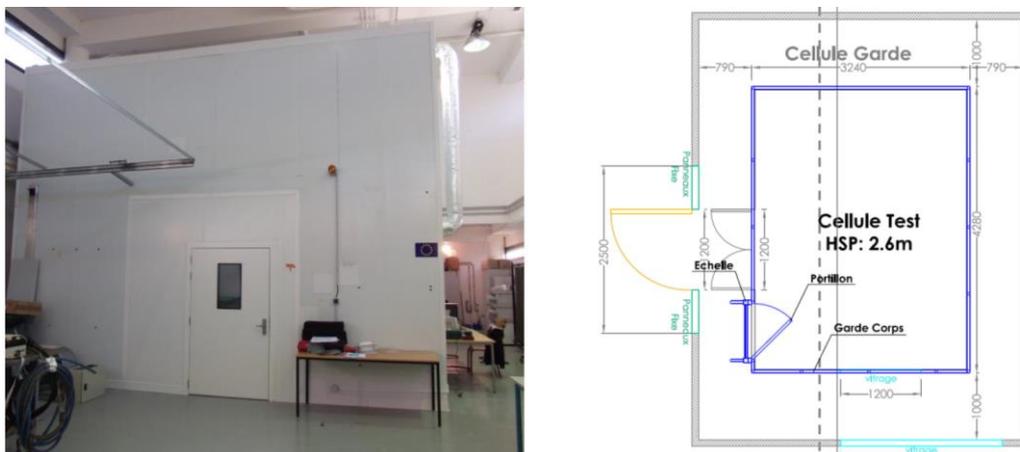
Cette méthode est largement utilisée par les chercheurs pour leurs travaux tels que (Moujalled, 2007 ; Mazari, 2012 ; Buratti et al., 2013 ; Jindong, 2015 ; Labbouz, 2015 ; El-Darwish, 2017) vue la fiabilité des résultats obtenus par cette technique qui étudie les phénomènes réels sous l'interaction de tous les facteurs. Son inconvénient réside, toutefois, dans la difficulté d'isoler les paramètres pour établir des causalités.

#### IV.2.3. La méthode expérimentale

La méthode expérimentale est parmi les techniques de recherches les plus utilisées au niveau mondial et dans tous les domaines. Elle permet de tester différents éléments ou phénomènes (variables) dans des conditions naturelles (réelles) ou contrôlées (en laboratoire).

Dans le domaine du bâtiment, les recherches expérimentales peuvent être des études effectuées sur des modèles ou cellules tests exposées directement à des conditions climatiques extérieures (conditions réelles). Ce type d'études expérimentales peut porter sur l'exploitation de modules ou cellules tests à une échelle réelle ou réduite. En outre, l'expérimentation peut

s'intéresser à une composante du bâtiment mais dans des conditions contrôlées au niveau d'un laboratoire (une garde thermique ou une chambre climatique). La figure 4.39 illustre une étude expérimentale en laboratoire à travers l'utilisation d'un modèle à échelle réelle dans une cellule garde.



**Figure 4.39** : Vue et plan d'une cellule garde avec une cellule test (Source : Cablé, 2013)

La cellule garde (la garde thermique) est utilisée pour fournir des conditions thermiques contrôlées similaires ou supérieures aux conditions réelles, ce qui facilite l'étude des différents phénomènes au niveau de la cellule test (le comportement thermique, le flux de la chaleur, la performance des matériaux et des isolants, la consommation énergétique,... etc.) dans des conditions extrêmes avec un temps de test succinct.

Par ailleurs, il existe des appareils pour les études expérimentales. La figure 4.40 présente un appareil de mesure du facteur solaire « g » des éléments translucides de l'enveloppe au niveau du laboratoire du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB à Grenoble.



**Figure 4.40** : Appareil de mesure du facteur solaire des éléments translucides de l'enveloppe du bâtiment (Source : Auteur, 2017)

Cet appareil a la capacité de quantifier les apports solaires transmis à travers les éléments translucides de l'enveloppe des bâtiments.

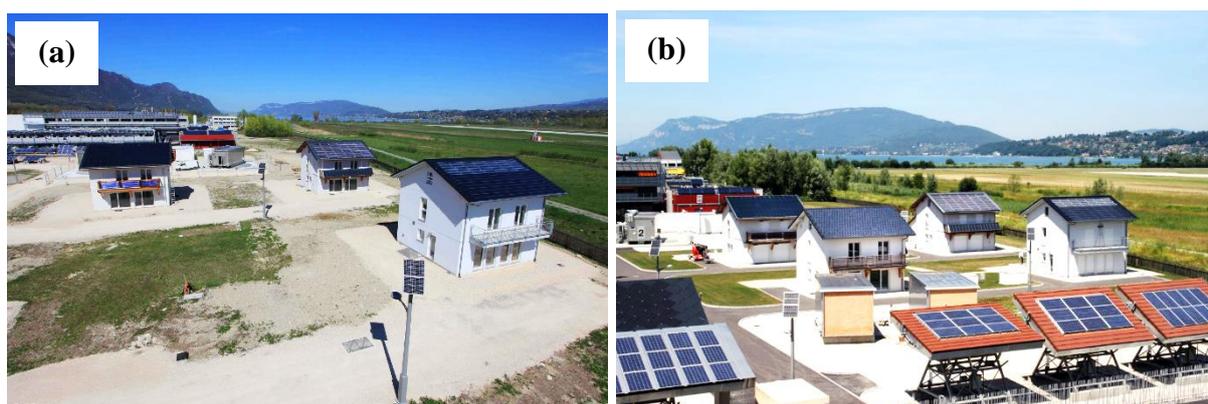
Pour plus de détails sur les études expérimentales, l'article de Lirola et al., (2017), intitulé « A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies » est une référence dans la matière. Les auteurs ont effectué une revue de littérature sur les méthodologies expérimentales par des cellules tests et ses applications dans le domaine du bâtiment. L'article s'intéresse au modèle en tant que dispositif expérimental lié à un système physique et l'objectif est de prédire avec précision les performances d'un tel système. Ces auteurs considèrent qu'il y a trois méthodes expérimentales à différentes échelles exploitées en fonction du domaine physique, la taille du dispositif et les équipements de mesures. Ces méthodes expérimentales sont basées sur :

- Des modèles réels « full-scale models » ;
- Des modules expérimentaux ou cellules tests « experimental modules or test cells » ;
- Des modèles réduits ou cellules réduites « scale models or reduced cells ».

Ils ont ajouté que le modèle dans le domaine du bâtiment peut être sous forme d'un prototype à grande échelle ou de cellules tests à une échelle réelle ou réduite.

#### IV.2.3.1. La méthode expérimentale avec modèles réels

La méthode expérimentale avec modèles réels porte sur la réalisation de prototypes afin d'étudier plusieurs paramètres ou phénomènes (Figure 4.41).



**Figure 4.41** : Vue de la plateforme d'essais INCAS de l'INES<sup>1</sup> et les modèles tests réalisées  
(Source : (a) Chahwane, 2011 ; (b) Ibrahim, 2014)

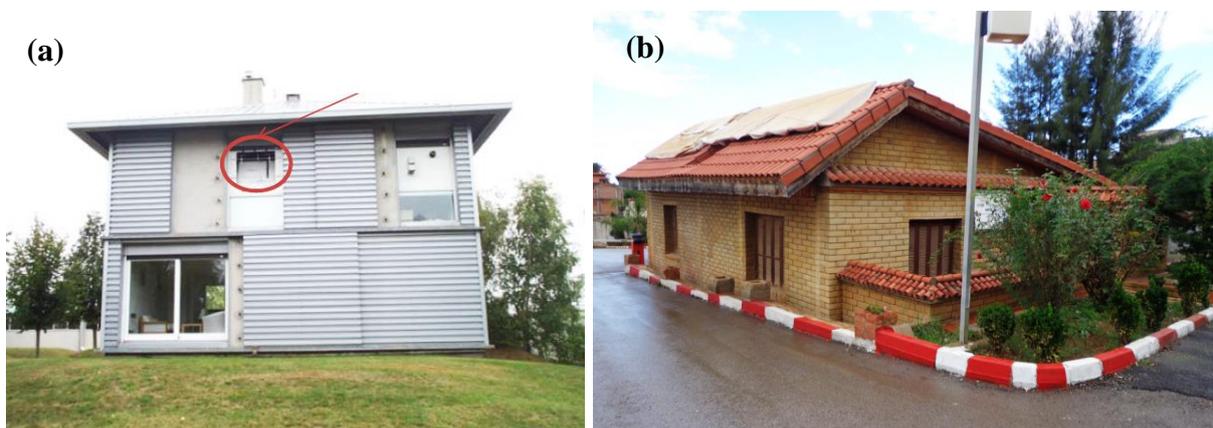
<sup>1</sup> Institut national de l'énergie solaire en France.

À ce propos, une compétition universitaire internationale est organisée par le département de l'énergie américain tous les deux ans depuis 2002 sous le nom « Solar Decathlon », ce concours multidisciplinaire regroupe des architectes, des urbanistes et des ingénieurs de plusieurs universités mondiales dont l'objectif est de concevoir et réaliser des modèles réels de bâtiments performants (Figure 4.42).



**Figure 4.42** : Vue aérienne du site de concours Solar Decathlon Europe en 2010  
(Source : SDEC<sup>2</sup>, 2010)

La figure 4.43 illustre deux exemples de modèles réels, (a) maison MARIA (Maison Automatisée pour des Recherches Innovantes sur l'Air) au niveau du CSTB et (b) une maison bioclimatique au niveau du centre CNERIB<sup>3</sup> - Algérie.



**Figure 4.43** : Modèles réels "full-scale models"  
(Source : (a) Caciolo, 2010 ; (b) Auteur, 2017)

En effet, cette méthode a des avantages mais reste très coûteuse. Lirola et al., (2017) ajoutent que la méthode expérimentale avec modèles réels présente des inconvénients par

<sup>2</sup> Solar Decathlon Europe Competition (2010), [www.sdeurope.org](http://www.sdeurope.org)

<sup>3</sup> Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du bâtiment.

rapport au coût et l'espace. Pour ces raisons, les études expérimentales ont été orientées vers d'autres méthodes telle que l'exploitation des cellules tests réelles et réduites.

#### IV.2.3.2. La méthode expérimentale avec modules ou cellules tests à une échelle réelle

La méthode expérimentale avec des cellules tests (ou modules tests) est une méthode utilisée dans plusieurs études tels que les travaux de (Castell et al., 2010 ; Revel et al., 2014b ; Barreneche et al., 2016 ; Alonso et al., 2017 ; Pisello et al., 2017) où les chercheurs exploitent des cellules tests à une échelle réelle afin d'étudier plusieurs phénomènes (voir tableau E.1, E.2, E.3 et E.4 - annexe E).

Les recherches scientifiques de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle ont exploité cette méthode vue ses atouts et la possibilité de l'étude et l'analyse des phénomènes physiques complexes vue la similitude réalisée entre la cellule et le modèle réel (Lirola et al., 2017). La figure 4.44 illustre un exemple d'une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réelle.



**Figure 4.44 :** Exemple d'une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réelle

(Source : Fernández-González, 2007)

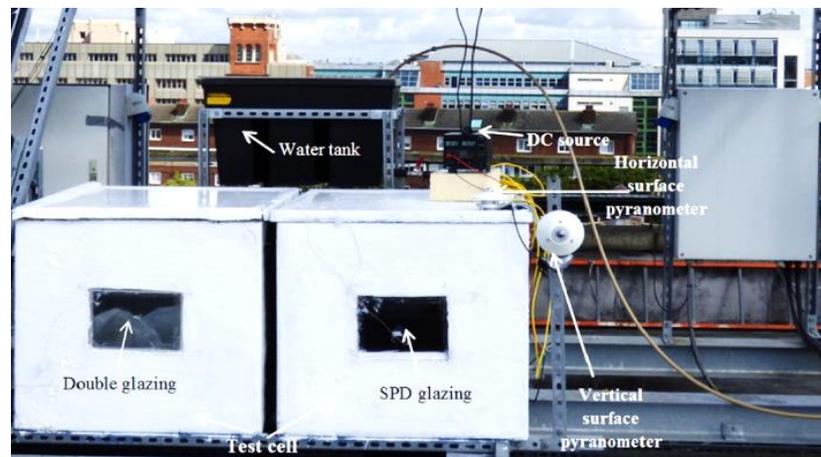
Cette méthode représente également des atouts mais toujours le coût élevé demeure un problème crucial.

#### IV.2.3.3. La méthode expérimentale avec cellules à une échelle réduite

L'utilisation des cellules tests à une échelle réduite est la méthode la plus utilisée par les chercheurs vu ses avantages et la fiabilité de ses résultats tels que les travaux de (Ahmad, 2004 ; Cheng et al., 2005 ; Doya et al., 2012 ; Elghawaby, 2013 ; Ibrahim, 2014 ; Cornaro et al., 2017 ;

Vox et al., 2018) où la recherche est basée sur la réalisation de petites cellules tests afin d'étudier des éléments et phénomènes différents (voir tableau E.5, E.6 et E.7 - annexe E).

La figure 4.45 illustre une étude expérimentale effectuée par des cellules tests à une échelle réduite pour évaluer le comportement des vitrages (double et SPD).



**Figure 4.45 :** Une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réduite  
(Source : Ghosh et al., 2016)

En outre, les échelles utilisées par les chercheurs allant jusqu'à "1/12" et les échelles les plus fréquentes sont "1/20" et "1/50" (Lirola et al., 2017).

#### IV.2.4. La méthode numérique

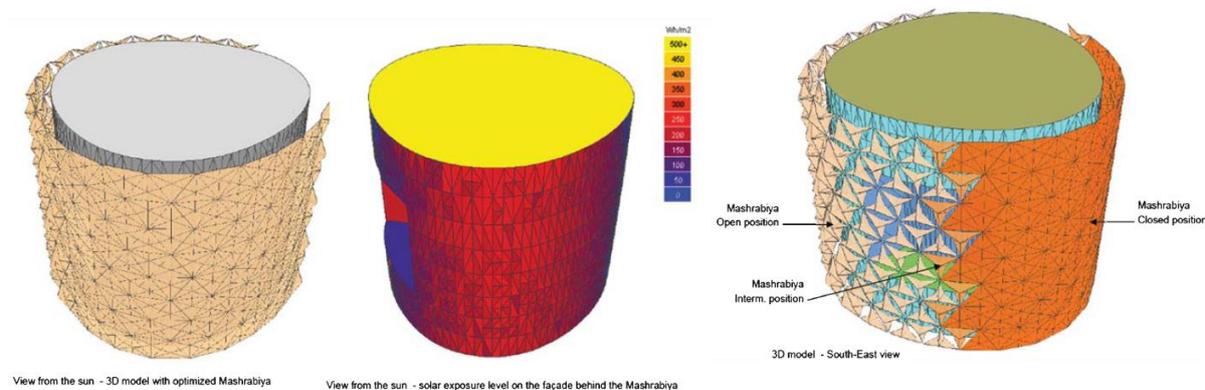
La méthode numérique à travers l'exploitation de différents logiciels de simulation. C'est une technique largement répandue dans le milieu de la recherche tels que les travaux de (Brun et al., 2009 ; Gossard, 2011 ; Rapone, 2012 ; Gracia et al., 2013 ; Chisholm, 2013 ; Rivalin, 2016 ; Santos et al., 2017).

Selon plusieurs chercheurs comme (Pisello et al., 2012 ; Rosso, 2014), l'utilisation des logiciels de simulation dynamique a connu un grand développement vu les atouts qu'ils offrent dans l'évaluation des bâtiments dans des conditions différentes. De leur côté Lirola et al. (2017), voient que cette méthode simplifie les phénomènes complexes.

À son tour, Spitz (2012) dans sa thèse « Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments », a effectué une recherche comparative profonde sur les outils de simulation (Trnsys, EnergyPlus, Comfie-pléiade, CoDyBa et SimSpark) et a pu montrer la fiabilité de ces outils de simulation les plus

utilisés dans le domaine des études environnementales qui traitent de la thermique et énergétique du bâtiment.

La figure 4.46 présente un exemple de simulation de l'influence de l'ombrage de moucharabieh sur la performance énergétique d'un bâtiment.



**Figure 4.46 :** Simulation de l'impact de l'ombrage de moucharabieh sur la performance énergétique (Source : Karanouh et al., 2015)

À noter que le programme le plus utilisé dans la plupart des recherches numériques relatives à la thermique du bâtiment est le logiciel de la simulation thermique dynamique TRNSYS vu la fiabilité de ses résultats. En outre, la simulation numérique constitue la méthode la plus exploitée dans le domaine de l'architecture (Lirola et al., 2017).

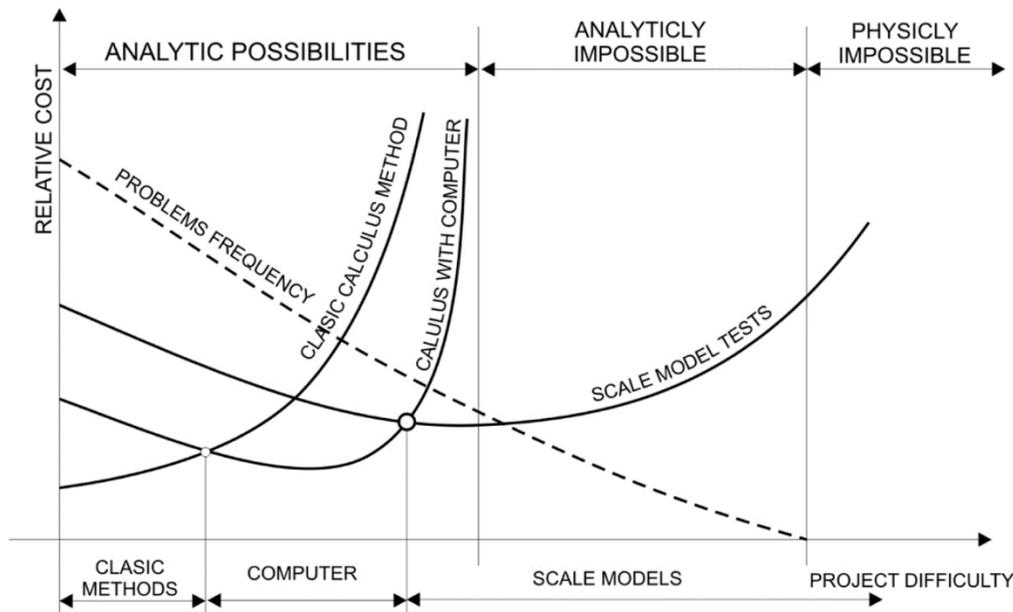
Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. La méthode analytique est une méthode classique mais relativement consommatrice de temps. Le travail sur terrain est pour sa part caractérisé par de grandes difficultés et obstacles de faisabilité (administratifs, l'assurance des conditions naturelles, le temps, etc.) mais il donne une bonne compréhension du phénomène étudié particulièrement les paramètres liés aux personnes (sensation et satisfaction des occupants).

L'étude expérimentale par des modèles réels et cellules à échelle réelle est une approche porteuse de beaucoup d'avantages mais elle reste très coûteuse ce qui oblige les chercheurs à se tourner vers des cellules tests à une échelle réduite. Cette technique est actuellement la plus appropriée pour étudier les phénomènes physiques dans des conditions réelles, en outre, elle donne une bonne compréhension des paramètres étudiés.

Concernant l'étude numérique sur des modèles virtuels, elle présente plusieurs avantages sur plusieurs plans mais elle nécessite une bonne maîtrise de l'outil de la simulation et la validation des résultats. Plus précisément, pour mieux comprendre les paramètres étudiés et

donner plus de fiabilité aux recherches, il est nécessaire de combiner entre plusieurs méthodes afin de vérifier et valider les résultats obtenus.

D'après Lirola et al. (2017), Heinz Hossdorf a réalisé un graphe représentant la relation entre la difficulté du projet et le coût relatif (Figure 4.47).



**Figure 4.47** : Graphe de Hossdorf de la relation entre la difficulté du projet et le coût relatif  
(Source : Lirola et al., 2017-Hossdorf)

La lecture générale de ce graphe permet de constater les éléments suivants :

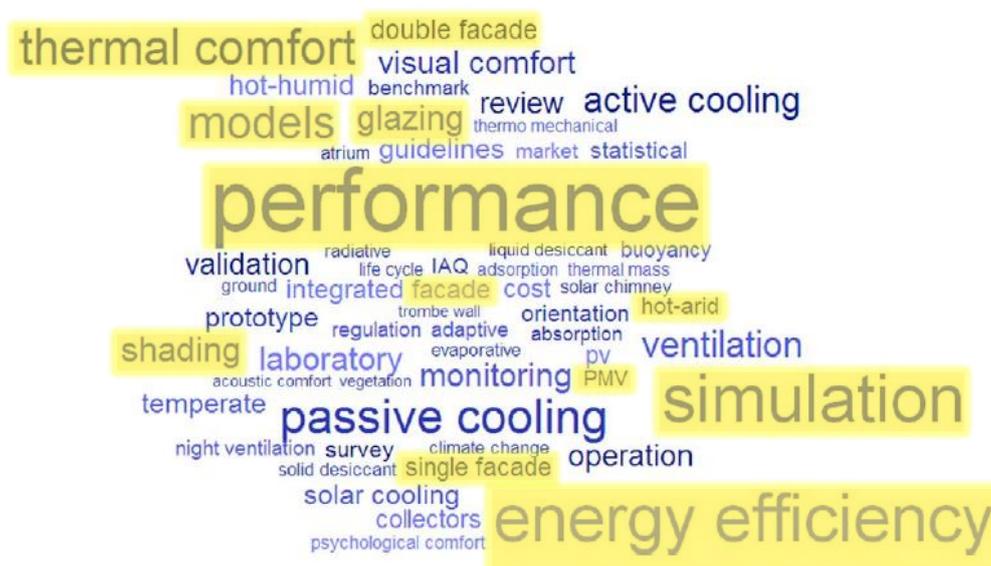
- Plus le projet est difficile plus le coût relatif est élevé dans toutes les méthodes ;
- La méthode classique et numérique sont limitées avec un coût relatif très élevé avec l'augmentation de la difficulté du projet ;
- La méthode des modèles tests est la meilleure méthode qui réunit entre la possibilité de la réalisation des projets plus difficiles et un coût relatif moyen.

En plus de ces points, Lirola et al. (2017), ajoutent que plus l'analyse est difficile, moins les simulations sont efficaces et vice versa, plus l'analyse est difficile, plus l'exploitation des modèles réduits est avantageuse voire unique dans certaines situations. Pour eux, il existe un point critique qui se situe au niveau du croisement entre la courbe de la simulation et la courbe des modèles réduits. En amont de ce point les deux méthodes sont rentables mais à partir de là, les méthodes expérimentales par modèles réduits deviennent plus avantageuses et rentables et plus efficaces pour traiter des projets de difficultés croissantes.

### IV.3. Le positionnement épistémologique

Prieto et al. (2017) ont réalisé un article relatif à l'état de l'art sur les stratégies de refroidissement intitulé « 25 Years of cooling research in office buildings: Review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990–2014) ». Cette revue de la littérature a été constituée sur la base d'un nombre important d'articles publiés au niveau de trois bases de données connues (Web of Science, SCOPUS et Science Direct) entre 1990 et 2014. Son objectif était d'identifier les lacunes dans les connaissances et de définir les voies et les tendances actuelles pour une exploration plus approfondie des informations pouvant soutenir la conception des immeubles de bureaux situés dans des climats chauds. Dans cette perspective, les chercheurs ont étudié et classé 861 résumés en fonction des mots-clés. Les résultats ont mis en exergue la pertinence actuelle de différents sujets dans ce domaine.

La figure 4.48 illustre une partie des résultats obtenus par Prieto et al. (2017) sous forme d'un nuage de mots et de mots-clés relatifs aux recherches effectuées où la taille du mot est proportionnelle au nombre d'articles publiés sur le sujet.



**Figure 4.48** : Nuage de mots et de mots-clés relatifs aux recherches effectuées

(Source : Prieto et al., 2017)

Dans ce graphique, la taille du mot reflète le nombre d'articles et par conséquent l'importance de chaque concept dans les bases de données étudiées, elle montre également l'orientation et l'intérêt scientifique des chercheurs pendant cette période (Prieto et al., 2017). Selon cette échelle, il apparaît que l'axe le plus exploré dans les recherches est la performance

énergétique (*performance*). Par ailleurs, la simulation par logiciel a constitué l'outil le plus exploité vu ses avantages.

La position de cette thèse par rapport à la panoplie de recherches s'intéressant aux façades est l'étude et l'optimisation des éléments passifs au niveau des façades des immeubles de bureaux situés dans un contexte climatique chaud et aride, plus précisément la présente recherche investit : le matériau, les ouvertures (vitrages) et dispositifs de protection. Les éléments traités dans l'étude sont soulignés en jaune dans la figure précédente (Figure 4.48).

Cette recherche est fondée sur une combinaison de méthodes (qualitative et quantitative) mobilisées pour comprendre les phénomènes thermiques et la sensation des usagers, le but final est d'obtenir une optimisation appropriée au contexte climatique de l'étude sur le plan thermique et énergétique.

#### **IV.3.1. L'étude in situ**

Cette méthode a été exploitée principalement afin d'analyser les différentes typologies des façades existantes relativement à un contexte climatique précis. Les prises de mesures donnent une bonne compréhension des phénomènes thermiques qui se déroulent à travers la façade. L'objectif est de faire une comparaison entre les éléments de la façade et leurs impacts sur le fonctionnement thermique des constructions.

L'exploitation des questionnaires avec les mesures in situ donne la possibilité d'étudier la sensation et la satisfaction des usagers vis-à-vis des ambiances thermiques afin de mieux comprendre leurs besoins.

#### **IV.3.2. L'expérimentation par des cellules tests**

L'exploitation de la méthode expérimentale donne la possibilité de tester et de suivre instantanément plusieurs éléments inexistants dans le corpus d'étude avec l'avantage d'effectuer des mesures pendant plusieurs jours dans des conditions naturelles.

#### **IV.3.3. La simulation**

La simulation permet de faire des études paramétriques détaillées (sur le plan thermique et énergétique) et ainsi d'évaluer plusieurs paramètres. Elle permet également de procéder à des optimisations par paramètres isolés ou combinés.

#### IV.4. Les conférences internationales sur la façade

Du fait de l'importance de la thématique de la performance des façades, plusieurs conférences internationales ont été organisées pour l'explorer à l'échelle mondiale d'une manière périodique et récurrente (annuelle, semestrielle et trimestrielle). Parmi les conférences internationales les plus célèbres il y a lieu de citer : ZAK World of facades<sup>4</sup>, Facade Tectonics<sup>5</sup> et Facades+<sup>6</sup>.

➤ ZAK World of facades :

Zak World of Façades est un cycle de conférences internationales organisé depuis 2012, elle fut consacrée uniquement aux recherches sur les façades (la conception des façades l'ingénierie des façades et les nouvelles technologies de cette partie de l'enveloppe) ;

➤ Facade Tectonics :

C'est une initiative sous forme de tables rondes sur les façades qui a débuté en 2007 à l'école de l'Université de Californie. Par la suite, ces tables rondes se sont transformées en une série de séminaires vu l'importance du sujet ;

➤ Facades+ :

Cette conférence est organisée depuis 2012, elle englobe des recherches sur les façades sous formes des présentations, de tables rondes et d'ateliers.

#### Conclusion

L'étude et l'optimisation thermique et énergétique de la façade à travers ses attributs et ses éléments relève d'un champ de recherche très vaste. L'impact déterminant de cette partie de l'enveloppe sur le plan thermique et énergétique des constructions donne à ce sujet un intérêt particulier parmi les chercheurs concrétisé par un grand nombre de travaux. Les études réalisées sont basées sur des méthodologies analytiques, empiriques sur terrain, expérimentales par des cellules tests à une échelle réelle ou réduite et numériques selon l'élément étudié et les objectifs de l'étude. Néanmoins, la variété des contextes et les conditions climatiques nécessitent d'effectuer des études approfondies pour chaque région afin de trouver des solutions adéquates et bien adaptées qui assurent le confort des usagers et la performance du bâtiment.

---

<sup>4</sup> [www.zakworldoffacades.com](http://www.zakworldoffacades.com)

<sup>5</sup> [www.facadetectonics.org](http://www.facadetectonics.org)

<sup>6</sup> [www.facadesplus.com](http://www.facadesplus.com)

## **CHAPITRE V :**

# **Étude empirique du fonctionnement thermique des immeubles de bureaux à Biskra**

Ce chapitre est consacré dans la première partie à la présentation du contexte climatique de la ville étudiée, les cas d'étude (échantillons des immeubles de bureaux sis à Biskra avec des façades différentes) et le protocole exploité. La seconde, porte sur l'étude quantitative par des prises de mesures sur terrain et l'analyse du comportement thermique des bâtiments étudiés durant la saison chaude et froide. Par la suite, il aborde une étude qualitative (accompagnée avec les mesures) élaborée sur le corpus d'étude à travers l'exploitation de questionnaires. À la fin, il interprète les résultats de l'étude in situ et démontre l'impact des éléments de la façade sur le comportement thermique du bâtiment, la sensation et la satisfaction des utilisateurs.

*« If you can not measure it, you can not improve it »*

*Le physicien Britannique William Thomson (Lord Kelvin)*

## **CHAPITRE V : Étude empirique du fonctionnement thermique des immeubles de bureaux à Biskra**

### **Introduction**

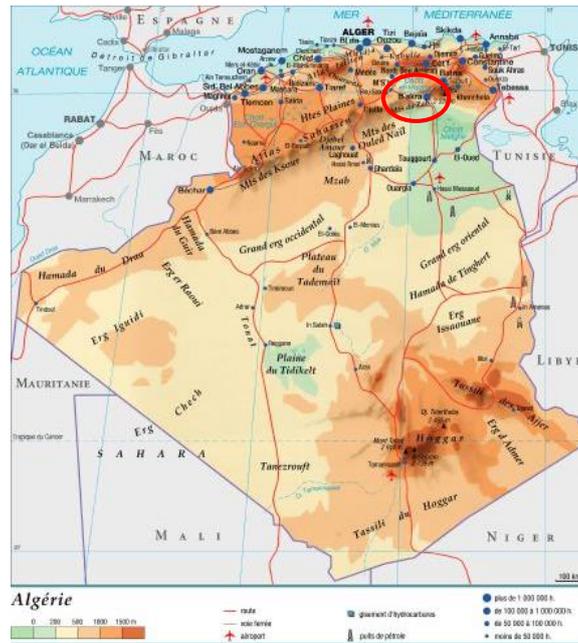
Le fonctionnement thermique des bâtiments est très varié en fonction de plusieurs paramètres entre autres la composition de l'enveloppe (éléments, matériaux, dispositifs, etc.) et les conditions climatiques où ils se trouvent (les variations des températures, l'humidité, les vents, les précipitations, etc.) qui produisent des phénomènes différents. La compréhension et la maîtrise de n'importe quel phénomène nécessite des études approfondies sur l'élément traité en conditions réelles. Dans cette perspective, la meilleure manière pour étudier le comportement des bâtiments reste l'étude dans des conditions réelles afin de mieux comprendre son fonctionnement tout en obtenant la sensation et la satisfaction de ses occupants ce qui permet de déterminer les problèmes et de les corriger.

### **V.1. Présentation du contexte climatique et les immeubles de bureaux à Biskra**

Cette étude a été effectuée dans la ville de Biskra qui est caractérisée par des conditions climatiques très dures particulièrement pendant l'été avec des températures caniculaires. Malgré ces conditions météorologiques sévères, la conception et la réalisation des immeubles de bureaux à Biskra a connu l'utilisation de façades inappropriées au contexte climatique ce qui engendre des situations d'inconfort thermique et des bâtiments énergivores.

#### **V.1.1. Le contexte climatique de la ville étudiée**

Le contexte climatique de cette étude porte sur les zones chaudes et arides comme la ville de Biskra. Située au Sud-Est Algérien (Figure 5.1) à une latitude de 34°48' Nord et une longitude de 5° 44' Est, elle s'élève à une altitude de 86 mètres (Berghout, 2012).



**Figure 5.1 :** La carte géographique de l'Algérie indiquant la situation de Biskra

(Source : [www.larousse.fr/encyclopedie](http://www.larousse.fr/encyclopedie))

La ville de Biskra est considérée comme une zone chaude et aride, elle est caractérisée par un climat désertique sec avec des températures très élevées, une température moyenne annuelle de 22,5 °C, une température mensuelle moyenne pendant le mois de Janvier de 11,6°C (le mois le plus froid) et une température mensuelle moyenne pendant le mois de Juillet de 34,9°C (le mois le plus chaud) selon les données de la station météorologique de la ville de Biskra (voir Annexe A).

### V.1.2. Les immeubles de bureaux de la ville de Biskra

Les immeubles de bureaux sis à Biskra sont caractérisés par l'utilisation aléatoire des éléments de la façade d'une manière indifférentes au contexte climatique particulièrement les surfaces vitrées (taux très élevé) et le type de vitrage (simple). En outre, quelques matériaux exploités ont des impacts négatifs sur le plan thermique (l'acier et l'aluminium au niveau de la double peau et les cadres des ouvertures). Bien entendu, les mêmes éléments de la façade avec les mêmes caractéristiques thermiques sont exploités indifféremment (au Nord qu'au Sud du pays) avec la négligence de la spécificité climatique de la région. Selon Elghawaby (2013), cette négligence des conditions climatique est appelée « *la logique de l'ignorance* » dans la conception architecturale qui produise des ambiances thermiques incontrôlables. Malheureusement, d'après des constats sur terrain, cette logique est devenue une manière de

travail et de conception dans la quasi-totalité des projets ce qui influe sur plusieurs plans (thermique, lumineux, énergétique, rendement des travailleurs, etc.).

La figure 5.2 illustre un échantillon des immeubles de bureaux de la ville de Biskra avec des façades différentes.



**Figure 5.2 :** Un échantillon des immeubles de bureaux de la ville de Biskra  
(Source : Auteur, 2017)

Où :

01 : Direction de la Santé et de la Population (DSP) ;

- 02 : Direction des Travaux Publics (DTP) ;
- 03 : Caisse Régionale de Mutualité Agricole (CRMA) ;
- 04 : Direction du Tourisme et de l'Artisanat ;
- 05 : Direction des Ressources en Eau ;
- 06 : L'algérienne des eaux ;
- 07 : Centre Des Impôts (CDI) ;
- 08 : Caisse Nationale du Logement (CNL) ;
- 09 : Centre d'Archive ;
- 10 : Contrôle Financier (CF);
- 11 : Office de Promotion et de Gestion Immobilière (OPGI) ;
- 12 : L'agence Foncière ;
- 13 : Direction de l'Emploi.

Dans la quasi-totalité de ces exemples, le vitrage a été exploité d'une manière excessive à travers de grandes surfaces vitrées ou complètement sous forme d'un mur rideau. Cette exploitation irrationnelle du vitrage engendre des conditions thermiques insupportables qui poussent les occupants à l'utilisation des équipements de chauffage ou la climatisation durant une longue période et de consommer une grande quantité d'énergie. En outre, l'utilisation des dispositifs de protections (protections solaire) est rare, même s'ils existent, ils sont intégrés uniquement pour l'aspect esthétique, sans calculs et parfois avec des matériaux métalliques. Cette situation nécessite des études approfondies sur les impacts des éléments de la façade sur le plan thermique et énergétique en fonction des spécificités climatiques de chaque zone afin de trouver des solutions adéquates pour chaque climat.

## **V.2. Etude quantitative des immeubles de bureaux à Biskra**

Cette recherche a été menée sur des bâtiments tertiaires et plus précisément sur des immeubles de bureaux se distinguant par la nature de leur façade. L'étude quantitative sur le corpus d'étude a été effectuée à travers des prises de mesures in situ.

### **V.2.1. Présentation des cas d'étude**

Les bâtiments étudiés représentent les typologies de façades les plus récurrentes et représentatives dans la ville de Biskra. Ces bâtiments ont été sélectionnés après une analyse profonde sur un grand nombre de bâtiments de la ville en question selon des critères choisis précédemment (matériaux, surface vitré, type de vitrage, dispositifs, etc.), les objectifs assignés

et la faisabilité de l'étude (la possibilité de mesure). Cette sélection a donné neuf typologies de façade (simple, double, ventilée, vitrée, sans ou avec protection, etc.).

La figure 5.3 présente les immeubles de bureaux étudiés (cas d'étude) avec des typologies de façade différente.



**Figure 5.3 :** Les immeubles de bureaux étudiés (Source : Auteur, 2017)

Chaque bâtiment choisi est caractérisé par une façade différente dont les détails sont énumérés comme suit :

- Le bâtiment B1 (Direction du Commerce) : une façade simple en brique creuse avec un ratio d'ouverture faible ;
- Le bâtiment B2 (Siège de l'actel et Touring voyage) : une façade double peau en acier avec un ratio d'ouverture moyen ;
- Le bâtiment B3 (Groupe Amouri) : une façade ventilée en terre cuite (de 1,6 cm d'épaisseur) et sans isolation thermique ;
- Le bâtiment B4 (Caisse Nationale des Assurances Sociales des Travailleurs CNAS) : une façade avec un habillage en aluminium (Alucobande) ;

- Le bâtiment B5 (Contrôle Technique des Constructions CTC-Est) : une façade avec des protections solaires verticales ;
- Le bâtiment B6 (Caisse nationale de Sécurité sociale des non-salariés CASNOS) : une façade avec des protections solaires mixtes de faible épaisseur ;
- Le bâtiment B7 (L'agence foncière) : façade avec un mur rideau en double vitrage (vitrage simple avec une cavité sans gaz) ;
- Le bâtiment B8 (Radio Ziban) : façade en brique de terre de 50 cm ;
- Le bâtiment B9 (Assurance Saa) : façade avec une texture rugueuse et des persiennes à l'italienne.

Le tableau 5.1 présente la composition des façades de chaque bâtiment étudié.

**Tableau 5.1** : La composition des façades des cas d'étude (Source : Auteur, 2017)

Cas d'étude	La composition de la façade de l'extérieur à l'intérieur	Epaisseur (cm)
B1	Enduit de ciment de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2 cm	34
B2	Façade double peau (FDP) en acier- cavité d'air- enduit de ciment de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2 cm	70
B3	Façade ventilée (FV) en terre cuite de 1,6 cm- cavité d'air de 8cm- enduit de ciment de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2 cm	40
B4	Habillage en aluminium (Alucobande) - cavité d'air de 10 cm- enduit de ciment de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2 cm	45
B5	Protections solaires de 40 cm- enduit de ciment de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2 cm	74
B6	Protections solaires mixtes de 10 cm- enduit de ciment de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2 cm	44
B7	Mur rideau en double vitrage (sans gaz)	01
B8	Enduit de ciment de 2,5 cm- brique de terre de 45 cm- enduit de plâtre de 2,5 cm	50
B9	Enduit de ciment (rugueux) de 2 cm- brique creuse de 15 cm- lame d'air de 5 cm- brique creuse de 10 cm- enduit de plâtre de 2cm	34

Ces cas d'étude sont considérés comme des bâtiments représentatifs de chaque typologie (voir Annexe B).

Chaque cas étudié a eu pour objectif de démontrer l'impact d'un élément de la façade sur le comportement thermique du bâtiment. Le bâtiment (B1) a été pris comme référence (une composition de façade la plus prisée, ratio d'ouverture faible et sans protection), le bâtiment (B2) pour étudier l'impact de la double peau et le choix du matériau de la deuxième peau, le bâtiment (B3) pour démontrer l'influence de la façade ventilée (la convection naturelle au niveau de la cavité d'air et le mouvement de l'air par l'effet de cheminée) et le bâtiment (B4) afin d'étudier l'impact de l'habillage en aluminium (Alucobande) qui est devenu un mode très apprécié par les concepteurs et les maîtres d'ouvrages.

Concernant le bâtiment (B5), il a été choisi afin d'étudier l'influence des protections solaires verticales, le bâtiment (B6) pour étudier l'impact des protections solaires mixtes et le bâtiment (B7) afin d'étudier l'impact des murs rideaux et élucider l'ambiguïté sur les impacts des doubles vitrages (en vitrage simple sans gaz). Par rapport au bâtiment (B8), il a été sélectionné afin de démontrer l'impact des matériaux lourds avec une grande inertie thermique et à la fin le bâtiment (B9) pour étudier l'impact des persiennes à l'italienne sur la protection contre les rayonnements solaires directs.

L'objectif de cette partie de l'étude est de démontrer les impacts thermiques réels de chaque décision ou le choix effectué par le concepteur par rapport aux éléments de la façade.

## **V.2.2. Protocole de la prise de mesures**

Sur la base des données météorologiques de la ville en question, il a été possible de déterminer la semaine type "design week" et par la suite la journée type "design day" durant laquelle se feront les prises de mesures pour la saison chaude et froide afin de justifier la période de l'étude. La semaine et la journée type sont déterminées à partir du calcul de la température moyenne journalière pendant la période considérée (Hong et al. 1999). Dans cette étude, le calcul de la semaine et la journée type a été effectué à travers l'exploitation des données de la station météorologique de la ville de Biskra durant une période de 15 ans entre 2000 et 2015 (voir Tableau A.2 et A.3 - Annexe A).

La semaine type "design week" sélectionnée pour effectuer la prise de mesures dans les cas d'étude durant la période hivernale et estivale sont comme suit :

- Entre le 05 et le 11 Janvier 2017 (le mois le plus froid) ;
- La deuxième semaine du mois de Juillet (le mois le plus chaud) entre le 07 et le 13 Juillet 2017.

Les journées types sélectionnées pour la prise de mesures sont respectivement entre le 08 et le 10 Janvier 2017 pour la saison froide et entre le 07 et le 08 Juillet 2017 pour la saison chaude (pendant le week-end).

La détermination des deux journées types a été effectuée durant la semaine type "design week" de chaque période en prenant en compte plusieurs critères telles que les conditions naturelles (mesures sans chauffage et sans climatisation) et la possibilité de mesure dans l'établissement. Nous avons demandé aux travailleurs au préalable de ne pas utiliser le chauffage pendant les journées de la prise de mesure. Concernant la période estivale, les mesures ont été effectuées pendant le week-end (Vendredi et Samedi).

L'ensemble des bâtiments pris comme cas d'étude se trouve au niveau de la ville de Biskra dans des zones urbaines. Les mesures ont été effectuées au niveau du 1<sup>er</sup> étage (étage intermédiaire) afin d'éviter l'influence des gains de chaleur provenant de la toiture (sauf le bâtiment B8- Radio Ziban car il est en R+1).

Le protocole exploité s'identifie à des mesures bi-horaires de 8 h à 16 h (pendant la période du fonctionnement de l'administration) dans des conditions naturelles (sans chauffage ou climatisation). Les paramètres mesurés sont :

- La température ambiante ( $T_a$ ) ;
- La température à l'extérieur ( $T_{ext}$ ) ;
- La température surfacique interne ( $T_{si}$ ).

Ces paramètres ont un impact direct sur la température du confort thermique ressentie par l'être humain, dite encore température opérative ( $T_o$ ) ou température résultante sèche. D'après Liébard et De Herde (2005), cette température ( $T_o$ ) se calcule par la moyenne de la température de l'air et de la température superficielle des parois comme le démontre la formule suivante :

$$T_{opérative} = \frac{T_{Air} + T_{Parois}}{2}$$

Les mesures ont été faites à l'ombre à une hauteur de 1,2 m. Le choix des points de mesures a été effectué en prenant en considération plusieurs paramètres notamment l'orientation, la surface vitrée, le type de vitrage, les gains internes (nombre des occupants et des ordinateurs) ainsi que la faisabilité et la possibilité d'effectuer les mesures dans des conditions naturelles. A signaler que les protections solaires intérieures existantes (rideaux et

stores) ont été ouvertes durant les journées des prises de mesures afin d'éviter leurs impacts sur le comportement thermique des bureaux.

Une étude préliminaire (ou un prétest) a été effectuée sur les bâtiments étudiés entre le 13 et le 15 Décembre 2016 (avant la période de l'étude) afin de déterminer la bonne manière de travail (la prise de mesures, l'enregistrement et l'estimation du temps nécessaire pour chaque mesure, etc.) dont l'objectif est d'assurer le bon déroulement de l'opération de la prise de mesures pendant la période de l'étude (Janvier et Juillet 2017).

### V.2.3. Étalonnage des instruments de la prise de mesures

Les instruments utilisés pour la prise de mesures sont un anémomètre "Testo 480" pour mesurer la température ambiante et un thermomètre infrarouge "CASON-CA 380" pour mesurer la température surfacique comme le démontre la figure 5.4 (voir Annexe C).



**Figure 5.4 :** Les instruments utilisés pour la prise de mesures

(Source : Auteur, 2017)

L'outil de mesure "Testo 480" est connu à l'échelle mondiale dans le domaine de la recherche, il est calibré et étalonné au préalable. Pour des raisons de précision et de vérification de la validité des outils exploités pour la prise de mesures, des comparaisons ont été effectuées avec d'autres instruments sur les valeurs de la température ambiante ( $T_a$ ) et la température surfacique ( $T_s$ ) afin d'assurer la fiabilité des mesures.

La figure 5.5 présente quelques appareils exploités pour vérifier les instruments utilisés pour la prise de mesures.



**Figure 5.5** : Les appareils exploités pour la vérification des instruments utilisés pour la prise de mesures (Source : Auteur, 2017)

La comparaison entre les valeurs enregistrées confirme la précision et la fiabilité des instruments utilisés pour la prise de mesures car les différentes valeurs comparées sont similaires ou avec un écart très faible et négligeable.

### **V.3. Etude qualitative des immeubles de bureaux à Biskra**

L'étude qualitative porte sur l'évaluation de la sensation et la satisfaction thermique des usagers des immeubles de bureaux de la ville de Biskra. Pour ce faire, une enquête a été effectuée sur les immeubles de bureaux étudiés (les cas d'étude). Dans cette optique, des questionnaires auto-administrés (voir Annexe D) ont été distribués durant les journées de la prise de mesures dans les bureaux étudiés (la population visée est les utilisateurs des bureaux où les prises de mesures ont été effectuées). Un total de 60 questionnaires fut distribué dans ce sens.

Afin d'assurer la compréhension des questions posées, le questionnaire a été élaboré en Français avec une traduction en Arabe disposée au-dessous de chaque question. Dans la même perspective et dans l'objectif de garantir la compréhension des questions ainsi que la fiabilité des résultats, une préenquête a été effectuée sur le corpus d'étude durant une étude préliminaire entre le 13 et le 15 Décembre 2016 (préalablement à la période de l'étude) pour vérifier la compréhension de toutes les questions qui peuvent paraître ambiguës pour certains afin les simplifier et les rendre compréhensibles.

Le questionnaire final élaboré est composé de 36 questions de type fermées avec six champs facultatifs pour l'explication ou pour donner plus de détails (voir Annexe D). Quelques questions sont exploitées uniquement pour connaître l'avis des personnes et ne sont pas utilisées dans l'interprétation des résultats.

Ce questionnaire est scindé en quatre parties traitant les sujets suivants :

- Des informations générales sur la personne questionnée (le sexe, l'âge et la localisation du bureau) ;
- Le confort d'une manière générale et particulièrement le confort thermique sans et avec des équipements (la sensation, la satisfaction, les habitudes utilisées pour l'amélioration du confort thermique et l'utilisation des équipements de chauffage et de la climatisation) ;
- La façade du bâtiment (la performance, la surface vitrée, les protections, les rideaux ou les stores) ;
- L'efficacité énergétique (les mois de l'utilisation des équipements, la moyenne journalière de l'utilisation du chauffage et de la climatisation et la connaissance des impacts de ces équipements sur la consommation énergétique).

Les réponses sont déterminées sur une échelle de 7 niveaux (par exemple la sensation thermique : très chaude, chaude, légèrement chaude, confortable, légèrement froide, froide et très froide) et une échelle de 5 (par exemple la satisfaction ; très mauvaise, mauvaise, acceptable, bonne et très bonne) dont l'objectif est d'organiser les réponses et d'en obtenir les plus adéquates en fonction de la situation thermique de la personne questionnée.

La grande partie du questionnaire a été consacrée au confort et plus précisément le confort thermique afin de bien comprendre la situation des personnes questionnées car la nature de cette notion est très complexe vu qu'elle est liée à plusieurs aspects de nature différente.

#### **V.4. Résultats de l'étude sur terrain**

Les résultats obtenus par l'étude sur terrain (sur les neuf bâtiments existants) sont répartis en deux catégories, respectivement les résultats de l'étude quantitative (les prises de mesures in situ) puis les résultats de l'étude qualitative (l'enquête par des questionnaires).

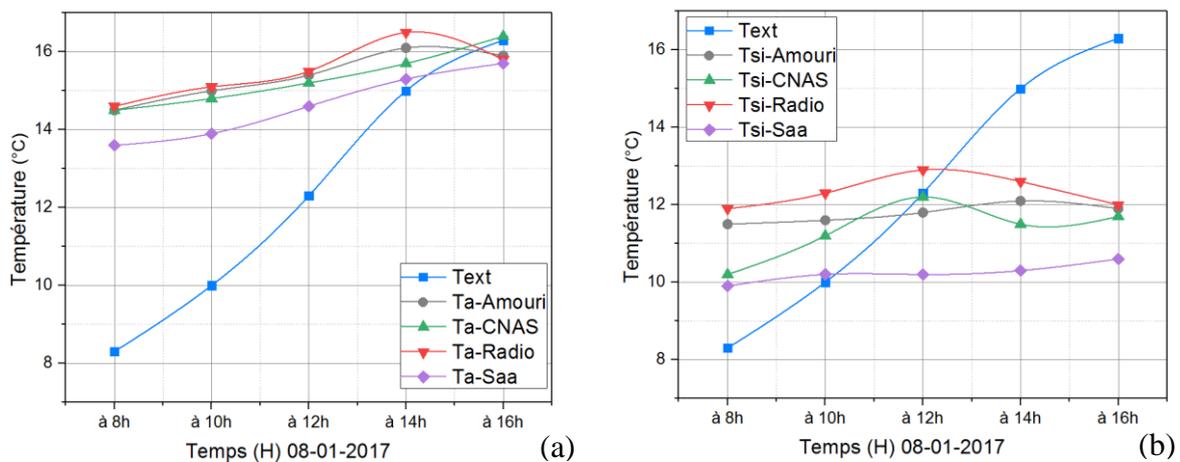
### V.4.1. Résultats de l'étude quantitative

Les résultats de l'étude quantitative sont divisés en trois parties, la première partie présente et interprète les résultats de la période hivernale, la deuxième relative à la période estivale et la troisième se focalise sur l'impact des ouvertures de la façade (surface vitrée et type de vitrage) sur le fonctionnement thermique des bâtiments car le premier constat est relatif à la grande utilisation du vitrage dans les zones arides.

#### V.4.1.1. Résultats de la saison froide

Les résultats obtenus par la prise de mesures pendant la période hivernale sont représentés dans les figures (5.6, 5.7 et 5.8).

La figure 5.6 illustre les températures mesurées pendant la journée type de la période hivernale (le 08 Janvier 2017) dans les quatre cas d'étude (Groupe Amouri "B3", la CNAS "B4", radio Ziban "B8" et l'assurance Saa "B9"). Le graphe (a) représente les températures ambiantes (Ta) et le graphe (b) les températures surfaciques internes (Tsi).

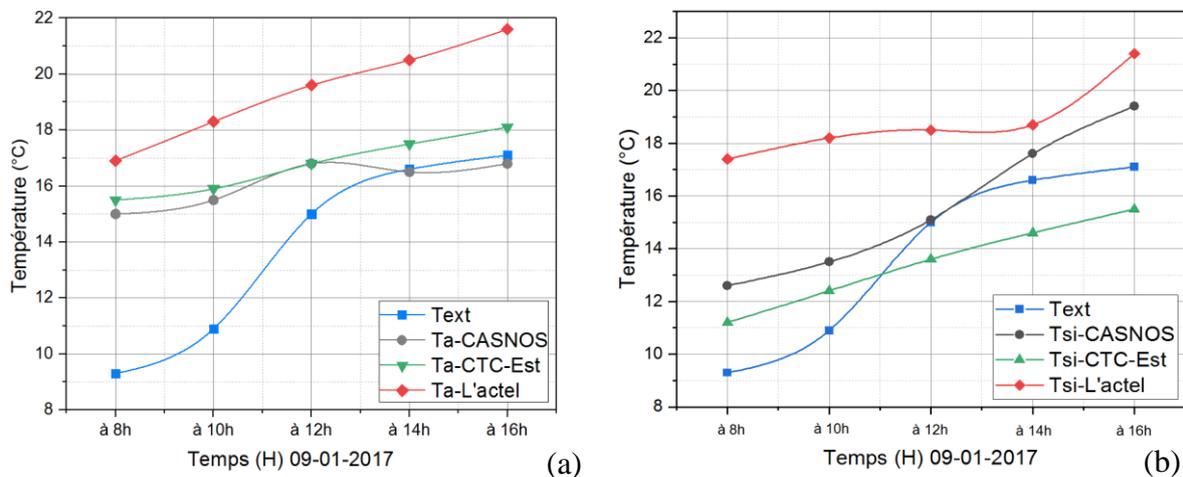


**Figure 5.6 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 08 Janvier 2017

(Source : Auteur, 2017)

Les valeurs de la température extérieure (Text) sont faibles et changent entre un minimum de 8,3 °C et un maximum de 16,3 °C. On remarque que les valeurs des températures ambiantes (Ta) dans le graphe (a) sont proches mais elles restent toujours des températures inconfortables (au-dessous de la plage de confort thermique). Concernant le graphe (b), les températures surfaciques (Tsi) représentent un comportement varie à cause de la différence de la composition des façades. D'une manière générale, le bâtiment "B8" (radio Ziban) représente le meilleur comportement thermique par rapport aux bâtiments (B3, B4 et B9).

Les températures mesurées le 09 Janvier 2017 dans les trois cas d'étude (le CTC "B5", CASNOS "B6" et l'actel "B2") sont représentées dans la figure 5.7 où le graphe (a) représente les températures ambiantes ( $T_a$ ) et le graphe (b) les températures surfaciques internes ( $T_{si}$ ).

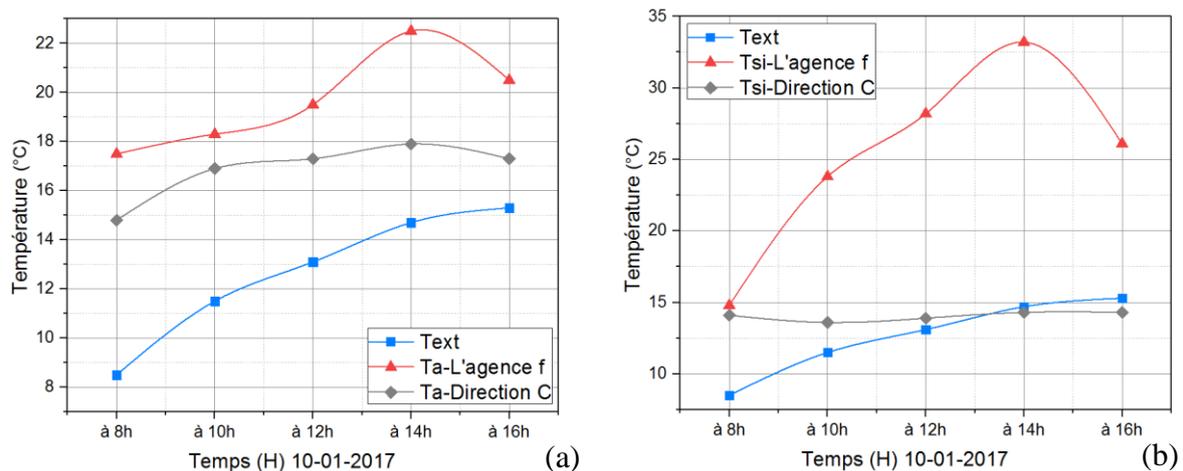


**Figure 5.7 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 09 Janvier 2017  
(Source : Auteur, 2017)

Les températures extérieures ( $T_{ext}$ ) varient entre un minimum de 9,3 °C et un maximum de 17,1 °C. Concernant les températures ambiantes ( $T_a$ ), on constate que les températures dans le bâtiment "B5" (CTC) et "B6" (CASNOS) sont proches mais par rapport au bâtiment "B2" (l'actel), les valeurs demeurent en augmentation continue particulièrement à partir de 10h sous l'influence des rayonnements solaires et le choix inapproprié de la double peau. Cette double peau en acier influence directement sur l'augmentation de la température surfacique interne ( $T_{si}$ ) qui dépasse les autres cas (B5 et B6) et aboutit à une valeur maximale de 21,4 °C à 16h ce qui engendre une hausse considérable de la température ambiante jusqu'à 21,6 °C ce qui influence sur la sensation thermique des utilisateurs et constitue une source de gêne même pendant l'hiver.

