



Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

## Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement dans les Zones Arides

Élaboration d'un outil d'aide à la conception pour une optimisation climatique et énergétique des bâtiments résidentiels dans un climat désertique. L'exemple du sud algérien

Présentée par :

**FEMMAM Asma**

Soutenu publiquement le: .....

**Devant le jury composé de :**

<b>Dr. KELIL Sara</b>	<b>MCA</b>	<b>Présidente</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. SRITI Leila</b>	<b>Professeur</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. HAMOUDA Abida</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examinatrice</b>	<b>Université de Batna 1</b>
<b>Dr. ASSASSI Abdelhalim</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna 1</b>

Année Universitaire : 2023 /2024

## *Dédicace*

*A mes chers parents*

*Aucun mot ne peut exprimer pleinement l'amour et l'affection que j'ai pour vous, mes chers parents. Votre soutien inébranlable et vos encouragements constants ont été ma source d'inspiration pendant mes années d'études. En ce jour spécial, je vous offre ce travail en signe de gratitude profonde. Que le Tout-Puissant vous accorde santé, bonheur et longévité, afin que je puisse à mon tour vous combler de bonheur.*

*A mes sœurs Amína et Karíma*

*Dans le voyage de la vie, vous êtes mes compagnes précieuses. Votre soutien, votre amour et vos rires ont enrichi chaque étape de notre parcours ensemble. Que notre lien continue de grandir en force et en complicité. Vous êtes les étoiles qui illuminent ma vie.*

*À ma petite famille,*

*À mon mari, Laroussi Khaled, qui a cru en moi quand je n'y croyais pas, tu es ma force et mon encouragement. Je ne peux pas te remercier assez pour ta patience et ton soutien. Que dieu te garde pour moi.*

*À ma petite princesse, ma fille Raním, je ne peux pas exprimer l'amour et l'affection que je ressens pour toi. Tu es ma source d'inspiration, mon tout. Que dieu te garde pour moi.*

*À ma belle-famille, à toute ma famille, à tous mes amis et mes collègues, ainsi qu'à ma meilleure amie, Imen Sfaksi, je souhaite la joie et la réussite."*

*Je dédie ce travail.  
FEMMAM Asma*

## **Remerciement :**

*Tout d'abord, mes remerciements vont au Tout-Puissant pour m'avoir accordé la détermination et la persévérance nécessaires pour entreprendre ce voyage académique.*

*Ma directrice de thèse, Professeure Sriti Leila, mérite une mention spéciale. Votre mentorat exceptionnel, vos précieux conseils et votre soutien inestimable tout au long de cette recherche ont été les piliers de mon succès académique. Votre expertise a guidé mes pas, et je suis honorée d'avoir eu l'opportunité de travailler à vos côtés.*

*Mes remerciements et ma gratitude s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner, évaluer, et discuter ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier tous les enseignants qui ont partagé leur savoir et leur expertise avec moi. Je cite : Dr.Femmam Nadia qui a toujours été à mes coté par son encouragement et ses conseils, Dr Medouki Mostafa, Dr.Bouzaher Soumia Et tous les enseignants du département. Merci infiniment.*

*En mémoire de mr. Boulenuar Kamel, dont la sagesse et la vision m'ont profondément inspiré, je dédie ce travail à sa mémoire.*

*Je tiens a remercié les architectes Amouri Noussir et Naoufel el Arabi Berdjouh pour leurs aide précieuse, merci infiniment.*

*Un grand merci à l'équipe de DesignBuilder pour son assistance technique précieuse, qui a facilité l'analyse et la modélisation dans le cadre de ma thèse.*

*Je n'oublie pas de remercier le département d'architecture de Biskra et le laboratoire Lacomofa pour leur soutien institutionnel, qui a grandement contribué à la réalisation de cette thèse.*

*Merci du fond*

## **Résumé :**

La maîtrise de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel vise à améliorer la qualité de vie tout en réduisant l'impact de l'empreinte carbone sur l'environnement. Malheureusement, la négligence des spécificités environnementales a entraîné une utilisation abusive et irrationnelle des ressources énergétiques à l'échelle de la planète. En Algérie, la consommation électrique du secteur résidentiel représente actuellement 40% de la consommation nationale totale d'électricité. Cette consommation est principalement destinée à l'éclairage artificiel, au chauffage et à la climatisation des foyers. Les régions du sud de l'Algérie où prédomine un climat très chaud et aride, illustrent clairement l'ampleur des problèmes environnementaux et énergétiques résultant des pratiques et dysfonctionnements caractérisant la production du cadre bâti résidentiel.

Depuis l'indépendance, les constructions produites dans le sud ne répondent plus aux conditions climatiques extrêmement rigoureuses de la saison estivale et n'arrivent plus à assurer des conditions minimales de confort thermique. En conséquence, les habitants sont contraints de recourir à des systèmes de chauffage et de climatisation mécaniques pour maintenir un certain niveau de confort, ce qui entraîne des coûts croissants chaque année. Pour réduire la facture énergétique et garantir un confort climatique optimal, il est impératif d'intervenir au niveau de la conception architecturale.

Cette étude tente d'explorer ce sujet relativement à l'architecture résidentielle du sud de l'Algérie, en prenant la ville d'El Oued comme cas d'étude. En effet, à l'instar des autres régions du sud de l'Algérie, les habitations réalisées dans la région du Souf posent un problème de confort thermique et constituent un défi à relever lors du processus de conception des projets d'habitat. Pourtant, l'architecture vernaculaire du Souf représente un modèle exemplaire d'architecture à la fois bioclimatique et durable, mettant en avant l'adaptation harmonieuse des bâtiments dans leur contexte climatique. Cette intégration repose sur des stratégies passives qui assurent un confort thermique intérieur salubre, tout en évitant le recours aux systèmes mécaniques. Ces méthodes passives, incluant l'orientation des bâtiments, la ventilation naturelle nocturne, le rapport fenêtre-mur, ainsi que les matériaux de construction, dictent l'adaptation des constructions aux conditions locales. De nos jours, l'architecture contemporaine a ignoré



ces stratégies passives, ce qui s'est traduit par la création des bâtiments résidentiels énergivores dépendant essentiellement de systèmes de chauffage et de climatisation mécanique.