La figure 5.8 présente les températures mesurées le 10 Janvier 2017 dans les deux derniers cas d'étude (Direction de commerce "B1" et l'agence foncière "B7"). Le graphe (a) illustre les températures ambiantes ( $T_a$ ) et le graphe (b) les températures surfaciques internes ( $T_{si}$ ).

Les valeurs de la température extérieure sont entre 8,5 °C et 15,3 °C. On remarque que le comportement thermique du bâtiment "B1" (direction du commerce) est presque stable par rapport à la température surfacique ( $T_{si}$ ) avec des petits changements concernant la température ambiante ( $T_a$ ) qui varie entre un minimum de 14,8 °C et un maximum de 17,9 °C, ces valeurs sont considérées au-dessous de la température de confort thermique.



**Figure 5.8 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 10 Janvier 2017  
(Source : Auteur, 2017)

Par contre, les températures surfaciques (Tsi) du bâtiment "B7" (le cadre en aluminium du mur rideau de l'agence foncière) représente de grands changements caractérisés par de grandes variations avec une valeur minimale de 14,8 °C à 8h et une valeur maximale de 33,2 °C à 14h (un écart très important de 18,4 °C) sous l'influence du rayonnement solaire ce qui influe directement sur la température ambiante. On constate que les valeurs des températures ambiantes (Ta) du bâtiment "B7" sont très variées où la valeur minimale enregistrée est de 17,5°C à 8h et la valeur maximale est de 22,5 °C à 14h qui est considérée comme une température assez élevée pendant l'hiver et engendre une situation d'inconfort thermique (selon l'avis des utilisateurs du bureau). L'influence de la surface vitrée et le type de vitrage sera discutée dans la partie (V.4.1.3.).

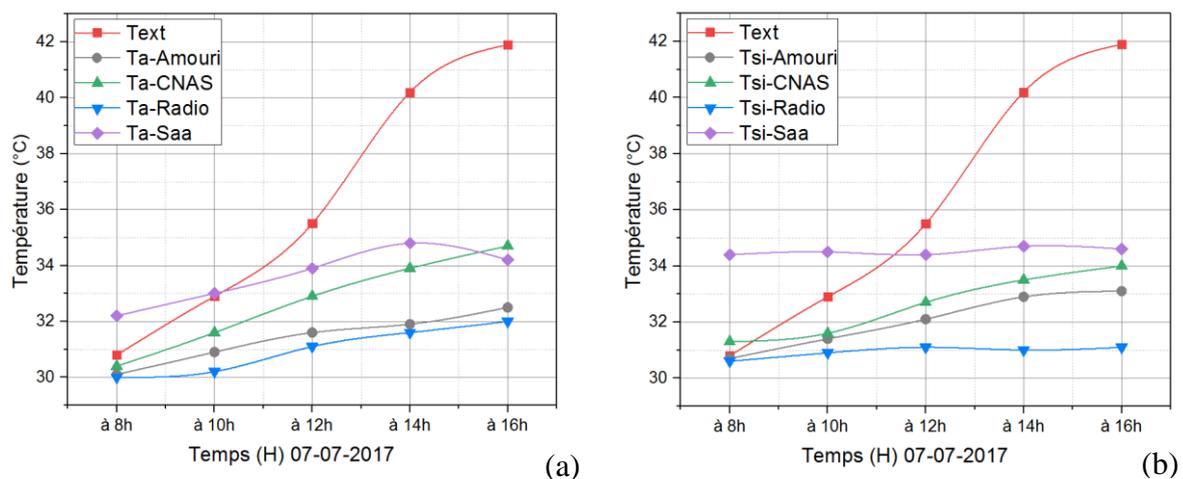
Globalement, le comportement thermique des immeubles de bureaux étudié pendant la période hivernale démontre le manque de confort thermique dans la quasi-totalité des bâtiments. Les valeurs des températures ambiantes (Ta) mesurées durant cette période sont au-dessous de la plage du confort thermique ce qui engendre des situations d'inconfort thermique dans les bureaux. Les températures ambiantes mesurées dans deux typologies de façades (double peau en acier et le mur rideau) sont acceptables jusqu'à 12h mais après 13h, les valeurs de la température ambiante augmentent d'une manière considérable sous l'influence des rayonnements solaires ce qui engendrent des situations insupportables.

La composition des façades du "B3" (Groupe Amouri avec une façade ventilée) et "B8" (radio Ziban avec un matériau lourd) s'oppose aux fluctuations des températures et assure des températures ambiantes assez stables (sous l'effet de l'inertie thermique).

#### V.4.1.2. Résultats de la saison chaude

Les résultats de la prise de mesures durant la période estivale sont représentés dans les figures (5.9 et 5.10).

La figure 5.9 présente les valeurs des températures mesurées durant la journée type de la période estivale (le 07 Juillet 2017) dans les quatre cas d'étude (Groupe Amouri "B3", la CNAS "B4", radio Ziban "B8" et l'assurance Saa "B9") où le graphe (a) représente les températures ambiantes ( $T_a$ ) et le graphe (b) les températures surfaciques internes ( $T_{si}$ ).



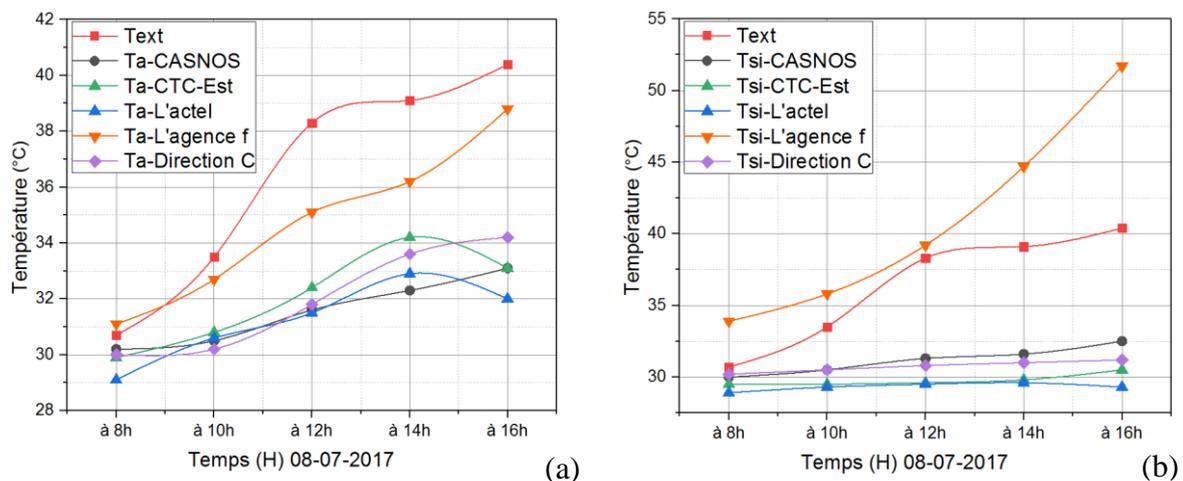
**Figure 5.9 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 07 Juillet 2017

(Source : Auteur, 2017)

Les valeurs des températures extérieures sont très élevées et varient entre un minimum de 30,8 °C à 8h et 41,9 °C à 16h. On remarque que les valeurs des températures surfaciques internes ( $T_{si}$ ) sont élevées dans tous les bâtiments, le meilleur fonctionnement enregistré est celui du bâtiment "B8" (radio Ziban avec un mur de grande inertie thermique) qui est caractérisé par des variations très faibles des températures surfaciques internes entre 30,6 °C à 8h et 31,1 °C à 16h vu la composition de sa façade.

Concernant la température ambiante ( $T_a$ ), on constate que toutes les valeurs sont au-dessous de la plage du confort thermique et dépassent les 30 °C même à 8h (jusqu'à 34,8 °C dans le bâtiment "B9"). Toujours les bâtiments qui ont une inertie thermique (Groupe Amouri "B3" avec une façade ventilée et radio Ziban "B8" avec une façade de 50 cm) s'oppose aux grandes fluctuations des températures où l'écart entre la température à 8h et à 16h est faible par rapport aux autres bâtiments.

Les valeurs des températures mesurées le 08 Juillet 2017 dans les autres cas d'étude (direction de commerce "B1", l'actel "B2", le CTC "B5", CASNOS "B6" et l'agence foncière "B7") sont représentées dans la figure 5.10 où le graphe (a) représente les températures ambiantes ( $T_a$ ) et le graphe (b) les températures surfaciques internes ( $T_{si}$ ).



**Figure 5.10 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 08 Juillet 2017

(Source : Auteur, 2017)

Les températures extérieures sont très élevées et changent entre un minimum de 30,7 °C à 8h et un maximum de 40,0 °C à 16h. On voit clairement que les valeurs des températures surfaciques ( $T_{si}$ ) sont proches entre tous les cas étudiés uniquement la température surfacique du bâtiment "B7" (l'agence foncière) qui est caractérisée par une augmentation considérable dépassant les valeurs de la température extérieure vu les caractéristiques thermiques du cadre de vitrage en aluminium avec une couleur foncée.

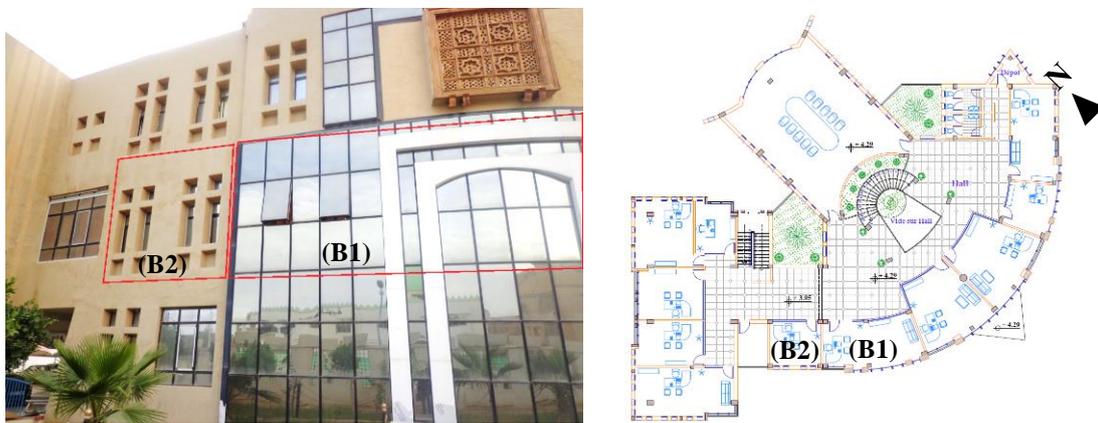
À propos de la température ambiante ( $T_a$ ), on remarque que les valeurs enregistrées dépassent de loin la plage du confort thermique. Le comportement thermique de tous les bâtiments est presque similaire à l'exception du bâtiment "B7" qui a connu une hausse colossale de la température ambiante jusqu'à 38,8 °C à 16h sous l'influence des caractéristiques thermiques des ouvertures (ratio d'ouverture et type de vitrage). L'étude détaillée relative à l'influence de la surface vitrée et le type de vitrage sera discutée dans la partie suivante (V.4.1.3.).

Globalement, le comportement thermique des bâtiments étudiés pendant la période estivale confirme l'absence totale du confort thermique dans les constructions étudiées. Toutes les valeurs des températures ambiantes enregistrées pendant cette période sont au-dessus de la plage du confort thermique ce qui engendre des situations d'inconfort thermique insupportables.

### V.4.1.3. Résultats de l'impact des ouvertures

Cette partie présente les résultats obtenus sur l'impact des ouvertures (ratio et type de vitrage) sur le fonctionnement thermique d'un bâtiment sis dans un climat chaud et aride.

Le cas d'étude est le siège de l'Agence Foncière de Biskra (le bâtiment "B7"). Il a été choisi parce qu'il représente la tendance de l'emploi des façades vitrées (un mur rideau avec un double vitrage simple sans gaz). C'est une bâtisse à trois niveaux (RDC+2), présentant un mur rideau et en même temps très exposée aux rayonnements solaires puisqu'elle ne bénéficie pas d'une protection solaire. Les murs extérieurs sont simples en briques creuses avec une composition de (15-5-10 cm). La figure 5.11 illustre la façade Sud-Ouest du bâtiment ainsi que le plan du premier étage où se situent les deux bureaux sujet de l'étude.



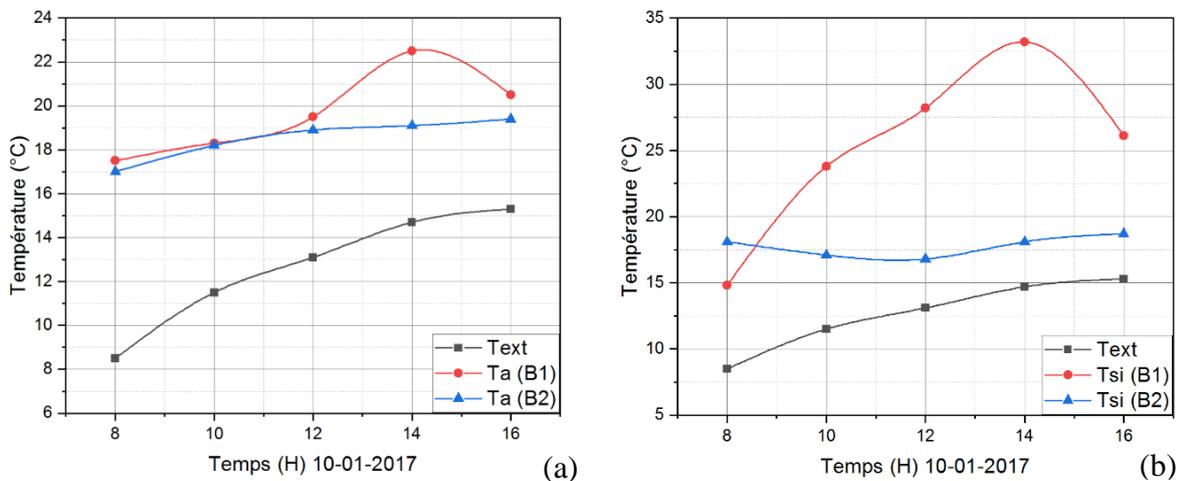
**Figure 5.11** : Façade et plan du siège de l'Agence Foncière de Biskra (Source : Auteur, 2017)

L'édifice est caractérisé par deux typologies d'ouvertures. La première (B1) est une grande surface vitrée (mur rideau en double vitrage simple sans gaz avec un cadre en aluminium) orientée vers le Sud et le Sud-Ouest sans protection solaire extérieure. La seconde (B2) présente des petites fenêtres (de 130x50 cm) avec un simple vitrage (Figure 5.11 et 5.12).



**Figure 5.12** : Les deux espaces de bureaux étudiés (Source : Auteur, 2017)

La figure 5.13 illustre les températures mesurées pendant la journée type de la période hivernale (le 10 Janvier 2017) dans les deux bureaux. Le graphe (a) représente la température ambiante ( $T_a$ ) et le graphe (b) la température surfacique interne ( $T_{si}$ ).



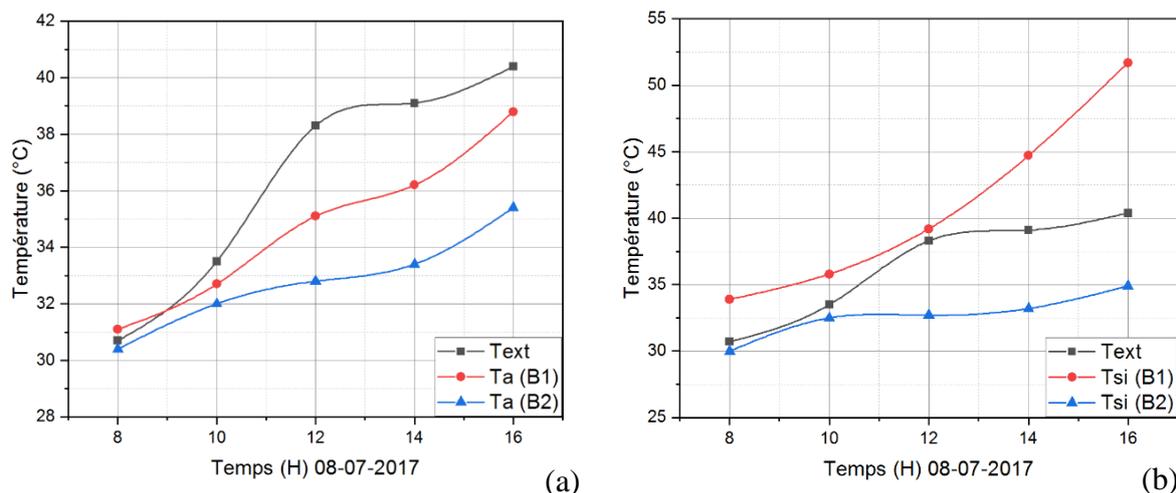
**Figure 5.13 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 10-01-2017 dans les deux bureaux (Source : Auteur, 2017)

On constate que la température extérieure (Text) change entre un minimum de  $8,5\text{ °C}$  et un maximum de  $15,3\text{ °C}$ . Dans le graphe de la température ambiante (a), de 8h à 12h, les températures ambiantes sont presque similaires dans les deux bureaux et varient entre  $17\text{ °C}$  à  $18,3\text{ °C}$ . La température ambiante dans le bureau B2 ( $T_{a\_B2}$ ) est assez stable vu la composition de la façade (matériaux et surface vitrée) qui s'oppose aux fluctuations des températures, mais dans (B1), on remarque une augmentation considérable de ( $T_{a\_B1}$ ) après 12h avec une valeur de  $22,5\text{ °C}$  à 14h. Cette hausse brusque est causée par la grande surface vitrée (double vitrage simple sans gaz) qui influe négativement sur la sensation thermique des usagers (d'après un constat personnel et l'avis des usagers).

Pour ce qui est de la température surfacique interne ( $T_{si}$ ), le graphe (b) montre clairement un comportement thermique stable du mur en brique dans ( $T_{si\_B2}$ ) avec des valeurs entre  $16,8\text{ °C}$  et  $18,7\text{ °C}$  (un écart faible de  $1,9\text{ °C}$ ). Des températures très élevées ont été enregistrées au niveau du cadre intérieur (en aluminium avec une couleur foncée) du mur rideau dans ( $T_{si\_B1}$ ) avec des valeurs qui varient entre  $14,8\text{ °C}$  et  $33,2\text{ °C}$  (un écart très important de  $18,4\text{ °C}$ ). Celle-ci à son tour influe directement sur la température opérative ressentie par les utilisateurs. Les caractéristiques thermiques (l'inertie thermique, l'effusivité et la diffusivité) des deux types de façade influent directement sur leurs fonctionnements thermiques où la

grande surface vitrée mal maîtrisée engendre des conditions inconfortables même dans une période froide.

Les mesures de la température pendant la journée type de la période estivale (le 08 Juillet 2017) sont présentées dans la figure 5.14. La température ambiante ( $T_a$ ) est illustrée dans le graphe (a) et la température surfacique interne ( $T_{si}$ ) dans le graphe (b).



**Figure 5.14 :** Graphes de températures ambiantes et surfaciques mesurées le 08-07-2017 dans les deux bureaux (Source : Auteur, 2017)

Le graphe de la température extérieure (Text) révèle clairement des valeurs élevées variant entre un minimum de 30,7 °C et un maximum de 40,4 °C. Des températures ambiantes ( $T_a$ ) ont été relevées de 8h à 10h avec de faibles différences entre les deux bureaux. Après 10h, on remarque l'augmentation de la ( $T_{a\_B2}$ ) d'une manière faible vue l'inertie thermique des matériaux (brique) avec une valeur maximale de 35,4 °C. Parallèlement, une hausse considérable de la ( $T_{a\_B1}$ ) est constatée sous l'influence des rayonnements solaires. Cette hausse s'effectue rapidement et atteint une valeur maximale de 38,8 °C à 16h et se rapproche de plus de la température extérieure. Ce comportement est dû à la grande effusivité et la grande diffusivité des matériaux de la façade vitrée de (B1).

Concernant la température surfacique interne ( $T_{si}$ ), les mesures dans (B2) montrent un comportement homogène avec des accroissements lents des températures vu la faible diffusivité et la faible l'effusivité de sa façade. Par contre, une augmentation considérable et rapide de ( $T_{si\_B1}$ ) est constatée. Ceci est le fait des caractéristiques thermiques du cadre foncé en aluminium de l'ouverture dont la température maximale atteint 51,7 °C à 16h et dépasse de loin la (Text) qui avoisine les 40,4 °C. Par conséquent, cet élément se transforme en source de

chaleur et d'inconfort par excellence, rendant la climatisation inefficace et la situation thermique insupportable.

Globalement, en hiver, le comportement thermique de (B2) est acceptable vu le faible taux d'ouverture de sa façade et le bon fonctionnement des matériaux utilisés (la brique creuse). Par contre, le comportement de (B1) est caractérisé par des fluctuations de ( $T_a$ ) en fonction de l'exposition de la grande surface vitrée aux rayonnements solaires. En été, le comportement thermique de (B2) est meilleur que celui de (B1). Ces résultats confirment l'importance du ratio, de l'effusivité et de la diffusivité thermique des matériaux de la façade et leurs impacts sur l'ambiance thermique.

De tels choix architecturaux (double vitrage sans gaz) se sont avérés inefficaces et défavorables relativement à un climat chaud et aride et ont engendré des situations inconfortables pendant toute l'année en particulier pendant l'été. Par ailleurs, le cadre du vitrage s'il est en aluminium avec une couleur foncée entraîne systématiquement une augmentation de la température ambiante et une sensation thermique inconfortable chez les usagers. Donc, le choix du taux et du type de vitrage doivent être bien réfléchis conformément au climat considéré. De même, les caractéristiques thermiques des matériaux essentiellement l'effusivité et la diffusivité thermique doivent être prises en considération.

Pour conclure, l'étude quantitative qui a été effectuée sur un corpus de neuf bâtiments administratifs à Biskra, a apporté des éclaircissements sur les conséquences de l'utilisation de différents éléments de la façade sur le fonctionnement thermique des constructions particulièrement le vitrage et la surface vitrée. D'après les mesures prises in situ, nous avons constaté le manque du confort thermique intérieur dans tous les bâtiments étudiés particulièrement pendant la période estivale. Les constructions réalisées à travers l'utilisation des matériaux lourds avec une inertie thermique (la brique de terre de grande épaisseur, la façade ventilée) ont un comportement thermique assez stable et des températures ambiantes plus proches à la plage du confort thermique. Par contre, les constructions qui ont des façades légères (des grandes surfaces vitrées, des murs rideaux) sont caractérisées par de grands changements brutaux des valeurs des températures ambiantes avec de grandes fluctuations où la situation thermique est insupportable en particulier pendant l'été.

La façade simple en brique creuse avec un ratio d'ouverture faible présente un comportement thermique assez stable par rapport à d'autres bâtiments mais reste en dehors de

la plage du confort thermique particulièrement pendant l'été qui nécessite de l'exploitation des dispositifs afin d'améliorer les conditions thermiques.

La façade double peau en métal, d'une part, assure une bonne protection solaire et protège le mur contre les rayonnements solaires, par contre, elle augmente considérablement la température surfacique et ambiante (par convection et par rayonnement) à travers la grande quantité de chaleur absorbée par la double peau en acier. À ce propos, l'utilisation du métal au niveau des façades dans les zones chaudes et arides est inapproprié vu ses inconvénients sur le plan thermique.

La façade ventilée en terre cuite, démontre les bienfaits du dispositif de la façade ventilée (sans isolation thermique) dans les zones désertiques vu l'impact positif de la convection naturelle dans la cavité d'air. Pendant l'hiver, il protège le mur et augmente l'inertie thermique ; pendant l'été il reflète le rayonnement solaire chaud et diminue le transfert de la chaleur par conduction qui influe sur la diminution du flux de la chaleur venant de l'extérieur vers l'intérieur.

La façade avec des protections solaires présente un bon impact pendant l'été sur la réduction de la température surfacique et la protection des murs contre les rayonnements solaires. Sa contribution sur la réduction des températures ambiantes reste insuffisante.

La façade avec des matériaux lourds qui ont une grande inertie thermique ont des impacts thermiques positifs. Ce paramètre est très important dans les zones chaudes et arides.

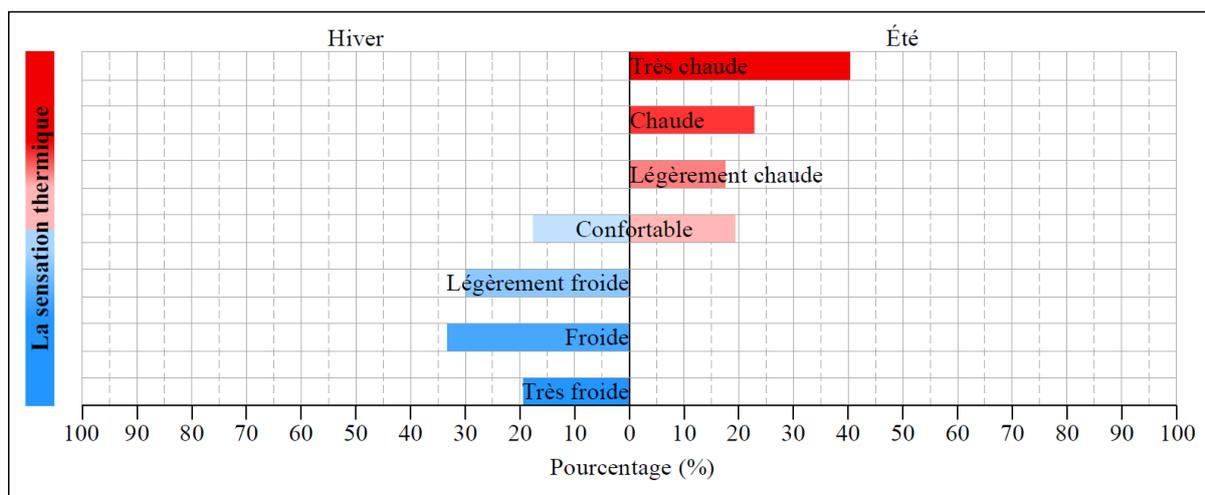
La façade avec des grandes surfaces vitrées a des impacts catastrophiques sur le côté thermique et engendre des ambiances insupportables notamment en été. L'utilisation d'un mur rideau est un choix inapproprié en zone chaude même s'il est réalisé en double vitrage. Les prises de mesures démontrent que le double vitrage est inefficace dans le contexte climatique chaud et aride en particulier pendant la période estivale qui engendre des augmentations colossales des températures ambiantes et des conditions thermiques insupportables.

#### **V.4.2. Résultats de l'étude qualitative**

Soixante questionnaires ont été distribués dans le corpus d'étude. Le nombre final exploité pour le traitement des résultats est de 57 questionnaires avec un pourcentage de 95 % (trois questionnaires ont été annulés à cause des réponses incomplètes et illogiques). Dans ces 57 questionnaires, le pourcentage des hommes est de 52,63 % et 47,37 % des femmes. Concernant les tranches d'âges, 75,44 % des personnes questionnées sont âgées entre 25 et 45

ans et 24,56 % dépassent les 45 ans. Les bureaux de l'ensemble des personnes interrogées sont situés dans un étage intermédiaire (1<sup>er</sup> ou 2<sup>ème</sup> étage) dans les bureaux où les prises de mesures ont été effectuées.

Les résultats obtenus par l'étude qualitative effectuée sur les cas d'étude pendant les journées de la prise de mesures sont représentés dans les figures ci-dessous. La figure 5.15 présente les résultats obtenus relatifs à la sensation thermique des usagers dans des conditions naturelles (sans chauffage ou climatisation) pendant l'hiver et l'été.



**Figure 5.15 :** La sensation thermique des usagers dans des conditions naturelles  
(Source : Auteur, 2017)

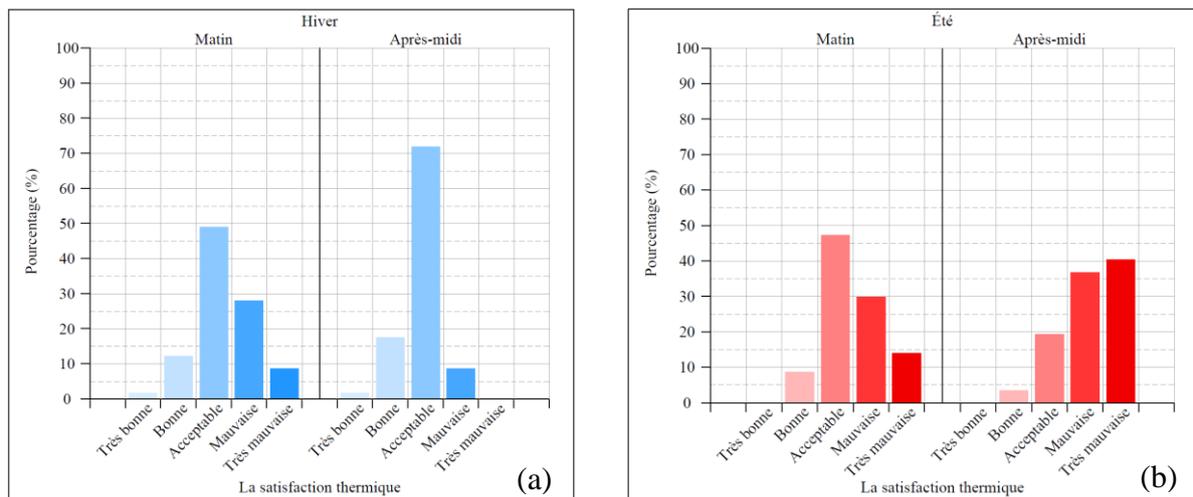
Pendant la période hivernale, la sensation thermique du tiers des usagers est "froide" avec un pourcentage de 33,33 %, puis "légèrement froide" avec un pourcentage de 29,82 %. Environ 20 % des usagers ont une sensation thermique "très froide" (dans les bâtiments avec des façades légères) et uniquement 17,55 % qui ont une sensation thermique confortable (dans les bâtiments avec des matériaux lourds).

Durant la période estivale, la quasi-totalité des usagers ont une sensation thermique "très chaude" avec un pourcentage de 40,35 %. Par la suite, 22,80 % des usagers ont une sensation thermique "chaude" et un pourcentage de 17,55 % des usagers ont une sensation thermique "légèrement chaude". Seulement 19,3 % qui ont une sensation thermique confortable.

Globalement, la sensation thermique des usagers des immeubles de bureaux étudiés est répartie entre "froide" pendant la période hivernale (un pourcentage de 33,33 %) et "très chaude" pendant la période estivale (un pourcentage de 40,35 %). Ces pourcentages affirment que les températures ambiantes sont en dehors de la plage du confort thermique et expliquent

que le grand problème par rapport à ce type de climat (chaud et aride) est un problème de températures très élevées pendant l'été, ce qui n'est pas le cas en hiver.

Les résultats obtenus concernant la satisfaction thermique des usagers dans des conditions naturelle (sans chauffage ou climatisation) sont représentés dans la figure 5.16. Le graphe (a) illustre les résultats de la période hivernale et le graphe (b) les résultats de la période estivale.



**Figure 5.16 :** La satisfaction thermique des usagers dans des conditions naturelles

(Source : Auteur, 2017)

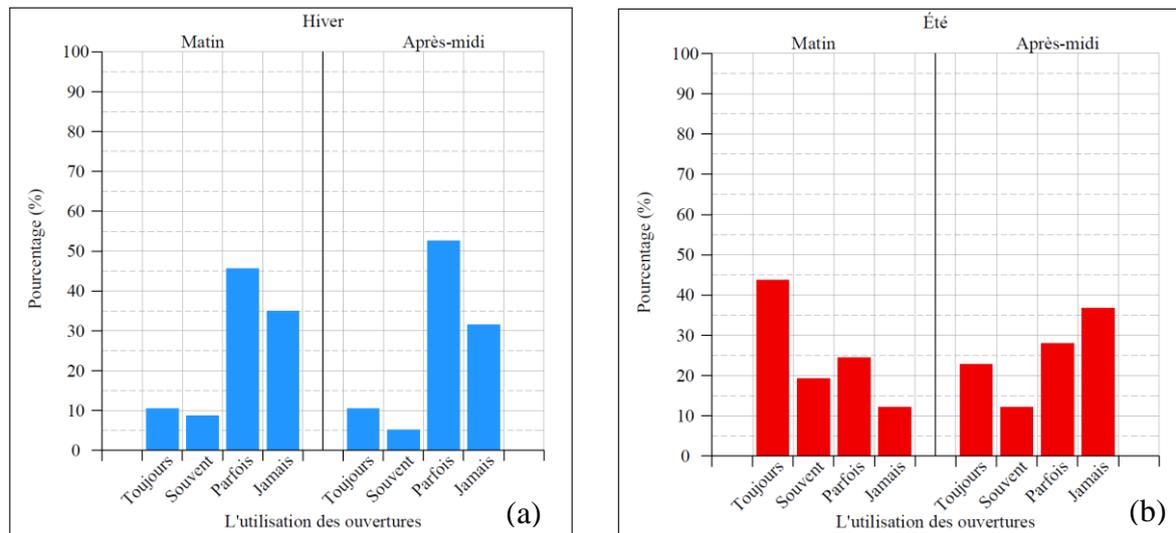
Pendant l'hiver (le graphe a), la satisfaction thermique de la plus part des usagers est "acceptable" particulièrement durant l'après-midi (avec un pourcentage de 49,12 % le matin et 71,93 % l'après-midi) sous l'influence de la pénétration des rayonnements solaires à l'intérieur des bureaux.

Durant l'été (le graphe b), la quasi-totalité des personnes ont une sensation thermique "acceptable" durant la matinée avec un pourcentage de 47,37 % et 29,82 % ont une sensation "mauvaise" et 14,04 % ont une sensation thermique "très mauvaise". Concernant la sensation thermique pendant l'après-midi, elle est divisée essentiellement en deux catégories où 40,35 % des personnes ont une sensation "très mauvaise" et 36,85 % une sensation "mauvaise" vue les températures ambiantes très élevées.

D'une manière générale et dans des conditions naturelles, la quasi-totalité des personnes interrogées ont une certaine satisfaction vis-à-vis des conditions thermiques hivernales qui sont plus proches à la plage du confort thermique en particulier durant l'après-midi. Par contre, la plus part des usagers sont insatisfaits par rapport aux ambiances thermiques pendant la période

estivale, notamment durant l'après-midi où les températures aboutissent à des valeurs très élevées (insupportables) très loin par rapport à la plage du confort thermique.

La figure 5.17 illustre les résultats obtenus à propos de l'ouverture des fenêtres afin de régler la température de l'espace. Le graphe (a) présente les résultats de l'hiver et le graphe (b) les résultats de l'été.



**Figure 5.17** : L'ouverture des fenêtres afin de régler la température du bureau  
(Source : Auteur, 2017)

En l'hiver, pendant toute la journée, le pourcentage des personnes qui ouvrent les fenêtres afin de régler la température du bureau est principalement divisé en deux catégories (parfois et jamais). Un pourcentage de 45,61 % pour l'ouverture des fenêtres "parfois" et 35,09 % des usagers n'utilisent pas les fenêtres "jamais" afin de régler la température de l'espace. Pendant l'après-midi, la quasi-totalité des personnes ouvrent les fenêtres "parfois" avec un pourcentage de 52,63 % puis un pourcentage de 31,58 % pour "jamais".

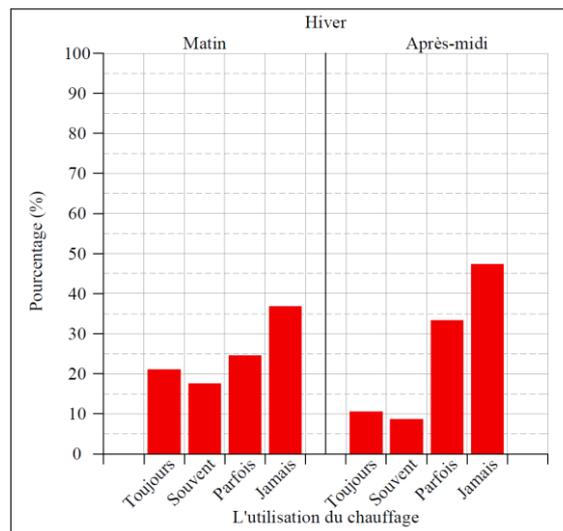
En été, durant la matinée, un pourcentage de 43,86 % des usagers ouvrent les fenêtres "toujours" afin d'améliorer la température de l'espace, puis un pourcentage de 24,56 % "parfois". Pendant l'après-midi, 36,85 % des utilisateurs ne les ouvrent "jamais" puis "parfois" avec un pourcentage de 28,07 %.

Globalement, on remarque que l'ouverture des fenêtres par les usagers afin d'améliorer leur situation thermique varie en fonction des conditions climatiques. Pendant l'hiver, la plus part des usagers ouvrent les fenêtres particulièrement pendant l'après-midi vu que les températures extérieures sont moyennes ainsi que la pénétration des rayonnements solaires à

l'intérieur de l'espace augmente la température ambiante. Pendant l'été, on voit clairement que l'avis des usagers est très varié (selon le type de la façade) où l'ouverture des fenêtres est effectuée pendant la matinée pour dissiper l'excès de chaleur au début de la journée (à 8h).

Par contre, durant l'après-midi, la plus part des usagers n'ouvrent pas les fenêtres de toute manière à cause de la grande augmentation des températures extérieures.

La figure 5.18 présente les résultats obtenus relatifs à la fréquence de l'utilisation du chauffage.



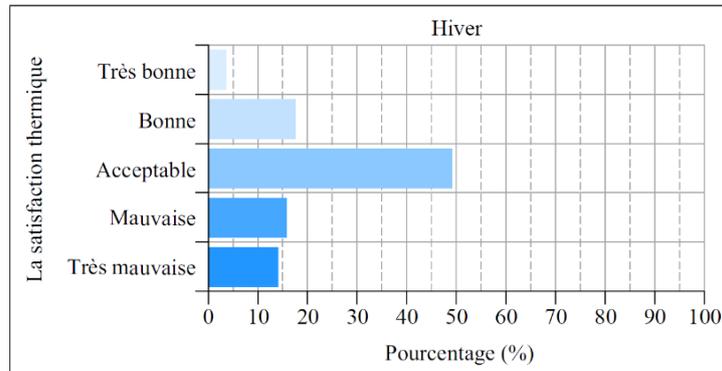
**Figure 5.18 :** La fréquence de l'utilisation du chauffage dans les bureaux  
(Source : Auteur, 2017)

On remarque qu'un grand pourcentage de personnes n'utilisent pas le chauffage ce qui représente un pourcentage de 36,85 % "jamais" pendant le matin et 47,37 % pendant l'après-midi. Ces pourcentages expliquent que les usagers désapprouvent l'utilisation du chauffage. Pour le pourcentage restant des usagers, 63,15 % l'utilisent durant la matinée et 52,63 % pendant l'après-midi. Ces préférences signifient que les ambiances thermiques intérieures (les températures ambiantes) pendant l'hiver sont en dehors de la plage du confort thermique qui crée des situations d'inconfort thermique poussant les usagers à exploiter le chauffage.

Les résultats obtenus à propos de la satisfaction thermique des usagers avec l'utilisation du chauffage sont représentés dans la figure 5.19.

On remarque qu'environ 21,04 % des usagers sont satisfaits vis-à-vis des conditions thermiques après l'utilisation du chauffage dont 17,54 % ont une "bonne" satisfaction thermique. La plus part des usagers (un pourcentage de 49,12 %) ont une satisfaction thermique "acceptable" après

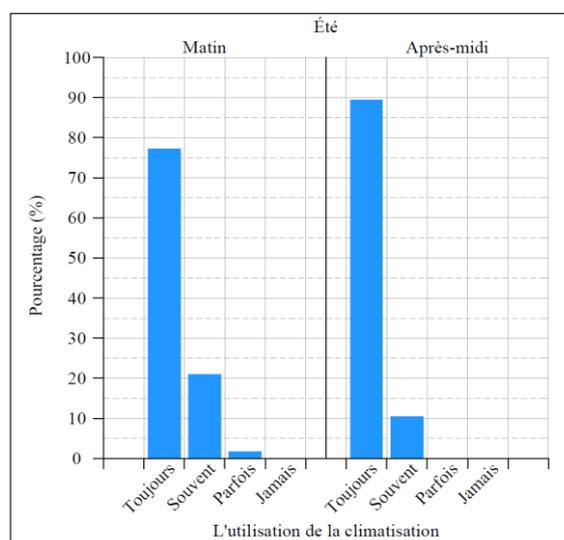
l'utilisation du chauffage. Le reste des usagers (un pourcentage de 28,84 %) sont insatisfaits après l'utilisation du chauffage où 15,8 % ont une "mauvaise" satisfaction thermique et 14,04 % ont une "très mauvaise" satisfaction thermique après l'exploitation du chauffage.



**Figure 5.19 :** La satisfaction thermique des usagers avec l'utilisation du chauffage  
(Source : Auteur, 2017)

Généralement, les usagers ne préfèrent pas l'utilisation du chauffage sauf dans des conditions climatiques où la température est assez basse. Selon l'avis des usagers dans le champ facultatif du questionnaire, « *le chauffage est mauvais pour la santé* » et engendre beaucoup de maladies à cause de la grande différence entre la température du bureau, du bâtiment et de l'extérieur. En plus de ces problèmes et malgré que le chauffage améliore la température, il est considéré comme une source de gêne pour plusieurs usagers.

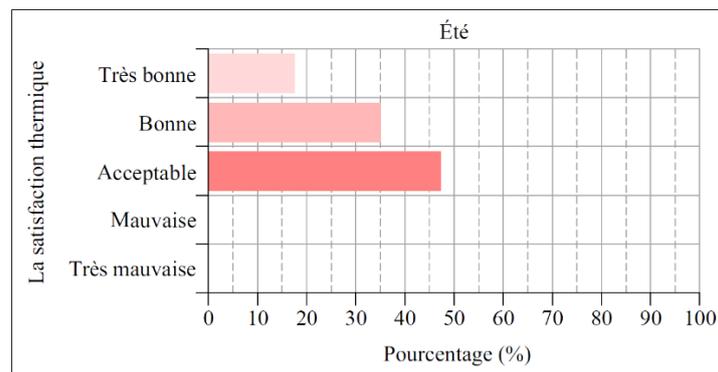
Les résultats obtenus relatifs à la fréquence de l'utilisation de la climatisation sont représentés dans la figure 5.20.



**Figure 5.20 :** La fréquence de l'utilisation de la climatisation dans les bureaux  
(Source : Auteur, 2017)

On constate que la quasi-totalité des usagers exploitent les climatiseurs pendant toute la journée et en particulier pendant l'après-midi. Un pourcentage de 72,2 % des usagers utilisent le climatiseur "toujours" pendant la matinée et 89,47 pendant l'après-midi. Ces pourcentages expliquent que les utilisateurs de l'espace sont totalement insatisfaits vis-à-vis des conditions thermiques intérieures à cause des valeurs très élevées des températures ambiantes durant toute la journée de la période estivale.

La figure 5.21 présente les résultats obtenus relatif à la satisfaction thermique des usagers avec l'utilisation de la climatisation.



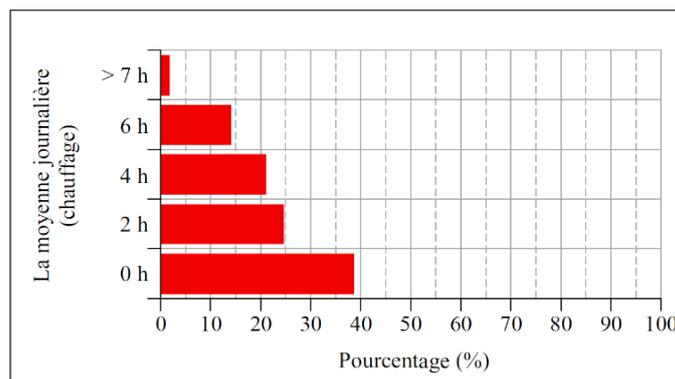
**Figure 5.21** : La satisfaction thermique des usagers avec l'utilisation de la climatisation  
(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que la quasi-totalité des usagers sont satisfaits par rapport aux conditions thermiques avec l'utilisation de la climatisation. Un pourcentage de 17,57 % des usagers ont une "très bonne" satisfaction thermique, un pourcentage de 30,09 % ont une "bonne" satisfaction thermique et 47,37 % ont une satisfaction thermique "acceptable".

D'après l'avis des utilisateurs dans le champ facultatif du questionnaire, l'utilisation de la climatisation est obligatoire mais elle ne constitue pas une bonne solution afin de régler la sensation thermique car elle engendre des fatigues et des maladies respiratoires.

La figure 5.22 illustre les résultats obtenus relatif à la moyenne journalière de l'utilisation du chauffage dans les bureaux.

On voit que 38,6 % des usagers n'utilisent pas le chauffage et le reste (61,4 %) l'utilisent selon des moyennes journalières différentes. Un pourcentage de 24,56 % des usagers utilisent le chauffage avec une moyenne journalière de 2h, un pourcentage de 21,05 % l'utilisent avec une moyenne journalière de 4h, 14,04 % avec une moyenne journalière de 6h et 1,75 avec une moyenne journalière dépassant les 7h.

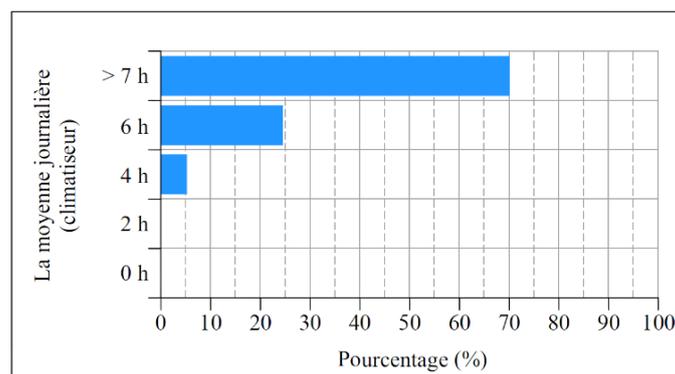


**Figure 5.22 :** La moyenne journalière de l'utilisation du chauffage

(Source : Auteur, 2017)

On remarque que la grande partie des usagers exploitent le chauffage avec une moyenne journalière entre 2 h à 4h.

Les résultats obtenus concernant la moyenne journalière de l'utilisation de la climatisation dans les bureaux sont représentés dans la figure 5.23.



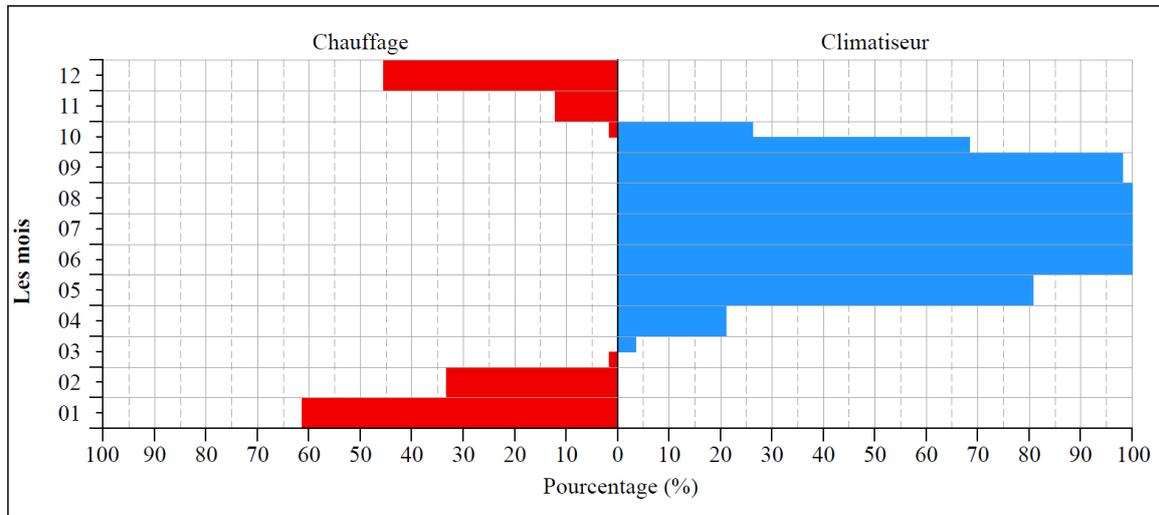
**Figure 5.23 :** La moyenne journalière de l'utilisation de la climatisation

(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que la plus part des usagers utilisent les climatiseurs avec une moyenne journalière qui dépasse les 7h avec un pourcentage de 70,17 %. Par la suite, un pourcentage de 24,56 % des personnes exploitent les climatiseurs d'une moyenne journalière de 6h et uniquement 5,26 % des usagers l'utilisent avec une moyenne journalière de 4h.

Cette grande utilisation de la climatisation augmente la consommation énergétique du bâtiment d'une manière considérable et influe directement sur la performance énergétique de la construction.

La figure 5.24 présente les résultats obtenus relatifs aux mois de l'utilisation des équipements (chauffage et climatisation).



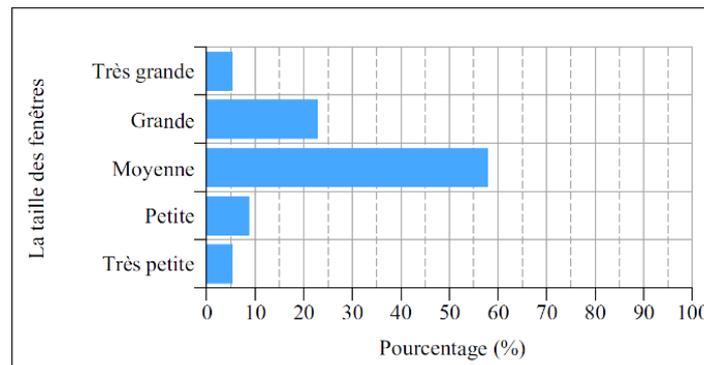
**Figure 5.24 :** Les mois de l'utilisation des équipements de chauffage et de la climatisation  
(Source : Auteur, 2017)

Pendant la période hivernale, fréquemment, l'utilisation du chauffage est uniquement pendant les mois les plus froids (le mois de Janvier et le mois de Décembre). Cette utilisation constitue un pourcentage de 61,4 % pendant le mois du Janvier et de 45,61 % pendant le mois de Décembre. Durant les autres mois (Février, début Mars, fin d'Octobre et Novembre), l'utilisation du chauffage reste assez faible par rapport au mois de Janvier et de Décembre.

Pendant la période estivale, on voit clairement que l'utilisation de la climatisation s'étale principalement sur sept mois de l'année. L'exploitation des climatiseurs commence à partir de la fin de Mars avec un pourcentage de 3,5 % et pendant le mois d'Avril avec un pourcentage de 21,05 %. La grande utilisation de la climatisation commence à partir du mois de Mai avec un pourcentage de 80,7 %. Durant trois mois de l'année (Juin, Juillet et Août) le pourcentage de l'exploitation de la climatisation est de 100 %. Durant le mois de Septembre elle est de 98,24 %, en début d'Octobre elle est de 68,42 % et pour en arriver à la fin du même mois à un pourcentage de 26,31 %.

L'utilisation démesurée de la climatisation particulièrement pendant une longue période de l'année constitue un grand problème pour ce genre de bâtiment qui se situe dans un contexte climatique chaud et aride.

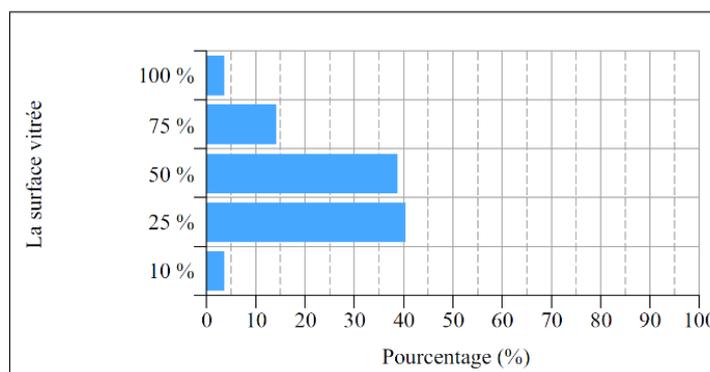
Les résultats relatifs à la taille des fenêtres des bureaux étudiés selon l'avis des usagers sont illustrés dans la figure 5.25.



**Figure 5.25 :** La taille des fenêtres des bureaux étudiés selon l'avis des usagers  
(Source : Auteur, 2017)

La plus part des usagers (un pourcentage de 57,89 %) considèrent la taille des fenêtres de leurs bureaux comme moyenne. Un pourcentage de 22,8 % des usagers voient que la taille des fenêtres de leurs bureaux est grande.

La figure 5.26 présente les pourcentages de la surface vitrée préférée par les usagers des bureaux étudiés.



**Figure 5.26 :** Les ratios de la surface vitrée préférée par les usagers  
(Source : Auteur, 2017)

La quasi-totalité des personnes préfèrent un pourcentage de la surface vitrée entre 25 et 50 % pour plusieurs raisons particulièrement la lumière naturelle, la chaleur des rayonnements solaires pendant la période hivernale ainsi que le renouvellement de l'air et la vue vers l'extérieur.

## **Conclusion**

La compréhension et la maîtrise des phénomènes thermiques des éléments de la façade nécessitent des études réelles sur des bâtiments existants en incluant tous les composants du bâtiment et en prenant en compte la spécificité climatique de la région. L'objectif est de mieux comprendre les phénomènes physiques intervenant dans la réponse du bâtiment, déterminer les problèmes et de les résoudre. Les résultats obtenus par l'étude sur des cas existants donnent une très bonne idée sur les impacts réels de différents éléments de la façade sur le comportement thermique des bâtiments (pendant la période chaude et froide) ainsi que la sensation et la satisfaction des usagers vis-à-vis des conditions thermiques.

L'étude empirique qui a été effectuée a démontré le manque de confort thermique intérieur dans les immeubles de bureaux étudiés particulièrement pendant la période estivale. Les façades réalisées avec des matériaux lourds ont un comportement thermique assez stable et assurent un certain confort plus proche de la plage du confort thermique par rapport aux façades réalisées avec des matériaux légers et sans protection. L'utilisation de grandes surfaces vitrées sans protections solaires (même en double vitrage) engendre des situations thermiques insupportables. Les situations d'inconfort thermique obligent les utilisateurs à l'exploitation excessive des équipements de chauffage et de la climatisation d'une manière incontrôlable ce qui influe sur l'efficacité énergétique de la construction.

## **CHAPITRE VI :**

# **Étude expérimentale des éléments de la façade par des cellules tests**

Ce chapitre présente dans la première partie un aperçu sur l'utilisation de cellules tests dans le domaine du bâtiment. Dans la seconde, l'étude expérimentale effectuée à travers la réalisation de quatre cellules tests à une échelle réduite avec différentes typologies et éléments de la façade. Par la suite, il décrit le protocole expérimental exploité pour les prises de mesures et les instruments utilisés. À la fin, il interprète et compare les résultats obtenus entre ces cellules afin de déterminer l'influence de chaque élément étudié sur le comportement thermique de la façade.

*« N'admettez rien a priori si vous pouvez le vérifier »*

*Rudyard Kipling*

## **CHAPITRE VI : Étude expérimentale des éléments de la façade par des cellules tests**

### **Introduction**

Les éléments de la façade d'un bâtiment représentent des paramètres déterminants relativement à son comportement thermique. Précisément, les dispositifs divers et les propriétés des matériaux ont un rôle prépondérant sur la performance thermique et énergétique du bâtiment. Dans la littérature scientifique, les études relatives à la façade et ses éléments ont été effectuées à travers l'exploitation de différentes méthodes de recherche, notamment, la méthode expérimentale. L'exploitation de l'expérimentation pour l'étude des façades a pu se faire à travers l'utilisation des cellules tests, soit à échelle réelle ou réduite. Dans les deux cas la fiabilité des résultats obtenus par l'expérimentation, ont fait que cette approche est la plus prisée dans les études d'évaluation et d'optimisation thermique et énergétique des éléments de la façade. Le présent chapitre décrit le travail expérimental réalisé pour évaluer l'impact de certains paramètres relatifs aux façades (propriétés surfaciques, façade ventilée et façade double peau) relativement à leurs comportements thermiques dans un climat chaud et aride.

### **VI.1. L'exploitation de cellules tests dans le domaine du bâtiment**

La conception architecturale nécessite l'évaluation des alternatives afin de répondre à plusieurs questions et des exigences différentes (Hall, 2010). Cette évaluation porte sur tous les composants du bâtiment entre autres la façade qui est considérée comme un élément crucial afin d'aboutir à une conception efficace (Kontoleon et al., 2007). Le choix adéquat des caractéristiques de cet élément permet de maîtriser les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur et améliorer l'efficacité du bâtiment (Sozer, 2010).

Plusieurs recherches se sont inscrites dans une démarche visant à optimiser le fonctionnement thermique de la façade et ses éléments vu son rôle. Cette amélioration peut être effectuée à plusieurs niveaux à travers des techniques différentes (Rosso et al., 2017c) telle que la méthode expérimentale. Plusieurs stratégies passives sont considérées comme de bonnes

solutions afin d'optimiser la performance des bâtiments tout en améliorant l'ambiance thermique interne notamment à travers l'enveloppe (Pisello et al., 2014 ; Pisello et al., 2016 ; Rosso et al., 2017a).

Les études sur le bâtiment et ses composants prennent de l'ampleur d'une manière croissante vue l'importance de ce secteur qui connaît des défis et des problèmes multiples entre autres de natures thermiques et énergétiques. Dans cette perspective, les chercheurs ont réalisé des études à travers l'utilisation de différentes méthodes. Parmi ces méthodes, les études expérimentales par l'exploitation des cellules tests à une échelle réelle « experimental modules or test cells » ou réduite « scale models or reduced cells » (les différentes techniques de la méthode expérimentale ont été traitées dans le chapitre IV dans la partie IV.2.3. La méthode expérimentale).

Dans le domaine du bâtiment, les études expérimentales ont été basées sur la réalisation des modèles similaires aux bâtiments du point de vue conceptuelle, physique et technique afin d'étudier l'impact de différents paramètres. À ce propos, Lirola et al. (2017), voient que pour l'architecture et les bâtiments, les « modèles » expérimentaux représentent des « maquettes » relatives à des constructions ou d'une partie d'un bâtiment et les prototypes réalisés représentant les bâtiments à une grande échelle. De leur côté, la ressemblance du modèle expérimental avec le bâtiment réel sur le plan physique est très importante mais aussi elle est vitale pour l'apparence qui donne la possibilité aux architectes (concepteur) pour intervenir dans le processus de la conception.

En effet, les recherches expérimentales exploitent :

- Des modèles réels « full-scale models » comme un bâtiment prototype ;
- Des modules expérimentaux ou cellules tests « experimental modules or test cells » (Voir tableau E.1, E.2, E.3 et E.4 - Annexe E) ;
- Des modèles réduits ou cellules réduites « scale models or reduced cells » (Voir tableau E.5, E.6 et E.7 - Annexe E).

La figure 6.1 illustre des exemples des études expérimentales à différentes échelles.



**Figure 6.1** : Exemples des études expérimentales à différentes échelles

(Source : (a) Chesné et al., 2012 ; (b) Kedowide, 2015 ; (c) Florentin et al., 2017 )

La figure (a) présente un modèle réel relatif à une maison, la figure (b) illustre une cellule expérimentale à une échelle réelle (la cellule PASSYS) et la figure (c) révèle des cellules tests à une échelle réduite.

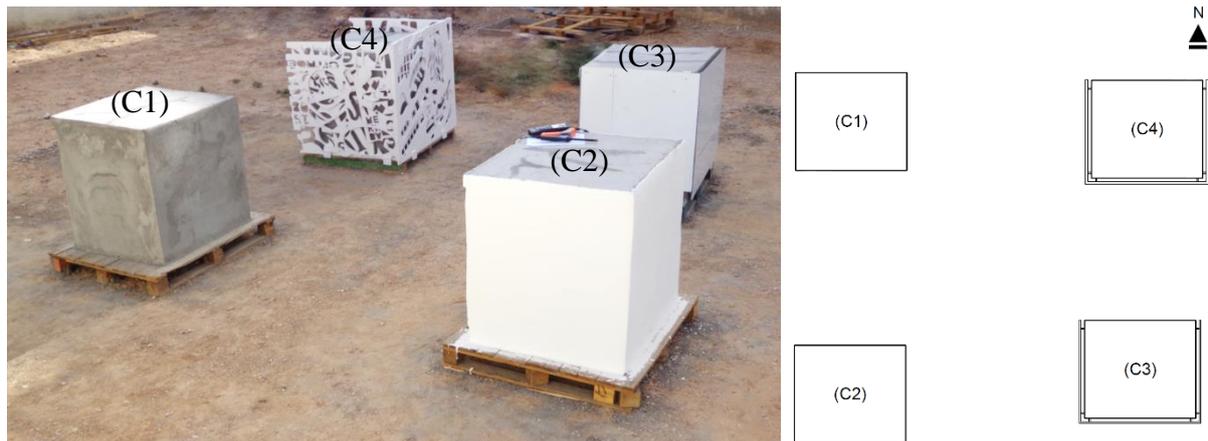
À ce propos, Lirola et al. (2017) ont réalisé un article intitulé « A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies » où ils ont trouvé que les échelles des cellules tests peuvent atteindre jusqu'à une échelle de (1/12). De leur côté et sur la base d'une étude approfondie sur l'utilisation des cellules tests dans le domaine des bâtiments, ils ont remarqué que les échelles des cellules tests les plus utilisées par les chercheurs sont (1/20) et (1/50).

## VI.2. Présentation de cellules tests réalisées

Dans la présente recherche, quatre cellules tests ont été réalisées afin d'étudier l'impact de trois paramètres de la façade (les caractéristiques surfaciques, la ventilation naturelle de la cavité d'air d'une façade ventilée "FV" et le dispositif de la façade double peau "FDP") sur les

températures surfaciques externes, les températures surfaciques internes ainsi que la température ambiante (voir Annexe E).

La figure 6.2 présente les quatre cellules tests réalisées à une échelle réduite de (1/50) avec une forme rectangulaire de (80 x 90 cm) et une hauteur de (90 cm). Les murs des cellules sont en briques creuses de (10 cm) avec un revêtement de ciment de (1 cm), une chape de (2 cm) et une dalle pleine en béton armé de (7 cm).



**Figure 6.2 :** Les quatre cellules tests réalisées à l'échelle de "1/50" (Source : Auteur, 2017)

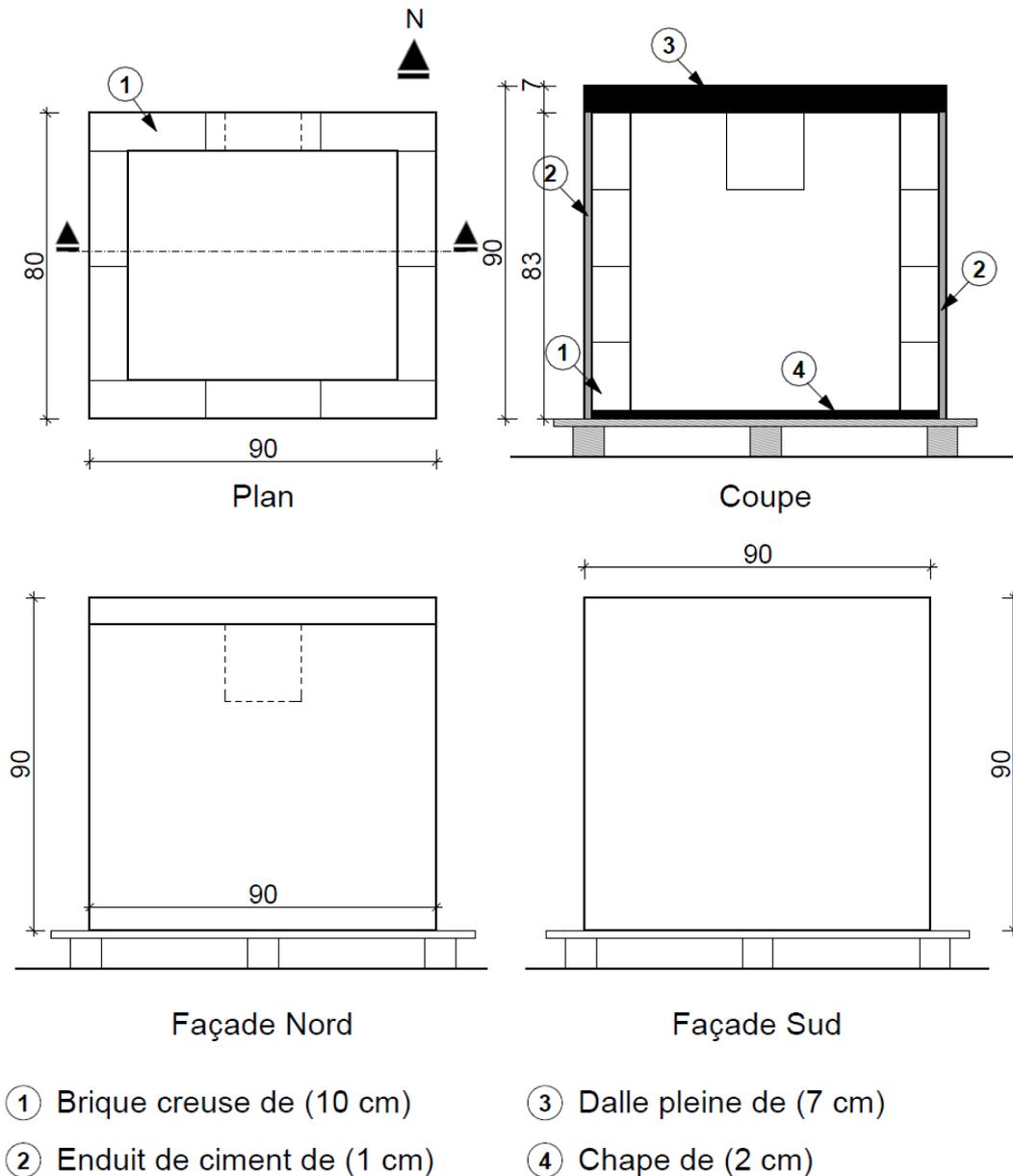
Les cellules tests sont situées dans un contexte urbain dans la ville de Biskra. L'ensemble de ces cellules sont soumises aux mêmes conditions climatiques avec une orientation Sud (l'orientation étudiée). Des distances entre les cellules ont été préservées afin d'éviter l'impact des ombres portées par les cellules sur son comportement thermique (en particulier la température surfacique externe "Tse"). Les façades des cellules sont fermées uniquement au niveau de la façade Nord où une petite ouverture a été gardée afin d'introduire les instruments de la prise de mesures (Figure 6.3).



**Figure 6.3 :** Les ouvertures de la façade Nord des cellules tests (Source : Auteur, 2017)

Ces ouvertures ont été fermées par un élément en bois avec un joint dont l'objectif est d'éviter l'infiltration de l'air (Voir figure E.8 - Annexe E).

La figure 6.4 illustre le plan, la coupe et les façades des cellules tests réalisées.



**Figure 6.4** : Plan, coupe et façades des cellules tests réalisées

(Source : Auteur, 2017)

L'ensemble des cellules sont élevées par rapport au niveau du sol afin d'éviter son impact sur les températures des cellules (transfert de la chaleur par conduction entre le sol et la cellule).

### VI.2.1. Présentation de la cellule de référence

La cellule (C1) a été exploitée comme une cellule de référence (Figure 6.5).



**Figure 6.5** : La cellule de référence "C1" (Source : Auteur, 2017)

L'utilisation de cette cellule comme un modèle témoin a permis de comparer ses résultats avec les trois autres cellules afin d'étudier l'impact des différents éléments de la façade sur le fonctionnement thermique des cellules.

### VI.2.2. Étude de l'impact des propriétés surfaciques extérieures de la façade

La façade exposée aux rayonnements solaires engendre des phénomènes d'absorption et de réflexion variant selon les caractéristiques de la surface du matériau (Azarnejad et al., 2015). La couleur (claire ou foncée) est une propriété surfacique qui influe sur plusieurs paramètres tels que la quantité du rayonnement absorbée et réfléchi, la température surfacique, les gains de chaleur et par la suite la performance thermique et énergétique de la construction (Hall, 2010 ; Azarnejad et al., 2015). La texture d'une surface (lisse ou rugueuse) est une autre propriété surfacique importante qui influence l'absorption et la réflexion des rayonnements solaires (Ibañez-Puy et al., 2017). Il s'avère qu'il y a des propriétés qui nous permettent de contrôler la température surfacique de la façade.

Plusieurs études ont été effectuées sur les surfaces considérant les matériaux froids "cool materials" comme une bonne solution afin d'éviter la grande accumulation de la chaleur sur la surface de la façade (Rosso et al., 2017c). Les matériaux froids "cool materials" sont exploités dans cette optique car ils sont caractérisés par des valeurs très élevées de la réflectance solaire et l'émittance infrarouge qui sont les deux principaux paramètres exploités pour contrôler la température surfacique d'un élément exposé aux rayonnements solaires (Synnefa et al., 2007 ; Santamouris et al., 2008 ; Ihara et al., 2016).

Les chercheurs définissent la réflectance solaire ( $\rho$ ) d'un matériau comme la capacité de sa surface à réfléchir la lumière du soleil y compris la réflexion diffuse et spéculaire, elle est quantifiée sur une échelle de 0 à 1 ou de 0 à 100 % (Santamouris et al., 2011 ; Kokogiannakis et al., 2012). Elle englobe tout le spectre solaire, l'ultraviolet (jusqu'à 400 nm), le visible (entre 400 et 700 nm) et l'infrarouge de 700 nm (Pisello et al., 2016 ; Ihara et al., 2016). Concernant l'émissivité thermique ( $\epsilon$ ), elle est définie comme la capacité d'une surface à émettre la chaleur absorbée sous forme du rayonnement, elle varie de 0 à 1 (Pisello et al., 2016 ; Santamouris et al., 2011 ; Kokogiannakis et al., 2012).

Plusieurs études ont été effectuées sur l'impact de la réflectance solaire et l'émissivité thermique vu leurs effets très importants sur le comportement thermique des façades. Ces études affirment que les surfaces extérieures des façades affectent l'équilibre énergétique dans la construction ce qui influe sur la variation de la température surfacique de l'enveloppe jusqu'à 20 °C selon les propriétés des matériaux (Alchapar et al., 2015 ; Alonso et al., 2017). Ces variations des températures surfaciques donnent la possibilité d'améliorer l'ambiance thermique ainsi que la performance énergétique des constructions (Ascione et al., 2010 ; Shi et al., 2011 ; Doya et al., 2012).

D'après ces recherches, il s'avère que les propriétés surfaciques de la façade ont des impacts considérables sur le plan thermique et énergétique de la construction. Les matériaux réfléchissants deviennent de plus en plus importants vu leurs atouts sur le plan thermique et énergétique (Hernández-Pérez et al., 2014). A titre d'exemple, l'exploitation des peintures froides « cool paints » permettent de réduire la charge de la climatisation (Ascione et al., 2010) et d'améliorer la performance énergétique de la construction (Figure 6.6).



**Figure 6.6 :** La performance énergétique de la peinture isolante  
(Source : [www.lisolation.fr/peinture-isolante](http://www.lisolation.fr/peinture-isolante), 2017)

Dans cette optique, plusieurs recherches ont été effectuées à travers l'emploi des matériaux frais (Doya et al., 2012 ; Rosso et al., 2017a) en utilisant des cellules tests pour l'étude tels que les travaux de (Cheng et al., 2005), (Doya et al., 2012) et (Ibrahim, 2014). En réalité, il n'existe pas de solutions universelles recommandées (Ihara et al., 2015) ce qui nécessite des recherches approfondies sur l'impact des caractéristiques surfaciques des matériaux dans différents types de climats.

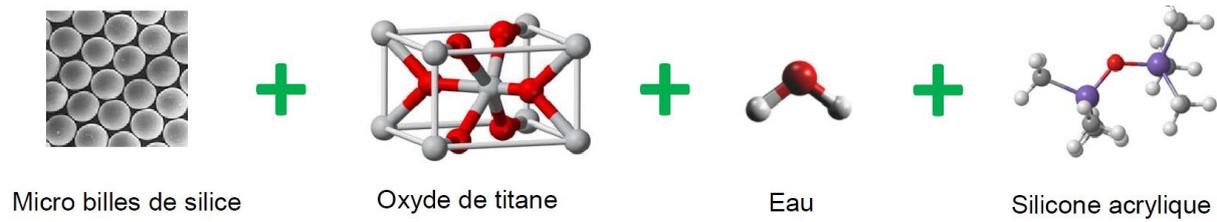
Selon les recherches qui ont été réalisées, nous avons constaté qu'il n'existe pas des études qui ont été faites sur l'impact des propriétés surfaciques de la façade en Algérie et particulièrement dans les zones chaudes et arides où nous avons pu remarquer une grande variété des couleurs et textures avec une négligence du côté thermique et énergétique lors du choix de ces paramètres.

Pour toutes ses raisons, la deuxième cellule (C2) a été recouverte par une peinture isolante avec des nanoparticules (ayant une grande réflexion solaire et une émittance thermique très élevée) afin de tester l'impact de ces deux paramètres sur le comportement thermique de la façade dans un climat chaud et aride (Figure 6.7).



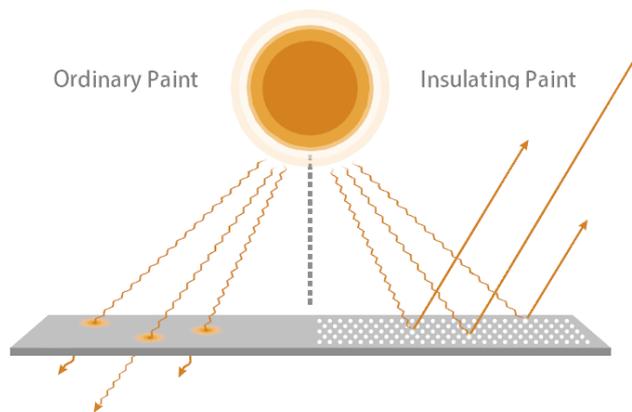
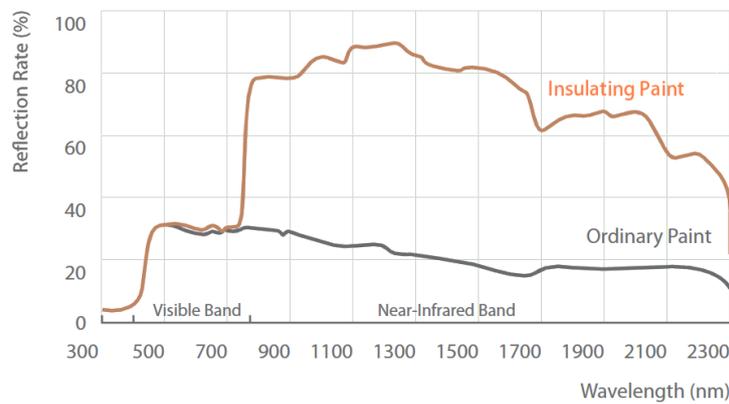
**Figure 6.7 :** La cellule "C2" avec une peinture isolante (Source : Auteur, 2017)

La peinture isolante exploitée fonctionne comme une barrière thermique qui minimise le transfert de la chaleur. Elle contient des nanoparticules (micro billes de silice semi creuses de 20  $\mu\text{m}$  micromètres, Oxyde de titane, eau et silicone acrylique) selon la fiche technique de la peinture utilisée comme le démontre la figure 6.8.



**Figure 6.8 :** La composition de la peinture isolante utilisée  
(Source : La fiche technique de la peinture isolante exploitée)

Ces nanoparticules donnent une grande réflexion du spectre visible jusqu'à 90,4 % et une valeur de 94,6% d'infrarouge qui minimise la quantité de chaleur absorbée et diminue le transfert de chaleur. La figure 6.9 présente une comparaison entre la réflexion d'une peinture ordinaire et la peinture isolante utilisée.



**Figure 6.9 :** Comparaison de la réflexion de la peinture ordinaire et la peinture isolante utilisée (Source : La fiche technique de la peinture isolante exploitée)

À noter que la peinture isolante exploitée a été certifiée par des centres de recherches et des laboratoires au niveau mondial (JIS, SGS, CREPIM, Tipee, etc.).

Dans cette perspective, Uemoto et al. (2010) dans leur article « Estimating thermal performance of cool colored paints », trouvent que les peintures froides produisent une grande réflectance infrarouge par rapport aux peintures ordinaires de la même couleur avec une différence de température surfacique de plus de 10 °C.

La figure 6.10 présente le principe du fonctionnement d'une façade avec une peinture isolante (exemple de la cellule test réalisée).



**Figure 6.10** : Principe du fonctionnement de la façade avec la peinture isolante exploitée

(Source : Auteur, 2017)

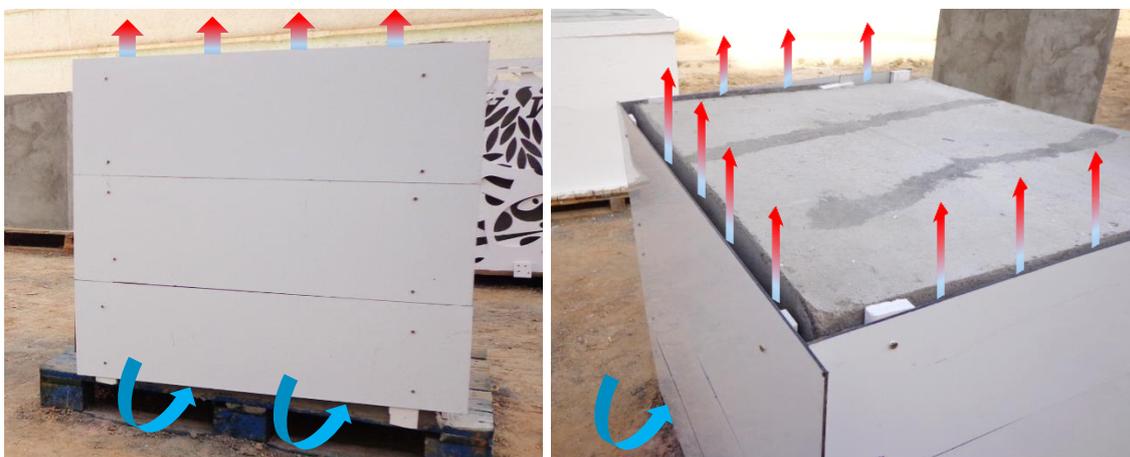
La peinture isolante augmente la réflexion de la surface d'une manière considérable qui dépasse les 90 % ce qui influe directement sur la quantité absorbée, par la suite sur le comportement thermique de la façade et de la cellule.

### VI.2.3. Étude de l'impact de la façade ventilée

La façade ventilée constitue l'une des techniques en plein expansion, elle est considérée comme une solution simple et efficace pour améliorer le fonctionnement thermique des façades (Verdonschot et al., 2009 ; Gracia et al., 2013 ; Ibañez-Puy et al., 2017). Ce dispositif de protection est caractérisé par une double peau avec un espacement entre le mur du bâtiment et le bardage ajouté, ce qui crée une chambre d'air en mouvement par le tirage thermique "l'effet de cheminée" (Gracia et al., 2013 ; Ibañez-Puy et al., 2017). Le type de ventilation de cette cavité dépend de l'origine de la ventilation. On distingue trois types : la ventilation naturelle, mécanique et hybride (Loncour et al., 2004).

Le dispositif de la façade ventilée a connu un intérêt particulier en architecture et génère des questions sur ses impacts thermiques qui nécessitent des études approfondies (Gratia et De Herde, 2004 ; Gratia et De Herde, 2007). Il faut préciser aussi que la façade ventilée étant un dispositif de protection, son comportement varie selon les conditions climatiques d'une ville à une autre et d'une région à une autre (Elarga et al., 2015). Dans la littérature, l'étude de la performance du système de la façade ventilée a été effectuée avec des expérimentations, des simulations, ainsi que sur des constructions existantes (Pasquay, 2004 ; Gavan et al., 2010 ; Gracia et al., 2013).

Dans cette perspective, la troisième cellule (C3) a été exploitée afin d'étudier l'influence de la convection naturelle (par l'effet de cheminée) de la cavité d'air d'une façade ventilée avec joints fermés sur le comportement thermique de la cellule (Figure 6.11).



**Figure 6.11** : La cellule "C3" avec une façade ventilée (Source : Auteur, 2017)

La façade ventilée a été réalisée en panneaux sandwich (plaques d'aluminium - Alucobande) de couleur blanche avec un espacement de 2 cm entre la première façade et le panneau ajouté (le bardage) qui crée une cavité d'air ou une chambre d'air (Figure 6.12).



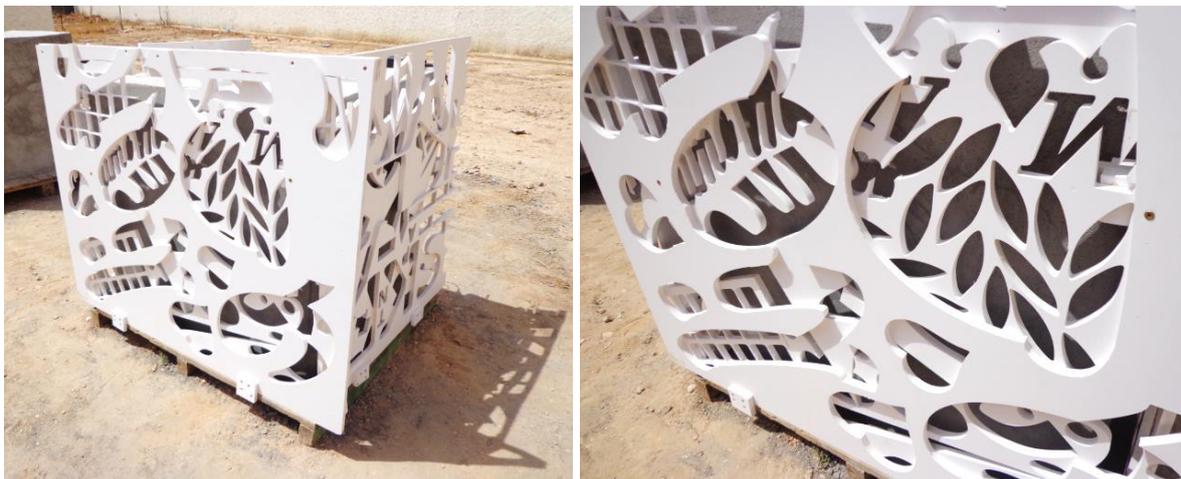
**Figure 6.12** : La cavité d'air de la cellule "C3" (Source : Auteur, 2017)

Ce modèle de la façade ventilée (C3) ne comporte pas d'isolation thermique et les joints entre les panneaux sont fermés. Une entrée et une sortie d'air ont été préservées afin d'assurer la circulation de l'air dans la cavité d'une manière naturelle (par l'effet de cheminée).

#### VI.2.4. Étude de l'impact de la façade double peau

Une façade double peau est composée de deux façades avec un espace entre eux, leur comportement dépend de plusieurs paramètres tels que l'espacement de la cavité d'air et les matériaux utilisés (Safer et al., 2005 ; Mostafa et al., 2016). Ce dispositif est de plus en plus prisés par les concepteurs vu ses avantages sur le plan esthétique, thermique et énergétique (Safer, 2006 ; Poirazis, 2006 ; Barbosa et al., 2014 ; Shen et al., 2016).

Dans cette optique une façade double peau a été intégrée dans la quatrième cellule (C4) afin de tester son impact sur le fonctionnement thermique de la cellule (Figure 6.13).



**Figure 6.13** : La cellule "C4" avec une façade double peau

(Source : Auteur, 2017)

Le matériau exploité dans la double peau est caractérisé par une faible diffusivité thermique et une faible effusivité thermique. Le pourcentage de la surface poreuse de la double peau est environ 40 % par rapport à la surface opaque (60 plein et 40 vide).

Cette double peau assure également la protection de la façade contre la grande quantité des rayonnements solaires à travers la surface opaque de la double peau et l'espacement entre la façade et la double peau ajoutée.

La figure 6.14 illustre la cavité d'air de la cellule "C4" et le principe du fonctionnement de la façade double peau.



**Figure 6.14** : La cavité d'air de la cellule "C4" et le principe du fonctionnement de la façade double peau (Source : Auteur, 2017)

L'espace entre la façade et la deuxième peau de 6 cm constitue une cavité d'air en mouvement par l'effet de cheminée.

### VI.3. Protocole de la prise de mesures et les instruments utilisés

Les mesures ont été effectuées pendant le mois d'Août pour la période chaude et le mois de Décembre pour la période froide après le calcul de la semaine type "design week" et la sélection de la journée type "Design Day" de chaque mois (Voir tableau A4 et tableau A5 - Annexe A).

Trois jours ont été sélectionnés pour la prise des mesures afin de choisir la journée la plus représentative de chaque période. Les journées types choisies pour la prise de mesures sont :

- Le 09, le 10 et le 11 Août 2017 pour la période chaude ;
- Le 12, le 13 et le 14 Décembre 2017 pour la période froide.

Des mesures bi-horaires ont été effectuées pendant douze heures (de 6h à 18h). Les paramètres mesurés sont la température extérieure (Text sous l'ombre à une hauteur de 1,2 m), la température surfacique externe (Tse), la température surfacique interne (Tsi) et la température ambiante (Ta).

Les instruments utilisés pour la prise des mesures sont les mêmes instruments exploités dans l'étude empirique après l'étalonnage (Figure 6.15).



**Figure 6.15 :** Les instruments exploités dans l'étude expérimentale (Source : Auteur, 2017)

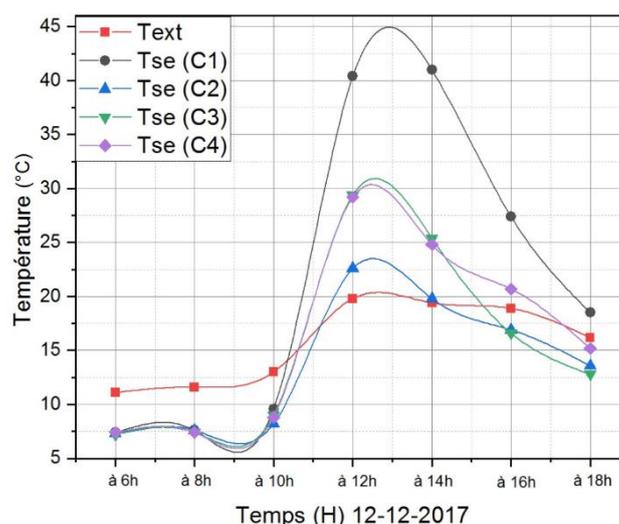
Un anémomètre "Testo 480" pour mesurer la température ambiante et un thermomètre infrarouge pour mesurer la température surfacique (Voir Annexe C).

#### VI.4. Résultats de l'étude expérimentale

Les résultats obtenus par la prise des mesures dans les cellules tests réalisées sont scindés en deux parties selon la période hivernale et estivale.

##### VI.4.1. Résultats de la période hivernale

Les résultats obtenus par la prise des mesures pendant la période hivernale sont représentés dans les figures (6.16, 6.17 et 6.18). Les températures surfaciques externes enregistrées durant la journée type le 12 Décembre 2017 sont représentées dans la figure 6.16.

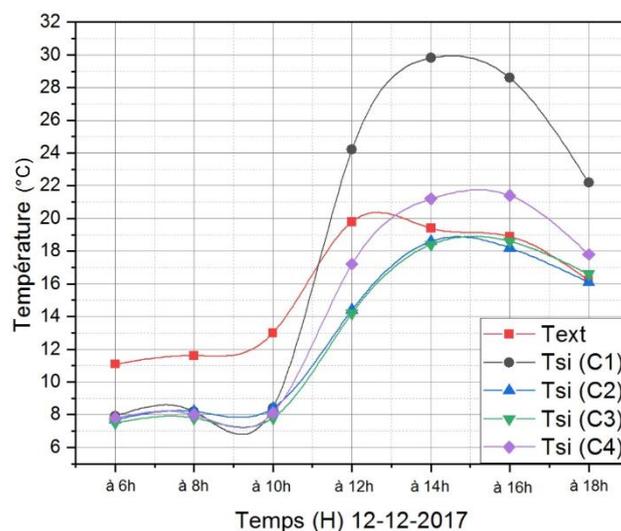


**Figure 6.16 :** Graphes de températures surfaciques externes mesurées le 12 Décembre 2017 (Source : Auteur, 2017)

On remarque que la température surfacique externe (Tse-C1) est très élevée où nous avons enregistré une valeur maximale de 41 °C à 14h, cette valeur dépasse de loin la valeur de la température externe de 19,4 °C (un écart de 21,6 °C). En revanche, les propriétés surfaciques de la cellule (C2), diminuent la température surfacique externe (Tse) avec une différence de 21,2 °C (entre C1 et C2) et un grand pourcentage de 51,7 % de réduction. On voit clairement que les deux autres cellules (C3 et C4) ont un comportement thermique similaire de 6h à 14h et à partir de 15h, la cellule (C3) présente des températures surfaciques assez basses par rapport à la cellule (C4) sous l'influence de la convection naturelle (par l'effet de cheminée) de la cavité d'air de la façade ventilée.

La surface sombre de la façade sans aucun dispositif de protection augmente d'une manière considérable la température surfacique externe (Tse). Les caractéristiques surfaciques de la cellule (C2) ont un grand impact sur la réduction des températures surfaciques externes (la couleur blanche de la peinture isolante avec une émittance thermique très élevée). La façade ventilée (C3) et la façade double peau (C4) assurent un certain ombrage à la paroi qui minimise sa température surfacique externe (Tse).

La figure 6.17 illustre les résultats obtenus relatifs aux températures surfaciques internes mesurées durant la journée type le 12 Décembre 2017.

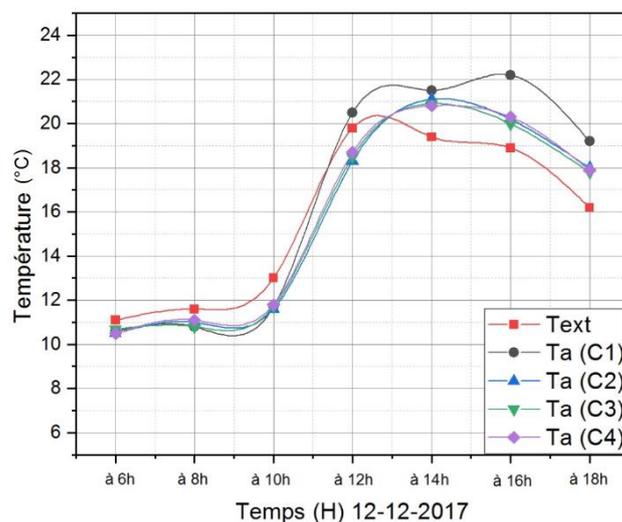


**Figure 6.17 :** Graphes de températures surfaciques internes mesurées le 12 Décembre 2017  
(Source : Auteur, 2017)

De 6h à 10h, les valeurs des températures surfaciques internes sont proches et toutes les cellules ont un comportement thermique similaire avec de faibles différences. On voit qu'il y a une hausse considérable de la courbe de la température surfacique interne (Tsi-C1) après 11h

engendrée par la grande quantité de la chaleur absorbée par la surface extérieure sous l'influence des rayonnements solaires vu les caractéristiques de sa façade (réflectance solaire et émittance thermique très faibles). Les valeurs de la température surfacique interne (Tsi-C4) sont basses par rapport aux (Tsi-C1). Les cellules (C2) et (C3) représentent le même comportement thermique avec des petites différences, leurs comportement est le résultat de la réduction de la quantité de la chaleur absorbée par la surface extérieure (les caractéristiques surfaciques du "C2" et l'ombrage assuré par la double peau de la cellule "C4"). L'écart maximal marqué entre la cellule de référence (C1) et la cellule avec la peinture isolante (C2) est de 11,2 °C à 14h (un pourcentage de 37,58 % de réduction).

Les valeurs des températures ambiantes mesurées durant la journée type le 12 Décembre 2017 sont représentées dans la figure 6.18.



**Figure 6.18 :** Graphes de températures ambiantes mesurées le 12 Décembre 2017

(Source : Auteur, 2017)

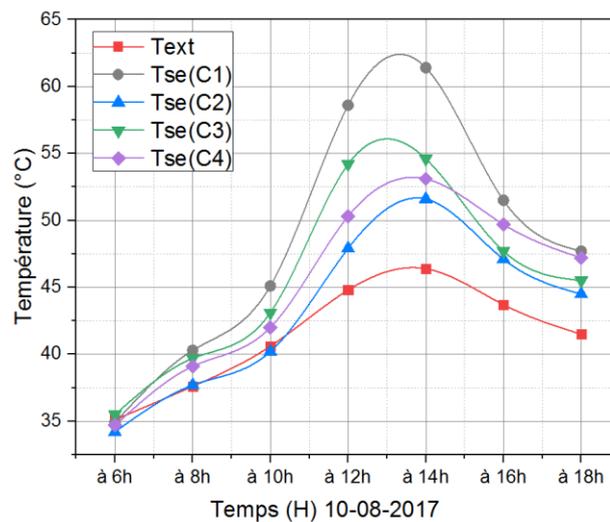
Les quatre cellules ayant un comportement thermique presque similaire de 6 à 10h. À partir de 10h, les courbes des températures ambiantes révèlent qu'il y a deux types de fonctionnement thermiques, le premier relatif à (C1) et le deuxième englobe toutes les autres cellules (C2, C3 et C4) qui ont presque le même comportement thermique durant toute la journée avec des différences très faibles.

Après 10h, on voit clairement l'augmentation de la courbe de (Ta-C1) d'une grande manière caractérisée par des variations avec une température maximale de 22,2 °C à 16h. Par contre les courbes de températures ambiantes de (C2, C3 et C4) sont caractérisées par un fonctionnement homogène sans grandes variations.

Les propriétés surfaciques du (C2), la convection naturelle de la façade ventilée de (C3) et la double peau de (C4) nous ont permis d'éviter la grande augmentation et les grands changements des températures ambiantes ( $T_a$ ) engendrée par les rayonnements solaires qui peuvent produire des situations inconfortables même durant la période hivernale (dans un climat chaud et aride).

#### VI.4.2. Résultats de la période estivale

Les résultats de la prise de mesures durant la période estivale sont représentés dans les figures (6.19, 6.20 et 6.21). La figure 6.19 représente les températures surfaciques externes mesurées pendant la journée type de la période estivale (le 10 Août 2017).



**Figure 6.19 :** Graphes de températures surfaciques externes mesurées le 10 Août 2017

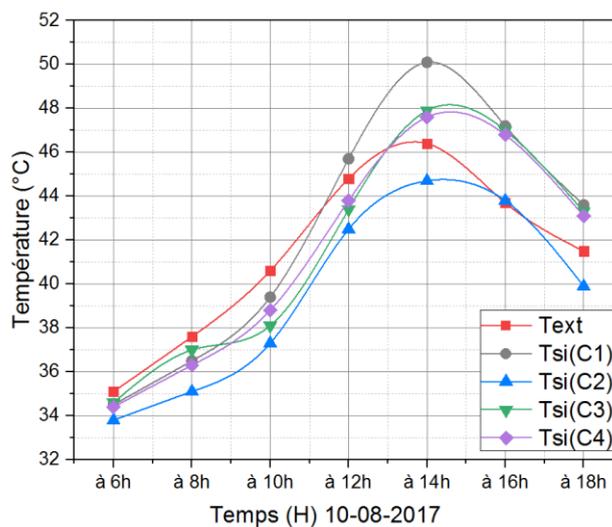
(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que les valeurs des températures surfaciques externes dépassent les valeurs des températures extérieures à partir de 7h vue l'influence des rayonnements solaires diffus et en particulier à partir de 10h sous l'influence des rayonnements solaires directs.

On constate que les valeurs des températures surfaciques externes ( $T_{se}$ ) de la cellule (C3) sont assez faibles par rapport à la cellule (C1) vu l'impact positif du bardage de la façade ventilée qui protège la surface de la façade contre les rayonnements solaires. À propos de la cellule (C4), la façade double peau influe d'une manière positive sur la réduction de la température surfacique externe à travers l'ombre portée par la deuxième peau, cette cellule participe mieux à la réduction de la température surfacique par rapport à la cellule (C1) et (C3).

Concernant la (Tse) de la cellule (C2), les températures surfaciques externes sont très basses par rapport aux températures surfaciques externes des autres cellules (C1, C3 et C4) avec un écart maximal de 10,7 °C à 12h par rapport à la cellule de référence (C1) vu l'impact positif des nanoparticules de la peinture isolante (la grande réflectance solaire et l'émissance thermique très élevée) qui permettent de réduire la température surfacique externe (Tse) jusqu'à 18,26 %. Cette réduction influe directement sur les températures surfaciques internes (Tsi).

Les valeurs des températures surfaciques internes mesurées durant la journée type le 10 Août 2017 sont représentées dans la figure 6.20.

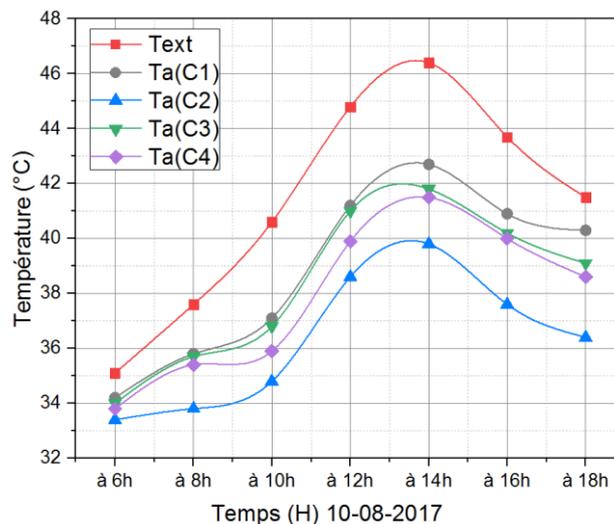


**Figure 6.20 :** Graphes de températures surfaciques internes mesurées le 10 Août 2017

(Source : Auteur, 2017)

On remarque que la température surfacique interne de (C1) a augmenté à partir de 10h et dépasse (Text) à 11h sous l'influence des grandes radiations solaires absorbées par le mur. Concernant la température surfacique interne de la cellule (C3) et (C4), on voit clairement que ces deux cellules ont un comportement thermique semblable pendant toute la période de mesure. Par contre dans la cellule (C2), la température surfacique interne (Tsi) est inférieure par rapport aux autres cellules (Tsi-C1, Tsi-C3 et Tsi-C4) durant toute la journée même par rapport à la température extérieure. La différence maximale a été enregistrée de 5,4 °C à 14h entre (Tsi-C1 et Tsi-C2) avec un pourcentage de 10,78 %. Les propriétés surfaciques externes de la cellule (C2) ont un impact positif sur la réduction des températures surfaciques externes et internes. Les valeurs de la température surfacique interne (Tse) et de la température surfacique interne (Tsi) influent directement sur la température ambiante (Ta).

La figure 6.21 illustre les résultats obtenus relatifs aux températures ambiantes mesurées durant la journée type de la période estivale le 10 Août 2017.



**Figure 6.21 :** Graphes de températures ambiantes mesurées le 10 Août 2017

(Source : Auteur, 2017)

On constate que la température extérieure est très élevée particulièrement après 8h avec une valeur maximale de 46,4 °C à 14h. Concernant la température ambiante, on remarque que le meilleur comportement thermique est celui de la cellule (C2) avec la peinture isolante, par la suite la cellule (C4) avec la façade double peau. De 6h à 12h, le fonctionnement thermique de la cellule (C1) et (C3) avec façade ventilée (sans isolation thermique) est semblable mais après 12h, la température (Ta-C4) diminue par rapport à (Ta-C1) vu l'impact de la façade ventilée (la convection naturelle dans la cavité d'air).

On voit clairement que la température ambiante de la deuxième cellule (Ta-C2) est inférieure par rapport à la température ambiante des autres cellules (C1, C3 et C4) pendant toute la période de mesures. La différence maximale enregistrée de la température ambiante entre la cellule (C2) et la cellule de référence (C1) est environ de 4 °C à 18h sous l'influence de la grande émittance thermique de la peinture isolante qui confirme son importance sur l'abaissement des températures ambiantes.

Globalement, la cellule (C2) présente un bon comportement thermique par rapport aux autres cellules (C3 et C4) et particulièrement par rapport à la cellule de référence (C1). La peinture isolante avec ses nanoparticules a montré sa fiabilité dans un climat chaud et aride. La grande réflexion solaire et l'émittance thermique très élevée ont des atouts en hiver et particulièrement en été. Durant la période estivale, ces deux paramètres influent d'une manière

colossale sur la réduction de la température surfacique externe ( $T_{se}$ ) de la surface des façades qui à son tour minimise la quantité de la chaleur transférée vers l'intérieur tout en réduisant la température surfacique interne ( $T_{si}$ ) du mur et par la suite évite l'augmentation de la température ambiante ( $T_a$ ). Pendant la période hivernale, ils nous ont permis de bénéficier des gains de chaleur tout en évitant un surplus de la chaleur.

Ces points ont été confirmés par d'autres recherches portant sur les influences des revêtements de couleur fraîche (ont une grande réflectivité solaire et une émissivité thermique élevée) où ces derniers ont des impacts sur l'abaissement de la température surfacique qui va influencer sur l'amélioration des conditions du confort thermique interne tout en diminuant la consommation énergétique de la climatisation (Synnefa et al., 2007 ; Santamouris et al., 2008). À ce propos, Hernández-Pérez et al. (2014) voient que Les matériaux froids "cool materials" avec une couleur claire ont un grand potentiel de réduire la température surfacique par rapport à d'autres matériaux de couleur foncée. Dans la même perspective, Ihara et al. (2016) confirment que l'utilisation des façades réfléchissantes permettent à la fois de réduire la température surfacique et les gains de chaleur ainsi que l'amélioration du confort thermique et réduisent les besoins énergétiques.

Concernant la troisième cellule (C3) avec une façade ventilée (FV), son fonctionnement thermique est le résultat d'une part, l'impact positif du bardage qui assure la protection contre les rayonnements solaires et d'autre part, le rôle de la convection naturelle de la cavité d'air qui a contribué à minimiser le flux de chaleur transmis. Pendant l'hiver, ce dispositif protège la façade contre le froid, augmente l'inertie thermique et minimise les déperditions à travers les ponts thermiques. Durant la saison chaude, la façade ventilée occulte les rayonnements solaires et s'oppose au transfert de la chaleur par conduction ce qui influe considérablement sur la diminution du flux de la chaleur venant de l'extérieur vers l'intérieur. La valeur de certains paramètres reste assez élevée vu l'absence de l'isolation thermique dans la cavité d'air qui joue un rôle très important sur l'amélioration du fonctionnement thermique de ce dispositif.

La façade double peau (FDP) de la quatrième cellule (C4) a des atouts sur le plan thermique si le matériau de la deuxième peau a été choisi d'une manière bien réfléchi en prenant en compte les spécificités climatiques de la région. Ce dispositif assure un certain ombrage à la façade qui contribue à la protection de la première peau contre les rayonnements solaires et par la suite la réduction de la température surfacique ainsi que l'amélioration de l'ambiance thermique interne.

## Conclusion

La façade est un élément déterminant dans le fonctionnement thermique d'un bâtiment. Chaque composant de cet élément de l'enveloppe a un rôle prépondérant à jouer pour assurer la performance du bâtiment. Les recherches ayant traité les façades et leurs composants, ont été effectuées à travers l'exploitation de différentes méthodes de recherche, entre autres, la méthode expérimentale. Cette méthode porte sur la réalisation de modèles réels ou à travers l'exploitation des cellules tests à une échelle réelle ou réduite.

Le travail expérimental réalisé avec des cellules tests a permis de déterminer, successivement, l'impact des propriétés surfaciques, du dispositif de la façade ventilée et celui de la façade double peau, sur le comportement thermique des façades sises dans un climat chaud et aride. Le meilleur fonctionnement thermique observé a été obtenu grâce au traitement surfacique de la façade avec une peinture isolante.

Ainsi, l'expérimentation a montré que l'utilisation d'une surface extérieure qui est d'une grande réflectance solaire et d'une émittance thermique élevée affecte le comportement thermique des façades d'une manière considérable. Ces deux paramètres ont donné leurs preuves particulièrement durant la saison chaude où la réduction de la température surfacique externe atteint 10,7 °C. Le traitement des propriétés surfaciques externes influe sur le flux de chaleur transféré vers l'intérieur tout en réduisant la température surfacique interne. Pour le cas d'un traitement optimal, la température surfacique interne a pu être diminuée de 5,4 °C. Implicitement, ce dispositif permet de diminuer la température ambiante jusqu'à 4 °C. Finalement, la peinture isolante avec ses nanoparticules a montré son efficacité dans un climat chaud et aride. Ce traitement assure l'augmentation de la quantité du rayonnement solaire réfléchi qui diminue la quantité de la chaleur stockée dans le matériau. Son utilisation est une solution adéquate pour un climat chaud et aride.

## **CHAPITRE VII :**

# **Étude et optimisation des éléments de la façade par une simulation paramétrique**

Ce chapitre est consacré à l'étude et l'optimisation des éléments de la façade par des simulations numériques. Il présente dans sa première partie le logiciel de la simulation thermique dynamique utilisé TRNSYS. Dans la seconde, il décrit les détails et les scénarios exploités pour la simulation ainsi que la validation du modèle numérique. Par la suite, il analyse et interprète les résultats obtenus afin de déterminer l'impact des éléments de la façade sur le comportement thermique de la façade, de la construction et de l'utilisateur de l'espace ainsi que la performance énergétique du bâtiment.

*« Les approches par modélisation, simulation et expérience de pensée ont cela en commun qu'elles ouvrent un espace épistémologique nouveau. Elles agissent comme des opérateurs permettant de repenser et d'étendre l'épistémologie contemporaine, de dépasser les apories de l'épistémologie classique essentiellement théorie-centrée et de déplacer les débats sur le réalisme »*

*Franck Varenne*

*Livre : Modéliser & simuler (2014)*

## **CHAPITRE VII : Étude et optimisation des éléments de la façade par une simulation paramétrique**

### **Introduction**

Les programmes de la simulation numérique sont considérés comme des outils puissants d'aide à la décision qui donnent aux chercheurs une lecture globale et une bonne compréhension du phénomène ou de l'élément étudié. Dans le secteur du bâtiment, les logiciels de simulation sont exploités pour étudier les différents phénomènes physiques (température de l'air, ventilation, ...) et énergétiques relatifs aux bâtiments et leurs composants notamment la façade et ses éléments. Ils permettent également d'optimiser la conception d'un bâtiment en proposant une approche réaliste du fonctionnement thermique de la construction à l'aide de calculs énergétiques détaillés. Ils donnent ainsi la possibilité d'apprécier les phénomènes thermiques qui s'opèrent dans le bâtiment et de les appréhender globalement sur le cycle complet d'une année. Le présent chapitre a pour objectif l'étude de l'impact de certains paramètres propres à la façade soit respectivement : la surface vitrée, le type de vitrage, le facteur d'ombrage des ouvertures et les propriétés surfaciques (la partie opaque) afin de proposer leur optimisation.

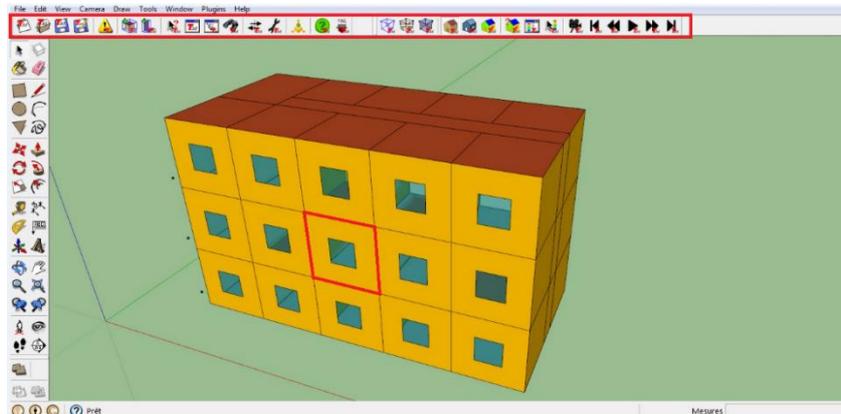
Pour ce faire, des tests sous formes de séries de simulation sur le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment administratif seront effectués sous les conditions des données météorologiques de la ville de Biskra. La simulation se fera avec le logiciel « TRNSYS » sur un modèle virtuel qui servira de cas de base et de référence, pour déterminer l'impact des paramètres de la façade sur la performance thermique et l'efficacité énergétique. Les tests de simulation se feront d'abord séparément pour ressortir à chaque fois les paramètres des cas optimaux, lesquels seront ensuite regroupés pour former le cas optimisé.

### **VII.1. La simulation numérique**

La simulation numérique représente la technique de recherche la plus exploitée par les chercheurs dans la quasi-totalité des études vu leurs atouts sur plusieurs plans ainsi que la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

### VII.1.1. Présentation du logiciel de la modélisation

La création de la géométrie des modèles étudiés a été effectuée à travers l'exploitation du logiciel « Sketch-Up » en utilisant le plugin « Trnsys-3D » comme le démontre la figure 7.1.



**Figure 7.1** : La création de la géométrie des modèles étudiés (Source : Auteur, 2017)

Le plugin « Trnsys-3D » permet de créer le modèle du bâtiment sous « Sketch-Up » ainsi que l'exportation du fichier vers le logiciel « TRNSYS » sous format « idf ». L'ensemble des modèles étudiés sont situés au milieu dans un étage courant (1<sup>er</sup> étage) afin d'éviter l'influence de la toiture sur le fonctionnement thermique du bureau. Plusieurs modèles ont été réalisés selon l'élément étudié (matériaux, surface opaque, surface vitrée, protections solaires, etc.).

### VII.1.2. Présentation du logiciel de simulation TRNSYS et les logiciels exploités

L'étude numérique a été élaborée avec le logiciel de la simulation thermique dynamique « TRNSYS Version 17 » (Transient System Simulation) qui est développé par plusieurs laboratoires et centres de recherches spécialisés (Figure 7.2).



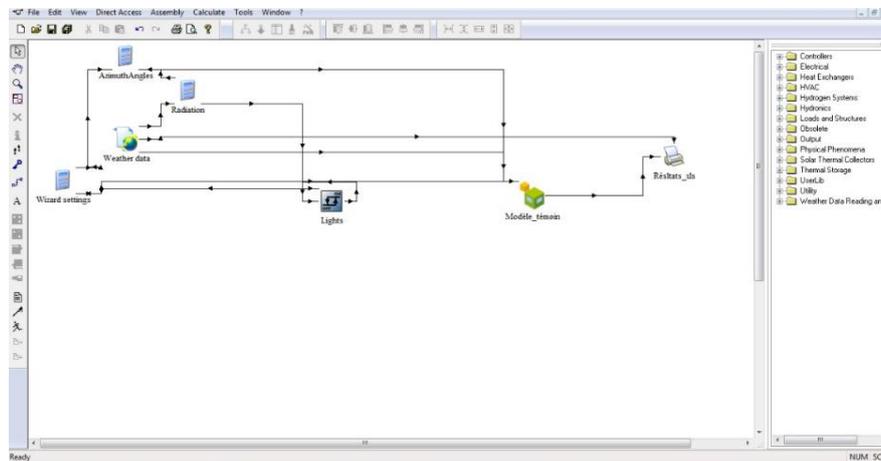
**Figure 7.2** : Le logiciel exploité pour la simulation et les développeurs de cet outil  
(Source : TRNSYS<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> TRNSYS 17- Multi zone Building modeling with Type 56 and TRNBuild, Volume 5.

Le logiciel « TRNSYS » est un environnement modulaire caractérisé par sa flexibilité avec une interface graphique ainsi que des bibliothèques des composants, il est développé par l'université de « Wisconsin-Madison », le groupe Allemagne « TransSolar », le centre français « CSTB » et l'entreprise privée « TESS » (Spitz, 2012).

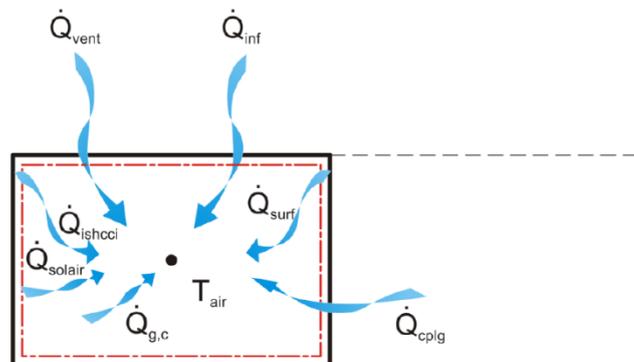
Ce logiciel de simulation thermique dynamique est destiné principalement aux acteurs du bâtiment et à des fins de recherche vu ses avantages (Gossard, 2011 ; Spitz, 2012). Il permet d'intégrer tous les paramètres et les composants du bâtiment ainsi que les systèmes actifs afin d'étudier des phénomènes thermiques, hygrothermiques et énergétiques (Belkacem, 2017).