Afin de minimiser la consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels situés dans des climats désertiques, il est nécessaire de procéder à une optimisation à la fois climatique et énergétique. Dans cette perspective, la présente étude a été effectuée dans le but d'élaborer un guide d'assistance environnemental basé sur les conditions climatiques, sociales et économiques spécifiques. Cet outil s'inspire des stratégies passives vernaculaires pour atténuer les conditions d'inconfort générées par les constructions contemporaines. A travers le développement d'une approche intégrée au processus conceptuel, cet outil s'adresse aux architectes en leur fournissant les moyens de l'utiliser dès la phase d'esquisse. Il se présente comme un ensemble de connaissances et de compétences spécialement conçu pour les architectes. Il les guide de manière pratique et simplifiée tout au long du processus de conception, avec pour objectif final la création d'espaces de vie performants et fonctionnels, offrant un confort thermique optimal et un bien-être accru pour les occupants.

**Mots-clés** : Bâtiment résidentiel, conception bioclimatique, stratégies passives, confort thermique, optimisation énergétique, guide d'assistance, climat désertique, sud algérien.

## **Abstract :**

The mastery of energy consumption in the residential sector aims to improve the quality of life while reducing the impact of carbon footprint on the environment. Unfortunately, the neglect of environmental specifics has led to the abusive and irrational use of energy resources on a global scale. In Algeria, the electrical consumption of the residential sector currently accounts for 40% of the total national electricity consumption. This consumption is primarily directed towards artificial lighting, heating, and air conditioning in households. The southern regions of Algeria, characterized by a very hot and arid climate, clearly illustrate the extent of environmental and energy problems resulting from practices and malfunctions in the production of residential buildings.

Since independence, constructions in the south no longer meet the extremely rigorous climatic conditions of the summer season and fail to provide minimal thermal comfort conditions. As a result, residents are forced to resort to mechanical heating and air conditioning systems to maintain a certain level of comfort, leading to increasing costs every year. To reduce energy bills and ensure optimal climatic comfort, it is imperative to intervene at the level of architectural design.

This study seeks to explore this issue in relation to residential architecture in southern Algeria, using the city of El Oued as a case study. Indeed, like other regions in southern Algeria, dwellings in the Souf region pose a thermal comfort problem and present a challenge in the design process of housing projects. However, the vernacular architecture of the Souf region represents an exemplary model of both bioclimatic and sustainable architecture, highlighting the harmonious adaptation of buildings to their climatic context. This integration is based on passive strategies that ensure a healthy indoor thermal comfort while avoiding the use of mechanical systems. These passive methods, including building orientation, nighttime natural ventilation, the window-to-wall ratio, as well as construction materials, dictate the adaptation of constructions to local conditions. Nowadays, contemporary architecture has ignored these passive strategies, resulting in the creation of energy-intensive residential buildings that depend mainly on heating and mechanical air conditioning systems.

To minimize energy consumption in residential buildings located in desert climates, it is necessary to proceed with optimization that considers both climatic and energy aspects. In this perspective, this study was conducted to develop an environmental assistance guide based on specific climatic, social, and economic conditions. This tool draws inspiration from vernacular passive strategies to alleviate discomfort conditions generated by contemporary constructions. Through the development of an integrated approach to the conceptual process, this tool is intended for architects, providing them with the means to use it from the sketch phase. It serves as a set of knowledge and skills specifically designed for architects, guiding them practically and simplified throughout the design process, with the ultimate goal of creating efficient and functional living spaces, offering optimal thermal comfort and increased well-being for occupants.

**Keywords** : Residential building, bioclimatic design, passive strategies, thermal comfort, energy optimization, assistance guide, desert climate, southern Algeria.

## الملخص:

السيطرة على استهلاك الطاقة في قطاع الإسكان تهدف إلى تحسين جودة الحياة وفي الوقت نفسه تقليل تأثير البصمة الكربونية على البيئة. للأسف، أدى إهمال التفاصيل البيئية إلى استخدام مفرط وغير منطقي لموارد الطاقة على مستوى العالم. في الجزائر، يمثل استهلاك الكهرباء في قطاع الإسكان حاليًا 40٪ من الاستهلاك الوطني الإجمالي للكهرباء. يُستخدم هذا الاستهلاك بشكل رئيسي للإضاءة الاصطناعية والتدفئة وتكييف المنازل. تمثل المناطق الجنوبية في الجزائر، حيث يسود مناخ حار وجاف بشكل واضح، حجم المشكلات البيئية والطاقة الناتجة عن الممارسات والاختلالات المميزة لإنتاج الإسكان السكني.

منذ الاستقلال، لم تعد الإنشاءات المنتجة في الجنوب تستجيب لظروف المناخ الصارمة للفصل الصيفي ولا تستطيع ضمان شروط الراحة الحرارية الدنيا. نتيجة لذلك، يضطر السكان إلى اللجوء إلى أنظمة التدفئة وتكييف الهواء الميكانيكية للحفاظ على مستوى معين من الراحة، مما يؤدي إلى ارتفاع التكاليف سنويًا. لتقليل فاتورة الطاقة وضمان راحة مناخية مثلى، فمن الضروري التدخل على مستوى التصميم المعماري.