La simulation sous « TRNSYS » a été effectuée à travers l'utilisation du « Type 56 "Multi-Zone Building" » comme le démontre la figure 7.3 (Voir Annexe F).



**Figure 7.3 :** Les types et les connexions utilisés pour la simulation numérique  
(Source : Auteur, 2017)

Le « Type 56 » a été utilisé pour la simulation numérique en prenant en compte de différents facteurs thermiques tels que les gains convectifs des surfaces et d'infiltration, les gains de ventilation, les gains de convection internes, etc. (Figure 7.4).



**Figure 7.4 :** Les facteurs thermiques influençant sur le nœud d'air (Source : TRNSYS 17)

Les détails des modèles mathématiques du flux de chaleur convectif dans le nœud air (Airnode) sont définis dans le « Type 56 » du logiciel TRNSYS par l'équation suivante :

$$Q_i = Q_{surf,i} + Q_{inf,i} + Q_{vent,i} + Q_{g,c,i} + Q_{cplg,i} + Q_{solair,i} + Q_{ISHCCI,i}$$

Où :

$Q_{surf,i}$  : Le gain convectif des surfaces ;

$Q_{inf,i}$  : Les gains d'infiltration (flux d'air de l'extérieur uniquement) ;

$Q_{vent,i}$  : Les gains de ventilation ;

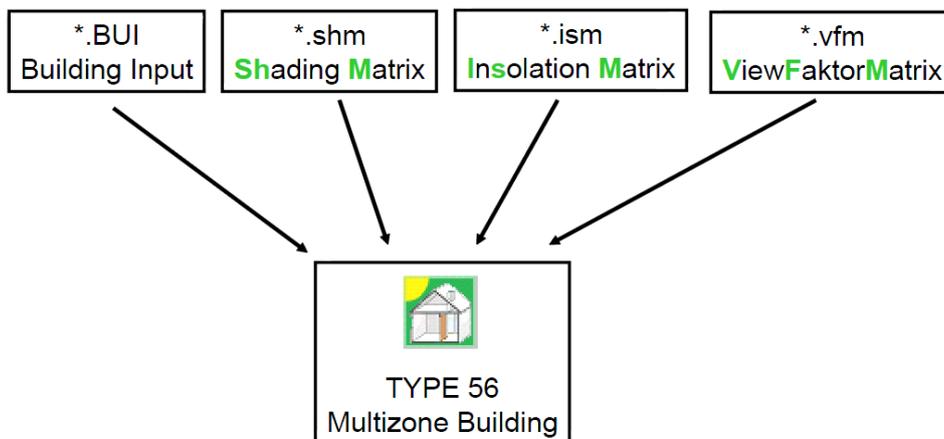
$Q_{g,c,i}$  : Les gains de convection internes (par les personnes, les équipements, l'éclairage, les radiateurs, etc.) ;

$Q_{cplg,i}$  : Les gains dus au flux d'air (de connexion) de l'Airnode (I) ou à la condition aux limites ;

$Q_{solair,i}$  : La fraction du rayonnement solaire entrant dans un nœud d'air par des fenêtres extérieures ;

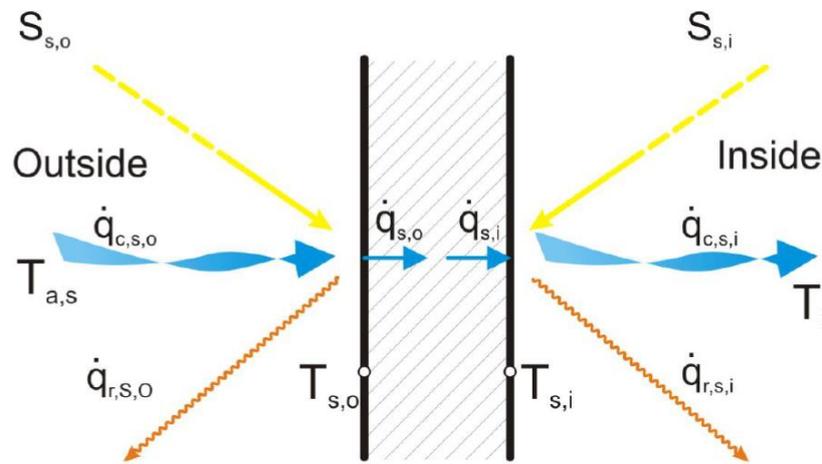
$Q_{ISHCCI,i}$  : Le rayonnement solaire absorbé sur tous les dispositifs d'ombrage internes de la zone et transféré directement sous forme de gain de convection à l'air interne.

Le fonctionnement du « Type 56 » est basé sur plusieurs fichiers d'entrées (inputs) tels que la description du bâtiment, les protections, l'ensoleillement, etc. (Figure 7.5).



**Figure 7.5** : Les inputs du « Type 56 » (Source : TRNSYS 17)

Le comportement thermique de tous les éléments du bâtiment ainsi que le flux de chaleur et les températures de surface du type utilisé sont représentés dans la figure 7.6.



**Figure 7.6 :** Le comportement thermique des éléments du bâtiment selon le type exploité  
(Source : TRNSYS 17)

Où :

$S_{s,i}$  : Flux de chaleur de rayonnement absorbé à la surface interne (gains solaires et radiatifs) ;

$S_{s,o}$  : Flux de chaleur de rayonnement absorbé à la surface extérieure (gains solaires) ;

$q_{r,s,i}$  : Transfert de chaleur radiatif net avec toutes les autres surfaces de la zone ;

$q_{r,s,o}$  : Transfert de chaleur radiatif net avec toutes les surfaces en vue de la surface extérieure ;

$q_{s,i}$  : Flux de chaleur par conduction du mur à la surface intérieure ;

$q_{s,o}$  : Flux de chaleur par conduction dans le mur à la surface extérieure ;

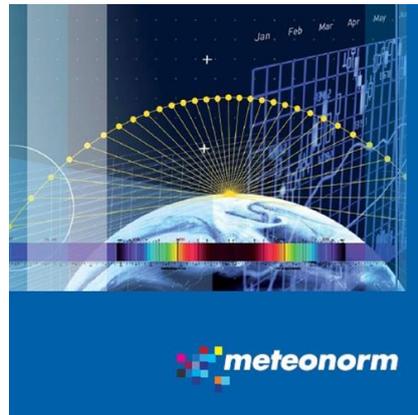
$q_{c,s,i}$  : Flux de chaleur de convection de la surface intérieure vers l'air ;

$q_{c,s,o}$  : Flux de chaleur par convection vers la surface extérieure depuis la limite / ambiance ;

$T_{s,i}$  : Température de surface intérieure ;

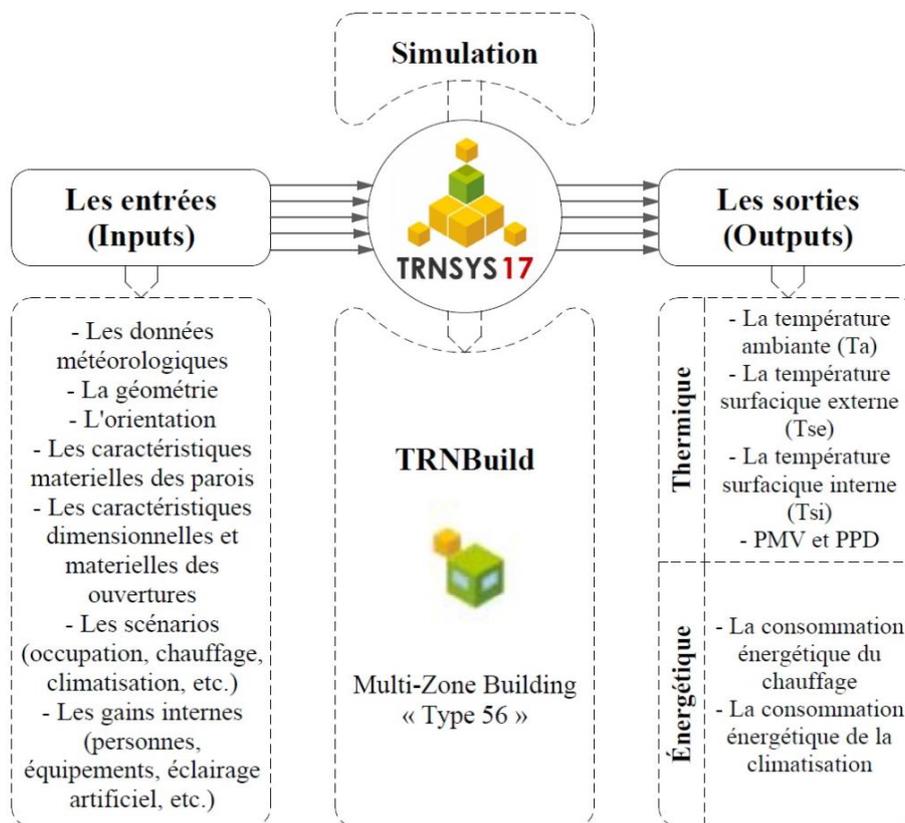
$T_{s,o}$  : Température de surface extérieure.

Le fichier climatique de la ville sujet de l'étude a été généré par le logiciel « Meteonorm V7.2 » sous format « Tm2 » pour le « Type 15-2 "Weather data" » (Figure 7.7).



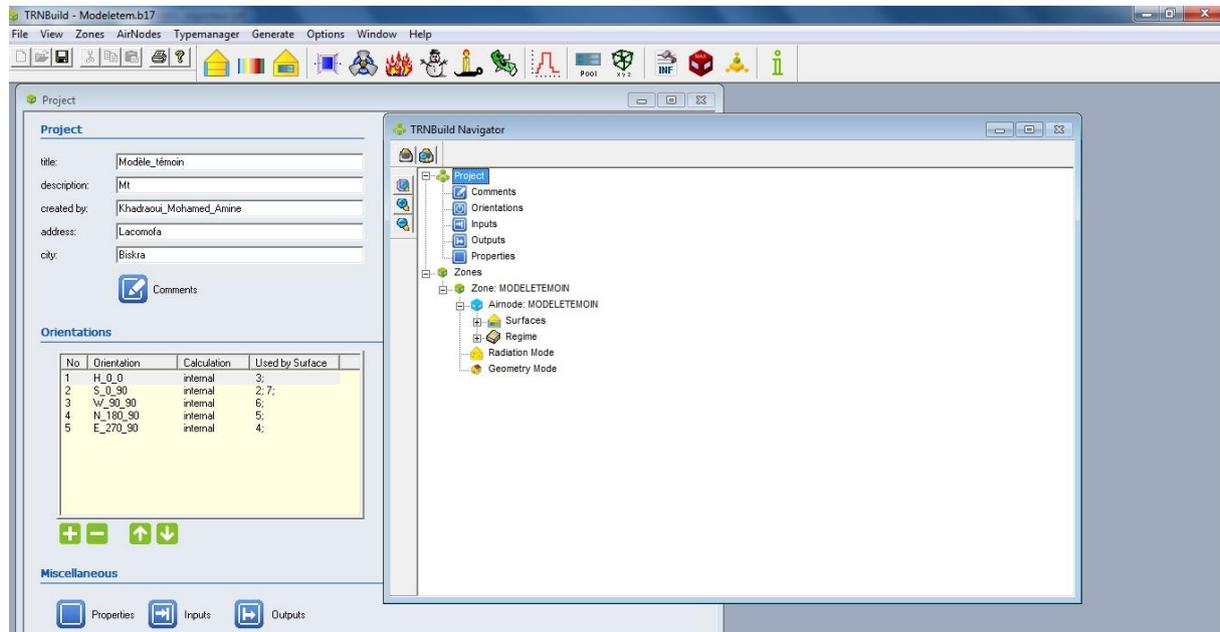
**Figure 7.7 :** Le logiciel exploité pour générer le fichier climatique  
(Source : [www.cstb.fr/energie-environnement/279-meteonorm](http://www.cstb.fr/energie-environnement/279-meteonorm), 2017)

Le logiciel de la simulation « TRNSYS » a besoin de certains paramètres d'entrées (inputs) pour faire la simulation et de donner des sorties (outputs). La figure 7.8 présente les entrées et les sorties de la simulation élaborée à travers le « Type 56 » du logiciel « TRNSYS » tout en utilisant « TRNBuild ».



**Figure 7.8 :** Les inputs et les outputs du modèle simulé (Source : Auteur, 2017)

Concernant les entrées (inputs), il est nécessaire de définir la géométrie du modèle étudié (forme et dimensions) ainsi que son orientation. Les données météorologiques de la ville en question ont été introduit sous format « Tm2 ». Par la suite, les détails relatifs au bâtiment sont introduits à travers l'utilisation du « TRNBuild » comme le démontre la figure 7.9 (Voir Annexe F).

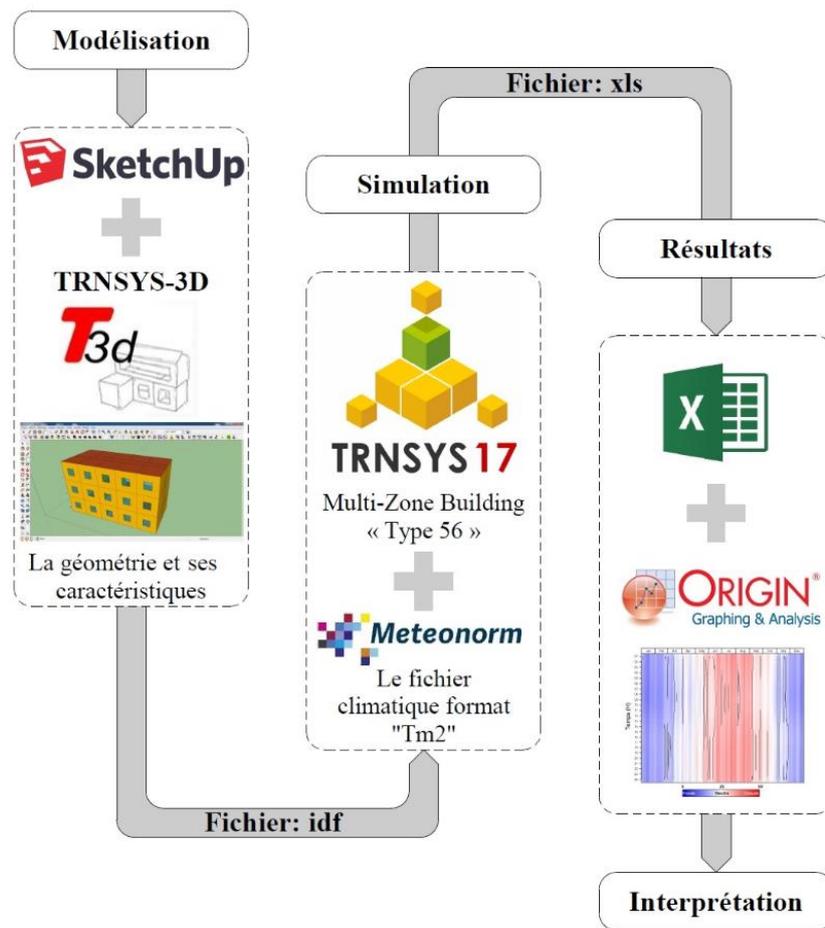


**Figure 7.9 :** L'interface de « TRNBuild » (Source : Auteur, 2017)

Au niveau de « TRNBuild », il est possible de définir les caractéristiques matérielles des parois (mur, plafond, sol) et des ouvertures, les scénarios exploités (l'occupation, l'utilisation des stores, l'ouverture des fenêtres, l'infiltration, l'exploitation du chauffage ou de la climatisation, etc.) ainsi que les gains internes (le nombre de personnes et leurs activités, les équipements, l'éclairage artificiel, etc.).

À propos des sorties (outputs), le logiciel « TRNSYS » donne la possibilité de simuler plusieurs paramètres de natures différentes. Dans notre cas, deux aspects ont été étudiés, le premier est de nature thermique (la température ambiante, la température surfacique interne, la température surfacique externe, le PMV et le PPD) et le second est de nature énergétique (la consommation énergétique du chauffage et de la climatisation afin d'assurer des ambiances thermiques confortables).

La figure 7.10 illustre un schéma de synthèse représente le processus de la simulation et les logiciels exploités dans l'étude numérique.



**Figure 7.10** : Schéma de synthèse de l'étude numérique

(Source : Auteur, 2017)

L'étude numérique est répartie en trois grandes parties, la première relative à la modélisation à travers la création de la géométrie et ses caractéristiques, la deuxième porte sur la simulation numérique et la troisième est axée sur l'exportation des données obtenues, la réalisation des graphes et l'interprétation des résultats.

La première étape de l'étude numérique porte sur la réalisation de la géométrie du modèle et ses caractéristiques dimensionnelles et conceptuelles sous « Sketch-Up » à travers l'utilisation du plugin « Trnsys-3D ». Par la suite, un fichier sous format « idf » a été exporté vers le logiciel de la simulation thermique dynamique « TRNSYS ».

La deuxième étape consiste à la création du fichier météorologique de la ville étudiée sous format « Tm2 » à travers l'utilisation du logiciel « Meteonorm ». Par la suite, l'insertion

de ces fichiers (idf et Tm2) dans le logiciel de simulation « TRNSYS » tout en exploitant le « Type 56 "Multi-Zone Building" » et l'interface de « TRNBuild » afin d'introduire les détails relatifs au modèle étudié (matériaux, scénarios, gains, etc.).

La troisième étape porte sur l'exportation de données obtenues sous forme de tableaux (format xls pour Excel) puis la réalisation des graphes par le logiciel « Origin » et par la suite l'interprétation de ces résultats.

Les détails relatifs au processus de la simulation numérique sont représentés dans l'Annexe F.

## **VII.2. Étude paramétrique des éléments de la façade**

La façade d'un bâtiment est une composante essentielle de l'enveloppe architecturale. À ce propos, Yasa (2015), voit que la façade d'une construction a un rôle primordial sur le côté thermique et énergétique du bâtiment. En effet, chaque élément de la façade influe sur son efficacité thermique et énergétique en fonction du climat ce qui nécessite des études approfondies sur cet élément et ses composants dans chaque région. Dans cette perspective, plusieurs paramètres ont été étudiés dans la présente recherche respectivement : la surface vitrée, le type de vitrage, les propriétés surfaciques (la partie opaque) et le facteur d'ombrage des ouvertures.

### **VII.2.1. Étude de l'impact de la surface vitrée et le type de vitrage**

Selon plusieurs études, les besoins énergétiques d'une construction sont tributaires de certains paramètres relatives à la façade particulièrement la surface vitrée (Shan, 2013 ; Konstantinou, 2014 ; Liang et al., 2015 ; Omrany, 2016). En effet, la façade entièrement vitrée est responsable d'environ 30 à 50 % des déperditions de chaleur (Richieri, 2008 ; Zelenay et al., 2011). Ce point a été confirmé par Westphal et al. (2016) dont les résultats ont montré qu'une façade entièrement vitrée dans une zone climatique chaude est responsable de 45 % des charges de refroidissement de la construction. Cependant, l'impact de la surface vitrée varie selon d'autres paramètres tels que le type de verre et sa composition dont les caractéristiques sont prépondérantes dans le fonctionnement thermique du bâtiment (Moreno-Sierra, 2012 ; Buratti et al., 2013 ; Westphal et al., 2016).

En effet, le double vitrage a été bien expérimenté et évalué dans des recherches ce qui a démontré son efficacité sur le plan thermique et énergétique. Ces recherches ont été circonscrites pour des climats relativement froids. Par contre, très peu de recherches ont été

entreprises dans le contexte climatique chaud et aride (le cas d'étude). La présente recherche tente de compléter le manque dans ce domaine. A son tour, elle pourra orienter les décisions des concepteurs relatives au ratio et le type de vitrage afin d'améliorer la performance thermique et énergétique des constructions.

### VII.2.1.1. Présentation du modèle numérique et le protocole de la simulation

Pour étudier l'impact de la surface vitrée et le type de vitrage sur la performance thermique et énergétique des bâtiments, neuf modèles numériques ont été élaborés. Le modèle de base a été défini à partir d'un cube de (4x4x4 m) avec une fenêtre orientée vers le Sud et sans protections solaires internes ou externes (la façade étudiée est celle orientée vers le Sud car elle représente la façade la plus exposée aux rayonnements solaires avec des conditions les plus défavorables).

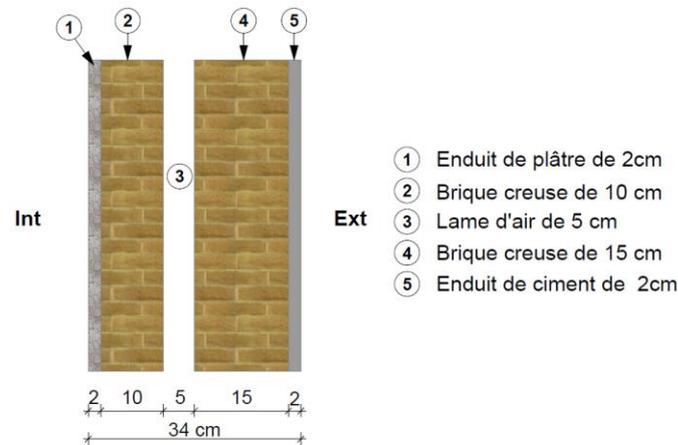
Cinq modèles (Msv) ont été élaborés pour étudier l'impact de la surface vitrée (Msv=20%, 40%, 60%, 80% et 100%) avec un simple vitrage. Quatre modèles (Mtv) pour évaluer l'influence du type de vitrage (Mtv : simple, double, triple et double basse émissivité avec un gaz argon) avec une surface vitrée de 50 %. Ce ratio a été choisi afin d'augmenter les échanges thermiques effectués à travers le vitrage ce qui ont permis de mettre en évidence et de bien démontrer l'impact du changement du type de vitrage sur le comportement thermique de la façade.

Dans le modèle qui correspond à l'impact du type de vitrage (Mtv), plusieurs compositions de verre ont été utilisées (simple, double et un triple vitrage). Cependant, pour obtenir une isolation thermique, il faut introduire un gaz peu conducteur dans la cavité du vitrage (Quenard, 2009). A cette fin, le quatrième modèle a été réalisé avec un double vitrage-basse émissivité contenant le gaz argon dans sa cavité (Mdv\_bg). Le tableau 7.1 donne les valeurs de la transmission thermique (U) pour chaque type.

**Tableau 7.1** : La transmission thermique "U" des vitrages utilisés (TRNSYS 17)

Modèle	Type de vitrage	Transmission thermique U (W/m <sup>2</sup> .k)
Msv	Simple vitrage	5,74
Mdv	Double vitrage	2,95
Mtv	Triple vitrage	2
Mdv_bg	Double vitrage basse émissivité avec gaz	1,43

La composition matérielle des parois est similaire à ce qui est couramment utilisé dans la région de Biskra (Figure 7.11).



**Figure 7.11** : La composition matérielle des murs (Source : Auteur, 2017)

Le tableau 7.2 illustre les caractéristiques thermiques des matériaux exploités pour la simulation.

**Tableau 7.2** : Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés pour la simulation (Source : D.T.R. C3-2 1997<sup>2</sup>)

	<b>Conductivité thermique <math>\lambda</math> (W/m.k)</b>	<b>Chaleur spécifique C (KJ/kg.k)</b>	<b>Densité D (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Epaisseur (cm)</b>
<b>Brique creuse</b>	0,48	1080	900	10-15
<b>Enduit de plâtre</b>	0,35	936	1150	02
<b>Enduit de ciment</b>	1,4	1080	2200	02
<b>Lame d'air de 5 cm</b>	0,047	1000	1	05
<b>Corps creux</b>	1,2	1000	1300	16
<b>Dalle de compression</b>	1,75	1080	2500	04
<b>Carrelage</b>	1	940	2000	02
<b>Dalle flottante</b>	1,75	1080	2500	10

Après la création de la bibliothèque des matériaux sur « TRNSYS », un scénario détaillé qui englobe tous les paramètres (infiltration, gains internes, nombre de personnes et leurs activités et les équipements éventuels) a été intégré ; l'objectif est de faire une comparaison avec un bâtiment existant pour pouvoir ensuite valider le modèle numérique.

<sup>2</sup> D.T.R. C 3-2 (1997). Document Technique Réglementaire-fascicule 1, ministère de l'habitat, Algérie.

Pour estimer les besoins énergétiques, un seuil de température a été déterminé pour le fonctionnement des équipements, soit 20 °C pour le chauffage et 25 °C pour la climatisation. Cet intervalle est situé dans la zone de confort thermique tel que défini dans des recherches de (Roulet, 2004), (Kjell, 2014) et (Lavoye et al., 2015). Dans la même perspective, la norme (NF EN 15251) a donné des plages de température en fonction du type de la construction (Figure 7.12).

### NF EN 15251

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Plage de température pour le chauffage, °C Vêtue ~ 1,0 clo	Plage de température pour le rafraîchissement, °C Vêtue ~ 0,5 clo
Bâtiments d'habitation, pièces de séjour (chambres, séjours, etc.)	I	21,0 – 25,0	23,5 – 25,5
Activité sédentaire ~1,2 met	II	<b>20,0 – 25,0</b>	<b>23,0 – 26,0</b>
	III	18,0 – 25,0	22,0 – 27,0
Bâtiments d'habitations, autres locaux (cuisines, rangements, etc.)	I	18,0 – 25,0	
Station debout, marche ~1,5 met	II	<b>16,0 – 25,0</b>	
	III	14,0 – 25,0	
Bureaux et locaux à activité similaire (bureaux individuels ou paysagés, salles de réunion, auditoriums, cafétérias, restaurants, salles de classe)	I	21,0 – 23,0	23,5 – 25,5
	II	<b>20,0 – 24,0</b>	<b>23,0 – 26,0</b>
	III	19,0 – 25,0	22,0 – 27,0
Ecoles maternelles	I	19,0 – 21,0	22,5 – 24,5
	II	<b>17,5 – 22,5</b>	<b>21,5 – 25,5</b>
Station debout, marche ~1,4 met	III	16,5 – 23,5	21,0 – 26,0
Grands magasins	I	17,5 – 20,5	22,0 – 24,0
	II	<b>16,0 – 22,0</b>	<b>21,0 – 25,0</b>
	III	15,0 – 23,0	20,0 – 26,0
Station debout, marche ~1,6 met			

**Figure 7.12** : La plage de température selon la norme NF EN 15251

(Source : Hernandez, 2014)

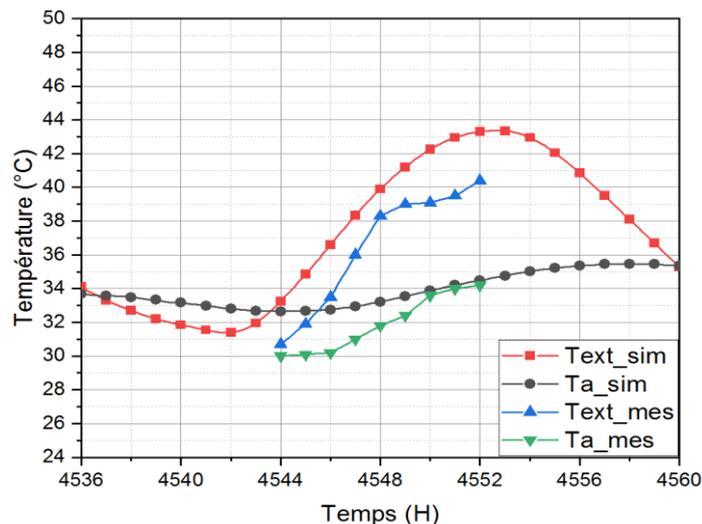
Selon cette norme, la plage de température pour les bureaux se situe entre 20 et 26 °C.

La simulation a été lancée pendant une année afin d'éviter les erreurs de l'initialisation de la simulation (avec un pas de temps d'une heure) et les résultats ont été exportés sous format (xls). Par la suite les graphes ont été élaborés par le programme « Origin » durant les périodes la plus chaude et la plus froide selon le fichier climatique utilisé. Les trois jours sélectionnés durant chaque période correspondant aux heures de l'année sont le 11, 12 et 13 Janvier (240-312 heures) pour la période froide et le 20, 21 et 22 Juillet (4805-4877 heures) pour la période chaude.

### VII.2.1.2. Validation du modèle numérique

Principalement le logiciel « TRNSYS » est destiné aux acteurs du bâtiment, il a montré sa performance et fait l'objet de validations approfondies (Spitz, 2012 ; Soudani, 2016). Selon la littérature scientifique, on peut valider un modèle numérique s'il y a une correspondance et cohérence entre les valeurs mesurées et simulées (Arnal, 2013 ; Soudani, 2016) mais l'écart maximal entre ces valeurs doit être inférieur à 10 % (Miranville, 2002 ; Faure, 2007 ; Daverat, 2012 ; Guichard, 2013).

Dans notre cas, nous avons effectué une simulation d'un modèle similaire au bâtiment existant avec les mêmes caractéristiques et durant la même période. Les résultats de la simulation obtenus ont été comparés avec les prises de mesures effectuées (le 08 Juillet 2017 de 8h à 16h selon les instruments disponibles "Testo 480" et la possibilité de mesure dans le bâtiment) (Figure 7.13).



**Figure 7.13 :** Comparaison des graphes de températures mesurées et simulées le 08 Juillet 2017 (Source : Auteur, 2017)

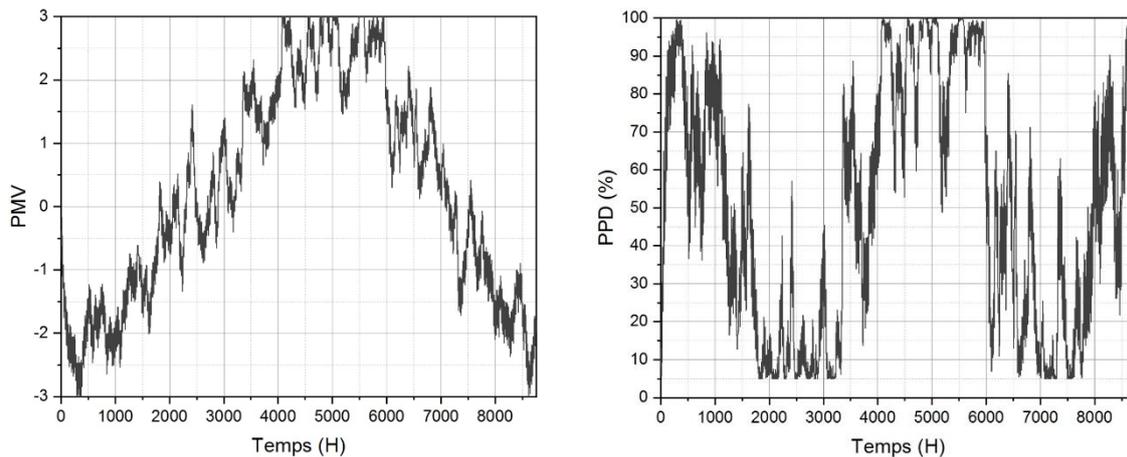
En premier lieu, nous avons vérifié les températures du fichier météorologique vu ses impacts sur les résultats de la simulation. La lecture des deux courbes de la température extérieure (Text\_mes et Text\_sim) nous a permis de voir l'existence d'une correspondance entre les deux avec un écart de 1,6 °C à 2,9 °C avec un pourcentage de 4,01 % à 6,69 % ; ces valeurs sont inférieures à 10 % donc le fichier climatique est correcte.

Concernant les deux températures ambiantes (Ta\_mes et Ta\_sim), visiblement il existe une nette correspondance entre les deux graphes ; l'écart varie de 0,2 °C à 2,65 °C donc un

pourcentage de 0,58 % à 8,11 % ; ces pourcentages sont inférieurs à 10 % ce qui permet de valider le modèle numérique.

### VII.2.1.3. Résultat de l'impact de la surface vitrée et le type de vitrage

Une étude préliminaire a été effectuée sur l'indice du vote moyen prévisible « PMV » et le pourcentage prévisible d'insatisfaits « PPD » dans un modèle avec une surface vitrée de 20 %. Les résultats obtenus durant une année sont représentés dans la figure 7.14.



**Figure 7.14 :** L'indice « PMV » et « PPD » simulés pendant une année

(Source : Auteur, 2017)

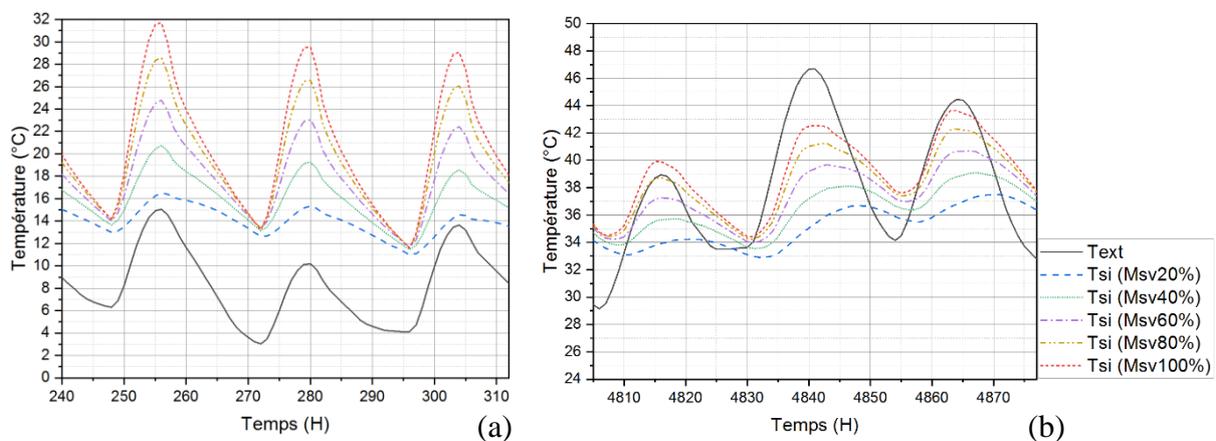
La lecture du graphe du vote moyen prévisible « PMV » nous a permis de trouver trois zones selon la saison. Durant la période froide (le mois de Janvier, Février et Décembre), la sensation de température est plus basse que la plage de confort (sensation froide à très froide). Pendant la période chaude (le mois de Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre), la sensation thermique des usagers est plus élevée par rapport à la plage de confort thermique (sensation chaude à très chaude). Durant les autres mois (le mois de Mars, Avril, Octobre et Novembre), on remarque que la sensation thermique est moyenne variant entre (-1 et +1) c'est-à-dire entre légèrement frais et légèrement tiède autrement dit autour d'une sensation optimale.

Le graphe du pourcentage prévisible d'insatisfaits « PPD » démontre que durant la période froide le taux d'insatisfaction est important vu la température inconfortable très basse. Durant la période chaude, le pourcentage d'insatisfaction est très élevé vu la hausse considérable des températures. Pendant les autres mois (le mois de Mars, Avril, Octobre et Novembre), on constate que le pourcentage d'insatisfaction diminue d'une manière considérable à cause des températures acceptables durant cette période.

Globalement, la sensation thermique des usagers est répartie en deux périodes. Une grande période avec une situation thermique inconfortable et une sensation insatisfaisante vue les températures très élevées ou très basses (durant l'hiver et l'été). L'autre période (mi saison) est caractérisé par des situations thermiques acceptables et une sensation thermique satisfaisante à cause de températures moyennes.

### VII.2.1.3.1. Résultat de l'impact de la surface vitrée

La figure 7.15 illustre les températures surfaciques internes simulées durant trois jours extrêmement froids (le graphe "7.15.a" le 11, 12 et 13 Janvier) et trois jours extrêmement chauds (le graphe "7.15.b" le 20, 21 et 22 Juillet).



**Figure 7.15** : Graphes de températures surfaciques internes simulées du (Msv)

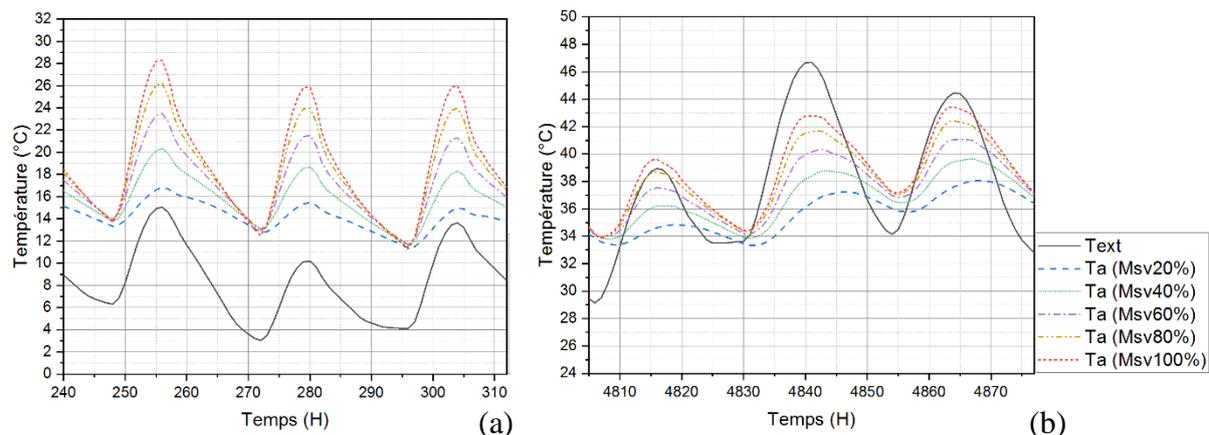
(Source : Auteur, 2017)

Dans les deux graphes, on constate que chaque augmentation de la surface vitrée avec un simple vitrage engendre un accroissement conséquent de la température surfacique interne de la paroi. L'accroissement de la surface vitrée de 20 à 100 % a des conséquences très négatives sur l'augmentation de température surfacique interne (Tsi) ; en hiver de 16,5 °C à 31,7 °C avec un grand pourcentage de 47,94% et en été de 35,6 °C à 42,5°C environ 16,23 %. Ce comportement thermique influe directement sur la température ambiante (Ta) dans le bureau.

Les températures ambiantes simulées dans la même période sont représentées dans la figure 7.16.

Le graphe (7.16.a) – saison froide – indique que l'augmentation de la surface vitrée améliore la température ambiante (Ta) ; cela s'explique par la pénétration des rayonnements solaires par le vitrage qui assurent un chauffage passif. Cependant, les gains de chaleurs deviennent une source d'inconfort si la surface vitrée est grande, précisément, si le taux

d'ouverture dépasse les 60 % ; dans ce cas, une hausse de température au-dessus de la plage de confort thermique est signalée vu la grande quantité de chaleur qui traverse le vitrage.



**Figure 7.16 :** Graphes des températures ambiantes simulées du (Msv)

(Source : Auteur, 2017)

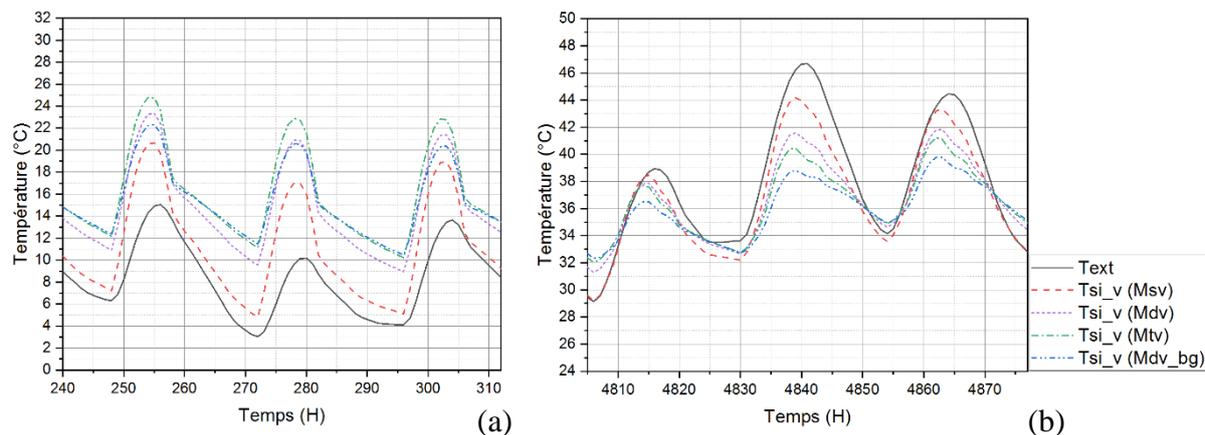
La différence de la température ambiante ( $T_a$ ) entre le modèle (Msv20 % et Msv100 %) peut atteindre une valeur de 11,5 °C ce qui confirme l'importance de cet élément et son impact direct sur le confort thermique.

Le graphe (7.16.b) – saison chaude – révèle les valeurs de la température ambiante ( $T_a$ ) pendant l'été. Ainsi, si le ratio augmente, la température ambiante ( $T_a$ ) augmente aussi et parfois dépasse la température extérieure dans le cas d'un (Msv100 %) alors qu'une différence jusqu'à 6,3 °C a été enregistrée avec (Msv20 %) Soit 14,75 %. Durant cette période, les valeurs de la température ambiante ( $T_a$ ) dépassent de loin la plage de confort thermique.

### VII.2.1.3.2. Résultat de l'impact du type de vitrage

Les températures surfaciques des ouvertures ont un caractère de changement irrégulier par rapport aux autres surfaces (Bouchahm et al., 2010). Pour cette raison nous avons simulé l'impact du type de vitrage sur sa température surfacique interne ( $T_{si\_v}$ ) et la température ambiante ( $T_a$ ).

La figure 7.17 illustre les températures surfaciques internes des vitrages ( $T_{si\_v}$ ) simulées pour chaque type de vitrage durant les trois jours les plus froids (graphe 7.17.a) et les plus chauds (graphe 7.17.b).



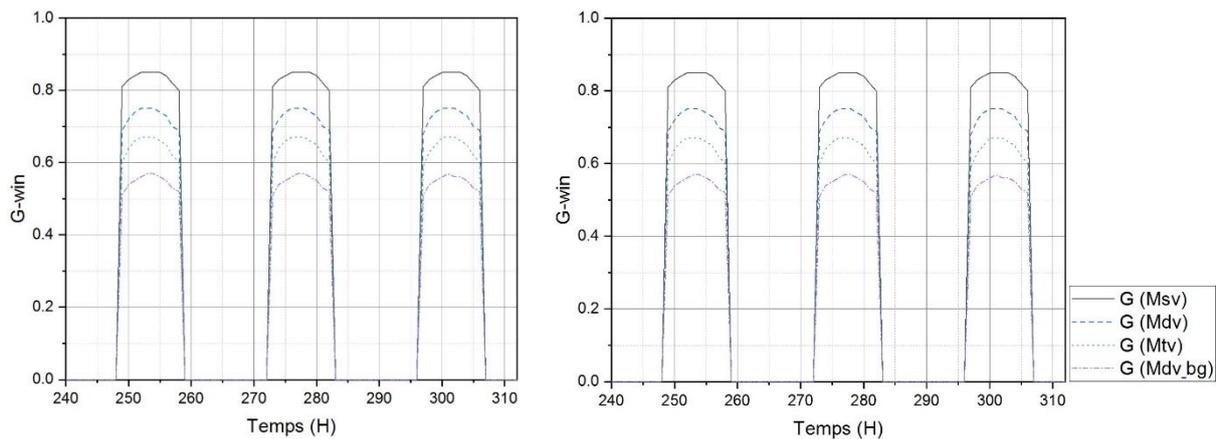
**Figure 7.17 :** Graphes des températures surfaciques internes des vitrages obtenues par simulation du (Mtv) (Source : Auteur, 2017)

Le graphe (7.17.a) – période froide – indique que l’amélioration du type de vitrage (transmission thermique  $U$  de 5,74 à 1,43  $\text{w/m}^2\text{k}$ ) a un impact sur la température surfacique interne du vitrage. Le meilleur comportement est celui du modèle à double vitrage-basse émissivité avec gaz argon (Mdv\_bg). Par contre on trouve un comportement très différent dans le simple vitrage vu sa transmission thermique très élevée.

Dans le graphe (7.17.b) de la période chaude, on voit clairement l’influence de l’amélioration du type de vitrage sur la réduction de la ( $T_{si\_v}$ ) avec un écart maximal de 6,9 °C (un pourcentage de 15,09 %) entre le simple vitrage et le double vitrage-basse émissivité avec gaz qui révèle un bon comportement thermique durant toute la période chaude vu ses caractéristiques thermiques optimisées.

La transmission thermique " $U$ " a des impacts considérables sur l’amélioration du comportement thermique du vitrage. En hiver, elle atténue les grandes fluctuations de la température surfacique du vitrage ; et en été, elle joue un rôle important sur la réduction des valeurs maximales des températures surfaciques.

La figure 7.18 présente les valeurs du coefficient de gain de chaleur solaire du vitrage uniquement (G-win) de chaque type de vitrage étudié. Le graphe (7.18.a) illustre les résultats obtenus durant les trois jours de la période hivernale et le graphe (7.18.b) les résultats relatifs aux trois jours de la période estivale.



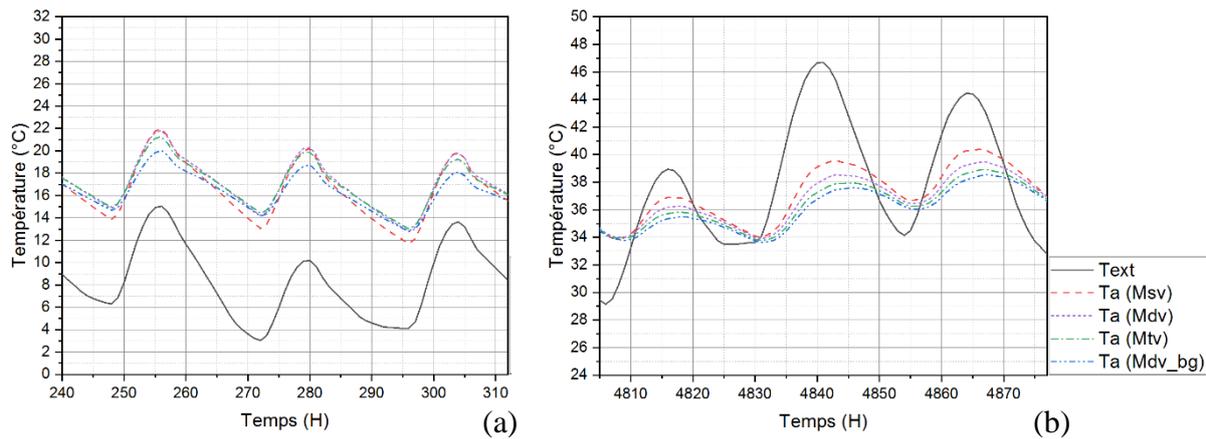
**Figure 7.18 :** Graphes du coefficient de gain de chaleur solaire du vitrage des modèles (Mtv)  
(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que le simple vitrage (Msv) a le grand coefficient de gain de chaleur solaire (jusqu'à 0,85) puis le double vitrage (Mdv) avec une valeur maximale de 0,75. On remarque que le triple vitrage (Mtv) présente un coefficient de gain de chaleur solaire moyen avec une valeur de 0,67. Le double vitrage basse émissivité avec gaz (Mdv\_bg) a le coefficient de gain de chaleur solaire le plus faible par rapport aux autres types avec une valeur maximale de 0,57.

La comparaison des coefficients de gain de chaleur solaire des vitrages étudiés affirme que le double vitrage basse émissivité avec gaz (Mdv\_bg) influe d'une manière considérable sur la réduction des gains de chaleur solaire transmis à travers le vitrage à l'intérieur du bâtiment ce qui influe directement sur les variations des températures et le comportement thermique de la construction ainsi que sa performance énergétique.

L'amélioration du type de vitrage à travers la réduction de la transmission thermique, influe également d'une manière positive sur la température ambiante (Figure 7.19).

Le meilleur comportement thermique remarqué est celui du modèle en double vitrage-basse émissivité avec gaz (Mdv\_bg). Dans ce modèle, pendant la saison froide (graphe 7.19.a), on remarque que la différence avec le simple vitrage est de 1,9 °C. Durant la période chaude (graphe 7.19.b), on constate que ce type de vitrage permet une nette réduction de la température de l'ordre de 4,82 % par rapport au vitrage simple.



**Figure 7.19** : Graphes de températures ambiantes simulées avec différents types de vitrages (Mtv) (Source : Auteur, 2017)

Finalement, le choix adéquat du type de vitrage a des impacts sur le comportement thermique. L'optimisation d'un seul paramètre est insuffisante et afin d'optimiser le fonctionnement thermique des bâtiments à travers les surfaces vitrées, il faut combiner plusieurs paramètres, notamment le taux d'ouverture et le type de vitrage.

## VII.2.2. Étude de l'impact des propriétés surfaciques

Les surfaces de la façade sont considérées comme des zones de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. À ce propos, les propriétés surfaciques, particulièrement la couleur et la texture ont un rôle important sur l'absorption solaire et l'émissivité thermique de la façade et par la suite le fonctionnement thermique du bâtiment. Dans cette perspective, Alonso et al. (2017) voient que les propriétés surfaciques des matériaux de la façade ont un rôle crucial sur le fonctionnement thermique du bâtiment.

L'objectif de cette partie de la recherche est d'étudier l'impact des propriétés surfaciques de la façade (les parties opaques) sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments situés dans un contexte climatique chaud et aride. Les paramètres étudiés sont la couleur, la texture et leurs absorptions en utilisant la simulation thermique dynamique (TRNSYS) comme outil d'étude.

### VII.2.2.1. Présentation du modèle numérique et le protocole de la simulation

Afin d'étudier l'impact des propriétés surfaciques des parties opaques (l'absorption), trois modèles ont été réalisés ( $M_{ab}$ ). Ils sont similaires uniquement au niveau des propriétés surfaciques extérieures des façades avec une absorption faible ( $M_{ab0.1}$ ), moyenne ( $M_{ab0.5}$ ) et élevée ( $M_{ab0.75}$ ).

Le tableau 7.3 démontre les caractéristiques surfaciques des modèles simulés.

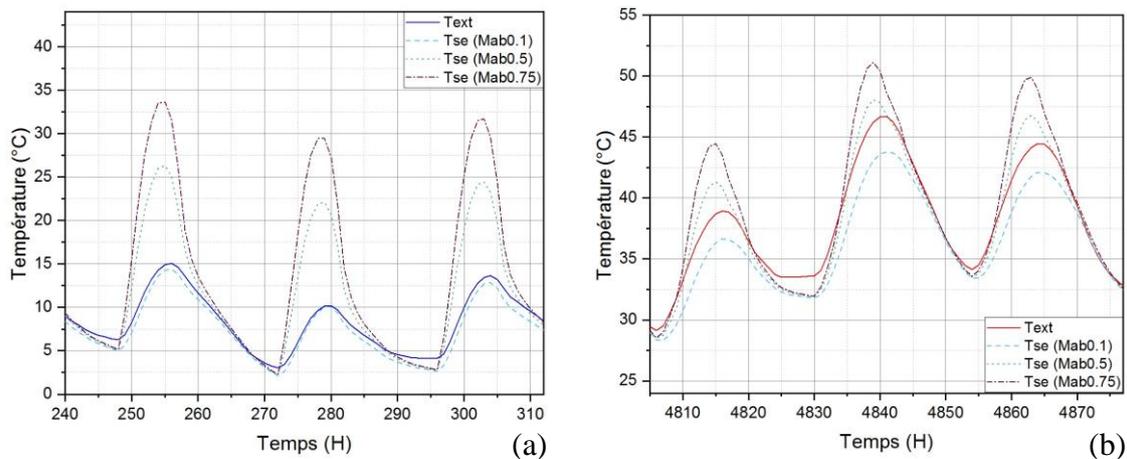
**Tableau 7.3** : Les propriétés surfaciques des modèles simulés et leurs coefficients d'absorption (Source : Auteur, 2017)

Modèle	propriétés surfaciques	Absorption
$M_{ab0.1}$	Surface lisse et couleur claire	0,1
$M_{ab0.5}$	Surface lisse et couleur moyenne	0,5
$M_{ab0.75}$	Surface rugueuse et couleur foncé	0,75

Des scénarios détaillés ont été introduits qui touchent tous les paramètres (infiltration, gains internes, équipements, nombre de personnes et leurs activités). Le protocole de la simulation détaillé et la validation du modèle numérique ont été traités dans la partie précédente (VII.2.1.1. et VII.2.1.2.).

### VII.2.2.2. Résultat de l'impact des propriétés surfaciques

La figure 7.20 illustre les températures surfaciques externes (Tse) simulées durant trois jours d'hiver (7.20.a) et trois jours d'été (7.20.b).



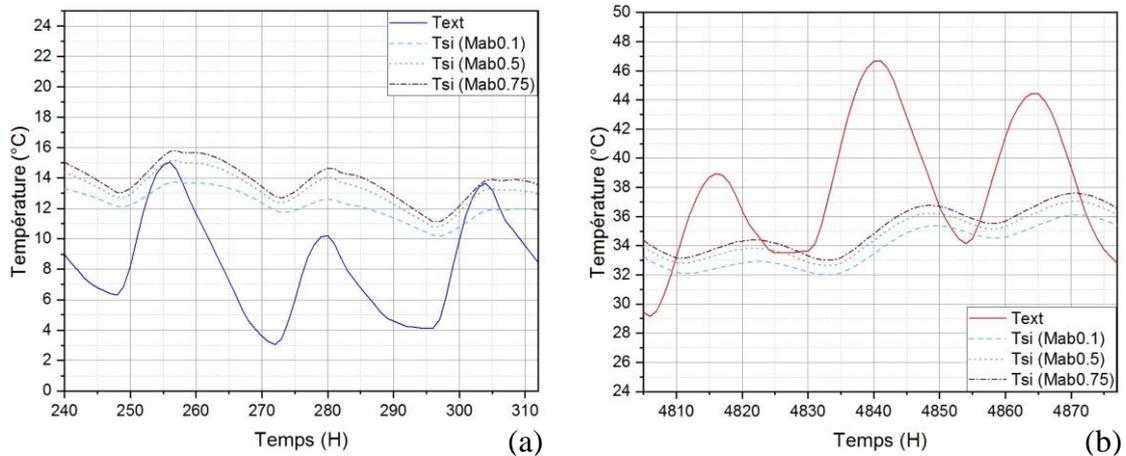
**Figure 7.20** : Graphes de températures surfaciques externes simulées du ( $M_{ab}$ ) (Source : Auteur, 2017)

On remarque que chaque augmentation de l'absorption de la surface de la façade (couleur foncée et une texture rugueuse) engendre une hausse de la température surfacique externe. Cet accroissement peut atteindre jusqu'à 19,3 °C avec un pourcentage de 57,44 % en hiver et 8 °C (15,65 %) en été entre les deux modèles ( $M_{ab0.1}$  et  $M_{ab0.75}$ ).

Les valeurs des températures surfaciques externes (Tse) confirment l'importance du choix adéquat de la couleur et la texture des façades vu leurs grands impacts sur l'absorption

des surfaces et par la suite la quantité de la chaleur stockée dans l'enveloppe. L'accroissement des valeurs de l'absorption surfacique influe sur la (Tse) et par la suite sur la (Tsi).

Les températures surfaciques internes simulées sont représentées dans la figure 7.21 où (7.21.a) représente les trois jours d'hiver et (7.21.b) les trois jours d'été.

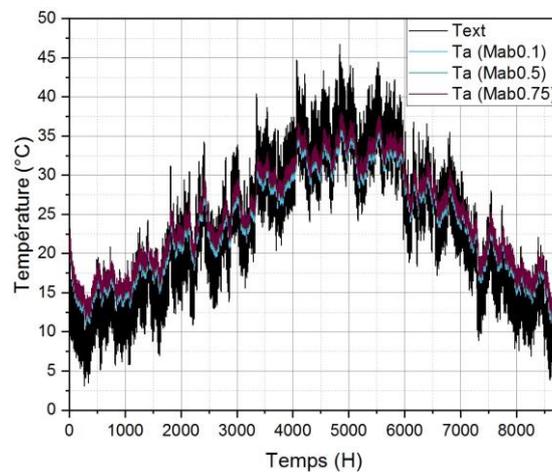


**Figure 7.21 :** Graphes de températures surfaciques internes simulées du ( $M_{ab}$ )

(Source : Auteur, 2017)

On voit que l'influence sur la (Tsi) est moins que dans la (Tse). En hiver, dans le graphe (7.21.a), la différence enregistrée entre les deux modèles ( $M_{ab0.1}$  et  $M_{ab0.75}$ ) est de 12,65 %. Au niveau du graphe (7.21.b) en été, l'écart marqué entre les deux modèles ( $M_{ab0.1}$  et  $M_{ab0.75}$ ) est de 4 %.

La température ambiante simulée pendant une année dans les trois modèles est illustrée dans la figure 7.22.