تحاول هذه الدراسة استكشاف هذا الموضوع فيما يتعلق بالهندسة المعمارية للمساكن في جنوب الجزائر، باعتبار مدينة الوادي نموذجًا للدراسة. في الواقع، كما هو الحال في باقي مناطق جنوب الجزائر، تثير المساكن في منطقة السوف مشكلة في الراحة الحرارية وتشكل تحديًا خلال عملية تصميم مشاريع الإسكان. ومع ذلك، تمثل الهندسة التقليدية في السوف نموذجًا رائعًا للهندسة البيومناخية والمستدامة، مبرزة التكيف المنسجم للمباني في سياقها المناخي. يعتمد هذا التكامل على استراتيجيات سلبية تضمن راحة حرارية داخلية صحية، مع تجنب اللجوء إلى الأنظمة الميكانيكية. هذه الطرق السلبية، بما في ذلك توجيه المباني، والتهوية الطبيعية ليلاً، ونسبة النافذة إلى الحائط، وكذلك مواد البناء، تحدد تكييف الإنشاءات للظروف المحلية. في الوقت الحاضر، أهملت الهندسة المعمارية المعاصرة هذه الاستراتيجيات السلبية، مما أسفر عن إنشاء مبان سكنية تستهلك الطاقة وتعتمد أساسًا على أنظمة التدفئة وتكييف الهواء الميكانيكية.

من أجل تقليل استهلاك الطاقة في المباني السكنية الموجودة في مناخات صحراوية، يتعين القيام بتحسين يأخذ في اعتباره كل من الجوانب المناخية والطاقة. في هذا السياق، تمت هذه الدراسة بهدف وضع دليل مساعدة بيئي استناداً إلى الظروف المناخية والاجتماعية والاقتصادية المحددة. يستلهم هذا الأداة من استراتيجيات التكامل السلبي المحلية لتخفيف شروط العدم الارتياح الناتجة عن المنشآت المعمارية المعاصرة. من خلال تطوير نهج متكامل في العملية المفهومة، تُوجه هذه الأداة إلى المهندسين المعماريين، مزودة إياهم بوسائل لاستخدامها من مرحلة المسودة. تتمثل في مجموعة من المعرفة والمهارات مصممة خصيصًا للمهندسين المعماريين، موجهة لهم بطريقة عملية وبمبسطة طوال عملية التصميم، بغية إنشاء فضاءات معيشية فعالة ووظيفية، تقدم راحة حرارية مثلى ورفاهية متزايدة للسكان.

**الكلمات المفتاحية:** مبنى سكني، تصميم بيو مناخي، استراتيجيات سلبية، راحة حرارية، تحسين طاقي، دليل مساعدة، مناخ صحراوي، جنوب الجزائر.

## TABLE DES MATIERES

Dédicaces .....	I
Remerciement .....	II
Résumé .....	III
Abstract .....	V
ملخص .....	VII
Table des matières .....	VIII
Liste des figures .....	XV
Liste des tableaux .....	XX
Nomenclature .....	XXII
Production scientifique .....	XXIV

### **CHAPITRE INTRODUCTIF**

1. Introduction générale.....	1
2. problématique .....	4
3. Hypothèses .....	6
4. Objectifs de la recherche .....	7
4. Méthodologie .....	9
6. Structure de la thèse .....	10

## Partie Théorique

### **Chapitre I            Climat et confort thermique**

Introduction.....	14
I.1 Climat et données climatiques.....	14
I.1.1. Le climat.....	14
I.1.2. Les classifications climatiques.....	15
I.1.2.1. Classification climatique de Köppen .....	16
I.1.2.2. Classification climatique de Thornthwaite .....	17

I.1.2.3 La classification climatique ASHRAE.....	17
I.1.3. Le climat en Algérie .....	18
I.1.4. Données géographiques .....	19
I.1.5. Les zones climatiques en Algérie .....	20
I.1.5.1. Les zones climatiques en hiver .....	20
I.1.5.2. Les zones climatiques en été.....	21
I.2. Aperçu sur le confort thermique .....	22
I.2.1. Confort thermique .....	22
I.2.2 Les aspects du confort thermiques .....	23
I.2.2.2.1. L’aspect psychologique .....	23
I.2.2.2. L’aspect thermo-physiologique.....	24
I.2.2.3. L’aspect physique .....	25
I.3. Les approche du confort thermique .....	26
I.3.1.L’approche analytique (statistique).....	26
I.3.1.a Le modèle de Fanger (PMV) et (PPD) .....	27
I.3.1.b Le modèle Gagge .....	28
I.3.2. L’approche adaptative .....	30
I.4. Les indices de confort thermique .....	31
I.4.1. L’indice de vote moyen prévisible (PMV) .....	32
I.4.2. Pourcentage prévu des insatisfaits (PPD) .....	32
I.4.3 L’indice de température effective (ET) .....	34
I.4.4.L’indice de température résultante (TR) .....	34
I.4.5. L’indice de température opérative (TO) .....	35
I.4.6. Les digrammes bioclimatiques .....	36
I.3. Le confort thermique dans un climat chaud et aride .....	37
Conclusion .....	39

**Chapitre II : Le concept de durabilité et les méthodes  
d’évaluation de la performance énergétique du bâtiment**

Introduction.....	40
II.1. Concept de durabilité .....	40
II.1.1. État de durabilité environnementale.....	41
II.1.2. État de durabilité économique.....	41

II.1.3. État de durabilité sociale.....	41
II.2. Méthode d'évaluation et approches de la durabilité.....	42
II.3. Les systèmes de certification internationaux.....	44
II.3.1. LEED :.....	44
II.3.2. BREEAM.....	46
II.3.3. DGNB .....	48
II.3.4. HQE .....	49
II.4. Certificat de Performance Énergétique du Bâtiment (CPEB) :.....	50
II.5. L'architecture durable :.....	51
II.6. Les stratégies de l'architecture durable : .....	53
II.6.1 Énergie et optimisation :.....	54
II.6.2.2. Eau : Conception pour une réduction de la consommation d'eau et des déchets.....	55
II.6.3. Qualité de l'air intérieur :.....	56
II.6.4. Matériaux de construction.....	59
Conclusion.....	61

**Chapitre III :      **Sagesse Passive : Leçons de l'Architecture  
Vernaculaire à travers le Monde : « Etat de l'art »****

Introduction .....	62
III.1. Architecture vernaculaire et durabilité .....	63
III.2. L'Architecture vernaculaire à travers le monde.....	64
III.3. Étude de la littérature sur l'application des stratégies passives pour l'optimisation des bâtiments résidentiels .....	68
III.4. Synthèse des recherches dans le domaine .....	71
III.5.Méthodologie d'investigation et élaboration de travail .....	74
III.5.1. La méthode d'investigation par un questionnaire .....	74
III.5.2. Le travail empirique : collecte des données et mesures in situ .....	76
III.5.3.La méthode de simulation : étude quantitative .....	77
III.5.3.1. Présentation de quelques outils de simulation énergétique.....	78
III.5.3.1.1. EnergyPlus.....	78
III.5.3.1.2. DesignBuilder/Energyplus .....	79
III.5.3.1.3. TRNSYS .....	79

III.5.3.1.4. IDA-ICE.....	80
Conclusion .....	81

## **Partie Pratique**

### **Chapitre IV : Identification du contexte et présentation des cas d'étude**

Introduction .....	82
IV.1. Présentation de contexte d'étude .....	82
IV.2. Les données bioclimatiques de la ville .....	84
IV.3. Analyse climatique à l'aide des outils bioclimatiques ... ; .....	86
IV.3.1. Les table de Mahoney .....	86
IV.3.2. Diagramme psychrométrique ASHRAE .....	87
IV.3.3. Résultats et discussion de l'analyse .....	88
IV.3.3.1. Stratégies de conception adaptée au climat selon les tables de Mahoney ...	88
IV.3.3.2. Stratégies de conception adaptée au climat selon le diagramme psychrométrique .....	89
IV.4. Présentation de cas études.....	90
IV.4.1. Premier cas d'étude : La maison traditionnelle d'El Oued.....	90
IV.4.1.1. Situation de la maison .....	90
IV.4.1.2. Analyse qualitative de la maison traditionnelle.....	93
IV.4.2. Deuxième cas d'étude : La maison contemporaine d'El Oued.....	96
IV.4.2.1. Situation de la maison :.....	96
IV.4.2.2. Analyse qualitative de la maison contemporaine.....	97
IV.4.2.2.1. L'ouverture sur l'espace public .....	97
IV.4.2.2.2. Matériaux de construction :.....	97
IV.4.2.2.3. Problèmes liés aux ouvertures : .....	97
IV.4.2.2.4. Disparition du "haouch" .....	98
IV.5 Les stratégies passives de l'architecture traditionnelle de Souf .....	98
IV.5.1. La compacité .....	99
IV.5.2. L'orientation .....	100
IV.5.3. Matériaux et techniques de construction .....	101
IV.5.3.1. Les murs .....	101
IV.5.3.2. Coupole et voutes .....	103



IV.5.4. Le ratio de la fenêtre (WWR) .....	103
IV.5.5. La ventilation nocturne .....	104
IV.5.6. Masse thermique .....	105
IV.6. Evaluation subjective enquête par questionnaire .....	107
IV.6. L'objectif de l'enquête .....	108
IV.6.1. Résultats et discussion .....	109
IV.6.1.1. La méthode de l'investigation.....	112
IV.6.1.2. Définition de la copule .....	112
IV.6.1.3. Estimation de la copule correspondante .....	112
Conclusion.....	116
<b><u>Chapitre V : Etude paramétrique : optimisation et élaboration</u></b>	
<b><u>d'un guide d'assistance de conception environnementale</u></b>	
Introduction.....	118
V.1. Protocole de mesure In-situ et simulation .....	119
V.1.1.2. Protocole de mesure : .....	119
V.1.1.2.1 Instrument de mesure : .....	120
V.1.1.2.2. Misol HP3001 : .....	120
V.1.1.2.3. Télémètre laser numérique : .....	120
V.2. Résultats des mesures et discussion .....	122
V.2.1. 1er cas d'études : la maison traditionnelle .....	122
V.2.1.1. La période hivernale : le mois de Janvier : .....	122
V.2.1.1.2. Sguifa : .....	122
V.2.1.1.3. Sabbat : .....	123
V.2.1.1.4. Chambre, cuisine et salon : .....	124
V.2.1.2. La période estivale : le mois de juillet .....	125
V.2.1.2.1. Sguifa .....	125
V.2.1.2.2. Sabbat : .....	126
V.2.1.2.3. Chambre, cuisine et salon : .....	127
V.2.2. 2eme cas d'études : la maison contemporaine : .....	128
V.2.2.2. La période hivernale : le mois de Janvier : .....	128
V.2.2.3. Séjour : .....	128
V.2.2.4. Salon : .....	129
V2.2.5. Cuisine et chambre : .....	130

V.2.3. La période estivale : le mois de Juillet :.....	131
V.2.3.1. Séjour :.....	131
V.2.3.2. Salon :.....	132
V.2.3.3. Cuisine et chambre :.....	133
V.3. Modélisation et simulation par le logiciel Designbuilder/Energyplus .....	134
V.3.1. Choix de logiciel DesignBuidler/EnergyPlus:.....	134
V.3.2. Le processus de simulation numérique par Designbuilder :.....	135
V.3.2.1. Matériaux et méthode de simulation :.....	137
V.2.2.2. Sélection du bâtiment de référence :.....	137
V.2.2.3. Les données météorologiques :.....	137
V.2.2.4. Modélisation :.....	139
V.3.3. Spécifications des deux maisons.....	141
V.3.4. Mode d'occupation :.....	142
V.4. Résultats et discussion :.....	142
V.4.1. Comportement thermique des deux cas d'études en hiver :.....	142
V.4.2. Comportement thermique des deux cas d'études en été :.....	143
V.4.3. Calibration .....	144
Deuxième partie : Analyse multi-objective par l'algorithme génétique et élaboration d'un guide d'assistance de conception environnementale.....	147
V.5. Le choix des objectifs et des variables .....	148
V.5.1. Résultats et discussion ... ..	150
V.5.2. Analyse multi-objective par l'algorithme génétique.....	150
V.5.2.1. L'orientation optimale.....	151
V.5.2.2. Le ratio optimal d'ouverture.....	153
V.5.2.3. La ventilation naturelle nocturne .....	157
V.5.2.4. Enveloppe et masse thermique .....	161
Conclusion .....	166
 <b>Conclusion générale</b>	
1. Synthèse de la recherche et rappel des principaux résultats.....	167
2. Recommandations.....	171
3. Limites et perspectives de recherche .....	172
<b>Bibliographie</b> .....	175