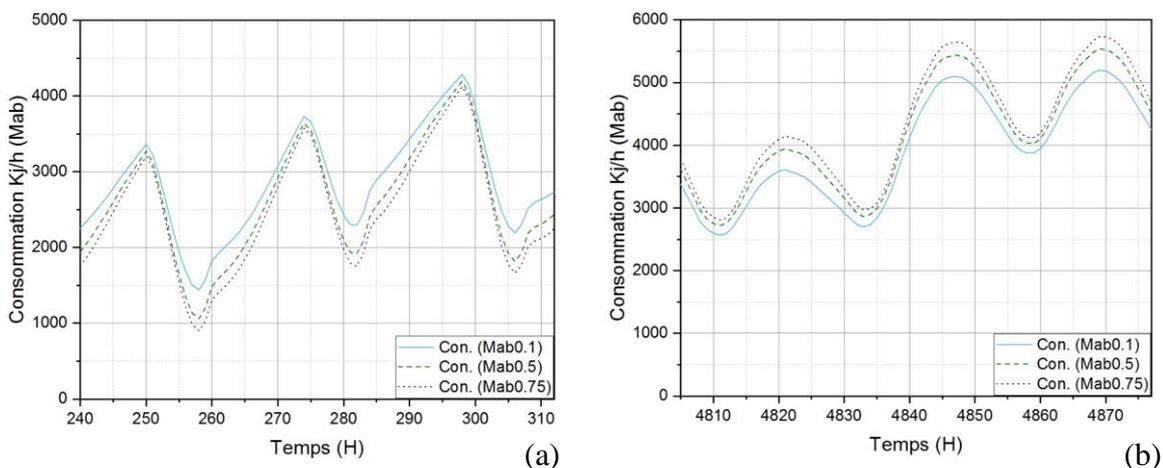
**Figure 7.22 :** Graphe de températures ambiantes simulées pendant une année du ( $M_{ab}$ )

(Source : Auteur, 2017)

Globalement, on remarque que la température ambiante du modèle ( $M_{ab0.75}$ ) est très élevée pendant toute l'année notamment durant la période chaude ce qui explique le rôle de la grande absorption des surfaces sur l'augmentation des ambiances thermiques. Par contre, la température ambiante du modèle ( $M_{ab0.1}$ ) est très basse durant toute l'année par rapport au premier modèle vu la faible absorption de ses surfaces. La réduction de l'absorption des surfaces (du  $M_{ab0.75}$  à  $M_{ab0.1}$ ) nous a permis de minimiser la température ambiante ( $T_a$ ) de 3,18% en été.

Les surfaces à faible absorption (couleur claire et texture lisse) affectent le fonctionnement thermique de l'enveloppe d'une grande manière. A travers la réduction de l'énergie solaire absorbée on peut éviter l'accumulation de la chaleur dans les deux surfaces de la façade qui optimise l'ambiance thermique tout en diminuant les besoins énergétiques (Kontoleon et al., 2007 ; Uemoto et al., 2010 ; Ibañez-Puy et al., 2017).

Les besoins énergétiques pour garantir une ambiance thermique entre 20 et 25 °C sont représentés dans la figure 7.23 (durant trois jours d'hiver "7.23.a" et trois jours d'été "7.23.b").



**Figure 7.23 :** Graphes des besoins énergétiques durant trois jours d'hiver et d'été du ( $M_{ab}$ )  
(Source : Auteur, 2017)

On remarque que l'augmentation de l'absorption des surfaces des façades a deux impacts contradictoires selon la saison. Pendant la période froide (7.23.a), l'augmentation de l'absorption (du  $M_{ab0.1}$  à  $M_{ab0.75}$ ) a permis de réduire les besoins de chauffage dans les pics froids de 3,86 %. Durant la période chaude (7.23.b), cette augmentation de l'absorption de (0,1) à (0,75) a engendré l'augmentation des charges de la climatisation de 9,27 %. Ces résultats affirment que l'absorption affecte les charges de chauffage et de la climatisation. Les valeurs des besoins énergétiques obtenues restent assez faibles vu les simples matériaux utilisés dans

la simulation. Il existe des revêtements frais qui ont un grand impact sur la réduction de la consommation énergétique telles que les peintures isolantes avec une grande réflectance solaire et une émittance thermique élevée (Revel et al., 2014b).

Les résultats obtenus nous ont donné une idée sur l'importance du choix de l'absorption des surfaces des façades et leurs grands impacts sur la température surfacique et ambiante ainsi que la consommation énergétique. Il faut prendre en considération les spécificités climatiques de la région pour l'obtention d'un comportement adéquat.

L'étude numérique confirme l'importance de l'absorption des surfaces des façades (choix des couleurs et des textures). Sur le plan thermique, la diminution de l'absorption de la façade affecte le fonctionnement thermique de l'enveloppe selon la saison. Elle permet de réduire la température surfacique externe ( $T_{se}$ ) de 8 °C (15,65 %) en été et jusqu'à 19,7 °C (57,44 %) en hiver. Cette réduction influe sur la température surfacique interne ( $T_{si}$ ) de 4 % en été et jusqu'à 12,65 % en hiver. Par la suite, une réduction de la température ambiante ( $T_a$ ) a été enregistrée de 3,18 % en été et de 7,04 % en hiver. Ces dernières se répercutent sur les besoins énergétiques avec une réduction de 9,27 % en été.

Ces résultats expliquent le grand impact des propriétés surfaciques des façades et leurs importances sur l'amélioration du confort thermique intérieur et la réduction de la consommation énergétique. Un choix adéquat de la couleur et de la texture avec une grande réflexion solaire et une émittance thermique élevée influent d'une manière positive sur le comportement thermique et l'efficacité énergétique des constructions dans un climat chaud et aride.

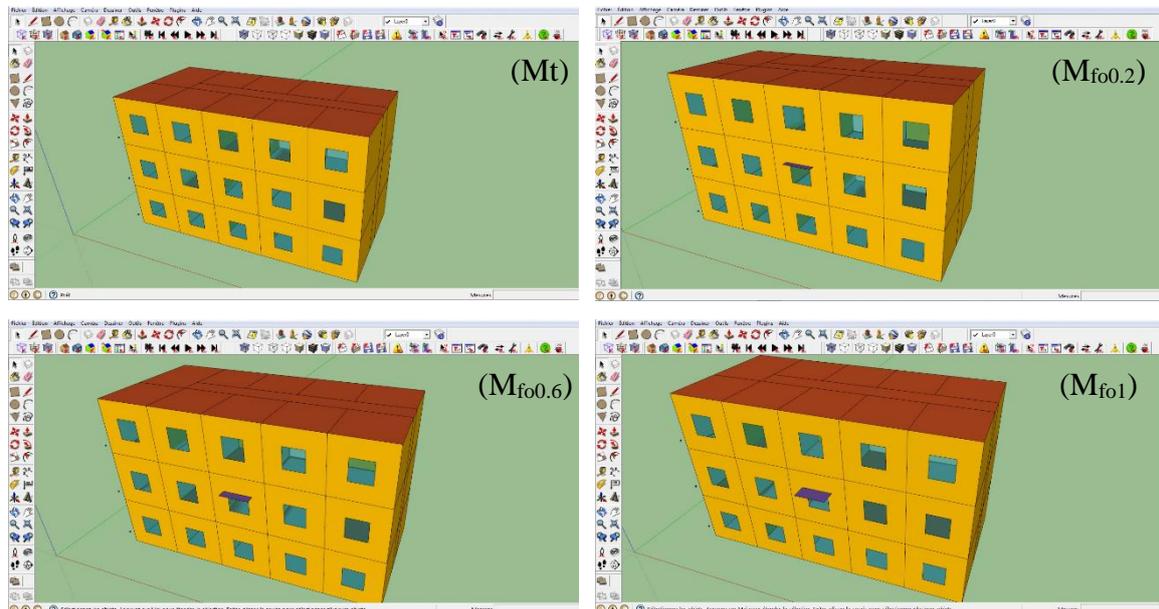
### **VII.2.3. Étude de l'impact du facteur d'ombrage des ouvertures**

Les protections solaires constituent un élément très important dans les façades particulièrement celles les plus exposées aux rayonnements solaires. Cette composante a un rôle protecteur, elle protège les ouvertures contre les rayonnements solaires et a une influence sur le comportement thermique de la construction en fonction de plusieurs paramètres.

#### **VII.2.3.1. Présentation du modèle numérique et le protocole de la simulation**

Afin d'étudier l'influence des protections solaires (facteur d'ombrage des ouvertures) sur le fonctionnement thermique des constructions situées dans un climat chaud et aride, six modèles numériques ont été élaborés. Le premier modèle a été utilisé comme un modèle témoin ( $M_t$ ) sans protection solaire (facteur d'ombrage  $F_o = 0$ ). Les autres modèles ( $M_{f_o}$ ) relatifs aux

impacts du facteur d'ombrage sont similaires uniquement au niveau des protections solaires externes avec des facteurs d'ombrages différents respectivement ( $M_{fo0.2}$ ), ( $M_{fo0.4}$ ), ( $M_{fo0.6}$ ), ( $M_{fo0.8}$ ) et ( $M_{fo1}$ ). La figure 7.24 présente quelques modèles réalisés.



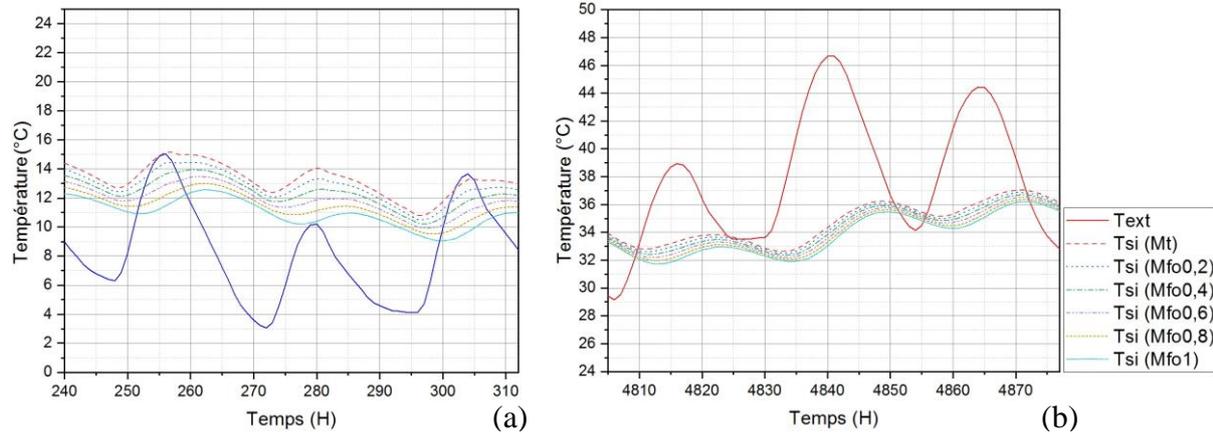
**Figure 7.24 :** La géométrie de quelques modèles relatifs à l'étude du facteur d'ombrage ( $M_{fo}$ )  
(Source : Auteur, 2017)

Les mêmes scénarios exploités dans les modèles précédents ont été introduits (infiltration, gains internes, équipements, nombre de personnes et leurs activités) mais avec différents facteurs d'ombrage ("0", "0.2", "0.4", "0.6", "0.8" et "1"). Le protocole de la simulation détaillé et la validation du modèle numérique ont été traités dans la partie (VII.2.1.1. et VII.2.1.2.).

### VII.2.3.2. Résultat de l'impact du facteur d'ombrage des ouvertures

Les températures surfaciques internes simulées sont représentées dans la figure 7.25 où (7.25.a) représente les trois jours d'hiver et (7.25.b) les trois jours d'été.

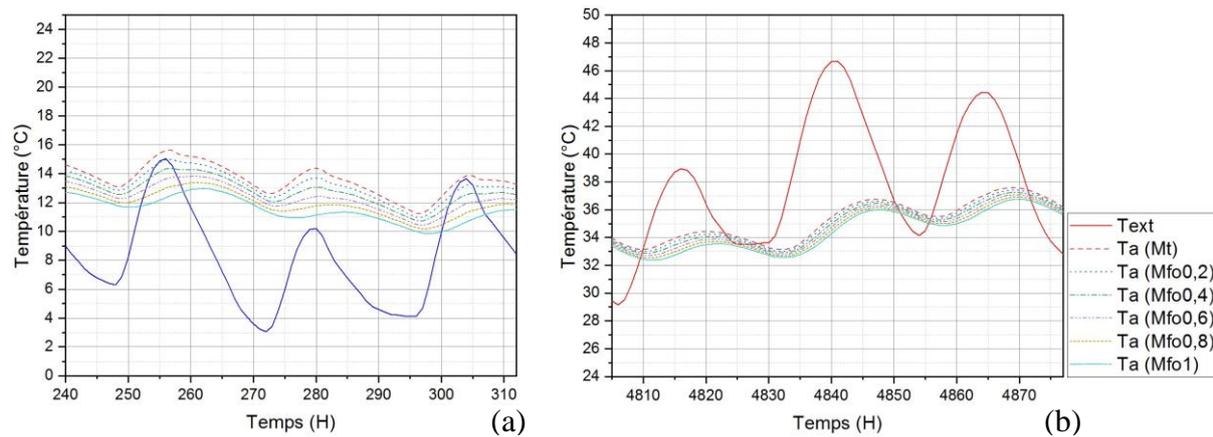
On remarque que chaque augmentation du facteur d'ombrage engendre une réduction des températures surfaciques internes des murs ( $T_{si}$ ) vue la diminution de la quantité des rayonnements solaires infiltrés à l'intérieur de l'espace. Les grandes réductions ont été enregistrées durant la période froide avec un écart maximale de 3,7 °C entre le modèle témoin (Mt) et le modèle ( $M_{fo1}$ ). La valeur de réduction peut atteindre jusqu'à 1,3 °C pendant la période chaude.



**Figure 7.25 :** Graphes de températures superficielles internes simulées du modèle ( $M_{fo}$ )

(Source : Auteur, 2017)

L'augmentation du facteur d'ombrage influe sur la température superficielle interne ainsi que la température ambiante du local. La figure 7.26 illustre les températures ambiantes simulées durant trois jours d'hiver (7.26.a) et trois jours d'été (7.26.b).

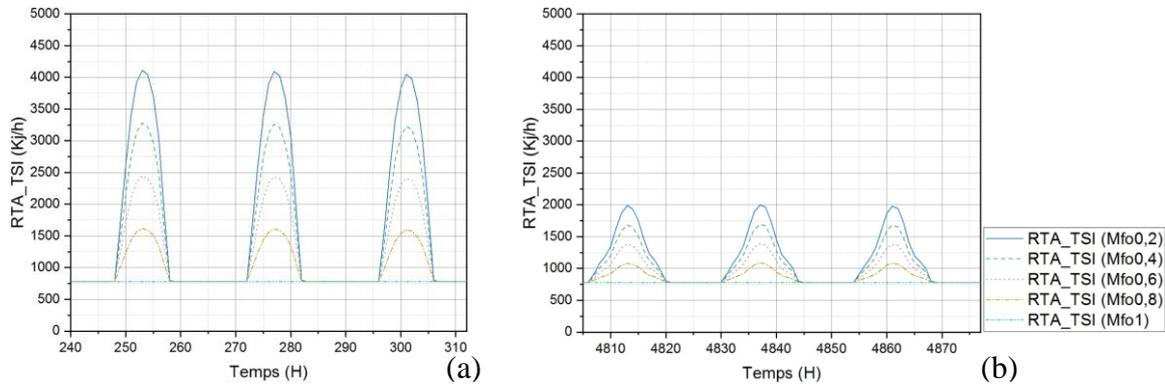


**Figure 7.26 :** Graphes de températures ambiantes simulées du modèle ( $M_{fo}$ )

(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que l'augmentation du facteur d'ombrage influe directement sur les valeurs des températures ambiantes particulièrement pendant la période hivernale. L'augmentation du facteur d'ombrage de (0) à (1) entre le modèle témoin (Mt) et le modèle ( $M_{fo1}$ ) engendre une réduction de la température ambiante ( $T_a$ ) jusqu'à 3,3 °C pendant l'hiver. Par contre, une réduction de 1,2 °C de ( $T_a$ ) a été enregistrée pendant l'été. Pendant la période froide, le modèle témoin présente un bon comportement thermique par rapport au modèle ( $M_{fo1}$ ) car il bénéficie au maximum des apports solaires mais le cas contraire durant la période estivale.

La figure 7.27 présente le rayonnement total absorbé (RTA\_Tsi) ou transmis sur toute la surface intérieure de l'Airnode (comprend les gains solaires, la chaleur radiative, les gains radiatifs internes et les gains de parois) où le graphe (7.27.a) présente les trois jours d'hiver et le graphe (7.27.b) les trois jours d'été.

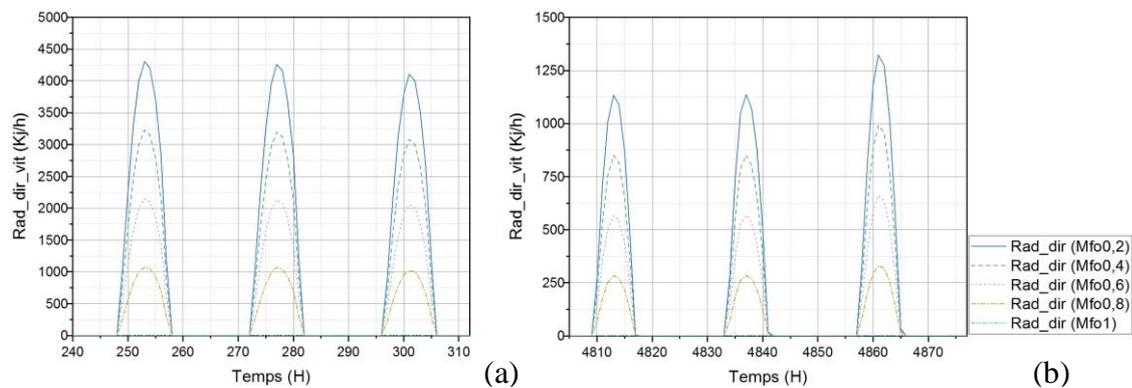


**Figure 7.27** : Graphes du rayonnement total absorbé du modèle ( $M_{fo}$ )

(Source : Auteur, 2017)

On constate que les protections solaires ont une grande influence sur les valeurs du rayonnement total absorbé (RTA\_Tsi) en particulier durant l'hiver. La différence maximale enregistrée pendant la période hivernale entre le modèle ( $M_{fo0,2}$ ) et le modèle ( $M_{fo0,8}$ ) peuvent atteindre jusqu'à 2500 (Kj/h) et de 3330 (Kj/h) entre le modèle ( $M_{fo0,2}$ ) et le modèle ( $M_{fo1}$ ). En revanche, pendant l'été, la différence maximale enregistrée entre le modèle ( $M_{fo0,2}$ ) et le modèle ( $M_{fo0,8}$ ) atteint jusqu'à 907,14 (Kj/h) et de 1209,52 (Kj/h) entre le modèle ( $M_{fo0,2}$ ) et le modèle ( $M_{fo1}$ ). Ces valeurs confirment que le changement du facteur d'ombrage (l'intégration des protections solaires) influe d'une manière considérable sur plusieurs paramètres entre autre le rayonnement total absorbé.

Les valeurs des radiations solaires directes simulées dans les différents modèles du facteur d'ombrage ( $M_{fo}$ ) sont représentées dans la figure 7.28.

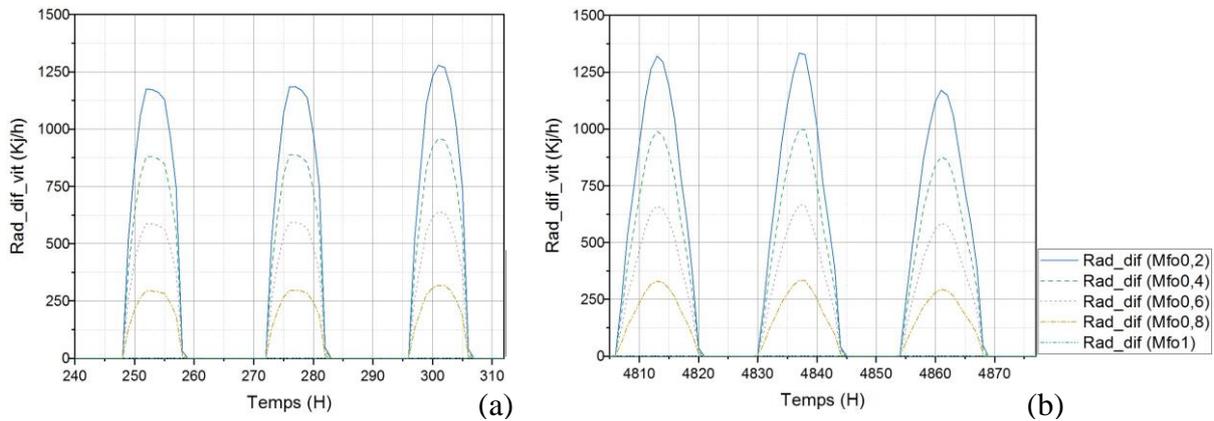


**Figure 7.28** : Graphes des radiations solaires directes du modèle ( $M_{fo}$ )

(Source : Auteur, 2017)

On remarque que l'augmentation du facteur d'ombrage influe directement sur la valeur des radiations solaires directes en particulier pendant l'hiver ou des grandes valeurs ont été enregistrées vu la hauteur angulaire faible du soleil durant la période hivernale. La différence maximale notée entre le modèle ( $M_{fo0,2}$ ) et le modèle ( $M_{fo0,8}$ ) est de 3226,42 (Kj/h) pendant l'hiver. Par contre, la différence maximale enregistrée entre ces deux modèles durant l'été est de 991,57 (Kj/h) à cause de la hauteur angulaire élevée du soleil durant cette période.

La figure 7.29 illustre les graphes des radiations solaires diffuses simulées dans les différents modèles du facteur d'ombrage ( $M_{fo}$ ).

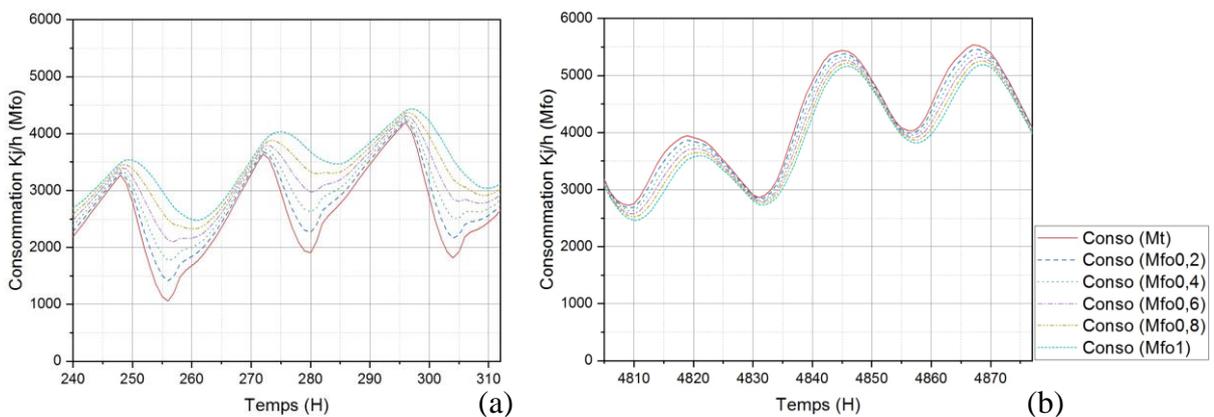


**Figure 7.29 :** Graphes des radiations solaires diffuses du modèle ( $M_{fo}$ )

(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que l'augmentation du facteur d'ombrage a une influence sur la réduction de radiations solaires diffuses durant les deux périodes hivernale et estivale.

Les besoins énergétiques afin d'assurer une ambiante thermique entre 20 et 25 °C sont représentés dans la figure 7.30. Le graphe (7.30.a) présente les trois jours d'hiver et le graphe (7.30.b) les trois jours d'été.



**Figure 7.30 :** Graphes des besoins énergétiques du modèle ( $M_{fo}$ ) (Source : Auteur, 2017)

On remarque que l'augmentation du facteur d'ombrage influe sur les besoins énergétiques selon la saison. Pendant la période froide, l'augmentation du facteur d'ombrage influe négativement à travers l'augmentation des besoins énergétiques exploités pour le chauffage à cause de la réduction des rayonnements solaires (les apports) transmis vers l'intérieur. Par contre, durant la période estivale, l'augmentation du facteur d'ombrage influe d'une manière positive sur la réduction des besoins énergétiques exploités pour la climatisation.

Globalement, le facteur d'ombrage a une influence sur la température surfacique interne des parois ainsi que la température ambiante de l'espace sous l'influence de la quantité des rayonnements solaires directs et diffus qui pénètrent à l'intérieur ce qui influe sur le comportement thermique du bâtiment et ses besoins énergétiques.

### **VII.3. Optimisation paramétrique des éléments de la façade**

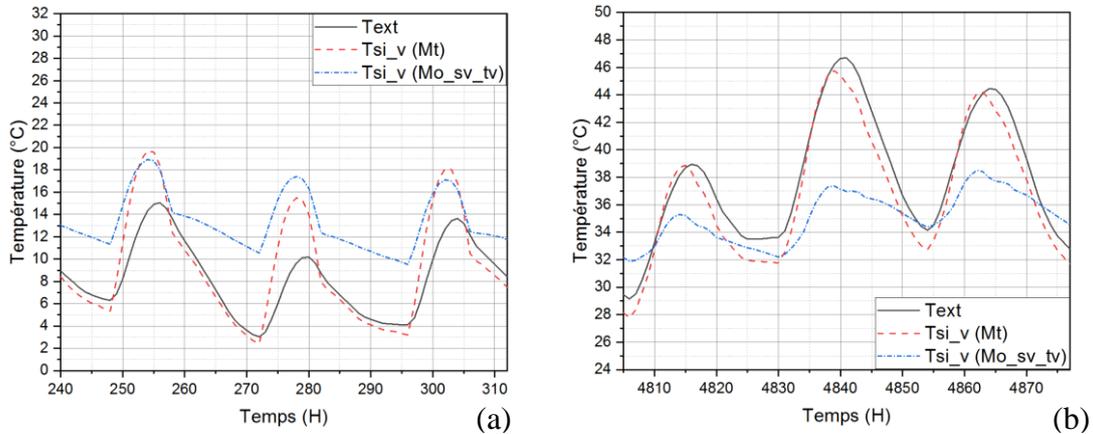
Le travail d'optimisation porte sur l'amélioration de quelques paramètres respectivement : la surface vitrée, le type de vitrage, le facteur d'ombrage et l'absorption de la surface opaque extérieure de la façade. La première optimisation est axée sur l'amélioration de la surface vitrée et le type de vitrage dans le même modèle (Mo-sv-tv). Le deuxième modèle optimisé relatif au facteur d'ombrage a été élaboré sur la base du premier modèle optimisé afin d'élaborer le modèle (Mo-sv-tv-fo) qui est par la suite optimisé du point de vue de l'absorption de la surface extérieure dont l'objectif est d'aboutir à un modèle optimisé final (Mo-sv-tv-fo-ab) en croisant les variantes les plus favorables de chaque modèle.

#### **VII.3.1. L'optimisation de la surface vitrée et le type de vitrage**

Après l'analyse des résultats obtenus relatifs à l'impact de la surface vitrée et le type de vitrage, un modèle optimisé (Mo-sv-tv) a été élaboré. L'optimisation d'un modèle assurant à la fois la surface vitrée la plus optimale et le type de vitrage le plus performant (basse émissivité avec gaz argon) aidera les architectes à opter pour les choix conceptuelles les plus adaptés aux conditions de confort thermique dans les régions chaudes et arides.

Le modèle optimisé (Mo-sv-tv) obtenu en croisant les variantes les plus favorables soient: le meilleur pourcentage de la surface vitrée (variante Msv20%) et le type de vitrage le plus efficace (double vitrage basse émissivité avec gaz Mdv\_bg). Il a été comparé avec un modèle témoin (Mt) qui a une surface vitrée de 50 % en vitrage simple. L'objectif est de déterminer l'impact de l'optimisation du ratio et du type de vitrage sur le confort thermique et la performance énergétique des bâtiments.

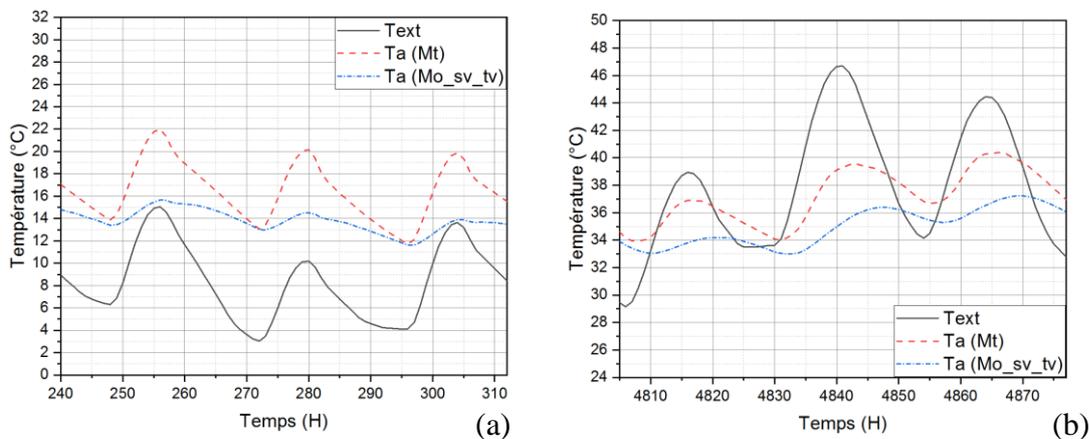
Les températures surfaciques internes (des vitrages) simulées sont présentées dans la figure 7.31 (le graphe "7.31.a" durant les trois jours les plus froids et le graphe "7.31.b" durant les trois jours les plus chauds).



**Figure 7.31** : Graphes de températures surfaciques internes des vitrages simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo\_sv\_tv)] (Source : Auteur, 2017)

Pendant la période froide (7.31.a), on constate que la courbe des températures surfaciques internes [Tsi\_v (Mo\_sv\_tv)] du modèle optimisé présente moins de fluctuations (faible amplitude thermique) en comparaison avec celle du modèle témoin [Tsi\_v (Mt)] qui enregistre de grandes variations et des pics de température (une grande amplitude thermique journalière). De même, pendant la période chaude (7.31.b), on voit clairement que le modèle optimisé contribue à la réduction de la température surfacique interne du vitrage de 7,2 °C (soit 16,28%) par rapport au modèle témoin. Ces résultats sont le fait des caractéristiques thermiques du vitrage (basse émissivité et gaz argon).

La figure 7.32 présente les températures ambiantes simulées dans les deux modèles.

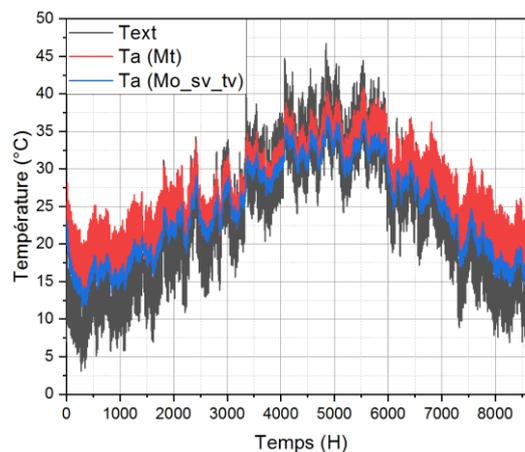


**Figure 7.32** : Graphes de températures ambiantes simulées du [(Mt) et (Mo\_sv\_tv)] (Source : Auteur, 2017)

La diminution des grands écarts de la température surfacique interne du vitrage influe directement et de manière favorable sur la température intérieure et implicitement, sur le confort thermique des usagers. Ceci a été confirmé par la température ambiante simulée durant la période froide (le graphe 7.32.a) et la période chaude (le graphe 7.32.b).

Les résultats obtenus relèvent un meilleur comportement thermique dans le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv) comparativement au modèle témoin. Pendant la période froide, le modèle optimisé ignore les grandes fluctuations des températures et assure un régime assez stable avec une diminution jusqu'à 6,3 °C (soit 28,76 %) et élimine la grande hausse des températures. Durant la période chaude, le modèle optimisé assure la réduction de la température ambiante (Ta) jusqu'à 3,7 °C avec un pourcentage de 9,36 % qui influe favorablement sur la sensation des usagers.

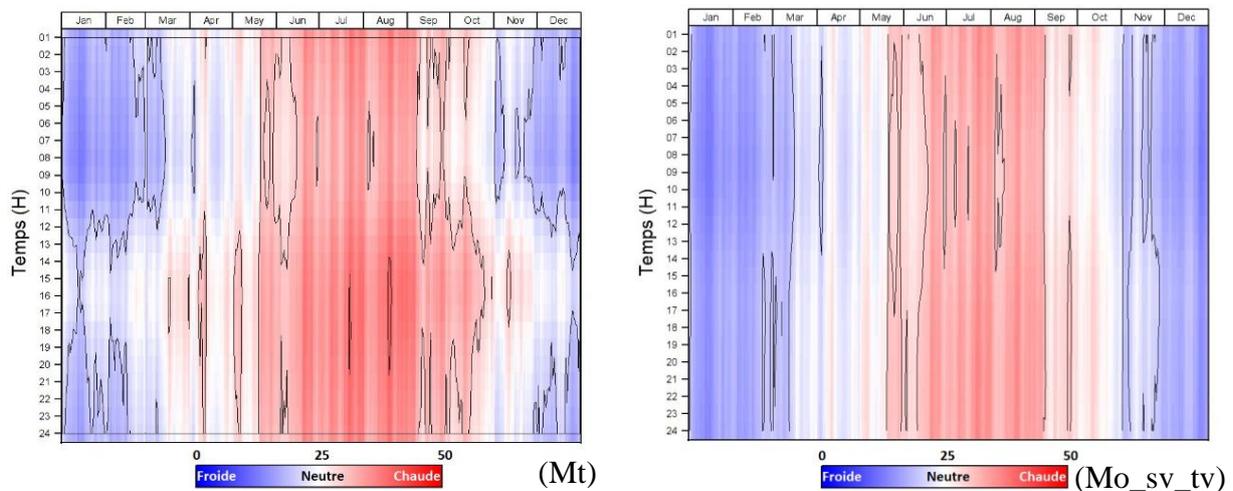
Le graphe 7.33 illustre les températures ambiantes simulées pendant une année afin d'observer le régime pendant chaque saison.



**Figure 7.33 :** Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [Ta (Mt) et Ta (Mo\_sv\_tv)] (Source : Auteur, 2017)

Les résultats montrent que les valeurs de la température ambiante du modèle optimisé [Ta (Mo\_sv\_tv)] sont inférieures à celles du modèle témoin [Ta (Mt)] durant toute l'année. Cette diminution de la température est le fait des caractéristiques dimensionnelles et matérielles du vitrage (un ratio faible de 20 % et un vitrage performant). Le modèle témoin, révèle de grandes fluctuations qui ont été enregistrées au niveau de la température ambiante simulée avec des valeurs très élevées, même pendant la période froide. Par contre, le modèle optimisé présente dans l'ensemble un bon comportement thermique caractérisé par de faibles fluctuations journalières.

Les isothermes simulées pendant une année pour les deux modèles permettent de visionner les changements journaliers des températures pendant chaque mois (Figure 7.34).



**Figure 7.34 :** Isothermes simulées du (Mt) et (Mo\_sv\_tv) pendant une année

(Source : Auteur, 2017)

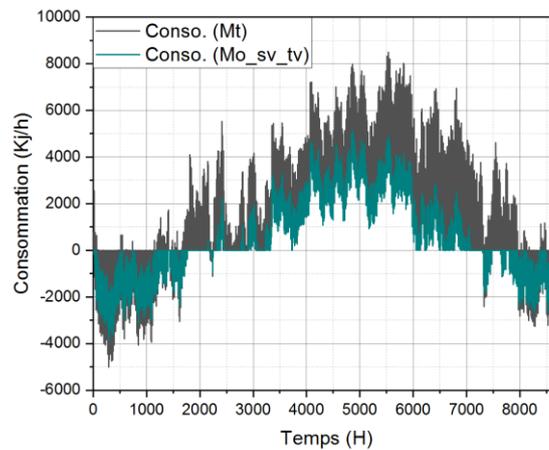
Après une lecture globale du comportement thermique des deux modèles, on constate que (Mo\_sv\_tv) a un régime de température plus stable que (Mt) durant chaque période (froide, chaude, neutre ou intermédiaire) et aussi durant le mois et la journée. De faibles amplitudes thermiques journalières sont enregistrées et les changements de températures se font d'une manière progressive dans le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv). Au contraire, dans le cas de (Mt) de grandes amplitudes thermiques journalières et des fluctuations brutales des températures sont constatées.

Concernant les valeurs des températures, il est clair que les températures du modèle optimisé sont plus favorables que le modèle témoin en particulier pendant la période estivale où les valeurs des températures diminuent. Les changements de la température ambiante hors de la plage de confort augmentent systématiquement la consommation énergétique.

La figure 7.35 présente les graphes relatifs aux besoins énergétiques nécessaires pour assurer une température ambiante dans la plage du confort thermique (supérieure à 20 °C en hiver et inférieure à 25 °C en été).

Le graphe confirme la performance du modèle optimisé (Mo\_sv\_tv) par rapport au modèle témoin (Mt). Ce modèle optimisé a des besoins énergétiques plus bas que ceux du modèle témoin particulièrement pendant la période chaude.

Durant les périodes extrêmes (les pics de froid et de chaleur), le modèle optimisé minimise, respectivement, les besoins en chauffage jusqu'à 23,28 % et les besoins de la climatisation jusqu'à 39,94 %.



**Figure 7.35 :** Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo\_sv\_tv)

(Source : Auteur, 2017)

L'optimisation du ratio et du type de vitrage a des impacts positifs sur la réduction des besoins énergétiques en particulier pendant la période chaude qui peut aboutir jusqu'à 40 % de réduction.

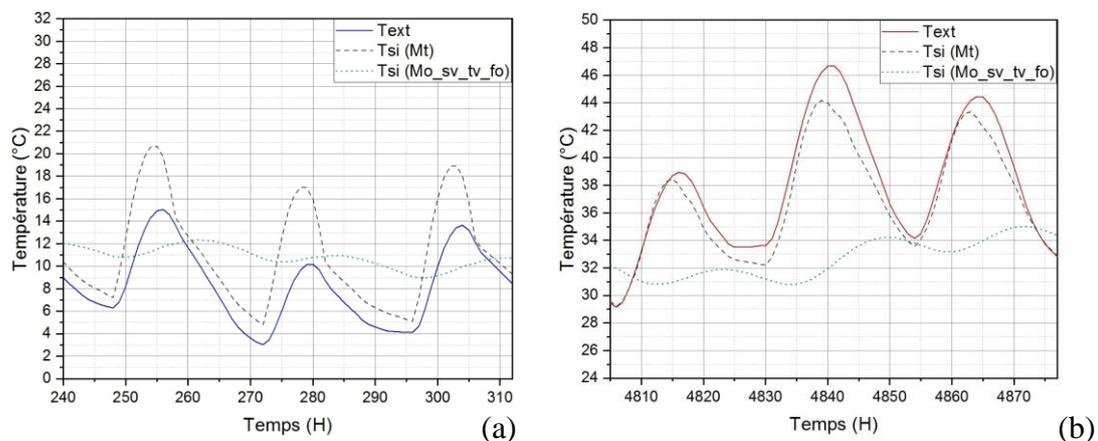
L'analyse de toutes ces données confirme que le taux d'ouverture (ratio) et le type de vitrage ont un impact considérable sur le fonctionnement thermique du bâtiment, le confort thermique des occupants et la consommation énergétique. Cet impact est néanmoins tributaire d'autres critères qu'il faut prendre en considération comme le type de climat et les spécificités du contexte.

Les paramètres de la façade interviennent ensemble et exigent d'être considérés comme des éléments déterminants pour sa conception afin d'assurer la performance du bâtiment et le confort thermique de l'utilisateur ainsi que la performance énergétique de la construction. De là s'impose la nécessité de l'optimisation d'autres paramètres (ombrage, surface opaque, etc.). Dans cette perspective, le modèle optimisé développé (Mo\_sv\_tv) a été utilisé comme modèle de base afin d'améliorer d'autres éléments de la façade respectivement le facteur d'ombrage et les propriétés surfaciques de la surface opaque (l'absorption).

### VII.3.2. L'optimisation du facteur d'ombrage

Après l'analyse des résultats obtenus relatifs à l'impact du facteur d'ombrage des ouvertures et sur la base du premier modèle optimisé (Mo\_sv\_tv), un deuxième modèle optimisé qui englobe la meilleure surface vitrée, le type de vitrage le plus performant a été élaboré tout en ajoutant un facteur d'ombrage (Mo\_sv\_tv\_fo). Le facteur d'ombrage exploité dans ce modèle est d'une valeur de 0,8 (la protection assurée).

La figure 7.36 illustre les températures surfaciques internes des murs simulées. Le graphique (7.36.a) présente les trois jours d'hiver et le graphique (7.36.b) les trois jours d'été.

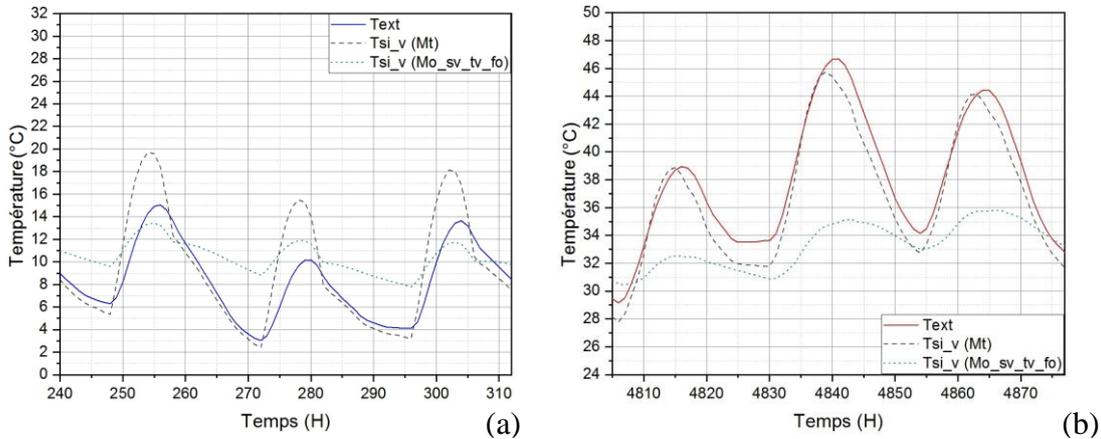


**Figure 7.36 :** Graphes de températures surfaciques internes des murs simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo)] (Source : Auteur, 2017)

Durant la période froide (le graphique 7.36.a), on remarque que les valeurs des températures surfaciques internes des murs du modèle optimisé sont au-dessous des températures du modèle témoin. Ainsi, le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo) est caractérisé par un comportement thermique assez stable. Par contre, le comportement thermique du modèle témoin (Mt) est caractérisé par de grandes variations.

Pendant la période chaude (le graphique 7.36.b), on voit clairement que la courbe de la température surfacique interne des murs du modèle optimisé (Tsi) est plus stable par rapport au modèle témoin (Mt) qui est caractérisé par des variations très importantes. Les valeurs des températures du modèle optimisé sont inférieures aux valeurs des températures du modèle témoin ainsi que par rapport à la température extérieure. L'écart maximal enregistré entre (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo) est de 12,5 °C avec un pourcentage de réduction de 28,34 %.

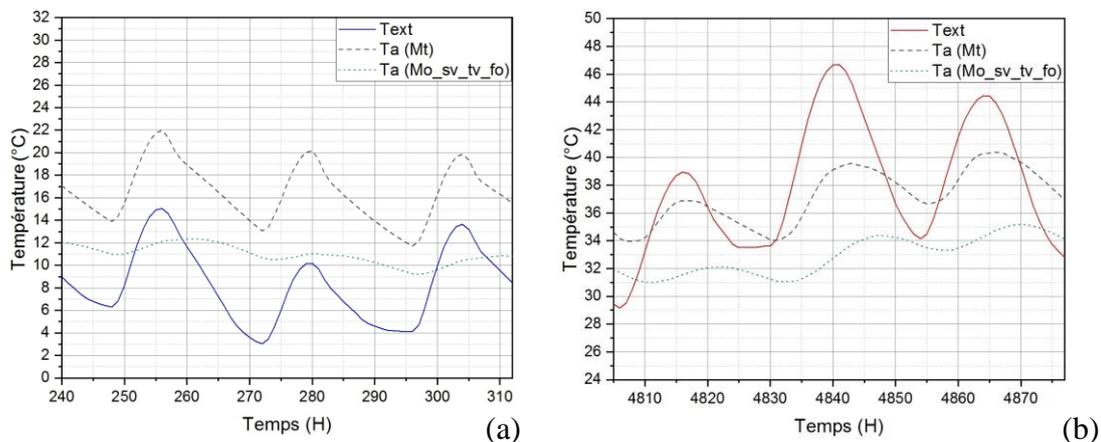
Les températures surfaciques internes (des vitrages) simulées sont présentées dans la figure 7.37 (le graphe "7.37.a" durant les trois jours les plus froids et le graphe "7.37.b" durant les trois jours les plus chauds).



**Figure 7.37 :** Graphes de températures surfaciques internes des vitrages simulées dans les deux modèles [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo)] (Source : Auteur, 2017)

À propos des températures surfaciques internes des vitrages, on constate que le modèle optimisé a un bon fonctionnement thermique par rapport au modèle témoin vu les éléments améliorés (le type de vitrage et la protection contre les rayonnements solaires). La différence maximale enregistrée entre le modèle (Mt) et le modèle (Mo\_sv\_tv\_fo) est de 11 °C avec un pourcentage de réduction de 24 %. Les variations des températures surfaciques et les éléments optimisés influent directement sur les températures ambiantes.

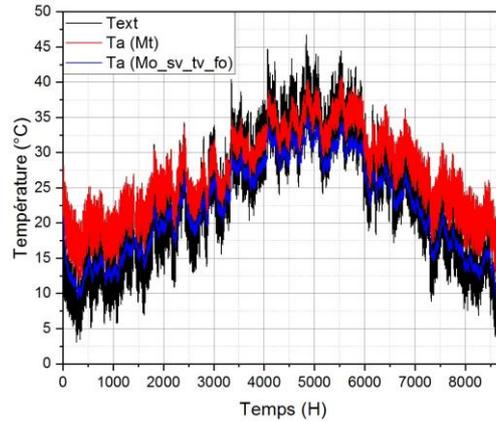
Les valeurs des températures ambiantes simulées dans les deux modèles (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo) sont représentées dans la figure 7.38. Le graphe (7.38.a) présente les trois jours d'hiver et le graphe (7.38.b) les trois jours d'été.



**Figure 7.38 :** Graphes de températures ambiantes simulées du [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo)] (Source : Auteur, 2017)

Généralement, le comportement thermique du modèle optimisé est plus stable que le modèle témoin durant les deux périodes. Le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo) a permis de réduire la température ambiante en été jusqu'à 6,4 °C (un pourcentage de 16,54 %).

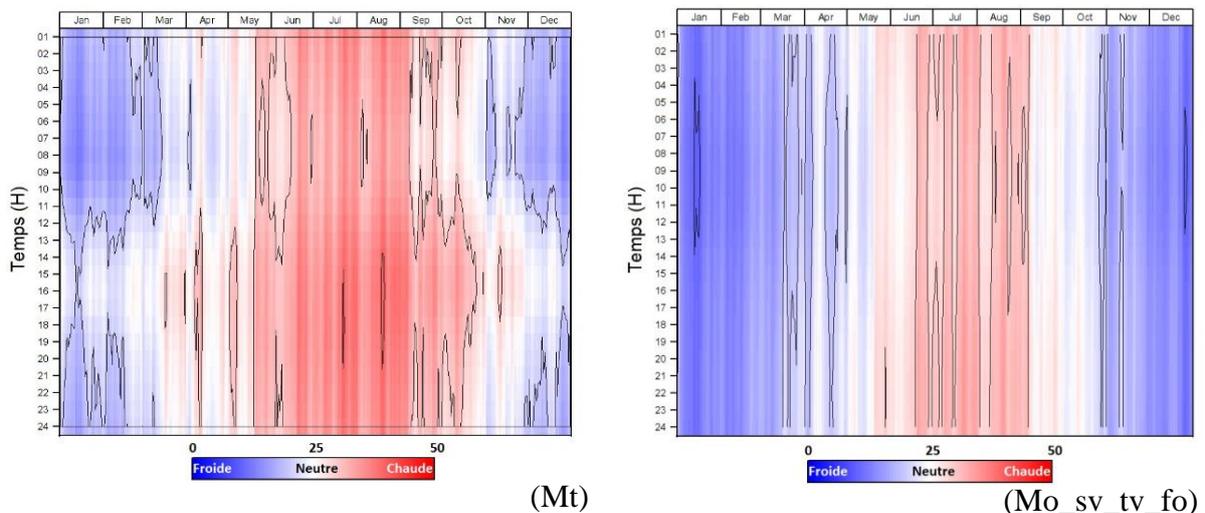
La figure 7.39 présente les températures ambiantes simulées dans les deux modèles (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo) pendant une année.



**Figure 7.39 :** Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo)] (Source : Auteur, 2017)

Le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo) est caractérisé par de faibles variations des températures ambiantes durant toute l'année sous l'influence des paramètres optimisés. En revanche, au niveau du modèle témoin (Mt), de grandes variations ont été enregistrées pendant toute l'année ce qui engendre des situations d'inconfort thermique.

Les isothermes simulées pendant une année pour les deux modèles sont représentés dans la figure 7.40.



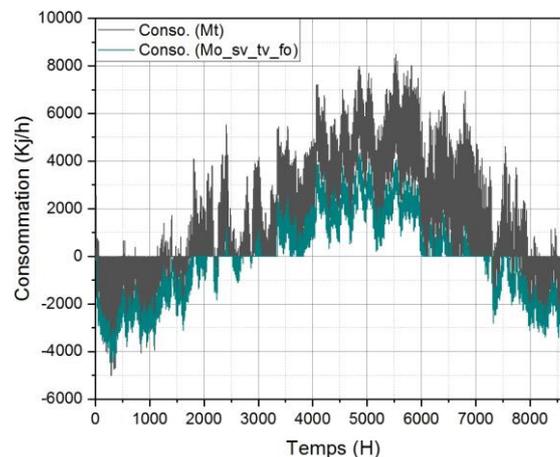
**Figure 7.40 :** Isothermes simulées du (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo) pendant une année

(Source : Auteur, 2017)

La lecture des isothermes des deux modèles a permis de constater que le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo) présente un régime de température plus stable que le modèle témoin (Mt) pendant toute l'année. En plus du comportement le plus stable du modèle optimisé, des grandes réductions des températures ambiantes ont été enregistrées pendant la période estivale.

Globalement, le modèle optimisé est caractérisé par un comportement thermique stable avec de faibles fluctuations des températures. Par contre, dans le modèle témoin de grands changements des valeurs des températures ont été enregistrés avec un comportement thermique instable et très varié.

Les besoins énergétiques nécessaires pour assurer une température ambiante dans la plage du confort thermique (supérieure à 20 °C en hiver et inférieure à 25 °C en été) sont illustrés dans la figure 7.41.



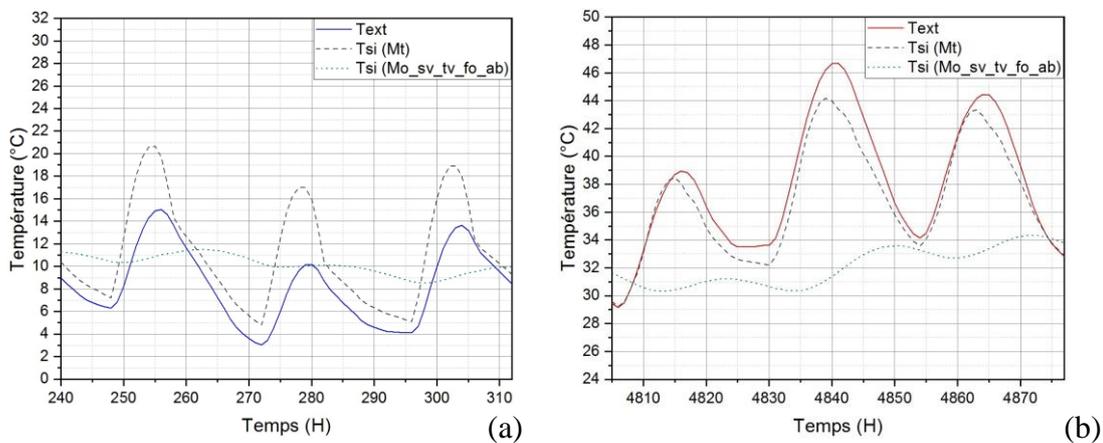
**Figure 7.41** : Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo)  
(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que les grandes valeurs de la consommation énergétique sont relatives au modèle témoin en particulier pendant la période chaude. Les besoins énergétiques du modèle optimisé sont assez élevés pendant la période froide mais le cas contraire est enregistré par rapport à la plus longue période chaude où les besoins énergétiques sont très bas par rapport au modèle témoin. La valeur maximale de la réduction des besoins énergétiques de la climatisation aboutit jusqu'à 4474,16 (Kj/h) avec un pourcentage de réduction de 58,04 % ce qui influe positivement sur la performance énergétique de la construction.

### VII.3.3. L'optimisation de l'absorption de la surface extérieure

Sur la base du deuxième modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo) et après l'analyse des résultats obtenus relatifs à l'impact des propriétés surfaciques extérieures des surfaces opaques (l'absorption), un troisième modèle (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab) a été élaboré tout en optimisant la performance de sa surface extérieure. La valeur de l'absorption de la surface extérieure utilisée dans ce modèle est de 0,2 (une faible absorption représente une surface avec une couleur claire et une texture lisse).

La figure 7.42 illustre les valeurs des températures surfaciques internes des murs simulées où le graphe (7.42.a) révèle les trois jours les plus froids et le graphe (7.42.b) les trois jours les plus chauds.

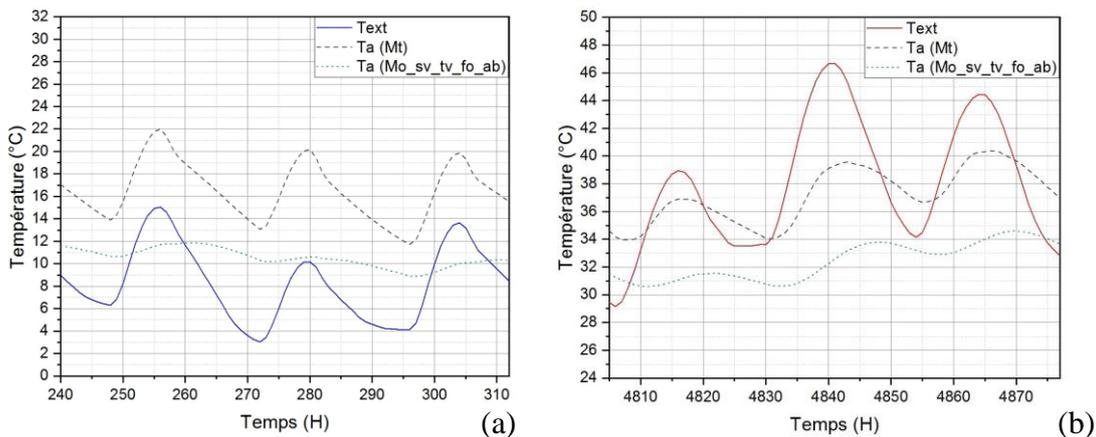


**Figure 7.42 :** Graphes de températures surfaciques internes des murs simulés dans les deux modèles [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab)] (Source : Auteur, 2017)

Durant la période froide (graphe 7.42.a), on constate que les valeurs des températures surfaciques internes du modèle optimisé sont inférieures par rapport au modèle témoin mais elles ont un fonctionnement thermique stable par rapport au (Mt). Par contre, pendant la période chaude (graphe 7.42.b), on remarque que la courbe de la température surfacique interne du modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab) présente un comportement thermique plus stable (caractérisé par de faibles fluctuations) par rapport au modèle témoin (Mt). Des écarts très importants ont été enregistrés entre les deux modèles où le modèle optimisé a permis de réduire la température surfacique interne du mur jusqu'à 13 °C avec un pourcentage de réduction de 29,48 % sous l'influence des paramètres optimisés (particulièrement l'ombrage et la faible absorption de la surface extérieure).