**Annexes**..... 191

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> les composants de climat .....	15
<b>Figure I.2</b> Carte de classification climatique Köppen-Geiger .....	16
<b>Figure I.3</b> : Les trois (03) catégories climatiques en Algérie .....	19
<b>Figure I.4</b> : les zones climatique d'hiver .....	20
<b>Figure I.5</b> : les zones climatiques d'été.....	21
<b>Figure I.6</b> : système de régulation thermique .....	22
<b>Figure I.7</b> : transmission thermique au sein de l'organisme humain .....	25
<b>Figure I.8</b> L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement .....	26
<b>Figure I.9</b> PMV, ses paramètres d'entrée, sa relation avec le PPD et son expression sur l'échelle de sensation thermique à 7 points de l'ASHRAE .....	28
<b>Figure I.10</b> Les détails des segments du modèle pour les modèles à deux nœuds et à plusieurs nœuds.....	29
<b>Figure I.11</b> : – Représentation des mécanismes adaptatifs .....	30
<b>Figure I.12</b> Le diagramme de confort ASHRAE [10] pour : (a) les bâtiments climatisés et (b) les bâtiments à ventilation naturelle .....	31
<b>Figure I.13</b> Le PPD en fonction du PMV .....	33
<b>Figure I.14</b> La courbe de température équivalente effective.....	34
<b>Figure I.15</b> L'indice de la température résultante d'après Missenard en 1948 .....	35
<b>Figure I.16</b> Diagramme bioclimatique du bâtiment .....	37
<b>Figure II.1.</b> Les trois piliers de la durabilité.....	41
<b>Figure II.2.</b> Les approches environnementales au monde .....	42
<b>Figure II.3.</b> Charges environnementales sur l'enveloppe du bâtiment.....	43
<b>Figure II.4.</b> Les catégories de l'approche LEED .....	44
<b>Figure II.5.</b> Principales catégories de critères LEED .....	45
<b>Figure II.6.</b> Les sujets traités par le BREEAM .....	46
<b>Figure II.7.</b> Catégories principales de critères BREAM .....	47
<b>Figure II.8.</b> Facteurs de pondération des catégories de la DGNB issus de la version internationale de la DGNB 2020. ....	48
<b>Figure II.9.</b> Deux certificateurs indépendants en France.....	49

<b>Figure II.10.</b> Sources de consommation énergétique à considérer dans le calcul de la performance énergétique d'un bâtiment selon la directive européenne 2010/31/UE	51
<b>Figure II.11.</b> Stratégie pour les principes et concepts de la construction verte (durable).....	52
<b>Figure II.12.</b> Charges environnementales sur l'enveloppe du bâtiment. ....	53
<b>Figure II.13.</b> La gestion durable des sols et des terres en lien avec le climat.....	54
<b>Figure II.14.</b> Les principales catégories liées à l'énergie durable dans le contexte des villes intelligentes.....	55
<b>Figure II.15.</b> Recyclage de l'eau dans les habitations.....	56
<b>Figure II.16.</b> Sélection de matériaux durables .....	60
<b>Figure III.1.</b> : Schématisation de processus de validation des solutions optimaux ...	73
<b>Figure III.2</b> : Le processus de construction d'un questionnaire .....	75
<b>Figure III.3</b> : Le processus des mesures in situ .....	76
<b>Figure III.4</b> : La structure générale d'EnergyPlus .....	78
<b>Figure III.5</b> : La structure générale de TRNSYS .....	80
<b>Figure III.6</b> : le logiciel de simulation IDA-ICE .....	80
<b>Figure IV.1</b> : El Oued dans le Bas-Sahara algérien : proximités et découpage communal .....	83
<b>Figure IV.2</b> : Dômes et voutes utilisée à l'Oued .....	84
<b>Figure IV.3</b> : Rayonnement mensuel de la ville d'El-Oued.....	85
<b>Figure IV.4</b> : Température journalière de la ville d'El-Oued .....	85
<b>Figure IV.5</b> : Rayonnement global journalier de la ville d'El-Oued .....	86
<b>Figure IV.6</b> : précipitation mensuelle de la ville d'El-Oued .....	86
<b>Figure IV.7</b> : Diagramme psychrométrique basé sur les conditions climatiques d'El Oued. ....	87
<b>Figure IV.8</b> : Les anciens quartiers de la ville d'El Oued en 1860. ....	90
<b>Figure IV.9</b> : Le Souk du quartier d'Achèche. ....	90
<b>Figure IV.10</b> : La rue principale Larbi Taleb .....	91
<b>Figure IV.11</b> : Les ruelles étroites du quartier d'Achèche.....	92
<b>Figure IV.12</b> : Localisation de la maison traditionnelle .....	92
<b>Figure IV.13</b> : 1 <sup>er</sup> cas d'étude : la maison traditionnelle .....	93