Les optimisations effectuées sur les éléments de la façade (surface vitrée, type de vitrage, facteur d'ombrage et l'absorption de la surface extérieure) ont un impact très important sur les valeurs des températures surfaciques internes des murs en particulier pendant la période chaude. Ces impacts influent directement sur les valeurs des températures ambiantes.

La figure 7.43 présente les valeurs des températures ambiantes simulées dans les deux modèles (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab). Le graphe (7.43.a) illustre les trois jours les plus froids et le graphe (7.43.b) les trois jours les plus chauds.



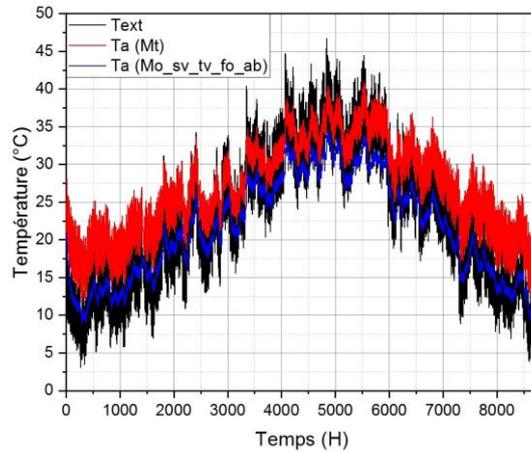
**Figure 7.43 :** Graphes de températures ambiantes simulées du [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab)]

(Source : Auteur, 2017)

On voit clairement que les valeurs des températures ambiantes du modèle optimisé sont inférieures par rapport au modèle témoin pendant les deux périodes. Pendant la période froide (graphe 7.43.a), le modèle optimisé a un comportement thermique stable sans grands changements mais les valeurs restent assez basses. Par contre, le modèle témoin est caractérisé par des changements très importants des températures ambiantes ce qui engendre des situations d'inconfort thermique.

Pendant la période chaude (graphe 7.43.b), on remarque que le comportement thermique du modèle témoin est très varié avec des valeurs de (Ta) très élevées. En revanche, le modèle optimisé présente un comportement thermique plus stable avec de faible variation des températures ambiantes. Les caractéristiques améliorées du modèle optimisé ont permis de réduire la température ambiante jusqu'à 6,8 °C avec un pourcentage de réduction de 17,57 % par rapport au modèle témoin.

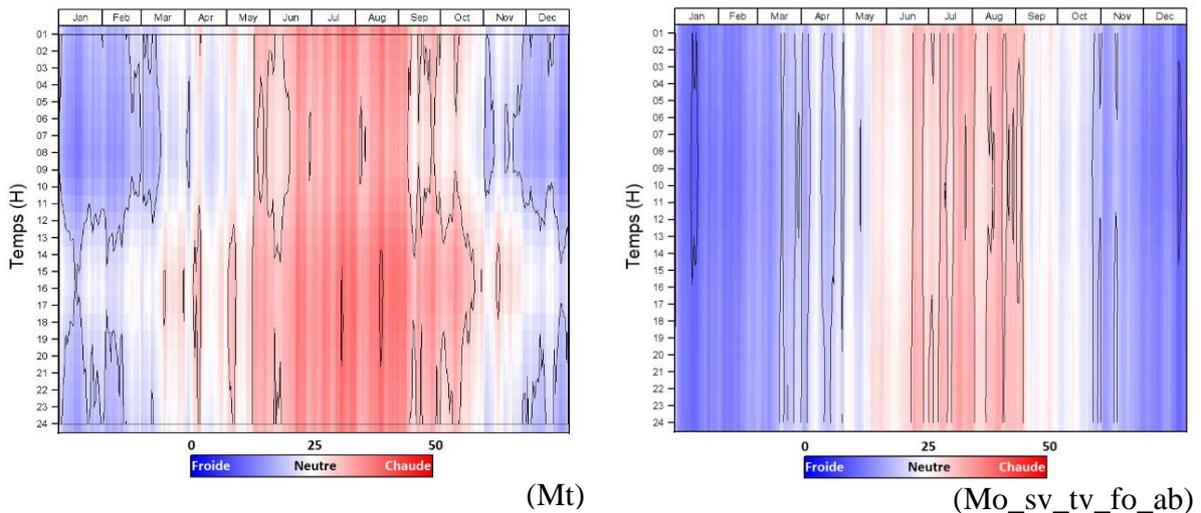
Les valeurs des températures ambiantes simulées dans les deux modèles pendant une année sont représentées dans la figure 7.44.



**Figure 7.44 :** Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [(Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab)] (Source : Auteur, 2017)

Les résultats obtenus relèvent un bon comportement thermique dans le modèle optimisé par rapport au modèle témoin. Ces résultats montrent que les valeurs de la température ambiante du modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab) sont inférieures à celles du modèle témoin (Mt) pendant toute l'année sous l'influence des paramètres optimisés au niveau de la façade.

La figure 7.45 illustre les isothermes simulées dans les deux modèles étudiés (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab) pendant une année.



**Figure 7.45 :** Isothermes simulées du (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab) pendant une année

(Source : Auteur, 2017)

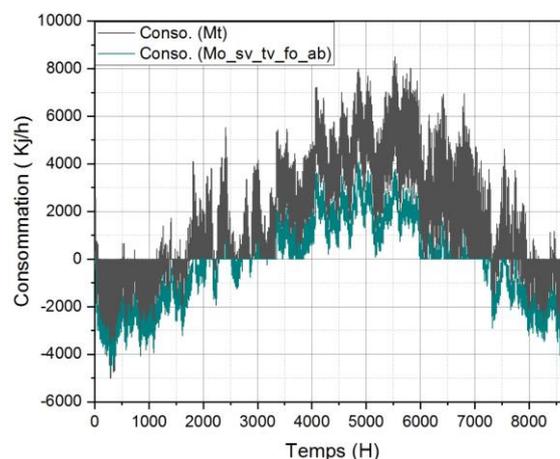
On voit clairement que le bon comportement thermique journalier et saisonnier est celui du modèle optimisé.

Le modèle optimisé (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab) présente un régime de température plus stable par rapport au modèle témoin pendant toute l'année, il est caractérisé par de faibles fluctuations des températures ambiantes ce qui influe positivement sur la sensation et la satisfaction thermique des occupants. Par contre, le modèle témoin est caractérisé par des fluctuations brutales des températures ambiantes dans chaque saison ainsi que pendant la même journée ce qui influe négativement sur le comportement thermique des utilisateurs de l'espace.

Les éléments de la façade améliorés dans le modèle optimisé (surface vitrée, type de vitrage, facteur d'ombrage des ouvertures et l'absorption de la surface extérieure) ont une grande influence sur le fonctionnement thermique du bâtiment. Ils ont permis de réduire les valeurs des températures surfaciques internes des murs. Par la suite, ils diminuent les valeurs des températures ambiantes ce qui influe directement sur la sensation et la satisfaction thermique des usagers particulièrement pendant la période chaude.

La lecture des résultats obtenus relatifs aux températures affirme que les températures du modèle optimisé sont plus confortables que le modèle témoin particulièrement pendant la période estivale où les températures diminuent ce qui améliore l'ambiance thermique. Ces variations thermiques ont des impacts sur la consommation énergétique du bâtiment.

La figure 7.46 présente les besoins énergétiques nécessaires pour assurer une température ambiante autour de la plage du confort thermique (supérieure à 20 °C en hiver et inférieure à 25 °C en été).



**Figure 7.46** : Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo\_sv\_tv\_fo\_ab)

(Source : Auteur, 2017)

Pendant la période hivernale, on remarque que les besoins énergétiques des deux modèles sont proches. Par contre, pendant la période chaude (la longue période), les besoins énergétiques

du modèle optimisé sont plus faibles que le modèle témoin vu l'impact positif des éléments optimisés ce qui permet de réduire les températures très élevées et par la suite la demande énergétique de la climatisation. Le modèle optimisé a permis de réduire les besoins énergétiques de la climatisation jusqu'à 4651,96 (Kj/h) avec un pourcentage de réduction de 60,34 %.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité thermique et énergétique du modèle optimisé ce qui influe positivement sur la sensation et la satisfaction thermique des usagers ainsi que la performance énergétique de la construction.

## **Conclusion**

La façade d'un bâtiment représente, par excellence, le lieu où s'opèrent les échanges thermiques entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur. Les attributs et caractéristiques des éléments qui composent la façade influent sur le comportement thermique et l'efficacité énergétique du bâtiment. Après avoir étudié cette partie de l'enveloppe en appliquant plusieurs techniques de recherche, le présent chapitre a été consacré à la présentation du travail effectué sous forme de simulation numérique.

L'étude numérique élaborée sur la façade et ses éléments et attributs a donné une bonne compréhension relative à leurs impacts sur la performance thermique et énergétique d'un bâtiment administratif sous les conditions d'un climat chaud et aride. Les éléments étudiés : la surface vitrée, le type de vitrage, le facteur d'ombrage (les protections) et les propriétés surfaciques. Ainsi, la simulation a confirmé l'effet négatif de l'augmentation de la surface vitrée avec un simple vitrage sur le confort thermique des usagers pendant toute l'année. Pour sa part, le type de vitrage influe sur le fonctionnement thermique du bâtiment. Un double vitrage de basse émissivité avec gaz diminue les gains de chaleur transférés et améliore la température ambiante. À propos du facteur d'ombrage, la protection contre les rayonnements solaires participe considérablement à l'amélioration des conditions thermiques. Concernant la performance de la surface extérieure, la couleur claire et la texture lisse qui ont une absorption faible influent d'une manière appréciable sur la réduction des températures ambiantes tout en minimisant les besoins énergétiques de la climatisation.

Les résultats obtenus, à l'issue de cette recherche, montrent que la maîtrise des éléments de la façade se répercute directement sur l'efficacité thermique et énergétique des constructions. Un choix adéquat de la surface vitrée combiné à un type de vitrage approprié bien protégé avec une faible absorption de la surface opaque améliore considérablement les conditions thermiques intérieures et la performance énergétique du bâtiment.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La façade d'un bâtiment représente la grande surface d'échange thermique entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur. Cette partie de l'enveloppe est considérée comme modulateur thermique et constitue un enjeu majeur aussi bien pour l'architecte que pour l'ingénieur. D'un point de vue thermique et énergétique, la performance de la façade relève de facteurs multiples à la fois conceptuels, matériels et techniques. L'architecte en tant que premier responsable de l'œuvre, doit assumer les impacts de ses décisions conceptuelles et ses choix matériels relatifs à la façade en ce qui est des ambiances thermiques et des dépenses énergétiques de la construction.

Depuis quelques décennies et suite à l'expansion des principes de l'architecture moderne, la façade a été dépouillée de sa dimension climatique. Lors de la conception, il est à déplorer une utilisation aléatoire des éléments de la façade marquée par l'ignorance totale des spécificités climatiques du site et de l'environnement physique ainsi que de la négligence des aspects thermiques et énergétiques. Cette pratique architecturale inappropriée au contexte climatique engendre des ambiances thermiques inconfortables et des constructions énergivores. La présente recherche constitue une contribution dont l'objectif est d'évaluer le comportement thermique des façades des immeubles de bureaux situés dans les zones chaudes et arides (à Biskra) afin de maîtriser et d'optimiser leurs performances thermiques et énergétiques. Pour ce faire, différentes méthodes de recherches ont été exploitées (quantitative et qualitative) afin de bien comprendre les phénomènes thermiques relatifs à la façade, la sensation et la satisfaction thermique des usagers ainsi que la consommation énergétique du bâtiment.

L'étude empirique qui a été effectuée sur des bâtiments administratifs existants à Biskra, a apporté quelques éclaircissements sur les conséquences de l'utilisation de différents éléments de la façade sur son comportement thermique ainsi que la sensation et la satisfaction thermique des occupants. En effet, l'étude sur terrain a démontré le manque de confort thermique intérieur dans les immeubles de bureaux étudiés en particulier pendant la période estivale. En plus, les façades réalisées avec des matériaux lourds présentent un comportement thermique assez stable par rapport aux façades légères. En outre, l'exploitation de grandes surfaces vitrées sans

protections solaires (même en double vitrage) engendre des situations thermiques insupportables. De tels choix architecturaux (double vitrage sans gaz) se sont avérés inefficaces et défectueuses relativement à un climat chaud et aride et ont engendré des situations inconfortables pendant toute l'année en particulier pendant l'été. Par ailleurs, le cadre du vitrage s'il est en aluminium avec une couleur foncée entraîne systématiquement une augmentation de la température ambiante et une sensation thermique inconfortable chez les usagers. De là, le choix du taux et du type de vitrage doivent être bien réfléchis conformément au climat. De même, les caractéristiques thermiques des matériaux (exploités au niveau de la double peau et dans les ouvertures) essentiellement l'effusivité et la diffusivité thermique doivent être pris en considération avec les spécificités climatiques de la zone. En outre, les dispositifs de protection (les protections solaires, la façade double peau et la façade ventilée) ont donné de bons impacts particulièrement s'ils sont exploités d'une manière bien réfléchi (matériaux et dimensions).

L'étude expérimentale qui a été effectuée à travers la réalisation de quatre cellules tests à une échelle réduite a permis de tester l'impact de quelques paramètres sur le fonctionnement thermique de la façade (la température surfacique externe, la température surfacique interne et la température ambiante). Ces cellules ont donné la possibilité de déterminer les impacts réels des propriétés surfaciques de la façade (la réflectance solaire et l'émissivité thermique) à travers l'utilisation d'une peinture isolante avec des nanoparticules, le dispositif de la façade ventilée ainsi que la façade double peau. Les résultats obtenus démontrent que le dispositif de la façade ventilée et la façade double peau ont des impacts positifs sur le fonctionnement thermique de la façade mais le meilleur comportement enregistré est celui de la cellule avec une peinture isolante (avec une grande réflectance solaire et une émissivité thermique très élevée). La cellule avec la peinture isolante a montré que l'exploitation d'une surface extérieure qui a une grande réflectance solaire et une émissivité thermique élevée améliore le comportement thermique de la façade d'une manière considérable. Ces deux paramètres ont donné leurs preuves particulièrement durant la saison chaude où la réduction de la température surfacique externe atteint 10,7 °C. Cette réduction influe sur la chaleur stockée et le flux de chaleur transféré vers l'intérieur ce qui minimise la température surfacique interne jusqu'à 5,4 °C et par la suite une réduction de la température ambiante de l'ordre de 4 °C est possible.

La simulation numérique effectuée sur les éléments de la façade a permis d'étudier et d'optimiser l'impact de quelques paramètres respectivement la surface vitrée, le type de vitrage, le facteur d'ombrage et l'absorption de la surface extérieure. Dans cette partie de l'étude, une série de vingt-un modèles numériques ont été élaborés. Les résultats obtenus relatifs à l'impact

de la surface vitrée ont confirmé l'effet négatif de l'augmentation de la surface vitrée avec un simple vitrage sur le confort thermique des utilisateurs et la consommation énergétique du bâtiment pendant toute l'année et en particulier durant la période estivale. À propos du type de vitrage, les résultats confirment que le vitrage a une influence colossale sur le fonctionnement thermique des bâtiments où l'utilisation d'un double vitrage de basse émissivité avec gaz permet de diminuer les gains de chaleur transférés et améliore la température ambiante. Concernant l'impact des protections solaires (le facteur d'ombrage), la protection contre les rayonnements solaires a donné des impacts positifs sur l'amélioration des ambiances thermiques pendant l'été. En outre, les modèles relatifs à l'impact de l'absorption de la surface extérieure démontrent la performance des façades qui ont une faible absorption.

Ces résultats montrent que la maîtrise des éléments de la façade se répercute directement sur l'efficacité thermique et énergétique des constructions. L'optimisation d'un seul paramètre est insuffisante et nécessite l'amélioration de la façade dans sa totalité à travers la combinaison de plusieurs paramètres. Dans cette perspective, plusieurs modèles ont été optimisés à travers l'amélioration de différents paramètres notamment le taux d'ouverture et le type de vitrage, la protection contre les rayonnements solaires avec une surface opaque performante. Les résultats obtenus grâce aux modèles optimisés ont confirmé la capacité des paramètres optimisés à diminuer la température surfacique interne du mur jusqu'à 13 °C avec un pourcentage de réduction de 29,48 %. Par la suite, ils influent sur les valeurs de la température ambiante avec des diminutions jusqu'à 6,8 °C avec un pourcentage de réduction de 17,57 %. À propos du côté énergétique, le modèle optimisé a permis de réduire les besoins énergétiques de la climatisation jusqu'à 4651,96 (Kj/h) avec un pourcentage de réduction de 60,34 %.

Les résultats de la présente recherche ont été positifs dissipant l'ambiguïté sur le comportement thermique des éléments de la façade et leurs impacts sous les conditions des zones chaudes et arides. L'étude a prouvé que l'utilisation des éléments appropriés avec la prise en compte des spécificités climatiques ont une grande contribution sur l'amélioration et la préservation des conditions du confort thermique tout en minimisant les besoins énergétiques de la construction. Ces résultats montrent que la maîtrise des phénomènes thermiques se répercute directement sur l'efficacité des constructions. Un choix adéquat de la surface vitrée combiné à un type de vitrage approprié, une protection adéquate et une surface opaque performante améliorent considérablement les conditions thermiques intérieures et la performance énergétique du bâtiment.

## Recommandations

Il est recommandable de prendre en considération les points suivants afin d'améliorer le confort thermique des usagers et la performance énergétique des constructions situées dans un contexte climatique chaud et aride :

- L'utilisation d'un taux de vitrage (ratio) faible de 20 à 25 % ;
- L'exploitation d'un vitrage performant (double vitrage de basse émissivité avec gaz vu ses atouts démontrés sur le plan thermique et énergétique) ;
- L'utilisation des cadres des ouvertures avec une faible diffusivité et effusivité thermique (éviter l'utilisation des cadres avec une couleur foncée ou en aluminium) ;
- L'intégration bien réfléchie des protections solaires au niveau des façades les plus exposées aux rayonnements solaires (maximiser l'ombrage des surfaces vitrées et opaques) ;
- L'utilisation des surfaces avec une couleur claire et une texture lisse (surfaces avec une grande réflectance solaire et une émittance thermique très élevée) afin d'assurer la faible absorption de la façade ;
- L'exploitation de la peinture isolante est recommandée vu ses atouts.

Ces recommandations aideront les architectes à opter pour les choix conceptuels et matériels les plus adaptés des éléments de la façade dans les régions chaudes et arides pour optimiser les ambiances thermiques et diminuer les besoins énergétiques.

## Les limites de la recherche

Le manque de moyens est considéré comme une limite qui ne nous a pas permis d'élaborer l'expérimentation par des modèles tests à une échelle réelle ou même à travers la réalisation de plusieurs cellules à une échelle réduite. En plus, le manque d'instruments de mesures qui permettent d'enregistrer les valeurs pendant toute la journée afin de bien comprendre le fonctionnement thermique des bureaux durant une longue période a entravé le travail de terrain. Ainsi, l'inexistence d'une caméra thermique qui aurait pu nous donner la possibilité d'établir une étude plus détaillée au niveau de chaque composant de la façade, aurait été d'un apport précieux.

## Perspectives de recherche

En guise de recherches futures à développer, les résultats obtenus s'apparentent aux premiers pas d'un long parcours et font partie des rudiments qui pourraient ouvrir la voie à plusieurs perspectives de recherche relatives à l'emploi des stratégies passives et actives au niveau de la façade, notamment :

- L'exploitation des données obtenues relativement à la thermique et le développement d'études sur leurs impacts du point de vue des aspects aérauliques et lumineux ;
- La caractérisation de quelques paramètres relatifs à la façade tels que les matériaux de construction et l'isolation thermique les plus appropriés à un climat chaud et aride ;
- L'étude de l'impact de la forme (géométrie, décrochements, etc.) de la façade sur son fonctionnement thermique ;
- L'étude de l'influence des matériaux à changement de phase (MCP) dans un contexte climatique chaud et aride vu son impact sur l'augmentation de l'inertie thermique mais avec des défis relatifs au choix d'un matériau adéquat (la température de fusion) ;
- L'étude de l'influence des fenêtres réversibles sur le fonctionnement thermique des immeubles de bureaux ;
- L'étude de l'impact des dispositifs actifs (les protections solaires amovibles, ...) sur le comportement thermique des bureaux.

## **Bibliographie**

## Bibliographie

**Aelenei, D., Aelenei, L., Vieira, C.P. (2016).** Adaptive Façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275.

**Ahmad, M. (2004).** *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux a changement de phase, super isolation, apports solaires* (Thèse de Doctorat). Université Joseph Fourier – Grenoble 1, France.

**Ahmed, M.M.S., Abel-Rahman, A.K., Ali, A.H.H. (2015).** Development of intelligent facade based on outdoor environment and indoor thermal comfort. *Procedia Technology*, 19, 742-749.

**Ahmed, M.M.S., Abel-Rahman, A.K., Ali, A.H.H., Suzuki, M. (2016).** Double Skin Façade: The State of Art on Building Energy Efficiency. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4 (1), 84-89.

**Akeiber, H., Nejat, P., Abd-Majid, M.Z., Wahid, M.A., Jomehzadeh, F., Famileh, I.Z., Calautit, J.K., Hughes, B.R., Zaki, S. (2016).** A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 1470-1497.

**Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., Moghtaderi, B. (2016).** Assessment of the Thermal Performance of Complete Buildings Using Adaptive Thermal Comfort. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 655-661.

**Alcamo, G., De-Lucia, M. (2014).** A new test cell for the evaluation of thermo-physical performance of facades building components. *International Journal of Sustainable Energy*, 33 (4), 954-962.

**Alonso, C., Martín-Consuegra, F., Oteiza, I., Asensio, E., Pérez, G., Martínez, I., Frutos, B. (2017).** Effect of façade surface finish on building energy rehabilitation. *Solar Energy*, 146, 470-483.

**Alchapar, N., Correa, E. (2015).** Solar reflectance of opaque enveloped and its effect on urban temperatures. *Informes de la Construcción*, 67, 1-12.

**Alwetaishi, M., Alzaed, A., Sonetti, G., Shrahily, R., Jalil, L. (2017).** Microclimate investigation in school buildings using advanced energy equipment: Case study. *Environmental Engineering Research*, 23 (1), 10-20.

**APRUE, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie. (2009).** *Consommation énergétique finale de l'Algérie, chiffres clés Année 2007*. Algérie : Ministère de l'Energie et des Mines.

**Arantes, L. (2013).** *L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située* (Thèse de Doctorat). Université de Grenoble, France.

**Arnal, E. (2013).** *Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l'amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques* (Thèse de Doctorat). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**Arranz, B., Vega, S., Bedoya, C. (2017).** *Evaluation of the performance of an innovative glazing system by a comparative experimental analysis*. Communication présentée à la conférence internationale Passive and Low Energy Architecture PLEA, Edinburgh, Royaume-Uni.

**Ascione, F., Bellia, L., Mazzei, P., Minichiello, F. (2010).** Solar gain and building envelope: the surface factor. *Building Research & Information*, 38 (2), 187-205.

**Azarnejad, A., Mahdavi, A. (2015).** Building facades' visual reflectance and surface temperatures: a field study. *Energy procedia*, 78, 1720-1725.

**Bakker, L.G., Hoes-van Oeffelen, E.C.M., Loonen, R.C.G.M., Hensen, J.L.M. (2014).** User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study. *Building and Environment*, 78, 44-52.

**Barbosa, S., Ip, K. (2014).** Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1019-1029.

**Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., Monticelli, C. (2016).** The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275-284.

**Barreneche, C., Navarro, L., De Gracia, A., Fernandez, A.I. (2016).** In situ thermal and acoustic performance and environmental impact of the introduction of a shape-stabilized PCM layer for building applications. *Renewable Energy*, 85, 281-286.

**Basecq, V. (2015).** *Développement d'un mur capteur/stockeur solaire pour le chauffage des bâtiments à très basse consommation d'énergie* (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, France.

**Batier, C. (2016).** *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen « D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales »* (Thèse de Doctorat). École nationale supérieure d'architecture de Montpellier, France.

**Batoul, H. (2007).** *Façade intelligente E<sup>2</sup> : isolation, PV, TH, ventilation*. Département solaire, Schuco, France.

**Belkacem, N. (2017).** *Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Souidania-Alger* (Thèse de Doctorat). Université de Chlef, Algérie.

**Benhouhou, M.N. (2012).** *L'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides* (Mémoire de magister). EPAU, Algérie.

**Berghout, B. (2012).** *Effet de l'implantation d'un bâtiment collectif sur le confort hygrothermique intérieur cas de Biskra-Algérie* (Mémoire). École de technologie supérieure, université du Québec, Canada.

**Binz, A., Bichsel, J., Geissler, A., Hall, M., Huber, H., Steinke, G., Weickgenannt, B. (2015).** *Constructions efficaces Concepts, critères, systems*. Suisse: Fachhochschule Nord westschweiz, Institut Energie am Bau.

**Bonte, M. (2014).** *Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment « Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ »* (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse, France.

**Bouamama, W. (2013).** *Au sujet de la politique d'efficacité énergétique en Algérie : approche systémique pour un développement durable cas de : programme éco-bat* (Mémoire de Magister). Université Abou Bekr Belkaid, Algérie.

**Bouchahm, G., Bourebia, F. (2010).** L'impact de l'orientation des parois transparentes sur le confort thermique dans une salle de classe à Constantine. *Revue des sciences et technologie*, 31: 71-80.

**Bouchié, R., Busson, B., Cormier, B., Delaire, A., Farkh, S., Leguillon, F. (2013).** *Performance énergétique : les matériaux et procédés d'isolation*. France : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB.

**Boudhen, 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 (1), 141-156.

**Boudreau, J.P. (2011).** *L'optimisation énergétique: un travail sur l'enveloppe*. Communication présentée au colloque CEBQ/OAQ sur l'enveloppe du bâtiment, Québec, Canada.

**Bougiatioti, F., Evangelinos, E., Poulakos, G., Zacharopoulos, E. (2009).** The summer thermal behaviour of "skin" materials for vertical surfaces in Athens, Greece as a decisive parameter for their selection. *Solar Energy*, 83 (4), 582-598.

**Broto, C. (2011).** *Conception et design - Façades*. France : Links.

**Brun, A., Spitz, C., Wurtz, E. (2009).** *Analyse du comportement de différents codes de calcul dans le cas de bâtiments à haute efficacité énergétique*. Communication présentée au l'IX<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Lille.

**Brun, A. (2011).** *Amélioration du confort d'été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l'enveloppe et stockage thermique* (Thèse de Doctorat). Université de Grenoble, France.

**Bucchianeri, X. (2012).** *Étude énergétique et spatiale d'une conception rationalisée de la façade* (stage mise en situation professionnelle). Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Grenoble, France.

**Buffoni, G., Xuereb, K. (2015).** *The Al Bahr Towers: shading, the real envelope*. Communication présentée au International Conference on Building Envelope Design and Technology, Graz, L'Autriche.

**Buonomano, A., Calise, F., Palombo, A., Vicidomini, M. (2017).** Exergetic and energy-economic analysis of a building integrated photovoltaic and thermal system. *Renewable Energy*, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.060

**Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E., Cotana F. (2013).** Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. *Building and Environment*, 59, 482-491.

**Cablé, A. (2013).** *Étude expérimentale et numérique du traitement des ambiances par le vecteur air dans les bâtiments à très basse consommation d'énergie* (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, France.

**Caciolo, M. (2010).** *Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraîchissement des immeubles de bureaux* (Thèse de Doctorat). L'école nationale supérieure des mines de Paris, France.

**Cantin, B., Moujalled, B., Guarracino, G. (2005).** *Complexité du confort thermique dans les bâtiments*. Communication présentée au 6<sup>ème</sup> congrès Européen de science des systèmes, Paris, France.

**Casas, P.F.I., Casas, A.F.I., Garrido-Soriano, N., Godoy, A., Pujols, W.C., Garcia, J. (2017).** Solution Validation for a Double Façade Prototype. *Energies*, 10 (12), 2013.

**Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., Cabeza, L.F. (2010).** Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42 (4), 534-540.

**Castellón, C., Medrano, M., Roca, J., Nogués, M., Castell, A., Cabeza, L.F. (2007).** Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Building Applications. *Buildings X*, 1-6.

**Catalina, T., Virgone, J., Roux, J.J., Blanco, E. (2008).** *Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation*. Communication présentée à la Conférence IBPSA International Building Performance Simulation Association- France.

**Chabi, G. (2012).** *Contribution à la lecture des façades du patrimoine colonial 19<sup>ème</sup> et début 20<sup>ème</sup> siècles, cas d'étude: quartier Didouche Mourad à Alger* (Mémoire de Magister). Université de Tizi Ouzou, Algérie.

**Chahwane, L. (2011).** *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments* (Thèse de Doctorat). Université de Grenoble, France.

**Cheng, V., Ng, E., Givoni, B. (2005).** Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. *Solar Energy*, 78 (4), 528-534.

**Chesné, L. (2012).** *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques* (Thèse de Doctorat). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**Chesné, L., Duforestel, T., Roux, J.J., Rusaouën, G. (2012).** Energy saving and environmental resources potentials: Toward new methods of building design. *Building and Environment*, 58, 199-207.

**Chisholm, E. (2013).** *Optimisation de l'Enveloppe d'un Bâtiment Passif à l'aide de la Simulation Thermique Dynamique*. Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France.

**Clua, A., Lufki, S., Rey, E. (2016).** *Towards a new prospective basis for the design strategies of Active Façades A research methodology to create guidelines for photovoltaic integration*. Communication présentée à la 36<sup>th</sup> International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2016, Los Angeles, États-unis.

**C.M.E. (2014).** Conseil Mondial de l'Énergie (Rapport du CME-2014), repéré à [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org)

**Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., Cabeza, L.F. (2014).** New green facades as passive systems for energy savings on buildings. *Energy Procedia*, 57, 1851-1859.

**Cornaro, C., Pierro, M., Puggioni, V.A., Roncarati, D. (2017).** Outdoor Characterization of Phase Change Materials and Assessment of Their Energy Saving Potential to Reach NZEB. *Buildings* 2017, 7(3), 1-19.

**Cristina, P.B. (2011).** *Architecture et matériaux*. Paris : Place Des Victoires.

**Daverat, C. (2012).** *Etude expérimentale de la convection Naturelle en canal vertical à flux de Chaleur imposé* (Thèse de Doctorat). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**De Asiain, J.L. (2010).** La formation à la conception durable. *Le Carré Bleu*, 3 (4).

**De Dear, R., Brager, G., Cooper, D. (1997).** Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference (Rapport ASHRAE RP- 884). Cooperative Research between the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., and Macquarie Research, États-Unis.

**Deljavan, N., Elias-Ozkan, S.T. (2017).** *Taxonomy of Sustainable, Responsive and Adaptive Façades*. Communication présentée à la conférence internationale Passive and Low Energy Architecture PLEA, Edinburgh, Royaume-Uni.

**Diallo, T.M.O., Zhao, X., Dugue, A., Bonnamy, P., Miguel, F.J., Martinez, A., Theodosiou, T., Liu, J.S., Brown, N. (2017).** Numerical investigation of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade system employing a smart modular heat recovery unit and a latent heat thermal energy system. *Applied Energy*, 205, 130-152.

**Diaz, M.L. (2014).** *La conception énergétique des bâtiments*. Communication présentée au séminaire l'éco Quartier de Rueil, Rueil-Malmaison, France.

**Djedjig, R. (2013).** *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain* (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, France.

**Domercq, B. (2018).** *Let's discover how glass changes the building industry*. Communication présentée à la conférence internationale Zak World of Façades, Paris, France.

**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, France.

**Doya, M., Bozonnet, E., Allard, F. (2012).** Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 55, 42-50.

**Drissi, S. (2012).** *Développement de nouveaux bétons "accumulateurs d'énergie" : Investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique* (Thèse de Doctorat). L'école nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunisie et l'Université Paris-EST, France.

**Dugué, A., (2013).** *Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations* (Thèse de Doctorat). Université de BORDEAUX 1, France.

**Du Montier, C., Potvin, A., Demers, C.M. (2013).** *Adaptive Façades for Architecture: Energy and lighting potential of movable insulation panels*. Communication présentée au 29<sup>th</sup> Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Allemagne.

**Duran, S.C. (2011).** *Architecture et énergie, un enjeu pour l'avenir*. France : Place Des Victoires.

**Dutreix, A. (2010).** *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. France : Eyrolles.

**Eicker, U., Fux, V., Bauer, U., Mei, L., Infield, D. (2008).** Facades and summer performance of buildings. *Energy and Buildings*, 40 (4), 600-611.

**Ekomy-Ango, S.B. (2011).** *Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase* (Thèse de Doctorat). L'école nationale supérieure d'arts et métiers-ParisTech - Centre de Bordeaux, France.

**Elarga, H., De Carli, M., Zarrella, A. (2015).** A simplified mathematical model for transient simulation of thermal performance and energy assessment for active facades. *Energy and Buildings*, 104, 97-107.

**El-Darwish, I., Gomaa, M. (2017).** Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4), 579-589.

**Elghawaby, M.M. (2013).** *Vers un confort thermique grâce à des concepts d'enveloppes de bâtiments, inspirés de la nature : Le mur respirant comme un exemple biomimétique approprié aux bâtiments en zones chaudes* (Thèse de Doctorat). Université Aix-Marseille, France.

**Entrop, A.G., Brouwers, H.J.H., Reinders, A.H.M.E. (2011).** Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses. *Solar Energy*, 85 (5), 1007-1020.

**Erell, E., Etzion, Y., Carlstrom, N., Sandberg, M., Molina, J., Maestre, I., Maldonado, E., Leal, V., Gutschker, O. (2004).** "SOLVENT": development of a reversible solar-screen glazing system. *Energy and Buildings*, 36 (5), 467-480.

**Faria-Neto, A., Bianchi, I., Wurtz, F., Delinchant, B. (2016).** *Thermal Comfort Assessment*. Communication présentée au Final ELECON Workshop, Florianópolis, Brazil.

**Faure, X. (2007).** *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique* (Thèse de Doctorat). Université Joseph Fourier-Grenoble 1, France.

**Fernandez, P., Lavigne, P. (2009).** *Concevoir des bâtiments bioclimatiques: fondements et méthodes*. France : Le Moniteur.

- Fernández-González, A. (2007).** Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States midwest. *Solar Energy*, 81(5), 581-593.
- Florentin, Y., Pearlmutter, D., Givoni, B., Gal, E. (2017).** A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy and Buildings*, 156, 293-305.
- Fuchs, S. (2007).** *L'architecture bioclimatique*. Communication présentée à la conférence-débat sur les éco-quartiers, Genève, Suisse.
- Fuchs, F.M., Raymond, B. (2010).** *Échanges thermiques d'une paroi 1*. Note techniques de construction. Repéré à : [archenergie.fr/data/rawdata/echanges-thermiques-d-une-paroi---explication.pdf](http://archenergie.fr/data/rawdata/echanges-thermiques-d-une-paroi---explication.pdf)
- Gagliano, A., Nocera, F., Aneli, S. (2016).** Thermodynamic analysis of ventilated facades under different wind conditions in summer period. *Energy and Buildings*, 122, 131-139.
- Gaillard, L., Ruedin, G., Giroux-Julien, S., Plantevit, M., Kaytoue, M., Saadon, S., Ménéz, C., Boulicaut, J.F. (2015).** Data-driven performance evaluation of ventilated photovoltaic double-skin facades in the built environment. *Energy Procedia*, 78, 447-452.
- Gallauziaux, T., Fedullo, D. (2010).** *Le Grand livre de l'isolation* (2<sup>ème</sup> éd.) Paris : Eyrolles.
- Gallo, C., Sala, M., Sayigh, A.A.M. (1998).** *Architecture : comfort and energy* (1<sup>ère</sup> éd., Vol. 2). Royaume-Uni : Elsevier.
- Gamboa, J. (2016).** *Analyse comparative de l'approche bioclimatique et de la méthode LEED en architecture* (Mémoire de M.Sc.A.). Université de Montréal, Canada.
- Gaüzère, L., Kuznik, F., Roux, J.J. (2008).** *Modélisation simplifiée des façades double peau avec store vénitien basée sur une méthode nodale*. Communication présentée à la Conférence IBPSA International Building Performance Simulation Association, Lyon, France.
- Gavan, V., Woloszyn, M., Kuznik, F., Roux, J.J. (2010).** Experimental study of a mechanically ventilated double-skin façade with venetian sun-shading device: A full-scale investigation in controlled environment. *Solar Energy*, 84 (2), 183-195.
- Gelesz, A., Reith, A. (2015).** Climate-based performance evaluation of double skin facades by building energy modelling in Central Europe. *Energy Procedia*, 78, 555-560.

- Ghaffarian-Hoseini, A.H., Makaremi, N. (2012).** Intelligent Facades in Low-Energy Buildings. *British Journal of Environment & Climate Change*, 2 (4), 437-464.
- Ghosh, A., Norton, B., Duffy, A. (2016).** Behaviour of a SPD switchable glazing in an outdoor test cell with Heat Removal under varying weather conditions. *Applied Energy*, 180, 695-706.
- Givoni, B. (1978).** *L'homme, l'architecture et le climat*. France : Le Moniteur.
- Godan, A., Rouquette, N. (2018).** *Les technologies des peintures en poudre au service de la façade*. Communication présentée à la conférence internationale Zak World of Façades, Paris, France.
- Gossard, D. (2011).** *Impact de l'enveloppe sur la performance énergétique des bâtiments : de la caractérisation jusqu'à l'optimisation* (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse, France.
- Gounni, A., El-Alami, M., Mabouk, M.T., Kheiri, A. (2018).** Experimental study of thermal performance of a reduced scale cavity equipped with phase change material (pcm): study of the optimal pcm layer location. *Journal of Solar Energy Engineering*, doi:10.1115/1.4039331
- Gracia, A.D., Navarro, L., Castell, A., Cabeza, L.F. (2013).** Numerical study on the thermal performance of a ventilated facade with PCM. *Applied Thermal Engineering*, 61 (2), 372-380.
- Gratia, E., De Herde, A. (2004).** Optimal operation of a south double-skin façade. *Energy and Buildings*, 36 (1), 41-60.
- Gratia, E., De Herde, A. (2006).** *Thermique des immeubles de bureaux* (1<sup>ère</sup> éd.). Belgique : Presses universitaires de Louvain.
- Gratia, E., De Herde, A. (2007).** Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin?. *Energy and Buildings*, 39 (5), 605-6019.
- Guiavarch, A., Bruneau, D., Dauvergne, J.L., Del Barrio, E.P., Peuportier, B., Clottes, F. (2008).** *Intégration d'un modèle simplifié de matériau à changement de phase dans une plateforme d'aide à la conception énergétique de bâtiments*. Communication présentée à la Conférence IBPSA International Building Performance Simulation Association- France.
- Guichard, S. (2013).** *Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changements de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale* (Thèse de Doctorat). Université de La Réunion, La Réunion.

**Guichard, S., Miranville, F., Bigot, D., Malet-Damour, B., Libelle, T., Boyer, H. (2015).** Empirical Validation of a Thermal Model of a Complex Roof Including Phase Change Materials. *Energies*, 9 (1), 1-16.

**Guillemeau, J.M., Wagelmans, P., Wagelmans, J., Pirenne, M.C., Stienon, Y., Glineur, M., Gilot, R., Goethem, C.V. (2015).** *Le guide : Performance Énergétique du Bâtiment*. l'Union européenne et université de Liège, France.

**Haase, M., Marques da Silva, F., Amato, A. (2009).** Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 41 (4), 361-373.

**Hall, M.R. (2010).** *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings* (1<sup>ère</sup> éd.). New Delhi : Woodhead Publishing

**Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., Zeumer, M. (2011).** *Construction et énergie : Architecture et développement durable* (1<sup>ère</sup> éd.). Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.

**Heiselberg, P. (2009).** *Expert Guide – Part 1 Responsive Building Concepts*. Danemark: Université d'Aalborg.

**Herant, P. (2004).** *L'enveloppe du bâtiment*. Conclusion de la journée thématique "Bâtiment 2010" consacrée à l'enveloppe du bâtiment. France: L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME.

**Hernandez, O. (2014).** *Etude et analyse de la ventilation et de la qualité des environnements intérieurs (QEI) dans les bâtiments de bureaux à faible demande énergétique le cas de la tour Elithis à Dijon* (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, France.

**Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., Simá, E. (2014).** Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*, 80, 81-105.

**Herzog, T., Krippner, R., Lang, W. (2004).** *Facade Construction Manual* (1<sup>ère</sup> éd.). Allemagne : BIRKHÄUSER.

**Hong, T., Chou, S.K., Bong, T.Y. (1999).** A design day for building load and energy estimation. *Building and Environment*, 34 (4), 469-477.

**Huebner, G.M., Shipworth, D.T., Gauthier, S., Witzel, C., Raynham, P., Chan, W. (2016).** Saving energy with light? Experimental studies assessing the impact of colour temperature on thermal comfort. *Energy Research & Social Science*, 15, 45-57.

**Hufty A. (2001).** Introduction à la climatologie. Canada : Les presses de l'Université de Laval.

**Humphreys, M.A., Nicol, J.F. (2002).** The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34 (6), 667-684.

**Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J.A., Martín-Gómez, C. (2017).** Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 180-191.

**Ibañez-Puy, M., Martín-Gómez, C., Bermejo-Busto, J., Sacristán, J.A., Ibañez-Puy, E. (2018).** Ventilated Active Thermoelectric Envelope (VATE): Analysis of its energy performance when integrated in a building. *Energy and Buildings*, 158, 1586-1592.

**Ibrahim, M. (2014).** *Improving the building envelopes energy performance using aerogel-based insulating mineral rendering* (Thèse de Doctorat). Université Paris Tech, France.

**Ihara, T., Gustavsen, A., Jelle, B.P. (2015).** Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. *Applied Energy*, 158, 422-432.

**Ihara, T., Jelle, B.P., Gao, T., Gustavsen, A. (2016).** Accelerated aging of treated aluminum for use as a cool colored material for facades. *Energy and Buildings*, 112, 184-197.

**Jaber, S., Salman, A. (2011).** Thermal and economic windows design for different climate zones. *Energy and Buildings*, 43 (11), 3208-3215.

**Jedidi, M., Benjeddou, O. (2016).** *La thermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation* (1<sup>ère</sup> éd.). Paris : Dunod.

**Jindong, W. (2015).** *Thermal Comfort and Occupant Behaviour in Office Buildings in South-East China* (Thèse de Doctorat). Université de Nottingham, Angleterre.

**Joudi, A., Svedung, H., Bales, C., Rönnelid, M. (2011).** Highly reflective coatings for interior and exterior steel cladding and the energy efficiency of buildings. *Applied Energy*, 88 (12), 4655-4666.

**Joussellin, F., Faure, X., Johannes, K., Quenard, D., Pierson, P. (2008).** *Enveloppe hybride pour bâtiment économe*, CSTB, France.

**Karanouh, A., Kerber, E. (2015).** Innovations in dynamic architecture: The Al-Bahr Towers Design and delivery of complex facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3 (2), 185-221.

**Kedowide, Y.A. (2015).** *Analyses expérimentales et numériques du comportement hygrothermique d'une paroi composée de matériaux fortement hygroscopiques* (Thèse de Doctorat). Université Grenoble Alpes, France.

**Kenisarin, M., Mahkamov, K. (2016).** Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371-398.

**Kirschbaum, N.S. (2016).** *The effectiveness of fixed solar shading*. Communication présentée au séminaire international Façade tectonics- World Congress Los Angeles, États-Unis.

**Kjell, A. (2014).** *Design Energy Simulation for Architects Guide to 3D graphics* (1<sup>ère</sup> éd.). New York : Routledge.

**Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., Auer, T. (2014).** *Façades : Principles of Construction* (2<sup>ème</sup> éd.). Allemagne : Birkhäuser Verlag.

**Kokogiannakis, G., Tuohy, P., Darkwa, J. (2012).** Impact of material surface properties on building performance across a variety of climates. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7 (3), 181-186.

**Konstantinou, T. (2014).** *Façade Refurbishment Toolbox* (Thèse de Doctorat). Delft University of Technology- Faculty of Architecture and the Build Environment, Pays-Bas.

**Kontoleon, K.J., Bikas, D.K. (2007).** The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations. *Energy and Buildings*, 39 (9), 1011-1018.

**Koolhaas, R., Petermann, S., Trüby, S., di Robilant, M., Westcott, J. (2014).** *Façade*. Italie: Marsilio.

**Kottas, D. (2016).** *Matériaux : Architecture et construction* (1<sup>ère</sup> éd.). France : Links.

**Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006).** World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 256-263.

**Krummenacher, E. (2005).** *Démarche environnementale, approche et évaluation en architecture* (Mémoire de fin d'étude). École d'architecture de Nancy, France.

- Kujawski, W. (2014).** *Impact de la forme architecturale sur la performance énergétique potentielle des collectifs d'habitation* (Série technique 14-103). Société canadienne d'hypothèques et de logement, Canada.
- La roche, P., Berardi, U. (2014).** Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82, 492-504.
- Labbouz, D. (2015).** *Bâtiments tertiaires performants et comportements favorables à l'environnement : Le rôle de variables psychosociales et du contexte organisationnel* (Thèse de Doctorat). Université Paris Ouest Nanterre, La Défense, France.
- Larsen, S.F., Filippín, C., Lesino, G. (2014).** Thermal simulation of a double skin façade with plants. *Energy Procedia*, 57, 1763-1772.
- Laurie, K., Bontemps, A., Grados, A., Royon, L. (2013).** *Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase (MCP) dans les planchers/plafonds de bâtiment à structure légère*. Communication présentée aux 16<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique, Marrakech, Maroc.
- Lavoie, F., Boeuf, F., Thellier, F. (2015).** *Qualité des ambiances dans les bâtiments* (1<sup>ère</sup> éd.). Paris : Presses des MINES-collection Développement durable.
- Law, T. (2013).** *The Future of Thermal Comfort in an Energy-Constrained World* (Thèse de Doctorat). École d'architecture et de design, Faculté des sciences, ingénierie et technologie Université de Tasmanie-Launceston, Australie.
- Lebreton, R. (2005).** *Peintures en poudre, composition, risques toxicologiques, mesures de prévention* (Rapport ED 956). Institut national de recherche et de sécurité, France.
- Leonard, T. (2010).** *Peintures en Poudre et Architecture*. Repéré à [www.akzonobel.com/powder](http://www.akzonobel.com/powder)
- León-Rodríguez, A.L., Suárez, R., Bustamante, P., Campano, M.A., Moreno-Rangel, D. (2017).** Design and performance of test cells as an energy evaluation model of facades in a Mediterranean building area. *Energies*, 10 (11), 1816.
- Levinson, R., Akbari, H., Reilly, J.C. (2007).** Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment*, 42 (7), 2591-2605.

- Liang, R., Wu, Y., Wilson, R. (2015).** *Thermal and visual comfort analysis of an office with thermo chromic smart windows applied.* Communication présentée au the International Symposium CISBAT, Lausanne, Suisse.
- Liébard, A., De Herde, A. (2005).** *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* (1<sup>ère</sup> éd.). Paris : Observ'ER.
- Lirola, J.M., Castañeda, E., Lauret, B., Khayet, M. (2017).** A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. *Energy and Buildings*, 142, 72-110.
- Litvak, A., Louet, D., Pichenot, J.P. (2012).** *Etude d'identification de méthodologies et d'outils d'autocontrôle par les entreprises de la qualité thermique de l'enveloppe* (Rapport N° 2). Centre régional d'accompagnement et de ressources pour la construction durable et la performance énergétique des bâtiments en Aquitaine, France.
- Loncour, X., Deneyer, A., Blasco, M., Flamant, G., Wouters, P. (2004).** *Les doubles façades ventilées, classification et illustrations des concepts de façades.* Centre scientifique et technique de la construction, département physique du bâtiment, climat intérieur et équipements, Belgique.
- Lstiburek, J.W. (2008).** Prioritizing Green: It's The Energy. *Insight*, 007, 1-8. Repéré à [www.buildingscience.com](http://www.buildingscience.com)
- Madre, F., Clergeau, P., Machon, N., Vergnes, A. (2015).** Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation*, 3, 222-233.
- Magri, E., Buhagiar, V., Borg, S.P. (2017).** *An Assessment of Glazing Systems suitable for the Mediterranean Climate.* Communication présentée à la conférence Internationale Passive and Low Energy Architecture PLEA, Edinburgh, Royaume-Uni.
- Mandallena, C. (2006).** *Elaboration et application d'une méthode d'évaluation et d'amélioration de la qualité environnementale de bâtiments tertiaires en exploitation* (Thèse de Doctorat). Université de BORDEAUX 1, France.
- Martin, Y. (2015).** *Façades végétalisées: nouvelles tendances et état de l'art.* Communication présentée à la Confédération de Construction de Bruxelles, Toitures et façades vertes, Belgique.

**Maufay, A. (2018).** *Shaping the architectural ambition*. Communication présentée à la conférence internationale Zak World of Façades, Paris, France.

**Maugard, A. (2014).** *Façade multiple, double peau ventilée naturellement sur l'extérieur*. Règles de l'art grenelle environnement.

**Mazari, M. (2012).** *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda « Tizi-Ouzou »* (Mémoire de Magister). Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.

**Medjelekh, D. (2015).** *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques* (Thèse de Doctorat). Université de Limoges, France et de Constantine 3, Algérie.

**Menzel, L. (2012).** *Façades, Design, Construction & Technology*. France : Citadelles & Mazenod.

**Miquey, D. (2010).** *La prise en compte de l'énergie et du climat dans l'urbanisme, l'approche bioclimatique dans l'aménagement*. Repéré à [www.territoires-durables.fr/IMG/pdf/rt\\_climat\\_090410\\_bioclim\\_inddigo.pdf](http://www.territoires-durables.fr/IMG/pdf/rt_climat_090410_bioclim_inddigo.pdf)

**Miranville, F. (2002).** *Contribution à l'Etude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en climat tropical humide* (Thèse de Doctorat). Université de La Réunion, La Réunion.

**Misawa, Y., Azuma, K., Cho, W., Iwamoto, S., Iwata, M. (2015).** Simulation study on energy conservation performance for integrated external louver facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3 (4), 237-252.

**Mishra, A.K., Loomans, M.G.L.C., Hensen, J.L.M. (2016).** Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions-An overview. *Building and Environment*, 109, 82-100.

**Misse, A. (2011).** *Stratégie du chaud/stratégie du froid, les grands principes*. Note du cours, École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, France.

**Missoum, A., Elmir, M., Belkacem, A., Nabou, M., Draoui, B. (2013).** Numerical simulation of heat transfer through a double walled facade building in arid zone. *Energy Procedia*, 36, 834-843.

**Moreno-sierra, A. (2012).** *Intégration des aspects énergétiques dans la conception du projet architectural : une approche méthodologique* (Thèse de Doctorat). Université de BORDEAUX 1, France.

**Morillon, F., Hernandez, M.A.B., Minet, A, Demazure, O., Gall, H.B.C., Aillerie, Y., Rozmiarek, F. (2011).** *Livre blanc : Confort et Santé dans les immeubles de bureaux énergétiquement performants- Approche globale et Interactions entre confort et performance énergétique* (1<sup>ère</sup> éd.). États-Unis, Steelcase.

**Moser, G. (2009).** *Psychologie environnementale, les relations homme-environnement*. Bruxelles : De Boeck.

**Mostafa, M.S.A., Ali, K.A.R., Ahmed, H.H.A., Suzuki, M. (2016).** Double Skin Façade: The State of Art on Building Energy Efficiency. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4 (1), 84-89.

**Moujalled, B. (2007).** *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés* (Thèse de Doctorat). L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**Moujalled, B., Cantin, R., Guarracino, G. (2008).** *Dynamic Modeling of Thermal Comfort in Buildings*. Communication présentée au Congress Systems, France.

**Munaretto, F. (2014).** *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments* (Thèse de Doctorat). L'école nationale supérieure des mines de Paris, France.

**Nowak, K., Rojewska-warchal, M. (2014).** *Thermal comfort of office rooms with a large area of glazing* (Technical transactions). Université de la technologie de Cracow, Pologne.

**O'Shaughnessy, L. (2013).** *Méthodes de construction*. Note du cours, Architecte à Saint-Colomban, Canada.

**Olissan, O.A. (2017).** *Influence de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments en climat tropical et humide : cas de la bande côtière du Bénin* (Thèse de Doctorat). Université de Liège, France.

**Oliva, J.P., Courgey, S. (2006).** *La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation*. France : Terre Vivante.

- OMM, Organisation Météorologique Mondiale (2011).** *Guide des pratiques climatologiques* (Publication N° 100). Repéré à [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_100\\_fr.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_fr.pdf)
- Omrany, H., Marsono, A.K. (2016).** Optimization of Building Energy Performance through Passive Design Strategies. *British Journal of Applied Science and Technology* 13 (6), 1-16.
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R. (2011).** Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43 (12), 3419-3429.
- Pajani, D. (2012).** *La thermographie du bâtiment Principes et applications du diagnostic thermographique*. Paris : Eyrolles.
- Parra, J., Guardo, A., Egusquiza, E., Alavedra, P. (2015).** Thermal Performance of Ventilated Double Skin Façades with Venetian Blinds. *Energies*, 8, 4882-4898.
- Parsons, K. (2014).** *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance* (3<sup>ème</sup> éd.). États-Unis: CRC Press.
- Pasquay, T. (2004).** Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy. *Energy and Buildings*, 36 (4), 381-389.
- Penu, G. (2015).** *La thermique du bâtiment* (2<sup>ème</sup> éd.). Paris : Dunod.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. (2008).** A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40 (3), 394-398.
- Perini, K., Ottelé, M., Haas, E.M., Raiteri, R. (2011).** Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1 (1), 1-8.
- Piroozfar, F.P.P.A.E. (2015).** Double skin façade (DSF) technologies for UK office refurbishments: A systemic matchmaking practice. *Structural Survey*, 33 (4), 372-406.
- Pisello, A.L., Goretti, M., Cotana, F. (2012).** A method for assessing buildings' energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. *Applied Energy*, 97, 419-429.
- Pisello, A.L., Cotana, F., Nicolini, A., Buratti, C. (2014).** Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal-energy performance in winter conditions: in field experiment. *Energy and Buildings*, 80, 218-230.
- Pisello, A.L., Pignatta, G., Piselli, C., Castaldo, V.L., Cotana, F. (2015).** *Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal performance in summer conditions: in field*

*experiment*. Communication présentée au 15<sup>ème</sup> congrès national CIRIAF Energy, Environment and Sustainable Development, Perugia, Italy.

**Pisello, A.L., Rosso, F. (2016).** Natural Materials for Thermal Insulation and Passive Cooling Application. *Key Engineering Materials*, 666, 1-16.

**Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Piselli, C., Fabiani, C., Cotana, F. (2017).** Thermal performance of coupled cool roof and cool façade: Experimental monitoring and analytical optimization procedure. *Energy and Buildings*, 157, 35-52.

**Poirazis, H. (2006).** *Double Skin Façades a Literature Review, A report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex 43*. Suède : Université de Lund.

**Prieto, A., Knaack, U., Klein, T., Auer, T. (2017).** 25 Years of cooling research in office buildings: Review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990–2014). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 89-102.

**Quenard, D. (2009).** Core-Skin-Shell Concept for New Building & Retrofitting. IEA - ECBCS - Annex 50 – Prefab Retrofit of Buildings, Grenoble, France.

**Quenard, D. (2011).** *Les panneaux isolants sous-vide, les isolants nano-poreux, principes et performance*. Présentation dans le Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, France.

**Rapone, G. (2012).** *Optimisation of office building façades by means of genetic algorithms* (Thèse de Doctorat). Université degli Studi di Udine, Italie.

**Revel, G.M., Martarelli, M., Emiliani, M., Gozalbo, A., Orts, M.J., Bengochea, M.A., Delgado, L.G., Gaki, A., Katsiapi, A., Taxiarchou, M., Arabatzis, I., Fasaki, I., Hermanns, S. (2014a).** Cool products for building envelope – Part I: Development and lab scale testing. *Solar Energy*, 105, 770-779.

**Revel, G.M., Martarelli, M., Emiliani, M., Celotti, L., Nadalini, R., Ferrari, A.D., Hermanns, S., Beckers, E. (2014b).** Cool products for building envelope – Part II: Experimental and numerical evaluation of thermal performances. *Solar Energy*, 105, 780-791.

**Richieri, F. (2008).** *Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères* (Thèse de Doctorat). L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**Ries, T. (2012).** *Plastic Materials in Facade Applications, the Oskar von Miller Tower.* *Plastic Materials in Facade Applications, the Oskar von Miller Tower.* Communication présentée à la conférence Building Envelope Design and Technology, Université de technologie de Graz, Autriche.

**Rivalin, L. (2016).** *Vers une démarche de garantie des consommations énergétiques dans les bâtiments neufs : Méthodes d'évaluation des incertitudes associées à la simulation thermique dynamique dans le processus de conception et de réalisation* (Thèse de Doctorat). Université de MINES ParisTech, France.

**Robillart, M. (2015).** *Étude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants* (Thèse de Doctorat). École nationale supérieure des mines de Paris, France.

**Ronfini, A., Cohn, M. (2016).** *Implementing parametric tools in project management: a case study.* Communication présentée au séminaire international Façade tectonics- World Congress Los Angeles, États-Unis.

**Rosso, F., Pisello, A.L., Cotana, F., Ferrero, M. (2014).** Integrated Thermal-Energy Analysis of Innovative Translucent White Marble for Building Envelope Application. *Sustainability*, 8(6), 5439-5462.

**Rosso, F., Pisello, A.L., Jin, W., Ghandehari, M., Cotana, F., Ferrero, M. (2016).** Cool Marble Building Envelopes: The Effect of Aging on Energy Performance and Aesthetics. *Sustainability*, 8 (8), 1-18.

**Rosso, F., Pisello, A.L., Cotana, F., Ferrero, M. (2017a).** Cool, translucent natural envelope: thermal-optics characteristics experimental assessment and thermal-energy and day lighting analysis. *Energy Procedia*, 111, 578-587.

**Rosso, F., Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Fabiani, C., Cotana, F., Ferrero, M., Jin, W. (2017b).** New cool concrete for building envelopes and urban paving: optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 151, 381-392.

**Rosso, F., Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Cotana, F., Ferrero, M. (2017c).** Smart cool mortar for passive cooling of historical and existing buildings: experimental analysis and dynamic simulation. *Energy Procedia*, 134, 536-544.

**Roulet, A. (2004).** Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments (1<sup>ère</sup> éd.). Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes de Lausanne.

**Safer, N., Woloszyn, M., Rusaouën, G., Roux J.J., Muresan, C. (2005).** *La façade de type double-peau : évaluation des transferts convectifs et radiatifs globaux à l'aide d'une approche CFD.* Communication présentée au VII<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, France.

**Safer, N. (2006).** *Modélisation des façades de type double-peau équipées de protections solaires : Approches multi-échelles* (Thèse de Doctorat). L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**Saint-Gobain. (2016).** Introduction à la thermique du bâtiment. Repéré à [www.construireavecsaint-gobain.fr](http://www.construireavecsaint-gobain.fr)

**Salem, T. (2007).** *Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie* (Thèse de Doctorat). L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

**Salomon, T. (2000).** *Architecture solaire et conception climatique des bâtiments.* Repéré à [www.baumardmaisonbioclimatique.com/Architecture%20solaire%20&%20Conception%20Bioclimatique.pdf](http://www.baumardmaisonbioclimatique.com/Architecture%20solaire%20&%20Conception%20Bioclimatique.pdf)

**Santamouris, M. (2006).** Confort thermique adaptatif et ventilation. *Ventilation Information Papers*, 12, 1-8.

**Santamouris, M., Pavlou, K., Synnefa, A., Niachou, K., Kolokotsa, D. (2007).** Recent progress on passive cooling techniques Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. *Energy and Buildings*, 39 (7), 859-866.

**Santamouris, M., Synnefa, A., Kolokotsa, D., Dimitriou, V., Apostolakis, K. (2008).** Passive cooling of the built environment –use of innovative reflective materials to fight heat islands and decrease cooling needs. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 3 (2), 71-82.

**Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011).** Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85 (12), 3085–3102.

**Santos, G.H.D., Fogiatto, M.A., Mendes, N. (2017).** Numerical analysis of thermal transmittance of hollow concrete blocks. *Journal of Building Physics*, 41 (1), 1-18.

**Sassine, E. (2017).** *Analyse typologique et thermique des maisons anciennes de Lille. Etude expérimentale et numérique des parois verticales* (Thèse de Doctorat). Université d'Artois, France.

**Sassine, E., Younsia, Z., Cherif, Y., Antczak, E. (2017a).** Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the Conduction Transfer function method. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 56-65.

**Sassine, E., Younsia, Z., Cherif, Y., Antczak, E. (2017b).** Experimental determination of thermal properties of brick wall for existing construction in the north of France. *Journal of Building Engineering*, 14, 15-23.

**Seoud, S. (2012).** *Audit énergétique de bâtiments tertiaires - Cas de trois bâtiments existants à Alger* (Mémoire de magister). EPAU, Algérie.

**Serrano, S., Rincón, L., González, B., Navarro, A., Bosch, M., Cabeza, L.F. (2017).** Rammed earth walls in Mediterranean climate: material characterization and thermal behaviour. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12 (3), 281-288.

**Shan, R. (2014).** Optimization for heating, cooling and lighting load in building façade design. *Elsevier-Energy Procedia*, 57, 1716-1725.

**Shen, C., Li, X. (2016).** Thermal performance of double skin façade with built-in pipes utilizing evaporative cooling water in cooling season. *Solar Energy*, 137, 55-65.

**Shi, Z., Zhang, X. (2011).** Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates. *Solar Energy*, 85 (1), 28-37.

**Silva, T., Vicente, R., Rodrigues, F., Samagaio, A., Cardoso, C. (2015).** Development of a window shutter with phase change materials: Full scale outdoor experimental approach. *Energy and Buildings*, 88, 110-121.

**Singh, S.P., Bhat, V. (2017).** Performance evaluation of dual phase change material gypsum board for the reduction of temperature swings in a building prototype in composite climate. *Energy and Buildings*, 159, 191-200.

**Song, J.Y., Lin, H., Shim, J. (2016).** *Leaf (low energy adaptive façade) Self-adapting micro shading façade design using responsive polymer sheets*. Communication présentée au séminaire international Façade tectonics- World Congress Los Angeles, États-Unis.

- Soudani, L.C.L. (2016).** *Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material* (Thèse de Doctorat). Université de Lyon, France.
- Soupart-Caron, A. (2015).** *Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase* (Thèse de Doctorat). Université Grenoble-Alpes, France.
- Sozer, H. (2010).** Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment*, 45 (12), 2581-2593.
- Spitz, C. (2012).** *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments* (Thèse de Doctorat). Université de Grenoble, France.
- Suárez, M.J., Sanjuan, C., Gutiérrez, A.J., Pistono, J., Blanco, E. (2012).** Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade. *Applied Thermal Engineering*, 37, 302-313.
- Swingedouw, D. (2014).** *Introduction à la dynamique du climat*. Note du cours, Université de BORDEAUX1.
- Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H. (2007).** Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39 (11), 1167-1174.
- Tittlein, P. (2008).** *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation* (Thèse de Doctorat). Université de Savoie, France.
- Tixier, N. (2003).** Conception thermique d'un habitat : rappels, stratégies. Repéré à [www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/tixier/DEA\\_Thermique.pdf](http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/tixier/DEA_Thermique.pdf)
- Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Haddad, A., Cabeza, L.F., Jiménez, L., Boer, D. (2018).** Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk. *Applied Energy*, 224, 602-614.
- Trachte, S. (2012).** *Matériau, Matière d'Architecture Soutenable : Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable* (Thèse de Doctorat). Université catholique de Louvain, Belgique.

- Tyagi, V.V., Kaushik, S.C., Tyagi, S.K., Akiyama, T. (2011).** Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2), 1373-1391.
- Uemoto, K.L., Sato, N.M.N., John, V.M. (2010).** Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings*, 42 (1), 17-22.
- Valderrama Ulloa, C.A. (2013).** *Exploitation et réhabilitation de bâtiments tertiaires : une démarche énergétique d'amélioration environnementale* (Thèse de Doctorat). Université de Bordeaux 1, France.
- Velázquez-Romo, E.E. (2015).** *Processus de conception énergétique de bâtiments durables* (Thèse de Doctorat). Université d'Arts et Métiers ParisTech, France.
- Veltz, I. (2015).** Les Climats du Futur. Repéré à [mediaserv.climatetmeteo.fr/users/IsabelleVeltz/LesClimatsDuFutur/LesClimatsDuFutur.pdf](https://mediaserv.climatetmeteo.fr/users/IsabelleVeltz/LesClimatsDuFutur/LesClimatsDuFutur.pdf)
- Venancio, R., Pedrini, A. (2009).** *Envelope Design, Energy Consumption and Thermal Performance*. Communication présentée à la 26<sup>th</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA, Québec, Canada.
- Venkateswara-Rao, V., Parameshwaran, R., Vinayaka-Ram, V. (2018).** PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends. *Energy and Buildings*, 158, 95-122.
- Verdonschot, J., Zeiler, W., Boxem, G. (2009).** *Passive Heating Performance of different facade types*. Communication présentée à la 26<sup>th</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA, Québec, Canada.
- Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. (2018).** Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166.
- Wang, M., Peng, J., Li, N., Yang, H., Wang, C., Li, X., Lu, T. (2017).** Comparison of energy performance between PV double skin facades and PV insulating glass units. *Applied Energy*, 194, 148-160.
- Wannous, S. (2013).** *Les économies d'énergie provoquées par la crise pétrolière de 1974 dans les bâtiments publics franciliens* (Thèse de Doctorat). Conservatoire national des arts et métiers cnam, France.

**Westphal, F.S., Andreis, C. (2016).** Influence of Glazed Facades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings in Brazilian Climates. *International Journal of Engineering Research and Applications* 6 (11), 54-60.

**Xu, S. (2014).** *Energy Evaluation and Optimal Design of Semi-transparent Photovoltaic Façade for Office Buildings in Central China* (Thèse de Doctorat). Université de Sheffield, L'Angleterre.

**Yang, H., Zhou, Y., Jin, F.Y., Zhan, X. (2016).** Thermal Environment Dynamic Simulation of Double Skin Façade with Middle Shading Device in Summer. *Procedia Engineering*, 146, 251-256.

**Yasa, E. (2015).** Evaluation of the Effect of the Different Distances between Two Facades Natural Ventilation on Atrium Buildings with DSF and PMV-PPD Comfort. *Procedia Engineering*, 121, 667-674.

**Yau, J.T., Hwang, R.L., Huang, K.T. (2017).** *Thermal comfort based window glass selection for office buildings*. Communication présentée à la conférence Internationale Passive and Low Energy Architecture PLEA, Edinburgh, Royaume-Uni.

**Yazdizad, A., Rezaei, F., Faizi, F. (2014).** *Classification of Double Skin Façade and Their Function to Reduce Energy Consumption and create sustainability in Buildings*. Communication présentée au 2<sup>nd</sup> International Congress on Structure, Architecture and Urban Development, Tabriz, Iran.

**Young, B.A., Falzone, G., Wei, Z., Sant, G., Pilon, L., (2018).** Reduced-scale experiments to evaluate performance of composite building envelopes containing phase change materials. *Construction and Building Materials*, 162, 584-595.

**Younsi, Z., Zalewski, L., Joulin, A., Lassue, S., Rouse, D. (2009).** *Étude expérimentale d'un mur trombe-composite à échelle réduite intégrant des matériaux à changement de phase*. Communication présentée à l'IX<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Lille, France.

**Yuksel, E., Nil Turkeri, A. (2017).** A literature review of experimental setups monitoring thermal performance of vegetated facade systems. *Journal of facade design & engineering*, 5 (2), 83-101.

**Zelenay, K., Perepelitza, M., Lehrer D. (2011).** *High-performance facades design strategies and applications in North America and Northern Europe* (Rapport CEC-500-99-013). Center for the Built Environment (CBE), Université de Californie, États-Unis.

**Zemella, G., Faraguna, A. (2014).** *Evolutionary Optimisation of Facade Design A New Approach for the Design of Building Envelopes* (1<sup>ère</sup> éd.). London : Springer.

**Ziegler, R., Schneider, B. (2012).** *Construction Aware Design Thinking*. Communication présentée à la conférence Building Envelope Design and Technology, Université de technologie de Graz, Autriche.

**Zoubir, A. (2013).** *Etude des transferts thermo convectifs dans un canal semi-ouvert : application aux façades photovoltaïques type double-peau* (Thèse de Doctorat). L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

## **Annexes**

## Annexes

### Annexe A : Les données météorologiques de la ville de Biskra

Les valeurs des températures de la station météorologique de la ville en question ont été exploitées dans cette étude. Le tableau A.1 illustre les températures moyennes mensuelles sous abri de la ville de Biskra pendant 15 ans (entre 2000 et 2015).

**Tableau A.1 :** Les températures moyennes mensuelles sous abri de Biskra entre 2000 et 2015

(Source : Station météorologique de Biskra, 2016 - adaptée par l'auteur, 2017)

Mois Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne
2000	9.4	13.7	17.7	22.2	28.7	30.6	34.2	33.1	29.1	21.8	16.9	13.1	22.5
2001	11.6	13.3	21	21.1	32.5	35.9	34.1	30	17.1	11	11	11	20.8
2002	10.6	14.6	19	21.4	26.3	31.8	34.2	33.2	28.8	22.9	17	13.9	22.8
2003	11.8	11.9	16.4	21.4	26.9	32.4	36.4	34.4	28.9	24.3	17.4	11.9	22.8
2004	12.8	14.9	17.3	19.7	23	30.2	33.3	34.7	28.4	24.5	15.6	12.4	22.8
2005	10	10.8	17.8	21.8	27.9	31.7	35.9	33.7	28.5	24	16.8	10.8	22.2
2006	10	12	17.7	23.2	28.5	31.6	34.4	33.9	27.4	24.7	17	13	22.5
2007	12.2	15.4	16.5	20.4	26.7	33.1	33.7	34.2	29.2	24	15.9	12.6	22.8
2008	12.2	13.8	17.8	22.5	26.6	30.8	36.2	34.4	29.5	22.4	15.3	10.9	22.7
2009	11.9	12.1	16	18.5	26.2	32	35.9	34.8	27.1	22.9	16.8	13.2	22.3
2010	12.6	14.5	18.3	22	24.3	31	35.1	34.4	28.7	22.4	16.6	12.4	22.7
2011	12.1	13.1	15.9	22	24.9	29.8	34.8	34.1	30.4	22.3	17.4	13.3	22.5
2012	11.9	10.5	17	21.2	26.8	34.2	36.3	35.6	29.6	24.4	18	13	23.2
2013	12.7	12.1	18.2	22	25.9	30	34.3	29.6	26.1	17.3	12.1	12.1	21
2014	12.7	14.9	16.3	22.7	26.9	30.6	34.5	34.9	31.1	25.2	18.5	12.8	23.4
2015	11.8	12.3	16.5	22.4	28	31.2	34.4	34.3	29.4	23.5	17.6	12.2	22.8
<b>Moyenne</b>	11.6	13.1	17.5	21.5	26.9	31.7	34.9	33.7	28.1	22.3	16.2	12.4	22.5

A travers l'exploitation des valeurs de ce tableau, le mois représentatif de chaque saison est le mois de Janvier pour la saison froide et le mois de Juillet pour la saison chaude.

Après la détermination des mois d'étude, les valeurs des températures moyennes journalières du mois de Janvier et Juillet ont été utilisées afin de calculer la semaine représentative "design week" de chaque période et par la suite la sélection de la journée type "design day" pour la prise de mesures sur terrain (Tableau A.2 et A.3). Les mesures de l'étude expérimentale sur les cellules tests ont été effectuées pendant le mois de Décembre et le mois d'Août (Tableau A.4 et A.5).

Le calcul de la semaine type "design week" et la sélection de la journée type de la prise de mesures "design day" du mois le plus froid (Janvier) pour l'étude sur terrain (Tableau A.2).

**Tableau A.2 : Calcul de la semaine type "design week" du mois de Janvier**  
(Source : Auteur, 2017)

Janvier	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Moyenne
1	7.6	9	11.3	14.2	12.1	10.9	11.6	11.8	11.9	11.6	14.2	11	14.3	12	9.2	9	11.36
2	9.9	8.4	10.7	13.9	12.1	13.3	12.6	10.2	10.5	12.3	15.3	10	12.8	11.1	9	9	11.32
3	11	11.7	10.7	16	12.1	13	11.9	11.9	10	14.4	13.7	12.9	15.5	12.8	13.2	10.3	12.57
4	8.1	11.9	9.2	14.9	11.9	11.3	10.7	10.3	12.2	12.1	11.6	12	14.7	13.8	12.2	13.3	11.89
5	9.5	13.4	8.1	15.7	11.2	10.3	9.9	12.5	13.9	12.7	12	11.5	15	12.8	12.9	12.1	12.09
6	8.4	12.6	8.3	12.5	11	10.1	7.3	12.5	13.7	9.6	13.1	11.7	15.2	14	15.2	10.5	11.61
7	8.3	11.7	5.6	14.1	8.9	8.5	7	11.2	12.9	11.5	13.8	11.2	13.6	13.3	12.7	10.8	10.94
8	7.7	12.6	7	11	9.5	10.2	8.8	10.5	13.7	11.9	11.3	11.8	13	12	12	10.2	10.83
9	7.7	11.4	9.6	12.2	10.8	9.2	13.7	12.2	13.7	11.8	7.2	12.6	11.5	12.9	12.1	11.9	11.28
10	8.5	9.2	9.3	7	17.8	8	11.5	13.2	13.2	11.6	6.3	12	10.3	12	12.5	13.5	10.99
11	10	9.5	10	9.6	17.8	10.2	12.8	13.6	12.2	11.7	10.3	13.4	10.2	14.4	12.7	12.9	11.96
12	10.1	10.2	10.6	9.7	16.3	11.2	10.9	15	12.5	13.3	12.9	16.4	11	13.4	15.1	12.1	12.54
13	10.5	10	11.2	10.2	15.1	10	9.1	13.9	12.4	13.3	14.3	15.7	9.1	12	16.5	10.7	12.13
14	9.7	14.2	9	12	15.4	11.3	10.4	12.7	10.5	12.5	12.7	14.5	9.4	12.5	14.2	12.4	12.09
15	7.3	12.9	13.6	11.1	17.2	10.7	9.1	11.7	11.9	11.9	13.7	15.1	10.5	11.6	13.5	13	12.18
16	9.3	10.1	11.2	11.4	12.8	9.7	6.3	11	11.7	9.5	14.9	15.3	10	14.1	11.5	14	11.43
17	10.3	12	12.3	12.1	15.4	8.4	8.7	12.5	13.7	10.4	12.2	13.7	13	16.5	14.3	10.2	12.23
18	11.4	12.1	9.8	12.5	12.2	9	7.7	13.3	10.5	13.6	13.8	10.5	12.3	16.9	12.2	11.7	11.84
19	11.1	13.7	9.2	12.4	12.5	11.2	8.6	13.6	16.6	12.7	13.7	12.2	11	16.4	13.6	6.6	12.19
20	11.6	15	10.8	11.5	10.8	13.9	10.8	16.7	13.9	11.3	15.4	12.9	7.7	14.5	11.7	9.4	12.37
21	9.1	14.2	10.6	10.5	13.4	16.5	12.6	13.9	13.6	10.9	16.5	12.1	11	12.5	10.1	11.2	12.42
22	9.5	13.1	11	12.3	15.7	17.2	13.7	12.5	11.9	11.4	12.7	8.9	10.6	12.5	8.7	9.2	11.93
23	8.7	11.4	13.1	13.8	12.4	13.7	13.4	12.8	16.6	13.9	10.5	9.8	15	9.7	13	11.8	12.48
24	10.3	12.3	14.2	11.9	17	11.8	10.6	12.9	13	16.6	11.8	10	15.2	10.8	13.4	11.3	12.69
25	10.4	12.5	15.3	9.5	16.6	10.4	5	10.5	10.8	14.7	14.2	12.2	14.7	12.1	15	11.3	12.20
26	11.3	14.1	12.7	12.9	14.3	5.6	5.8	13.1	11.1	11.3	12.9	9.7	11.8	8.9	18.7	11.7	11.62
27	10.5	12.9	12.6	13.7	16.3	4.9	8.7	13.9	11.3	10	15.3	13.2	11.9	11.7	16.5	11.8	12.20
28	7.2	15.2	14.3	15.2	16	6.6	12.5	13.7	13.1	12.3	13.3	14.3	12.2	11.5	15.2	12.7	12.83
29	14.2	11.4	14.8	14.2	10.9	7.7	12.2	11.4	12.7	15	12.4	13.4	12.2	17.2	11.3	11.7	12.67
30	13	11.5	13.7	11.1	9.5	9.1	11.1	15.9	12.2	16.6	12.7	14	9.9	13.5	14.2	13.7	12.61
31	10.1	11.2	13.8	6.2	10.9	10.3	12.3	17.5	9.2	13	12.3	13	13.2	16.3	13.7	18.1	12.57

Le calcul de la semaine type "design week" et la sélection de la journée type de la prise de mesures "design day" du mois le plus chaud (Juillet) pour l'étude sur terrain (Tableau A.3).

**Tableau A.3 : Calcul de la semaine type "design week" du mois de Juillet**  
(Source : Auteur, 2017)

Juillet	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Moyenne
1	34.3	30.6	36.3	35.9	33.2	36.5	36.9	33.3	32	33.1	31.2	35.5	34.8	29.1	30.1	33	33.68
2	36	33.5	33	36.8	33.9	35.3	35.3	33.1	32.8	33	32.8	34.2	34.1	29.2	32.5	31.7	33.58
3	34.8	32.2	32.9	38.6	35.2	33.5	35.1	33.8	34.6	34.8	34.2	35.2	35.2	32.8	34.6	32	34.34
4	34	33.8	33.8	37.9	32.6	32.4	37.9	34.5	37	35.3	34	34.6	36.2	33.6	38	29.9	34.72
5	33.4	38	34.4	34.2	33.7	34	37.3	35.4	37.7	35.9	35.1	35.2	36.8	32.2	38.2	31	35.16
6	32.5	40.1	35.8	34.5	35.5	27.9	35.8	31.2	37	35.8	33.8	31.9	37.5	30.4	34.9	30.3	34.06
7	35.9	40.7	39.3	36	35.1	33.7	36.4	31.5	38.3	35.9	32.9	32.7	38.6	30.8	36.1	30.6	35.28
8	35.1	38.8	36	33.9	33.1	34.4	35.7	33.5	39.7	38.5	34.1	34	38.3	31.7	38	32.5	35.46
9	34.8	36.1	36.4	32.9	32.5	35.3	33.3	36.1	40.4	36.1	33.7	35.9	39.1	32.6	33.7	35.6	35.28
10	33.2	38.4	37	34.8	31.6	38	32.5	37.3	40.2	34.4	33.7	37.8	39	33.9	32.4	34.6	35.55
11	34.7	37.3	37.1	33.8	33.3	34.2	31.3	32.1	40.6	32.4	34.2	38.4	39.7	32.6	30.5	33.9	34.76
12	32.6	34.1	36.4	34.2	34.1	31.4	31.9	28.9	40.9	34.1	34.2	37.4	39.5	34.1	30.5	33	34.21
13	29.4	34.4	36	33.9	31	31.1	33	29.4	39.5	35.4	35.1	37.7	40	36	33.6	33.8	34.33
14	30.4	36	31.7	35	28.8	32.3	34.5	31.4	38.1	36.3	37.9	35.3	39.5	36.6	33.2	35.2	34.51
15	32.3	38.9	28	37.8	27.4	33.7	34.9	32.2	33.7	35.7	36.2	32	39.1	33	34	34.2	33.94
16	31	38.4	29.9	38.3	29.7	33.5	33.4	31.2	34.3	36.3	36.7	34.1	35.7	33.6	32.7	33.1	33.87
17	35.7	35.6	31.8	38.8	30.8	34.8	32	30.5	34.4	37	37.1	35.6	34.7	34.9	33.4	33.2	34.39
18	37.9	33.1	33.6	33.4	34.5	36	31.2	31.5	37.2	36.3	38.7	35.2	31.6	34.2	32.2	33.8	34.40
19	36.1	34.3	33.1	38.3	35	35.9	32.2	33.1	35.3	31.7	36.7	38.5	32	33.3	33.4	33.2	34.51
20	32.2	32.7	34.3	37.1	31.9	35.5	33.2	33.9	34.2	32.4	35	36.1	34.1	34.7	35.9	35.7	34.31
21	34.4	30.2	33.5	36.9	34.3	34.6	33.6	34.3	35.9	35.1	36.2	33.5	36.1	37.5	35.1	35.3	34.78
22	33.9	32.4	36.2	36.1	35.9	36.6	33.5	34.5	36.7	32.1	37.4	36.7	36.1	36.9	31.5	37.2	35.23
23	31.9	35.7	37.5	35	34.3	37.5	33.3	34.9	32.4	36.4	38.7	35.3	30	34.8	31.5	35.5	34.67
24	30.9	36	36.7	35.8	34.6	35.2	33.9	34.7	32.8	36	37.7	32.6	29	33.7	33.2	33.3	34.13
25	33.6	38.5	31.3	36	36.3	39.2	35.4	35.2	35.7	36.1	35.3	29.9	30.5	34.7	35.9	35.1	34.92
26	37.2	34.6	31.9	37.5	33.7	40.7	35.5	34.3	36.9	37.3	31	29.6	34.1	35.9	38.5	36.5	35.33
27	37.9	34	30.4	38.6	30.7	40.1	35.6	34.2	33.7	36.7	30.3	31.1	37.4	37.6	38.2	36.1	35.16
28	38.2	36	31	38.9	31.1	38.9	34	34.3	33.7	37.4	31	33.8	37.2	36.7	33.2	36.4	35.11
29	36	38.5	32.9	36.4	31.9	38.5	36	33.8	34.6	37.7	34.4	33.7	38	34.7	36.5	37.1	35.67
30	33.2	37.5	32.3	35.3	33.9	37.9	36.4	34.6	34.2	37.4	33.4	32.6	38.3	35.8	35	37.4	35.33
31	33.8	37.3	34.5	33.7	32.7	37.8	34.4	39.5	34	33.8	34.9	32.8	36.7	33.6	33.2	37.6	35.02

Le calcul de la semaine type "design week" et la sélection de la journée type de la prise de mesures "design day" pour l'étude expérimentale pendant le mois d'Août (Tableau A.4).

**Tableau A.4** : Calcul de la semaine type "design week" du mois d'Août  
(Source : Auteur, 2017)

Août	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Moyenne
1	31.5	34.1	33.4	35	32.3	39.6	35.5	34.1	34.1	34	33.2	31.8	36.1	32.9	33	37.7	34.27
2	31.1	34.1	35.8	30	33.5	39.2	36.5	33.6	34.8	34.4	34.5	34.7	37.3	34.4	36.5	38.7	34.83
3	32.2	34.1	38.5	32.3	35.3	36.3	35.8	34.3	33.9	35.5	36.2	35.3	39.5	33.2	37.8	38.7	35.56
4	32	35.3	38.7	32	34.8	35.5	36	35.5	34.3	35	34.3	34.7	37.8	32.8	37.4	36.4	35.03
5	31.8	35.4	38	32.2	34.8	32.4	31.6	33.8	36.2	34	31.9	35.5	39	33.6	38	36.2	34.65
6	28.6	34.2	39.2	32.6	33.2	29.5	32.8	31.3	36.3	33.5	32	35.2	39.8	33.8	33.7	37.2	33.93
7	29	32.9	38.3	30	33	30.6	32.8	32.8	34.5	34.2	34.6	36.6	37.3	34.8	32.6	35.8	33.74
8	30.2	32.5	33.7	34	30.8	33.7	31.1	37.6	35.4	35.3	34.6	39.4	37.5	33.1	32.2	35.4	34.16
9	33	34.2	33.5	35.5	35.1	35.1	29.6	35.2	35.6	35.2	32.8	38.2	38	33.7	32.8	35.4	34.56
10	32.1	37	32.8	32.7	39.9	35.6	28.8	29.7	33.8	36.1	32.1	33.4	38.7	31.9	34.4	35.3	34.02
11	30.5	36.8	29.8	32.5	37.8	37.1	28.4	30.3	34.1	35	34	31.1	38.5	30.9	31	34.2	33.25
12	32.1	33.8	28.1	33.1	37.5	37.4	33.2	31.7	35.7	35.6	34.4	32.4	34.2	30.5	38	36.5	34.01
13	33	32.4	30	31.9	38	34.8	35.5	34.1	37.9	38.5	35	32.7	36.6	32.4	38.3	35.3	34.78
14	32.6	33	33.7	32.2	35.6	34.1	32.6	34.2	37.4	37.9	35.4	34.8	37.2	33.7	37.8	34.2	34.78
15	32.3	33.1	35.1	30.4	34.7	35.2	34	33.8	37.8	38.3	34	36.2	35.9	32.3	34.5	32	34.38
16	30.9	33.2	34.7	33.5	34	36.8	34.6	32	32	39.1	34.6	32.9	37.3	32	33.8	33.2	34.04
17	32.3	32.3	33.6	36	35.4	35.4	35.7	33	31.6	36	34.1	33	39.8	33.3	33	31	34.09
18	33.6	35	32.5	33.7	37.3	36.5	37.5	32.9	34.9	33.9	34.7	32.8	35.8	28.7	32.2	34	34.13
19	32.9	35	31.7	34.1	37	38.2	40.3	35.5	35	33.7	37.7	32.8	32.5	31.5	34.8	32.9	34.75
20	35.4	38.6	31.6	34.8	37.7	35	37.9	36.7	36.5	32.7	36.1	32.5	32.6	33	35.6	31.5	34.89
21	36.7	37.1	33.2	34.8	36.9	30.6	35.3	35.7	35.2	32.2	36	32.6	32.8	30.3	36.7	32.6	34.29
22	34.4	34.6	32.4	34.5	33.5	28	33.8	33.8	34.5	32.6	36.3	32.9	32.9	27.6	34.5	32.5	33.05
23	33.7	31.7	31.8	35	33.6	28.7	34.8	33.9	34	32.7	34.2	32.6	33	29.1	34.2	30.2	32.70
24	33.9	31.2	29.2	35.1	34.7	28.7	35.3	36.1	33	33.9	34.5	33.8	33.8	32.1	33.5	34	33.30
25	34.1	32	30.6	35.7	35.5	31.6	36.5	34.7	32.2	35.3	36.3	34.2	33.7	33.2	32.3	35.9	33.99
26	34.3	33.4	32.4	36.2	36.7	31.7	33.6	33.3	32.7	36.2	34.5	34.2	35.6	34	33.1	33.3	34.08
27	34.9	33.6	30.7	34.7	33.3	33.2	31.9	33	30.8	34.8	34.7	35	33.9	33.7	34.8	35.2	33.64
28	35.4	35	29.7	37	29.5	34.5	31	34.5	30.9	32	35.1	33.3	31.7	32.5	34.2	32.7	33.06
29	34.9	33.9	26.1	39.2	30	30.8	31.9	34.4	31.9	31	34.4	31.9	31.4	29.7	33	30.7	32.20
30	33.7	34.2	32.5	37.3	25.6	29.2	32.8	34.1	32.6	31.7	33.4	32	32.8	32.4	33.4	29.8	32.34
31	33.9	34.1	31.1	38.7	30.5	28.7	32.3	36.3	33	31.3	31.7	33.6	32.5	30.2	32.6	31.7	32.64

Le calcul de la semaine type "design week" et la sélection de la journée type de la prise de mesures "design day" pour l'étude expérimentale pour le mois de Décembre (Tableau A.5).

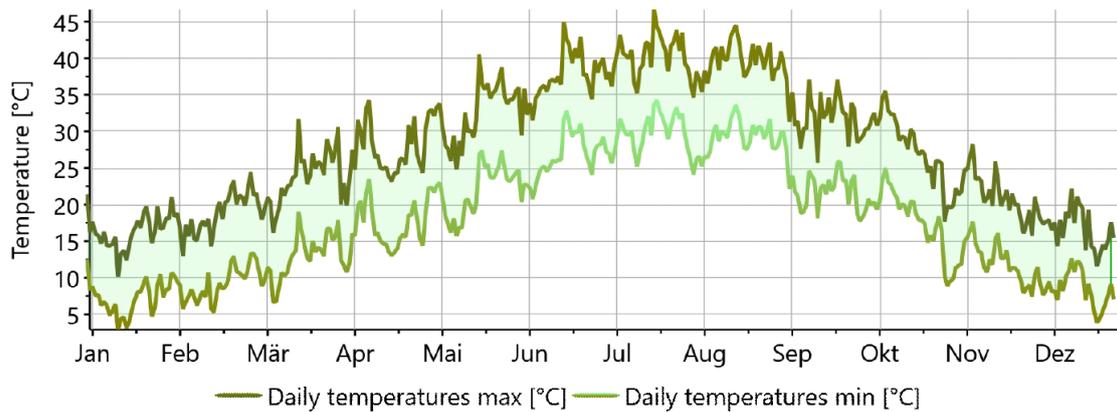
**Tableau A.5 :** Calcul de la semaine type "design week" du mois de Décembre

(Source : Auteur, 2017)

Décembre	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Moyenne
1	15,4	17	14,8	13,2	15,4	11,7	16,4	14,3	12,7	12,7	22	15,4	7,3	10,5	13,9	14	14,17
2	17,4	14,8	17,1	13,8	16	10,2	15,3	14,3	10,7	13,2	17,9	15,6	9,6	10,5	13,9	13,1	13,96
3	16,4	14,2	15,3	13,8	16,6	10,7	13,3	13,5	11,4	11,9	15,5	17,1	11,5	11,6	17	11,7	13,84
4	14,2	13,9	14,2	10	17	12,1	14,5	15,8	10,6	13,6	12,2	16,1	11,5	14	12,7	13,9	13,52
5	13,5	15,3	14,9	11	17	12,9	15,8	16,2	9,1	15,8	9,2	15,2	13,6	16,3	13,5	11,8	13,82
6	12,9	15,2	10,8	13,7	14,1	14,5	13,2	16	16	14,5	11,1	14,7	13,4	13,5	15,2	14,1	13,93
7	13	15,6	13,9	14,5	14,2	13,8	15,3	15,5	14,2	13,5	12,8	17	11	13,2	12,3	13,5	13,96
8	13,6	13	12,6	15,9	14,1	12,4	13,7	17	12,5	13,7	16,1	18,5	14,7	11,3	14,9	14,1	14,26
9	14,1	11,8	11,2	10,9	12,8	12,6	13,6	17,8	14,7	14,75	18	13	13	12,3	12,8	11	13,40
10	18,4	11	11,2	8,8	14,3	11,3	12,8	17,3	12,4	16,5	20,2	12	9,5	13,8	13,7	13	13,51
11	17,2	10,1	13,7	12,3	13,5	12,6	15,3	14	10,3	14,4	13,25	13,9	10,5	13,9	13,3	13,3	13,22
12	14,5	7,6	14,7	15,2	15,5	9,7	15	11,9	9,2	13	8,7	13,2	10,5	12	15,1	11,6	12,34
13	14,2	8,7	14,1	18,4	12,5	10	13,8	11,6	8,7	11	11,7	16	9,8	11,1	10,1	10	11,98
14	13,4	10,1	14,3	15,1	12,8	14,3	13,5	12	6	12,5	15,2	12,4	12,3	11,2	8,9	12	12,25
15	12,3	11,2	16,2	17,9	12,9	12,6	13,8	9,4	9,2	10,1	13,1	14,5	15,2	12,3	12,5	13,7	12,93
16	13,3	11,7	14,4	14,5	13,7	12	14,2	6,9	7,2	10,8	8,9	13,8	15	11,3	10,6	15	12,08
17	12,1	13,7	13,5	9,8	14,8	11,4	15	9,6	6,2	12,6	8,5	13,6	17,6	9,9	14,3	14,2	12,90
18	12,2	7,7	13,2	11,7	14,6	13,6	15,7	5,9	10,4	15	9,2	13,3	17,3	11,2	14,1	13,5	12,41
19	11	8,3	14,5	12	15,2	11,5	13	7,4	11,9	16	10,7	11,6	16,4	12,5	15,2	13	12,51
20	11,3	10,4	15,5	13,7	13,3	11,2	12,7	8,1	14,2	13,2	15,2	10,3	14,5	11	16,3	13,7	12,79
21	14,2	11,4	16,9	14	14	13	11,8	10,8	14,1	9,1	13,6	12,9	16,8	16,3	15,7	13,4	13,63
22	13	11,6	15,6	11	12	10,4	12,1	16,1	12	11	15,1	17,2	19,2	16,2	12,9	14	13,71
23	14,5	10,6	13,7	10,7	11,5	10	10,9	14,9	12	13,3	18,1	16,4	14,7	15,9	12	14,2	13,34
24	10,9	10,7	15,6	10,6	9,2	8,3	8,8	13,7	10,7	16,1	14,4	14	13,7	14,2	11,6	11,2	12,11
25	11,2	10,6	17,7	12,5	6,3	7,5	14,9	15,3	10,2	18,9	10,5	13	12,8	11	11,7	12,3	12,28
26	11,3	11,8	18,8	9,2	8,3	9,2	13,6	15,8	10,9	16,5	11	12,8	12,3	13,2	12,2	14,4	12,58
27	13,9	12,1	13	6,4	6,6	10,4	13,8	15	10,6	16,3	10,2	11,3	16,4	13,2	14	13,5	12,29
28	13,8	11,1	16,1	7,1	7	10,4	13,1	13,3	10,8	14	10,7	10,5	13,5	13,4	12,8	11,7	11,83
29	15,6	8,8	15	13,5	8,8	12	10,5	12	14,7	15,1	9,1	11,6	14,7	12,8	13,6	9,7	12,34
30	14,1	9,4	12,5	11,6	12	10,2	11,8	14,5	15	13,2	8,2	12,9	13,4	12	11,2	11,5	12,09
31	11,3	10,6	13,2	13,7	12,3	9	12,5	13,6	13,1	11,4	10,5	13,3	13,1	10	9,7	13	11,89

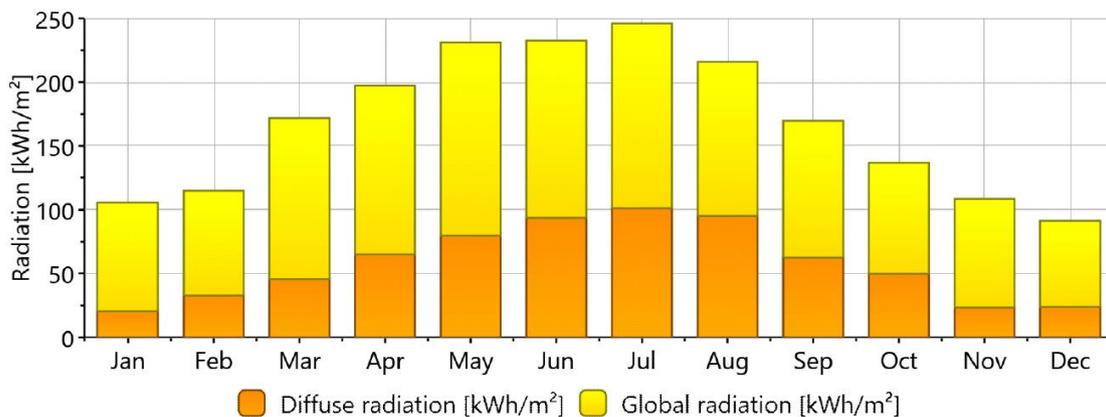
Le logiciel des données météorologiques "Meteonorm V.7.2" a été utilisé pour générer le fichier climatique de la ville de Biskra sous format "Tm2" afin de l'exploiter dans la simulation avec le logiciel "TRNSYS 17".

La figure A.1 illustre les valeurs de la température annuelle maximale et minimale de la ville de Biskra créée par le logiciel "Meteonorm V.7.2".



**Figure A.1 :** Les températures maximales et minimales de la ville de Biskra pendant une année (Source : Meteonorm V.7.2)

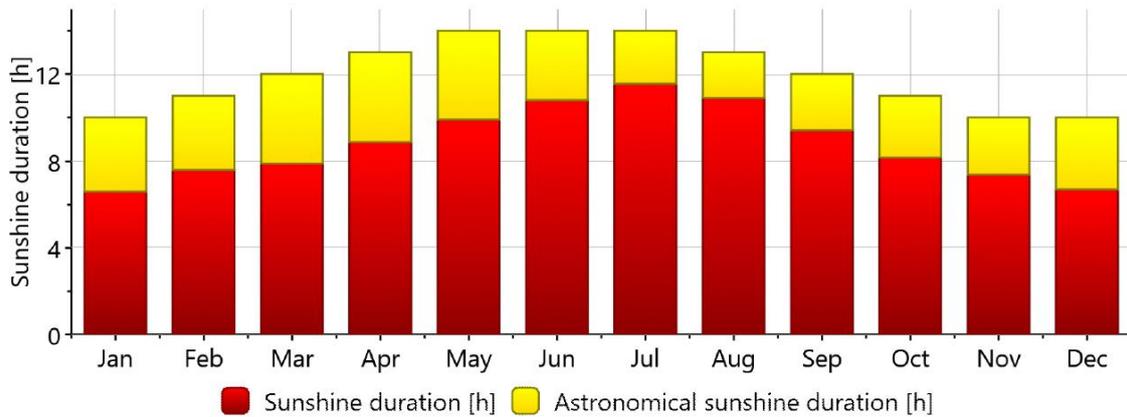
Les valeurs des radiations mensuelles de la ville de Biskra créées par le logiciel "Meteonorm V.7.2" sont représentées dans la figure A.2.



**Figure A.2 :** Les radiations mensuelles de la ville de Biskra (Source : Meteonorm V.7.2)

Les valeurs des radiations sont très élevées durant toute l'année particulièrement pendant l'été. Cette saison fut caractérisée par de grandes valeurs des radiations directes et diffuses avec une radiation globale de près de 250 KWh/m<sup>2</sup> pendant le mois de Juillet.

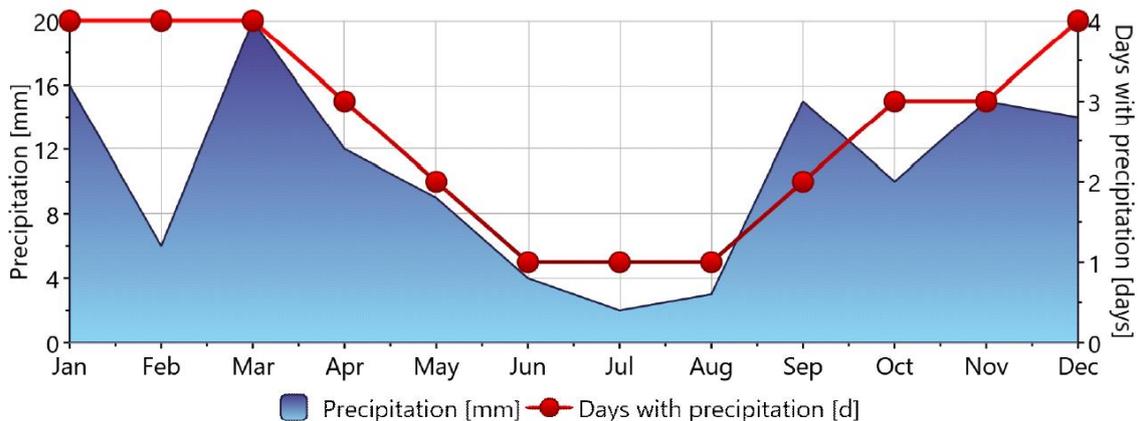
La figure A.3 présente la durée d'ensoleillement au niveau de la ville de Biskra pendant une année.



**Figure A.3 :** La durée d'ensoleillement dans la ville de Biskra (Source : Meteonorm V.7.2)

La durée d'ensoleillement la plus longue de cette ville est environ de 12h pendant le mois de Juillet.

À Biskra, les précipitations sont faibles et irrégulières comme le démontre la figure A.4.



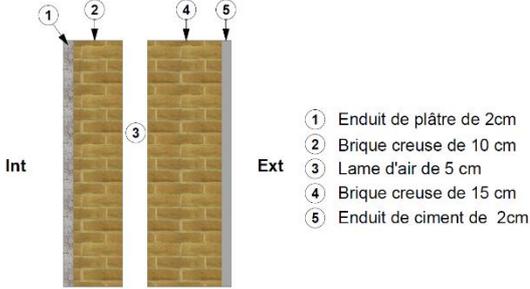
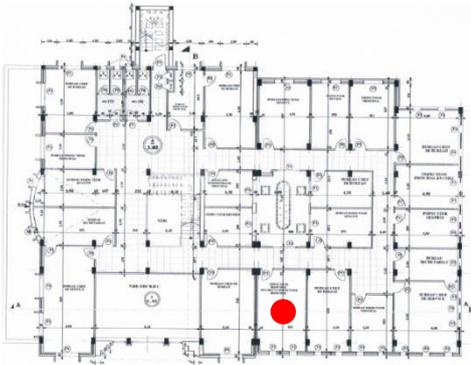
**Figure A.4 :** Les précipitations de la ville de Biskra (Source : Meteonorm V.7.2)

Les valeurs des précipitations sont très faibles et ne dépassent pas les 20 mm.

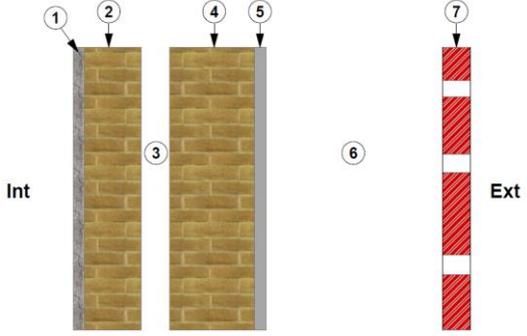
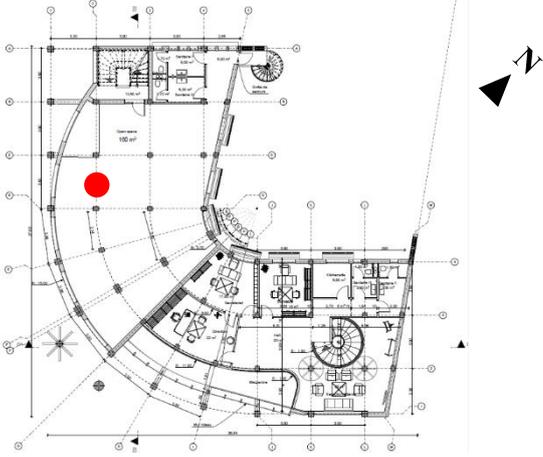
## Annexe B : Cas d'étude

Les tableaux ci-dessous représentent les cas d'étude.

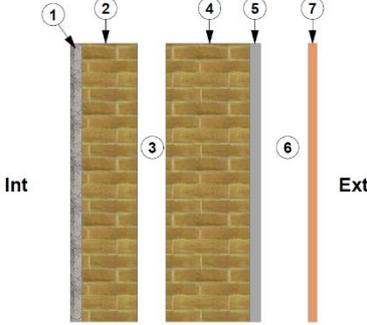
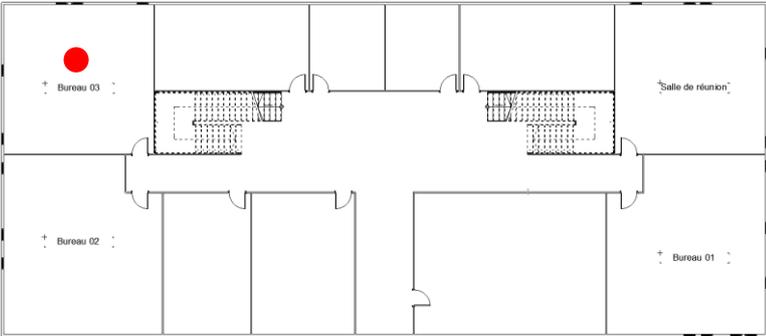
**Tableau B.1** : Cas d'étude B1- Direction du Commerce (Source : Auteur, 2017)

Cas d'étude	<p style="text-align: center;"><b>B1 : Direction du Commerce</b></p> 
Situation	
Type de la façade	<p style="text-align: center;">Façade simple avec un pourcentage faible des ouvertures et sans protection solaire</p>
Composition de la façade	 <ul style="list-style-type: none"> <li>① Enduit de plâtre de 2cm</li> <li>② Brique creuse de 10 cm</li> <li>③ Lame d'air de 5 cm</li> <li>④ Brique creuse de 15 cm</li> <li>⑤ Enduit de ciment de 2cm</li> </ul>
Lieu des prises de mesures	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

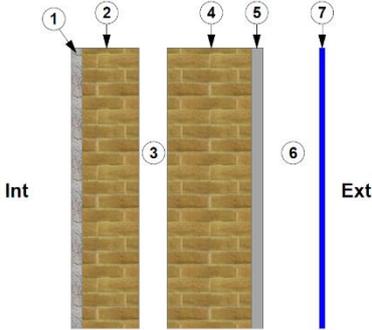
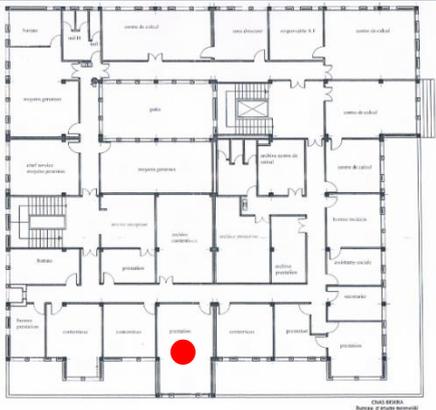
**Tableau B.2** : Cas d'étude B2- Siège de l'actel et Touring voyage (Source : Auteur, 2017)

<b>Cas d'étude</b>	<p style="text-align: center;"><b>B2 : Siège de l'actel et Touring voyage</b></p> 
<b>Situation</b>	
<b>Type de la façade</b>	Façade double peau (FDP) en acier avec un ratio d'ouverture moyen
<b>Composition de la façade</b>	 <p style="text-align: center;">Int <span style="margin-left: 200px;">Ext</span></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① Enduit de plâtre de 2cm</li> <li>② Brique creuse de 10 cm</li> <li>③ lame d'air de 5 cm</li> <li>④ Brique creuse de 15 cm</li> <li>⑤ Enduit de ciment de 2cm</li> <li>⑥ Vide</li> <li>⑦ DP en acier</li> </ul>
<b>Lieu des prises de mesures</b>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

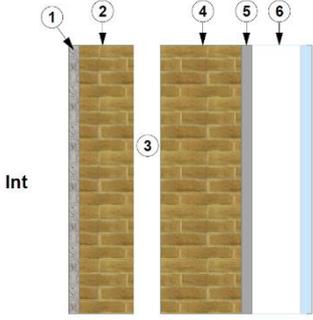
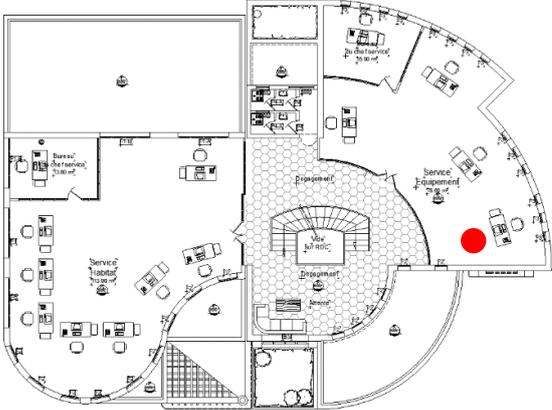
**Tableau B.3 : Cas d'étude B3- Groupe Amouri (Source : Auteur, 2017)**

<p><b>Cas d'étude</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>B3 : Groupe Amouri</b></p>  
<p><b>Situation</b></p>	
<p><b>Type de la façade</b></p>	<p style="text-align: center;">Façade ventilée (FV) en terre cuite</p>
<p><b>Composition de la façade</b></p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>① Enduit de plâtre de 2cm</li> <li>② Brique creuse de 10 cm</li> <li>③ lame d'air de 5 cm</li> <li>④ Brique creuse de 15 cm</li> <li>⑤ Enduit de ciment de 2cm</li> <li>⑥ Cavité d'air de 6cm</li> <li>⑦ FV en terre cuite de 1,6cm</li> </ul>
<p><b>Lieu des prises de mesures</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

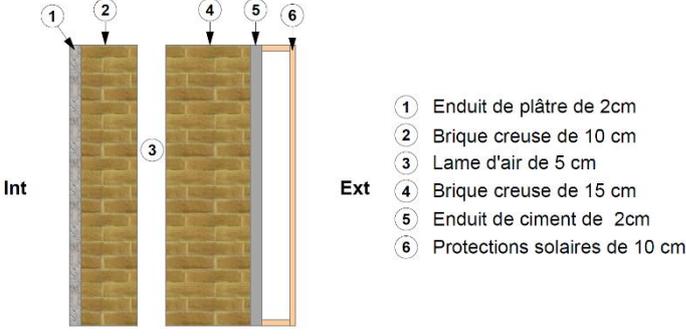
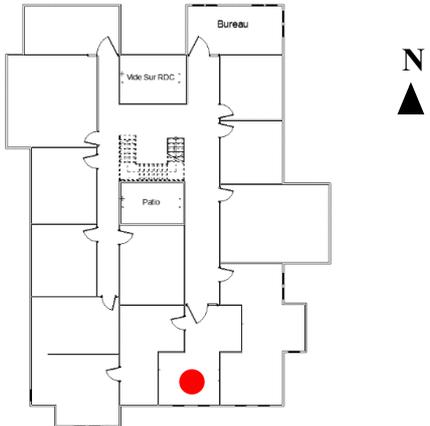
**Tableau B.4 :** Cas d'étude B4- Caisse Nationale des Assurances Sociales des Travailleurs  
(Source : Auteur, 2017)

<p><b>Cas d'étude</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>B4 : CNAS</b></p> 
<p><b>Situation</b></p>	
<p><b>Type de la façade</b></p>	<p style="text-align: center;">Façade avec un habillage en aluminium (Alucobande)</p>
<p><b>Composition de la façade</b></p>	 <p style="text-align: right;">         ① Enduit de plâtre de 2cm          ② Brique creuse de 10 cm          ③ Lame d'air de 5 cm          ④ Brique creuse de 15 cm          ⑤ Enduit de ciment de 2cm          ⑥ Cavité d'air de 10cm          ⑦ Habillage en aluminium (Alucobande)     </p>
<p><b>Lieu des prises de mesures</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 2<sup>ème</sup> étage</b></p> 

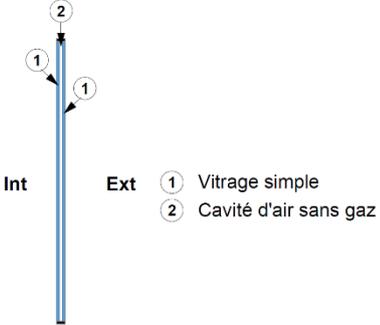
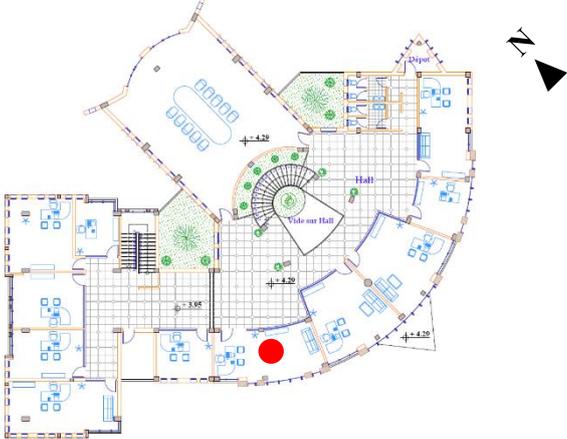
**Tableau B.5 : Cas d'étude B5- Contrôle Technique des Constructions CTC-Est**  
(Source : Auteur, 2017)

<p><b>Cas d'étude</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>B5 : Contrôle Technique des Constructions CTC-Est</b></p> 
<p><b>Situation</b></p>	
<p><b>Type de la façade</b></p>	<p style="text-align: center;">Façade avec des protections solaires verticales</p>
<p><b>Composition de la façade</b></p>	 <p style="text-align: right;">         ① Enduit de plâtre de 2cm          ② Brique creuse de 10 cm          ③ lame d'air de 5 cm          ④ Brique creuse de 15 cm          ⑤ Enduit de ciment de 2cm          ⑥ Protections solaires de 40 cm       </p>
<p><b>Lieu des prises de mesures</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p>  <p style="text-align: right;">N ▲</p>

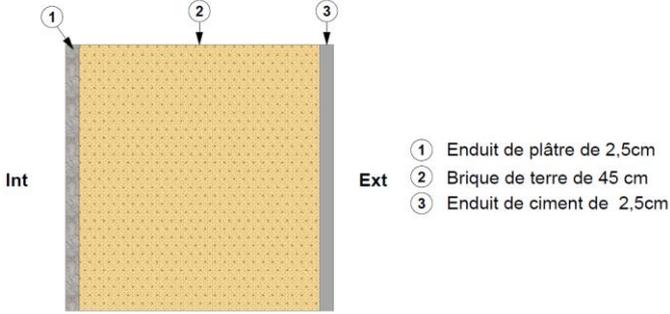
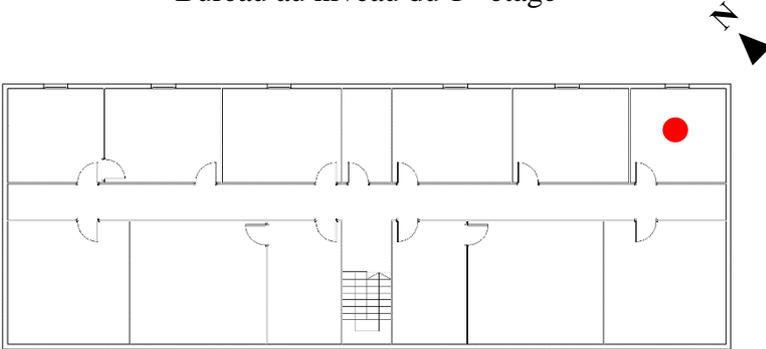
**Tableau B.6 : Cas d'étude B6- Caisse nationale de Sécurité sociale des non-salariés**  
(Source : Auteur, 2017)

Cas d'étude	<p style="text-align: center;"><b>B6 : CASNOS</b></p> 
Situation	
Type de la façade	Façade avec des protections solaires mixtes de faible épaisseur
Composition de la façade	 <p style="text-align: center;">Int <span style="margin-left: 200px;">Ext</span></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① Enduit de plâtre de 2cm</li> <li>② Brique creuse de 10 cm</li> <li>③ Lame d'air de 5 cm</li> <li>④ Brique creuse de 15 cm</li> <li>⑤ Enduit de ciment de 2cm</li> <li>⑥ Protections solaires de 10 cm</li> </ul>
Lieu des prises de mesures	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

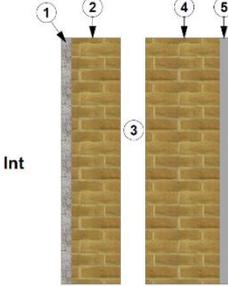
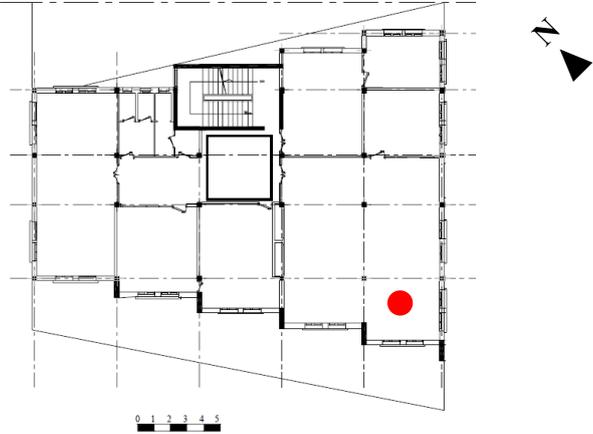
**Tableau B.7 : Cas d'étude B7- L'agence foncière (Source : Auteur, 2017)**

<p><b>Cas d'étude</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>B7 : L'agence foncière</b></p> 
<p><b>Situation</b></p>	
<p><b>Type de la façade</b></p>	<p>Façade avec un mur rideau en double vitrage (sans gaz)</p>
<p><b>Composition de la façade</b></p>	 <p>Int      Ext    ① Vitrage simple                          ② Cavité d'air sans gaz</p>
<p><b>Lieu des prises de mesures</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

**Tableau B.8 : Cas d'étude B8- Radio Ziban (Source : Auteur, 2017)**

<b>Cas d'étude</b>	<p style="text-align: center;"><b>B8 : Radio Ziban</b></p> 
<b>Situation</b>	
<b>Type de la façade</b>	<p style="text-align: center;">Façade en brique de terre de 50 cm</p>
<b>Composition de la façade</b>	 <p style="text-align: center;"> <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">1</span> Enduit de plâtre de 2.5cm  <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">2</span> Brique de terre de 45 cm  <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">3</span> Enduit de ciment de 2.5cm </p>
<b>Lieu des prises de mesures</b>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

**Tableau B.9 : Cas d'étude B9- Assurance Saa (Source : Auteur, 2017)**

<p><b>Cas d'étude</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>B9 : Assurance Saa</b></p> 
<p><b>Situation</b></p>	
<p><b>Type de la façade</b></p>	<p>Façade avec une texture rugueuse et des persiennes à l'italienne</p>
<p><b>Composition de la façade</b></p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>① Enduit de plâtre de 2cm</li> <li>② Brique creuse de 10 cm</li> <li>③ lame d'air de 5 cm</li> <li>④ Brique creuse de 15 cm</li> <li>⑤ Enduit de ciment de 2cm</li> </ul>
<p><b>Lieu des prises de mesures</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Bureau au niveau du 1<sup>er</sup> étage</b></p> 

## Annexe C : Instruments de mesures

### C.1. Anémomètre "Testo 480"

L'anémomètre (Testo 480-Référence 0563 4800) a été utilisé avec une sonde (Référence 0636 9743) de la température de l'humidité (Figure C.1).