<b>Figure IV.14</b> : Les ruelles du quartier Belle Vue.....	96
<b>Figure IV.15</b> : Localisation de la maison contemporaine .....	96
<b>Figure IV.16</b> : 2eme cas d'étude : la maison Contemporaine .....	98
<b>Figure IV.17</b> : morphologie urbaine compacte de Souf .....	99
<b>Figure IV.18</b> : la stratégie passive de l'orientation optimale dans un climat désertique .....	101
<b>Figure IV.19</b> : la pierre lous (rose de sable) .....	102
<b>Figure IV.20</b> : Coupe 3D des composants d'un mur de la maison traditionnelle d'El Oued .....	102
<b>Figure IV.21</b> : Coupe 3D d'un dôme de la maison traditionnelle d'El Oued .....	103
<b>Figure IV.22</b> : le ratio de la fenêtre dans la maison traditionnelle d'El Oued .....	104
<b>Figure IV.23</b> : la masse thermique de la maison traditionnelle d'El Oued.....	106
<b>Figure IV.24</b> : la stratégie passive de la ventilation nocturne (effet de cheminée) dans la maison traditionnelle d'El Oued .....	106
<b>Figure IV.25</b> : le parcours de l'architecte (formation et expertise) .....	109
<b>Figure IV.26</b> : l'avis de l'architecte sur le cahier des charges et son rôle dans la prise des décisions .....	109
<b>Figure IV.27</b> : l'importance du confort thermique et données climatiques lors la conception des bâtiments résidentiels .....	110
<b>Figure IV.28</b> : l'emploi des stratégies passives lors la conception des bâtiments résidentiels .....	111
<b>Figure IV.29</b> . Le couple de variables (X1, X10), corrélation positive forte entre les architectes (0.964).....	113
<b>Figure IV.30</b> . Le couple de variables (X2, X10), corrélation positive (0.558).....	114
<b>Figure IV.31</b> . Le couple de variables (X2, X9), corrélation faible négative (-0.080)...	114
<b>Figure IV.32</b> . Schéma de corrélation.....	115
<b>Figure IV.33</b> . Histogramme de la matrice de corrélation triangulaire inférieure .....	116
<b>Figure V.1 a.b</b> . Emplacement de l'instrument de mesure in situ .....	121
<b>Figure V.2</b> : Data logger Misol HP3001.....	121
<b>Figure V.3</b> . Relever à l'aide de télémètre.....	122

<b>Figure V.4.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans la Sguifa (08 au 10 Janvier 2022).....	123
<b>Figure V.5 :</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans le Sabbat (08 au 10 Janvier 2022).)	124
<b>Figure V.6.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans la chambre, la cuisine et le salon (08 au 10 Janvier 2022).	125
<b>Figure V.7.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans la Sguifa (23 au 25 Juillet 2022).	126
<b>Figure V.8.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans le Sabbat..	127
<b>Figure V.9.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans la chambre, la cuisine et le salon (23 au 25 Juillet 2022).....	128
<b>Figure V.10.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans le séjour.	129
<b>Figure V.11.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans le salon..	130
<b>Figure V.12.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans la cuisine et la chambre .....	131
<b>Figure V.13.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans le séjour.	132
<b>Figure V.14.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans le salon..	133
<b>Figure V.15.</b> Variation de la température (°C) extérieure et intérieure dans la cuisine et la chambre .....	134
<b>Figure V.16</b> Gamme de données sur les performances environnementales du Logiciel .....	135
<b>Figure V.17.</b> Processus de modélisation et simulation numérique par le logiciel Designbuilder .....	136
<b>Figure .V.18 :</b> les données de site mensuel de la ville d'El Oued. ....	138
<b>Figure V.19 :</b> les fréquences horaires de la température sèche et le point de rosée tout au long de l'année de la ville d'El Oued .....	138
<b>Figure V.20 :</b> modélisation du 1 <sup>er</sup> cas d'étude : maison traditionnelle .....	139
<b>Figure V.21 :</b> modélisation du 2eme cas d'étude : maison contemporaine .....	140
<b>Figure V.22 :</b> résultat de la simulation des deux cas d'étude dans la saison hivernale. ....	142
<b>Figure V.23 :</b> résultat de la simulation des deux cas d'étude dans la saison estivale. .	143
<b>Figure V.24 :</b> la méthode d'optimisation (objectifs, variables et contraintes).....	145
<b>Figure V.25 :</b> résultat de la simulation des deux cas d'étude dans la saison estivale. .	146

<b>Figure V.26</b> : Validation de calibration entre la température de l'air mesurée et simulée dans la période estivale sur les deux cas d'études. ....	149
<b>Figure V.27</b> : Le Front de Pareto de l'optimisation de la maison contemporaine.....	150
<b>Figure V.28</b> : L'orientation optimale de la maison selon le Front de Pareto .....	152
<b>Figure V.29</b> : La comparaison de la consommation énergétique et le taux d'inconfort entre les deux orientations .....	152
<b>Figure V.30</b> : Le ratio de la fenêtre optimale de la maison selon le Front de Pareto..	154
<b>Figure V.31</b> : Comparaison entre les deux options extrêmes du variable : ratio de la fenêtre. ....	155
<b>Figure V.32</b> : Comparaison entre les différentes options (plage) des ratios par rapport aux points de consigne. ....	155
<b>Figure V.33</b> : Consommation énergétique et heures d'inconfort par rapport au ratio de la fenêtre.....	157
<b>Figure V.34</b> : Optimisation de la ventilation naturelle dans la maison contemporaine .....	158
<b>Figure V.35</b> : Résultat de simulation de la ventilation naturelle sans ventilation nocturne .....	159
<b>Figure V.36</b> : Résultat de la simulation de la ventilation naturelle avec ventilation nocturne .....	159
<b>Figure V.37</b> : le système constructif optimal de la maison selon le Front de Pareto...	162
<b>Figure V.38</b> : Optimisation des variables par la minimisation de consommation énergétique.....	163
<b>Figure V.39</b> : Réduction de la consommation énergétique annuelle .....	164
<b>Figure V.40</b> : Résultat d'enchaînement des solutions et des variables pour optimiser la maison contemporaine. ....	164
<b>Figure V.41</b> : Utilisation des solutions et des variables optimisées pour effectuer des choix conceptuels dès la phase esquisse. (Source : auteur).....	165



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1</b> : les cinq grands types de climat d’après Köppen-Geiger .....	16
<b>Tableau 1.2</b> : les trois grandes classifications de climat d’après Thornthwaite.....	17
<b>Tableau 1.3</b> : les classifications climatiques ASHRAE.....	18
<b>Tableau 1.4</b> : les zones climatique en hiver.....	20
<b>Tableau 1.5</b> : les zones climatique en été.....	19
<b>Tableau 1.6</b> : les échelles de confort thermique selon Bedford et ASHRAE. ....	24
<b>Tableau 1.7</b> : La relation entre le "SET" et la sensation thermique. ....	29
<b>Tableau 1.8</b> L’interprétation des indices PMV et PPD. ....	33
<b>Tableau 1.9</b> Températures opératives recommandées pour les occupants, pour l'activité sédentaire basée sur l’ISO 7730-1984 .....	36
<b>Tableau 1.10</b> Table de recommandations pour un climat chaud et sec .....	38
<b>Tableau II.1.</b> Liste des critères liés aux matériaux dans LEED. ....	45
<b>Tableau II.2.</b> Liste des critères liés aux matériaux dans BREEAM. ....	47
<b>Tableau II.3.</b> Répartition des objectifs pour les bâtiments résidentiels. ....	50
<b>Tableau.II.4.</b> Stratégies pouvant favoriser à la fois l'efficacité énergétique et la qualité de l'air intérieur (QAI). ....	57
<b>Table IV.1</b> : Résumé des recommandations de Mahoney.....	88
<b>Tableau IV.2</b> : Analyse typologique de la maison traditionnelle d’El-Oued.....	94
<b>Tableau IV.3</b> : la compacité de la maison traditionnelle d’EL Oued .....	99
<b>Table IV.4</b> : La matrice de corrélation.....	115
<b>Tableau V.1.</b> Plage et précision de l’instrument de mesure. ....	121
<b>Tableau V.2</b> : Spécifications des deux cas d’études .....	141
<b>Tableau V.3</b> : Validation de modèle de simulation .....	146
<b>Tableau.V.4</b> : Matrice des objectifs, variables de conception et des options pour l'analyse d'optimisation. ....	148

<b>Tableau V.5</b> : Les économies d'énergie annuelle dans les deux orientations. ....	153
<b>Tableau V.6</b> : Optimisation de l'orientation dans la maison contemporaine : variables et options .....	153
<b>Tableau V.7</b> : Consommation énergétique et heures d'inconfort par rapport au ratio de la fenêtre.....	156
<b>Tableau V.8</b> : Optimisation de la ventilation naturelle : variables et options. ....	157
<b>Tableau V.9</b> : Consommation énergétique et heures d'inconfort par rapport à la ventilation naturelle. ....	160
<b>Tableau V.10</b> : Optimisation de l'enveloppe de la maison contemporaine. ....	161
<b>Tableau V.11</b> : Consommation énergétique et heures d'inconfort par rapport à l'enveloppe et l'isolation .....	163

# NOMENCLATURE

## ABREVIATIONS

ASHRAE :	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
BIM :	Building Information Modeling
BREEAM :	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CASBEE :	Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency.
CPEB :	Performance Énergétique du Bâtiment
CRS :	Certificat de Performance Énergétique
CV(RMSE) :	Cross-Validation (Root Mean Square Error).
CVC :	Chauffage, Ventilation et Climatisation.
DGNB :	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
ET :	L'indice de température effective
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HQE :	Haute Qualité environnementale
IDS :	Indicateurs de démonstration spécifiques
ISS :	Indicateurs de sous-systèmes
OM M :	Organisation météorologique mondiale
LEED :	Leadership in Energy and Environmental Design
NMBE	l'erreur de biais moyen normalisé
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
PMV :	Predicted Mean Vote
PPD :	Predicted Percentage of Dissatisfied
SET :	Standard Effective Temperature
WWR :	Window-to-Wall Ratio
CDF :	fonctions de distribution cumulative

## INDICES

U :	Coefficient de transmission thermique ( $w/m^2k$ ).
CLO :	Unité d'isolement vestimentaire.

KWH :	kilowatt-heure
H :	Heure
R :	Logiciel de statistique
Tai :	Température d'air intérieur
Tae :	Température d'air extérieur

## **SYMBOLES**

U <sub>1</sub> :	uniformes standard
CF :	Coefficient de forme
R :	Logiciel de statistique
V <sup>c</sup> :	Espace de conception
S :	La surface (m <sup>2</sup> ).
C :	Chaleur spécifique (Kj/kg. K).

# PRODUITS SCIENTIFIQUES

## Publications :

**Femmam, A.**, Sriti, L., & Latreche, S. (2022). *Towards Sustainable Residential Buildings in Hot Arid Climates : Learning from Traditional Architecture of the Souf Region (Algeria)*. Technium Soc. Sci. J., 37, 683.

Benghida, N., Sriti, L., **Femmam, A.**, Saouli, S., & Mekki, S. (2023). *A Stylistic Analysis of the Saharan French colonial architecture in southern Algeria*. Technium Soc. Sci. J., 39, 574.

Femmam, N., Boukhabla, M., Mazouz, S., & **Femmam, A.** (2023). *Analysis and reading of the quality of an urban public space via space syntax*. Technium Soc. Sci. J., 39, 554.

## Communications et participations :

**Femmam, A.**, Sriti, L. (2018). *A design tool to minimize energy consumption by natural lighting. Case study : the oasis houses in Biskra - Architecture and environment -*, Batna, Algeria.

**Femmam, A.**, Sriti, L. (2018). *Approche par l'élaboration d'un outil d'aide à la conception d'une architecture résidentielle durable – Zone Humides et Villes Durables –*, Biskra, Algérie.