**Figure C.1** : Anémomètre Testo 480

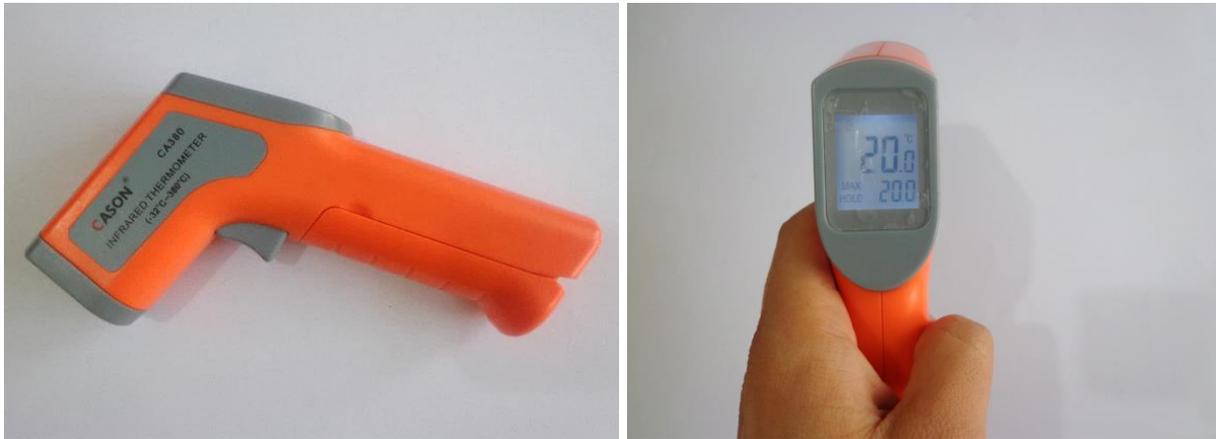
Le tableau C.1 illustre les caractéristiques de l'anémomètre exploité.

**Tableau C.1** : Les caractéristiques de l'anémomètre utilisé

Type	Testo 480
Référence	Testo 480-Réf. 0563 4800 Sonde : 0636 9743
Etendue de mesure	-20 ... +70 °C
Précision	± 0.2 °C (+15 ... +30 °C) ± 0.5 °C (étendue restante)

## C.2. Thermomètre infrarouge "CASON - CA 380"

Le Thermomètre infrarouge CASON-CA 380 a été exploité pour mesurer la température surfacique interne et externe (Figure C.2).



**Figure C.2 :** Thermomètre infrarouge CASON-CA 380

Les caractéristiques du thermomètre infrarouge utilisé sont représentées dans le tableau C.2.

**Tableau C.2 :** Les caractéristiques du thermomètre infrarouge exploité

Type	Thermomètre infrarouge "CASON - CA 380"
Etendue de mesure	-32 °C – 380 °C
Précision	± 2 °C

## Annexe D : Questionnaire

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département d'architecture

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المعمارية

### Questionnaire استبيان

Dans le cadre de la préparation d'une thèse de Doctorat en Architecture consacrée à « **l'étude et l'évaluation des impacts de la façade sur le confort thermique et l'efficacité énergétique** », nous avons l'honneur de vous remettre ce questionnaire qui a pour but d'évaluer votre satisfaction concernant les conditions de confort physique dans votre lieu de travail (bureau).

Votre contribution serait sans aucun doute d'un apport essentiel pour notre recherche.  
Nos remerciements anticipés.

Mettez une croix (X) s'il vous plaît dans la case correspondante, justifiez quand si cela vous est demandé.

في إطار التحضير لأطروحة دكتوراه في الهندسة المعمارية خاصة « بدراسة وتقييم آثار الواجهة على الرفاهية الحرارية والفعالية الطاقوية » ، يشرفنا أن نقدم لكم هذا الاستبيان الذي يهدف الى تقييم رضاكم (راحتكم) فيما يتعلق بظروف الرفاهية الجسدية في مكان عملكم (المكتب).

مشاركتم سيكون لها بدون شك مساهمة أساسية في بحثنا.  
شكرا مقدما.

ضع علامة (X) من فضلك في الخانة المناسبة، علل إذا طلب منك ذلك.

Cas d'étude :

حالة الدراسة :

Code : .....

الرمز: .....

### Informations générales معلومات عامة

Date : .....

التاريخ

Sexe :  Homme Femme

الجنس ذكر

أنثى

Age :  < 25 ans Entre 25 et 45 ans > 45 ans

السن أقل من 25 سنة

بين 25 و 45 سنة

أكثر من 45 سنة

Cochez sur le plan ci-dessous la localisation de votre bureau dans le bâtiment :

ضع علامة على المخطط لموقع مكتبك في المبنى

الطابق الأول Au 1 <sup>er</sup> étage	

### Confort الرفاهية

1-Le confort thermique (dans des conditions naturelles) : 1-الرفاهية الحرارية (في ظروف طبيعية)

Q1-Comment évaluez-vous votre sensation thermique dans votre bureau (dans des conditions naturelles) ? كيف تقيم شعورك الحراري في مكتبك (في ظروف طبيعية) ؟

	Très froide بارد جدا	Froide بارد	Légèrement froide قليلا	Confortable مريح	Légèrement chaude قليلا	Chaude حار	Très chaude حار جدا
En hiver الشتاء							
En été الصيف							

Q2-En hiver, comment évaluez-vous votre satisfaction vis-à-vis du confort thermique (dans des conditions naturelles) ? في الشتاء، كيف تقيم رضاك بالنسبة للرفاهية الحرارية (في ظروف طبيعية) ؟

	Très bonne جيد جدا	Bonne جيد	Acceptable مقبول	Mauvaise سيء	Très mauvaise سيء جدا
صباح Matin					
بعد الظهر Après-midi					

Q3-En été, comment évaluez-vous votre satisfaction vis-à-vis du confort thermique (dans des conditions naturelles) ? في الصيف، كيف تقيم رضاك بالنسبة للرفاهية الحرارية (في ظروف طبيعية) ؟

	Très bonne جيد جدا	Bonne جيد	Acceptable مقبول	Mauvaise سيء	Très mauvaise سيء جدا
Matin					
Après-midi					

**Q4-Avez-vous l'habitude d'ouvrir les fenêtres pour régler la température ? Si oui quand ?**  
هل أنت معتاد على فتح النوافذ من أجل تعديل درجة الحرارة ؟ إذا كانت الإجابة نعم فمتى ؟

En hiver في الشتاء			En été في الصيف		
	Matin	Après-midi		Matin	Après-midi
Toujours دائما			Toujours دائما		
Souvent غالبا			Souvent غالبا		
Parfois أحيانا			Parfois أحيانا		
Jamais أبدا			Jamais أبدا		

**Q5-Est-ce que vous êtes satisfait(e) de vos gestes de régulation thermique ?**

هل أنت راض على تصرفاتك لتعديل درجة الحرارة ؟

	Très satisfait(e) جد راض	Satisfait(e) راض	Insatisfait(e) غير راض	Très insatisfait(e) مستاء جدا
En hiver الشتاء				
En été الصيف				

**2-Le confort thermique (avec l'utilisation des appareils) : (مع استخدام الأجهزة)**

**Q6-En hiver, quand utilisez-vous le chauffage dans votre bureau ? Et à quelle fréquence ?**

في الشتاء، متى تستعمل المدفأة في مكتبك ؟ وكيف ؟

	Toujours دائما	Souvent غالبا	Parfois أحيانا	Jamais أبدا
Matin				
Après-midi				

**Q7-Comment évaluez-vous votre satisfaction vis-à-vis du confort thermique avec l'utilisation du chauffage ?**

كيف تقيم رضاك فيما يخص الرفاهية الحرارية مع استعمال المدفأة ؟

- Très bonne     Bonne     Acceptable     Mauvaise     Très mauvaise  
 جيد جدا    جيد    مقبول    سيء    سيء جدا

Pourquoi ? لماذا ؟

.....

**Q8-En été, quand utilisez-vous le climatiseur dans votre bureau ? Et à quelle fréquence ?**

في الصيف، متى تستعمل المكيف في مكتبك ؟ وكيف ؟

	Toujours دائما	Souvent غالبا	Parfois أحيانا	Jamais أبدا
Matin				
Après-midi				

**Q9-Vous réglez le climatiseur à quelle température ?**

على أي درجة حرارة تضبط المكيف ؟

Température de : ..... C°.  
درجة حرارة

**Q10-Comment évaluez-vous votre satisfaction vis-à-vis du confort thermique avec l'utilisation du climatiseur ?**

كيف تقيم رضاك فيما يخص الرفاهية الحرارية مع استعمال المكيف ؟

- Très bonne     Bonne     Acceptable     Mauvaise     Très mauvaise  
 جيد جدا    جيد    مقبول    سيء    سيء جدا

Pourquoi ? لماذا ؟

.....

## 3-الرفاهية بالنسبة لنوعية الهواء

## 3-Le confort vis-à-vis de la qualité de l'air :

Q11-Comment évaluez-vous la qualité de l'air à l'intérieur de l'espace ?

كيف تقيم نوعية الهواء داخل المجال ؟

- Très bonne  Bonne  Acceptable  Mauvaise  Très mauvaise  
جيدة جدا جيدة مقبولة سيئة سيئة جدا

Q12-Avez-vous l'habitude d'ouvrir les fenêtres pour améliorer la qualité de l'air ? Si oui quand ?

هل أنت معتاد على فتح النوافذ من أجل تحسين نوعية الهواء ؟ إذا كانت الإجابة نعم فمتى ؟

	En hiver في الشتاء		En été في الصيف	
	Matin	Après-midi	Matin	Après-midi
Toujours دائما			Toujours	
Souvent غالبا			Souvent	
Parfois أحيانا			Parfois	
Jamais أبدا			Jamais	

## 4-الرفاهية بالنسبة للتهوية

## 4-Le confort vis-à-vis de la ventilation :

Q13-Comment évaluez-vous la vitesse de l'air dans votre bureau ?

كيف تقيم سرعة الهواء في مكتبك ؟

- Très forte  Forte  Acceptable  Faible  Très faible  
قوية جدا قوية مقبولة ضعيفة ضعيفة جدا

Q14-Avez-vous l'habitude d'ouvrir les fenêtres pour créer un courant d'air ? Si oui quand ?

هل أنت معتاد على فتح النوافذ من أجل إنشاء تيار هوائي ؟ إذا كانت الإجابة نعم فمتى ؟

	En hiver في الشتاء		En été في الصيف	
	Matin	Après-midi	Matin	Après-midi
Toujours دائما			Toujours	
Souvent غالبا			Souvent	
Parfois أحيانا			Parfois	
Jamais أبدا			Jamais	

## 5-الرفاهية الصوتية

## 5-Le confort acoustique :

Q15-Comment évaluez-vous votre satisfaction par rapport au bruit ?

كيف تقيم رضاك بالنسبة للضجيج ؟

- Très bonne  Bonne  Acceptable  Mauvaise  Très mauvaise  
جيد جدا جيد مقبول سيء سيء جدا

Q16-Le niveau du bruit provenant de l'extérieur à travers les ouvertures est-il ?

ما هو مستوى الضجيج القادم من الخارج عن طريق الفتحات ؟

- Très gênant  Gênant  Moyen  Faible  Très faible  
مزعج جدا مزعج متوسط ضعيف ضعيف جدا

## 6-Le confort visuel :

## 6-الرفاهية البصرية

Q17-Comment évaluez-vous votre satisfaction vis-à-vis de l'éclairage naturel dans votre bureau ?

كيف تقيم رضاك بالنسبة للإضاءة الطبيعية في مكتبك ؟

- Très bonne  Bonne  Acceptable  Mauvaise  Très mauvaise  
جيد جدا جيد مقبول سيئ سيئ جدا

Q18-A votre avis quelle est la taille idéale des ouvertures pour assurer un meilleur éclairage naturel ?

في رأيك ما هو الحجم المثالي للفتحات لضمان أحسن إضاءة طبيعية ؟

- Très grande  Grande  Moyenne  Petite  Très petite  
كبيرة جدا كبيرة متوسطة صغيرة صغيرة جدا

Q19-Comment évaluez-vous les taches solaires dans votre bureau ?

كيف تقيم البقع الشمسية في مكتبك ؟

- Acceptable  Gênante  
مقبولة مزعجة

## 7-Le confort en général :

## 7-الرفاهية

**Q20**-Comment évaluez-vous votre satisfaction générale vis-à-vis des conditions de confort dans votre bureau ?

كيف تقيم رضاك العام فيما يخص ظروف الرفاهية في مكتبك ؟

- Très bonne     Bonne     Acceptable     Mauvaise     Très mauvaise  
 جيد جدا    جيد    مقبول    سيئ    سيئ جدا

A quoi est-elle due ? ناتج عن ماذا ؟

.....  
 .....

**Q21**-Vous favorisez quel facteur dans votre lieu de travail ? (Numérotez-les de 1 à 5 dans le cercle approprié, le numéro (1) étant la valeur la plus importante et (5) la valeur la moins importante)

تفضل أي عامل في مكان عملك (قم بالترقيم من 1 إلى 5 في الدائرة الخاصة، الرقم 1 للقيمة الأكثر أهمية والرقم 5 القيمة الأقل أهمية)

- Une vue vers l'extérieur.    إطلالة نحو الخارج  
 Une température adéquate.    درجة حرارة مناسبة  
 Un niveau de bruit faible.    مستوى ضجيج ضعيف  
 Un éclairage naturel homogène.    إضاءة طبيعية متجانسة  
 Une bonne qualité de l'air.    نوعية جيدة للهواء

## La façade الواجهة

**Q22-Comment évaluez-vous l'apparence de la façade de ce bâtiment ?**

كيف تقيم مظهر واجهة هذا المبنى ؟

- Très bonne     Bonne     Acceptable     Mauvaise     Très mauvaise  
 جيد جدا    جيد    مقبول    سيئ    سيئ جدا

**Q23-Comment trouvez-vous la performance thermique des matériaux utilisés dans la façade ?**

كيف تجد الفعالية الحرارية للمواد المستعملة في الواجهة ؟

- Très bonne     Bonne     Acceptable     Mauvaise     Très mauvaise  
 جيدة جدا    جيدة    مقبولة    سيئة    سيئة جدا

**Q24-Quel est votre avis sur l'influence de l'utilisation des isolants sur le confort thermique ?**

ما هو رأيك في تأثير استعمال العوازل على الرفاهية الحرارية ؟

- Très bonne     Bonne     Acceptable     Mauvaise     Très mauvaise  
 جيد جدا    جيد    مقبول    سيئ    سيئ جدا

**Q25-Comment trouvez-vous la taille des fenêtres dans votre bureau ?**

كيف تجد حجم الفتحات في مكتبك ؟

- Très grande     Grande     Moyenne     Petite     Très petite  
 كبيرة جدا    كبيرة    متوسطة    صغيرة    صغيرة جدا

**Q26-Quel est le pourcentage de la surface vitrée que vous préféreriez dans votre bureau ?**

ما هي النسبة المئوية للمساحة المنجزة بالزجاج التي تفضلها في مكتبك ؟

- 100%     75%     50%     25%     10%

Préférez-vous cette surface vitrée pour bénéficier de ? (vous pouvez choisir plusieurs réponses)

تفضل هاته المساحة التي بالزجاج من أجل الاستفادة من ؟ (يمكنك اختيار عدة أجوبة)

- La lumière naturelle     La chaleur des rayons     Le renouvellement de     La vue vers  
 الإضاءة الطبيعية    solaires en hiver    l'air    l'extérieur  
 حرارة أشعة الشمس في الشتاء    تجديد الهواء    الاطلالة نحو الخارج

Autres (précisez SVP) ? (أخرى (حدد من فضلك) ؟

**Q27-Avez-vous des dispositifs de protection solaire fixes sur la façade de votre bureau ?**

هل لديك عناصر ثابتة في الواجهة للحماية من الشمس في مكتبك ؟

- Oui نعم     Non لا

Si oui, ces protections solaires fixes sont-elles efficaces ?

إذا كانت الإجابة نعم، فهل هي فعالة ؟

- Oui نعم     Non لا

**Q28-Quelle est la taille des taches solaires dans votre bureau ?**

ما هو حجم البقع الشمسية في مكتبك ؟

- Très grande     Grande     Moyenne     Petite     Très petite  
 كبيرة جدا    كبيرة    متوسطة    صغيرة    صغيرة جدا

**Q29-Avez-vous des dispositifs de protection solaire mobiles (rideaux ou stores) dans votre bureau ?**

هل لديك عناصر متحركة للحماية من الشمس (ستائر) في مكتبك ؟

- Oui نعم     Non لا

Si oui, quelle est leur utilisation principale ?

إذا كانت الإجابة نعم، ما هو استعمالك الأساسي لهم ؟

- Pour maîtriser l'éclairage du bureau     Pour éviter l'entrée des rayons solaires en été  
 للتحكم بإضاءة المكتب    لتفادي دخول أشعة الشمس في الصيف

Autres (précisez SVP) ? (أخرى (حدد من فضلك) ؟

## الفعالية الطاقوية Efficacité énergétique

**Q30-**En hiver, quelle est la moyenne journalière de l'utilisation du chauffage dans votre bureau ?

في الشتاء، ما هو المتوسط اليومي لاستعمال المدفأة في مكتبك ؟

>7 h	6 h	4 h	2 h	Jamais أبدا

**Q31-**En quels mois de l'année actionnez-vous le chauffage dans votre bureau ?

ما هي الأشهر التي تستعمل فيها المدفأة في مكتبك ؟

Début d'octobre	Fin d'octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Début de Mars	Fin de Mars

**Q32-**A votre avis, quelle est la quantité d'énergie consommée par le chauffage ?

في رأيك، ما هي كمية الطاقة التي تستهلكها المدفأة ؟

- Très grande     Grande     Moyenne     Faible     Très faible  
 كبيرة جدا    كبيرة    متوسطة    ضعيفة    ضعيفة جدا

**Q33-**En été, quelle est la moyenne de l'utilisation du climatiseur dans votre bureau ?

في الصيف، ما هو المتوسط اليومي لاستعمال المكيف في مكتبك ؟

>7 h	6 h	4 h	2 h	Jamais أبدا

**Q34-**En quels mois de l'année actionnez-vous le climatiseur dans votre bureau ?

ما هي الأشهر التي تستعمل فيها المكيف في مكتبك ؟

Début de Mars	Fin de Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Début d'octobre	Fin d'octobre

**Q35-**A votre avis, quelle est la quantité d'énergie consommée par le climatiseur ?

في رأيك، ما هي كمية الطاقة التي يستهلكها المكيف ؟

- Très grande     Grande     Moyenne     Faible     Très faible  
 كبيرة جدا    كبيرة    متوسطة    ضعيفة    ضعيفة جدا

**Q36-**A votre avis, quel est l'impact du choix judicieux des éléments de la façade sur la réduction de la consommation énergétique ?

في رأيك، ما هو تأثير الاختيار الحكيم والمناسب لعناصر الواجهة على تخفيض استهلاك الطاقة ؟

- Très grand     Grand     Moyen     Faible     Très faible  
 كبير جدا    كبير    متوسط    ضعيف    ضعيف جدا

**Merci pour votre collaboration et le temps que vous avez consacré à ce questionnaire.**

شكرا لتعاونكم وعلى الوقت الذي كرستموه لهذا الاستبيان

## Annexe E : L'étude expérimentale

L'étude expérimentale porte sur la réalisation de quatre cellules tests (à une échelle de 1/50) avec une forme rectangulaire de "80 x 90 cm" et une hauteur de "90 cm" (Figure E.1 et E.2). La première cellule (C1) a été utilisée comme modèle de référence. Les trois autres cellules ont été exploitées afin d'étudier l'impact de quelques paramètres respectivement, la surface et la couleur (C2 : peinture isolante avec nanoparticules), la façade ventilée (C3) et la façade double peau (C4).



**Figure E.1** : Les étapes de la réalisation des cellules tests (Source : Auteur, 2017)



**Figure E.2** : Les quatre cellules tests réalisées (Source : Auteur, 2017)



**Figure E.3 :** La cellule de référence "C1" (Source : Auteur, 2017)



**Figure E.4 :** La cellule (C2) avec une peinture isolante (Source : Auteur, 2017)



**Figure E.5 :** La cellule (C3) avec une façade ventilée (Source : Auteur, 2017)



**Figure E.6 :** La cellule (C4) avec une façade double peau (Source : Auteur, 2017)



**Figure E.7 :** L'espace de la façade double peau "6cm" (Source : Auteur, 2017)

Afin d'éviter l'infiltration de l'air à l'intérieur à travers les ouvertures utilisées pour la prise de mesures, un joint a été ajouté au niveau de ces ouvertures (Figure E.8).



**Figure E.8 :** Le joint des ouvertures (Source : Auteur, 2017)

Les mesures ont été faites pendant trois jours durant chaque période, le 09, 10 et 11 Août 2017 pour la période chaude et le 12, 13 et 14 Décembre pour la période froide (Figure E.9).



**Figure E.9 :** La prise de mesures (Source : Auteur, 2017)

L'anémomètre (Testo 480-Réf. 0563 4800) avec une sonde de température/humidité (Réf. 0636 9743) et le thermomètre infrarouge "CASON - CA 380" ont été utilisés pour la prise de mesures (Figure E.10).

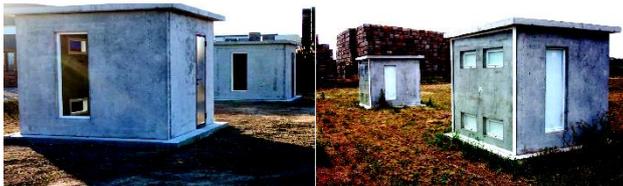
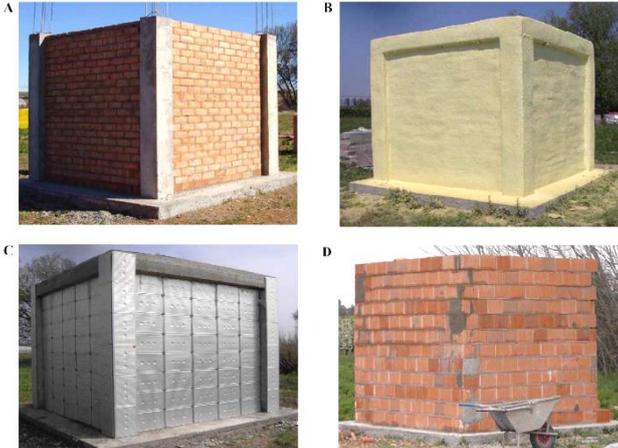


**Figure E.10 :** Les instruments utilisés pour la prise de mesures (Source : Auteur, 2017)

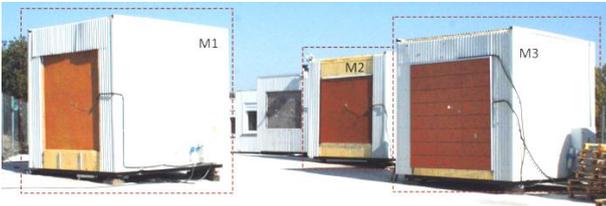
L'utilisation de cellules tests pour étudier les éléments de l'enveloppe fait l'objet de plusieurs travaux de recherches au niveau mondial. Ces cellules ont été réalisées à différentes échelles (réelles et réduites). Le tableau E.1, E.2, E.3 et E.4 illustrent des exemples de cellules tests réalisées à une échelle réelle.

**Tableau E.1 : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réelle**

(Source : Auteur, 2017)

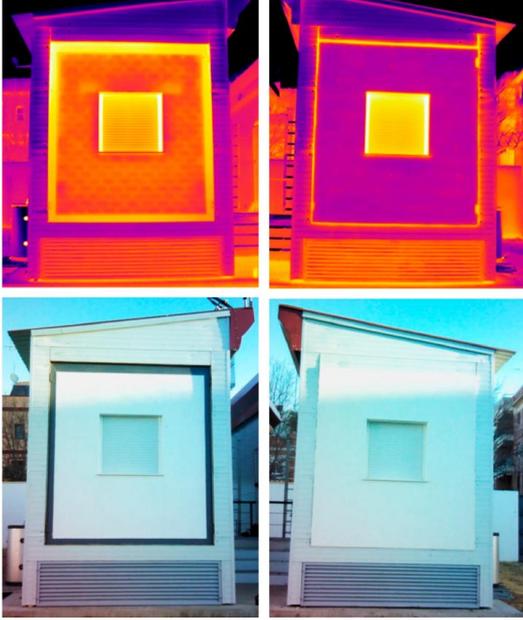
La référence	Illustration	L'élément étudié
Castellón et al., 2007		L'utilisation des microcapsules de matériaux à changement de phase (MCP)
Castell et al., 2010		Étude de l'impact des matériaux à changement de phase (MCP)
Joudi et al., 2011		L'influence des revêtements réfléchissants
Alcamo et al., 2014		L'évaluation des performances thermo-physiques des composants de la façade

**Tableau E.2 : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réelle**  
(Source : Auteur, 2017)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Silva et al., 2015		Développement de volet de la fenêtre
Medjelekh, 2015		Caractérisation du fonctionnement thermo-hydrrique de l'enveloppe
Barreneche el al., 2016		L'influence des matériaux à changement de phase (MCP)
Albatayneh et al., 2016		Évaluation du confort thermique adaptatif dans les bâtiments
Alonso et al., 2017		Les effets de la surface de l'enveloppe et la façade ventilée
Serrano et al., 2017		Étude des matériaux et le comportement thermique

**Tableau E.3 : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réelle**

(Source : Auteur, 2017)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Singh et al., 2017		Évaluation de la performance des panneaux de gypse en MCP
Magri et al., 2017		Évaluation des systèmes de vitrage
Yau et al., 2017		Étude du vitrage performant pour les bureaux
León-Rodríguez et al., 2017		Conception et performance des cellules de tests comme modèle d'évaluation énergétique

**Tableau E.4** : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réelle

(Source : Auteur, 2017)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Casas et al., 2017		Étude et validation d'une façade double peau
Arranz et al., 2017		Évaluation de la performance d'un nouveau vitrage
Torres-Rivas et al., 2018		Optimisation multi-objectifs des matériaux d'isolation thermique
Ibáñez-Puy et al., 2018		Analyse énergétique d'une enveloppe thermoélectrique active ventilée

Le tableau E.5, E.6 et E.7 illustrent des exemples de cellules test réalisées à une échelle réduite.

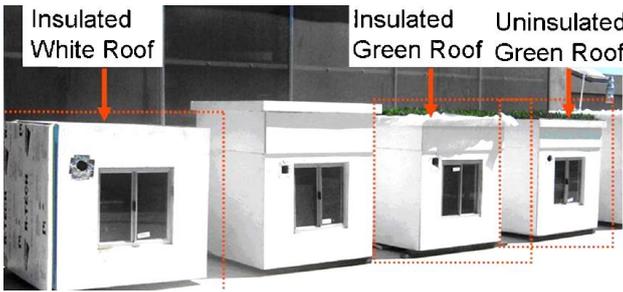
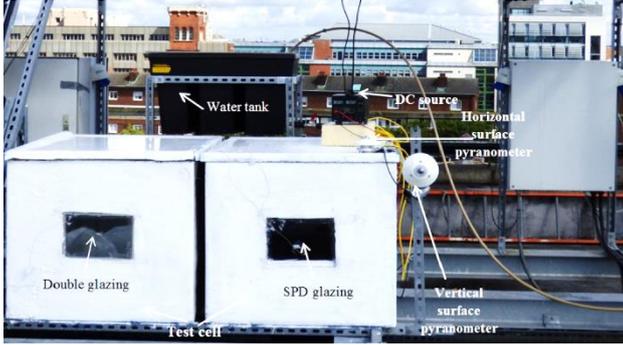
**Tableau E.5 : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réduite**

(Source : Auteur, 2017)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Ahmad, 2004		L'impact des isolants et les matériaux à changement de phase (MCP)
Cheng et al., 2005		L'influence de la couleur de l'enveloppe sur la température intérieure
Levinson et al., 2007		L'impact de la couleur de la tuile
Doya et al., 2012		Cool façades et leurs impacts sur le micro climat urbain
Entrop et al., 2011		l'utilisation de matériaux à changement de phase micro encapsulés

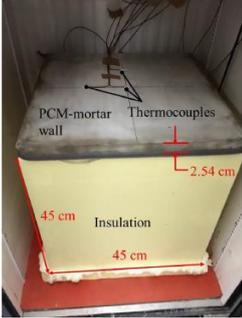
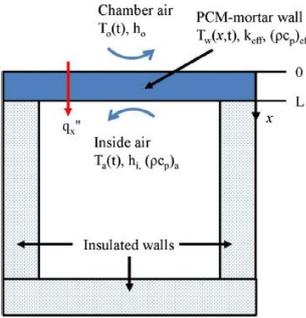
**Tableau E.6** : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réduite

(Source : Auteur, 2017)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Elghawaby, 2013		Le mur respirant (inspiration de la nature ou biomimétisme)
Ibrahim, 2014		Les conduites de fluide dans la façade
La roche et al., 2014		Confort et économies d'énergie avec les toits verts actifs
Ghosh et al., 2016		Étude du comportement des vitrages (double et SPD)
Cornaro et al., 2017		Les matériaux à changement de phase (MCP)

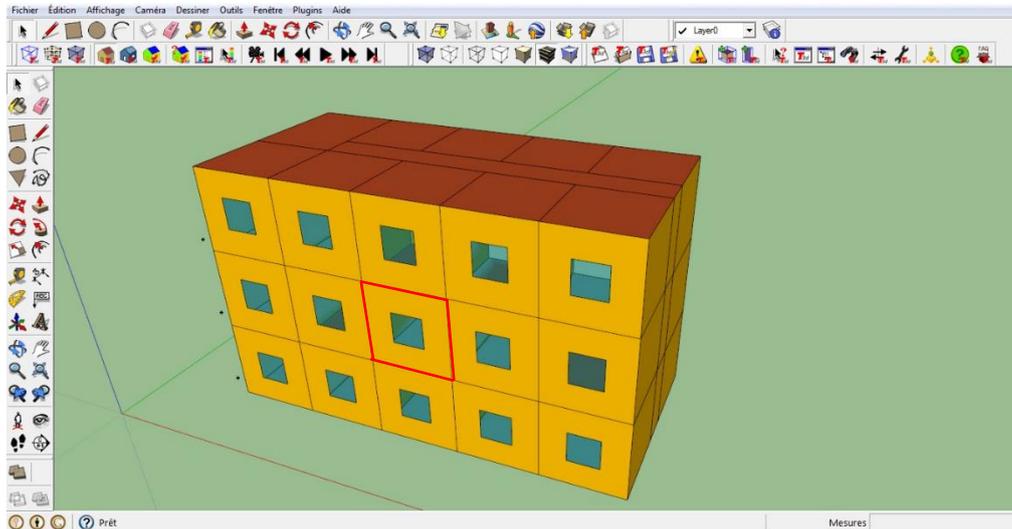
**Tableau E.7** : Exemples de cellules tests réalisées à une échelle réduite

(Source : Auteur, 2017)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Photo prise par l'auteur, 2017 (CSTB-Grenoble)		Les matériaux
Florentin et al., 2017		Étude des matériaux de construction bio-composite à base de chanvre-chaux
Young et al., 2018	 	Évaluation de l'enveloppe composite avec un matériau MCP
Gounni et al., 2018		Étude de l'emplacement optimal de la couche du MCP
Vox et al., 2018		Étude de l'impact de la façade végétalisée sur la température du bâtiment

## Annexe F : Modélisation et simulation

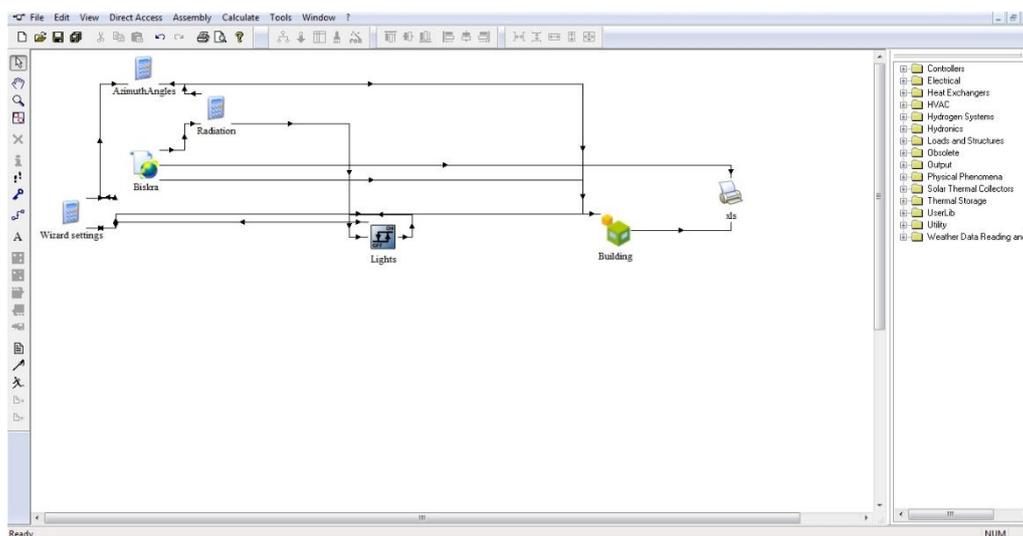
La figure F.1 présente la modélisation de la géométrie réalisée dans le programme "Sketch Up" à travers l'exploitation du plugin "Trnsys-3D".



**Figure F.1 :** La géométrie réalisée dans "Sketch Up" par "Trnsys-3D"

(Source : Auteur, 2017)

Le processus de la simulation ainsi que les détails relatifs aux modèles simulés sont représentés dans les figures ci-dessous.



**Figure F.2 :** Les types et les connexions utilisés (Source : Auteur, 2017)

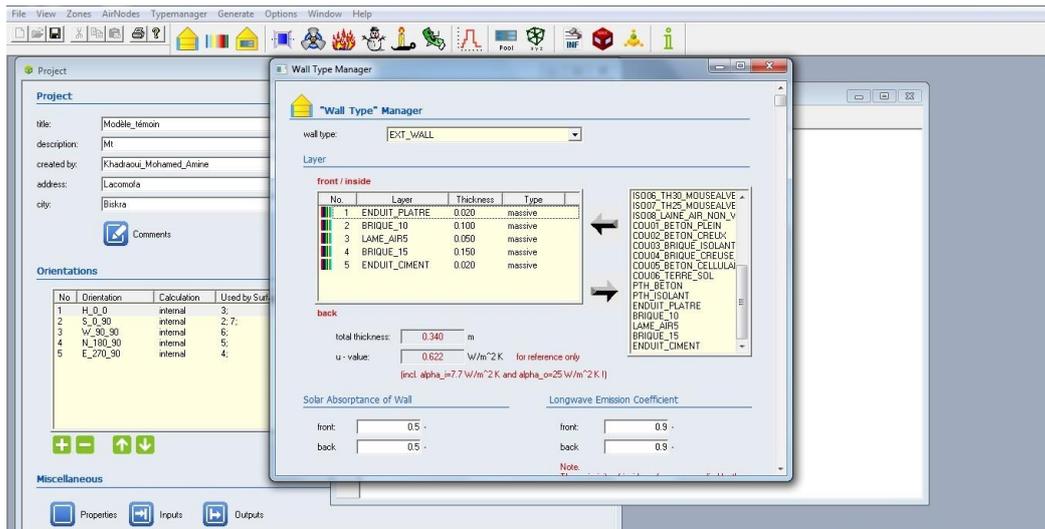


Figure F.3 : Les matériaux utilisés dans les murs (Source : Auteur, 2017)

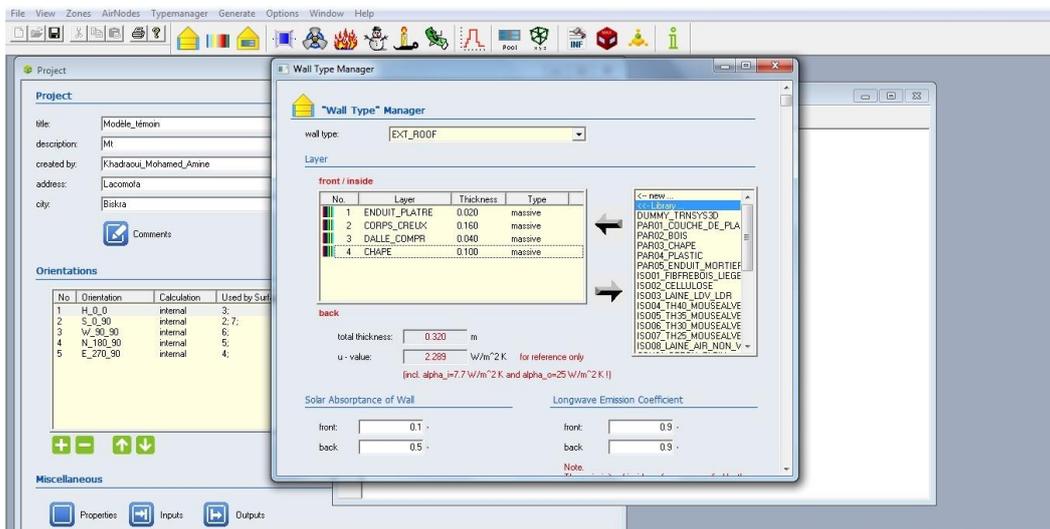


Figure F.4 : Les matériaux utilisés dans le plafond (Source : Auteur, 2017)

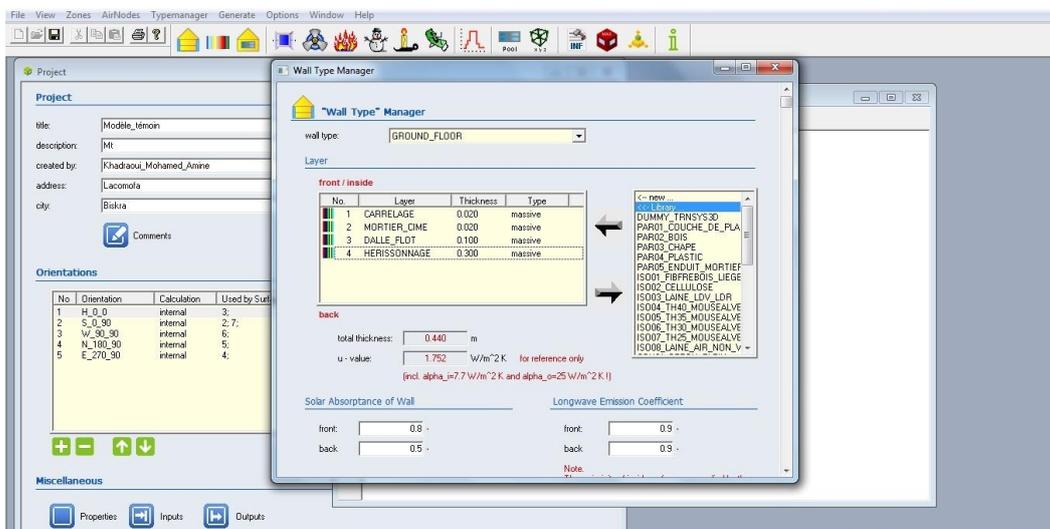


Figure F.5 : Les matériaux utilisés dans le sol (Source : Auteur, 2017)

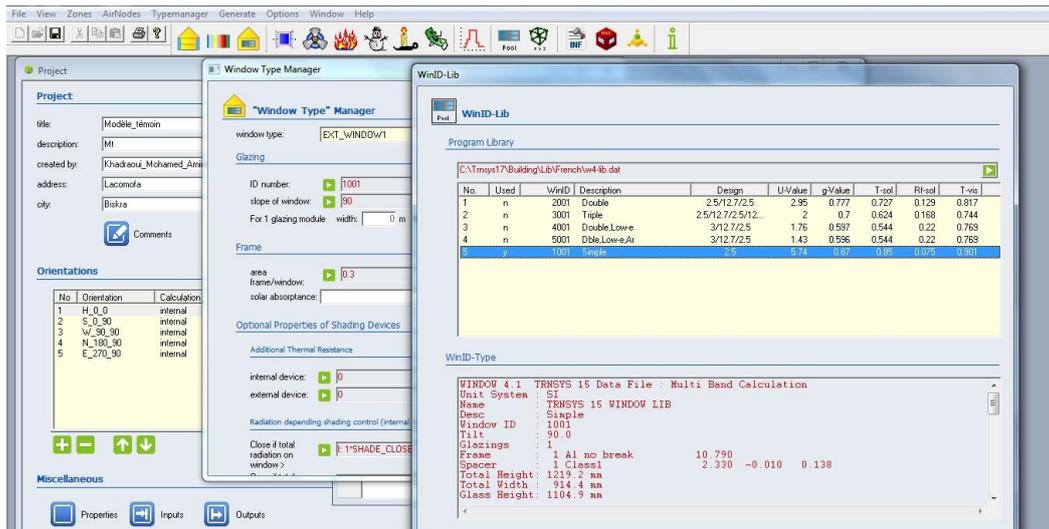


Figure F.6 : Les caractéristiques thermiques des fenêtres (Source : Auteur, 2017)

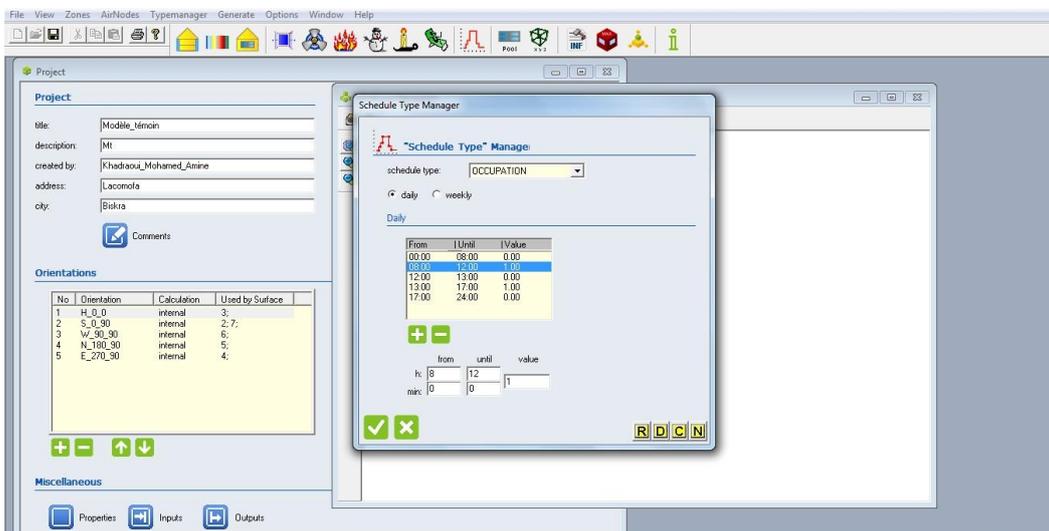


Figure F.7 : Le scénario de l'occupation utilisé (Source : Auteur, 2017)



Figure F.8 : Le type de l'espace et la nature de l'activité des occupants (Source : Auteur, 2017)

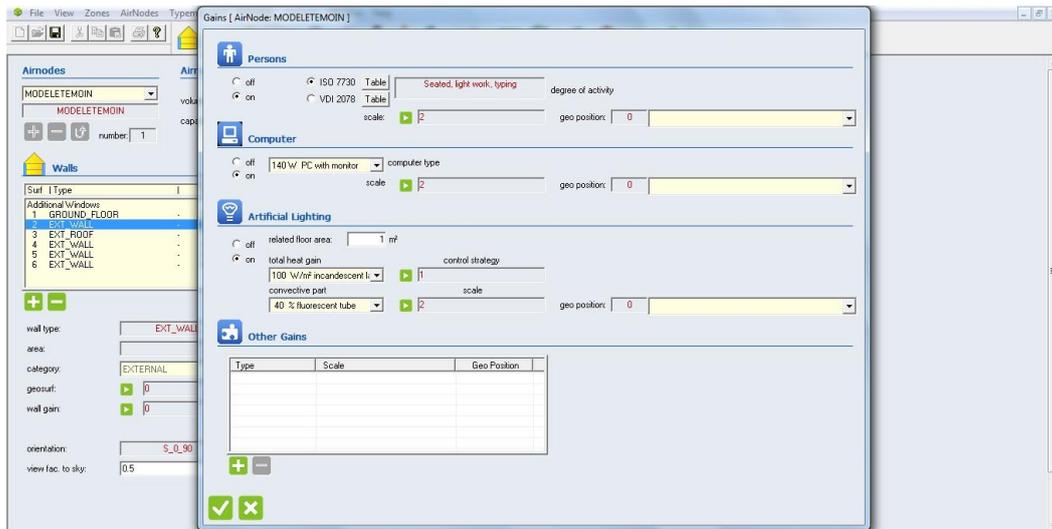


Figure F.9 : Les gains internes (Source : Auteur, 2017)

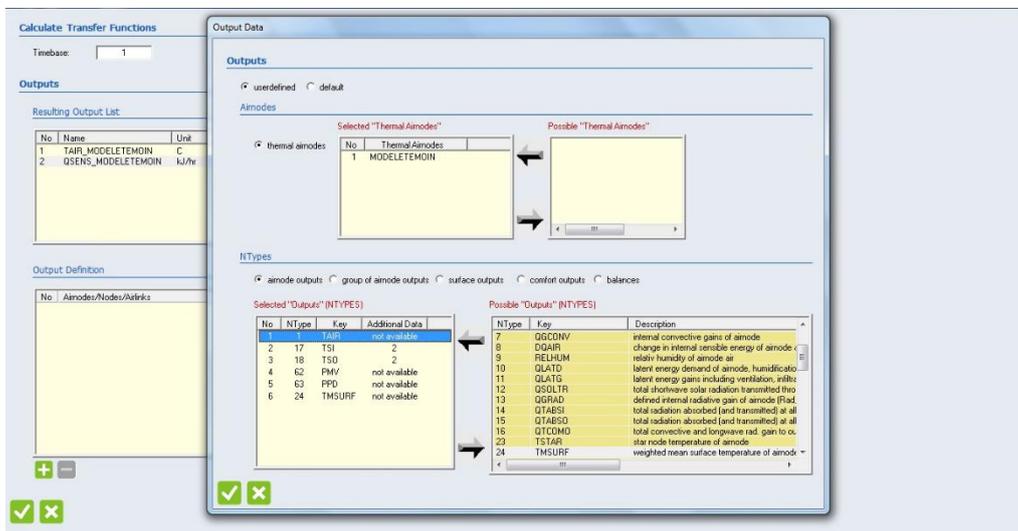


Figure F.10 : Les outputs N° 01 "températures" (Source : Auteur, 2017)

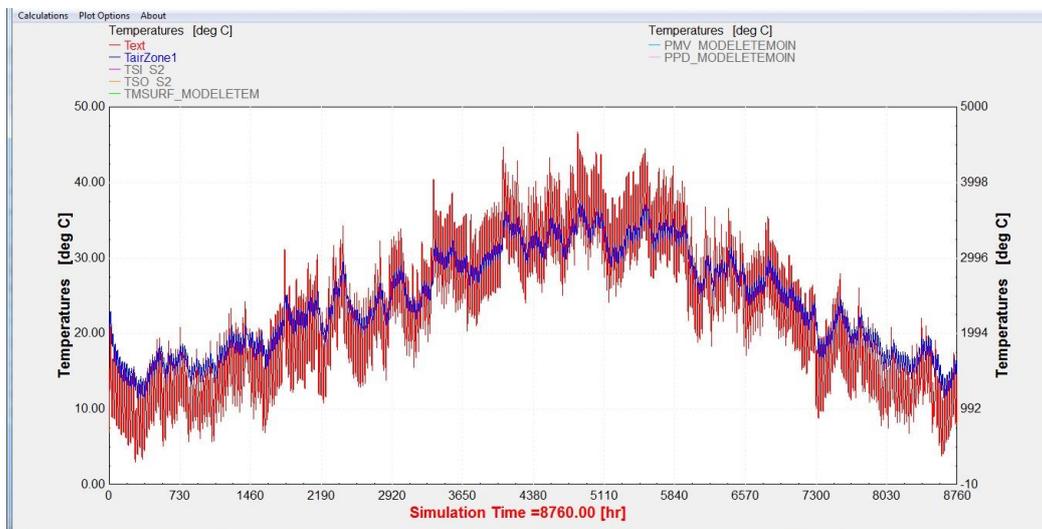


Figure F.11 : Les résultats obtenus relatifs aux températures (Source : Auteur, 2017)

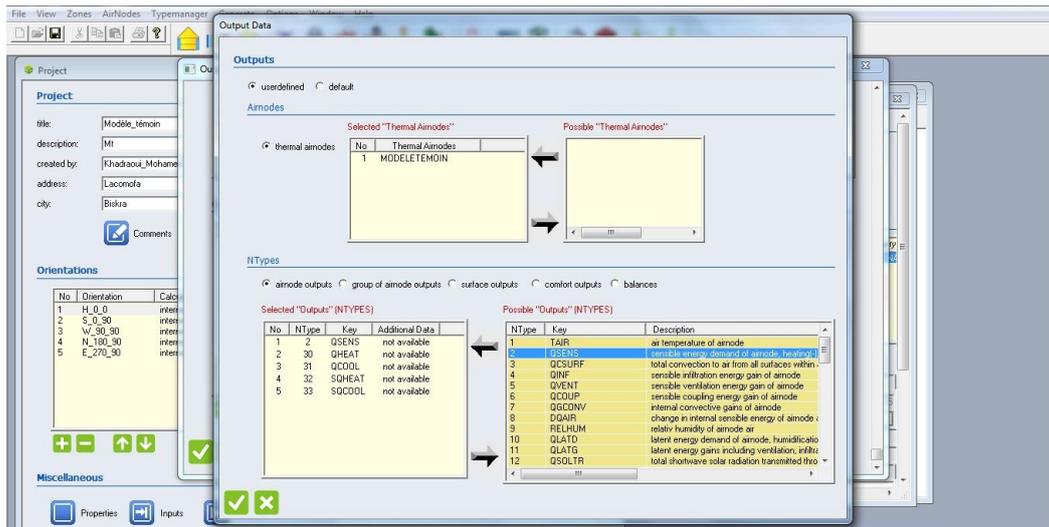


Figure F.12 : Les outputs N° 02 "consommation" (Source : Auteur, 2017)

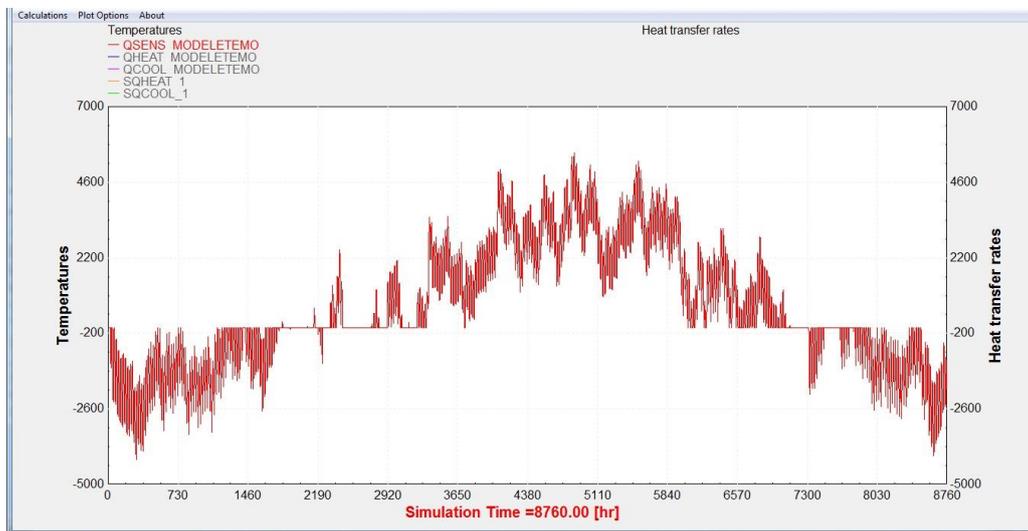


Figure F.13 : Les résultats obtenus relatifs à la consommation énergétique (Source : Auteur, 2017)