**Femmam, A.** (2019). *Regional Architecture Between Inspiration & mimicry - InternATIONAL Event STARTUP04 -*, Algiers, Algeria.

**Femmam, A.**, Sriti, L., Sfaksi, I., Berbouche, CH. (2019). *Decision making tool to minimize energy consumption case study : the oasis houses in Biskra – Built Environment in Oasis milieu (BEO) -*, Biskra, Algeria.

**Femmam, A., Sriti, L.** (2019). *La raouzna comme une strategie passive pour un eclaireage naturel cas d'etude : Les Maisons Oasiennes de la Ville de Biskra – Les Matériaux, le Patrimoine et l'Environnement en Zones Arides -*, Adrar, Algérie.

**Femmam, A., Sfaksi, I., Berbouche, CH., & Sriti, L.** (2019). *Building materials for sustainable architecture Case. Study : the thermal potential of materials in traditional & contemporary residential buildings – Villes durables et développement local -*, Guelma, Algeria.

Berbouche, CH., Sriti, L., & **Femmam, A.** (2019). *Rural settlement in the Aures, toward new bioclimatic housing strategies development. Case study (Ainzaatout-BeniFerah) – Ville durables et développement local -*, Guelma, Algérie.

**Femmam, A., Sriti, L.** (2020). *Development of a guide assistant tool to minimize energy consumption in residential buildings in hot and dry climate – The 2nd International Space Syntax Workshop on Urban Open Spaces -*, Biskra, Algeria.

**Femmam, A.** (2022). *A tool to minimize energy consumption in hot and arid climate case study : the oasis houses in Biskra – Innovative Academic Studies -*, Konya, Turkey.

**Femmam, A.** (2022). *Architectural and urban investigation methods and tools – Architectural Scales : post occupancy evaluation -*, Biskra, Algérie.

Darfi, I., Darfi, M., **Femmam, A.** (2022). *Outdoor thermal comfort in urban and open space – The international architectural and urban investigation tools and methods workshop -*, Biskra, Algeria.

Femmam, N., Baadache, H., **Femmam, A.** (2023). *Le retour au vernaculaire Techniques de rafraichissement naturelles – - التراث المعماري والعمراني بالجزائر (أساس تربيوي وكفاءة - (معمارية عمرانية*, Batna, Algérie.

# Introduction générale

*« L'architecture, c'est la totalité de  
l'environnement rendue visible »  
(Langer, S)*

## 1. Introduction générale

Depuis qu'il est sur Terre, l'être humain a toujours été à la recherche d'un abri pour assurer son bien être physiologique en se protégeant des facteurs externes tels que la chaleur, le froid, ainsi que pour satisfaire d'autres besoins notamment l'intimité, les relations sociales, l'usage et l'accomplissement des activités de l'ordre du quotidien, ...etc. Aujourd'hui, avec le développement technologique et la nécessité de produire toujours plus de bâtiments et plus rapidement, les contraintes climatiques ne constituent plus une dimension incontournable pour construire. Avec le mouvement moderne, l'architecture s'est « libérée ». 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.

Paradoxalement, le confort de l'utilisateur a été délégué à des installations mécaniques. Mais cette attitude a fini par avoir des conséquences désastreuses, tels que l'exploitation et la déplétion des ressources naturelles, la pollution environnementale et le changement climatique. Face à l'accroissement démographique, la pression sur l'environnement ne fait que s'aggraver du fait de la consommation d'eau, d'aliments, de la production des déchets (source traitée), ainsi que l'exploitation irrationnelle et rapide des énergies fossiles. Cette situation a conduit à l'organisation du premier Sommet de la Terre celui de Rio en 1992, où la notion de développement durable a été établie et reconnue comme la nécessité de répondre aux besoins présents sans compromettre les capacités des générations futures.

Le secteur résidentiel en Algérie, se présente comme le plus grand consommateur d'énergie avec plus de 40 % de la consommation nationale totale, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à ce secteur, s'élèvent à environ 30 %, alors que les émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de 19 % (Semahi, 2013). Conscient de la prédominance de l'énergie conventionnelle dans le pays et dans le souci de protéger l'environnement, une loi sur la maîtrise de l'énergie a été promulguée en 1999 par le gouvernement. Pour cela, les bâtiments résidentiels représentent un potentiel considérable d'amélioration et de réduction de l'énergie. De ce point de vue, et pour garantir le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments, ce sont généralement les stratégies passives qui sont mises en œuvre dans les constructions nouvelles, tout en améliorant là où c'est nécessaire et en préservant le cadre bâti historique (Chro, 2018).

Dans un autre volet, la nécessité de combler l'écart entre les performances énergétiques prédites et mesurées dès la phase de conception et d'ingénierie a été soulevée par les chercheurs afin de fournir une contribution sérieuse à la réalisation de bâtiments qui répondent à leurs ambitions (passivement), telles que les bâtiments à haute performance, les bâtiments à zéro



émission de carbone et les bâtiments à énergie nette nulle (De Wilde, 2014). Différents types de bâtiments ont des besoins énergétiques variables, influencés par des facteurs tels que le climat, la conception des bâtiments et les équipements installés. Avec les changements climatiques en cours, en particulier l'augmentation des températures, il est essentiel d'évaluer avec précision la consommation d'énergie des bâtiments et d'adopter des pratiques de conception efficaces pour relever les défis environnementaux (Boemi et al., 2016).

En conformité avec la législation sur la performance énergétique et les schémas d'évaluation environnementale des bâtiments, plusieurs études d'optimisation de la conception des bâtiments ont été menées. Les méthodes d'optimisation utilisées dans les recherches précédentes prennent en considération à la fois les niveaux faibles d'émission CO<sub>2</sub> et les performances en matière d'efficacité énergétique en modifiant différentes caractéristiques des bâtiments (De Boeck et al., 2015). Ce faisant, elles visent à minimiser la consommation d'énergie et les coûts associés. Durant la phase de conception, une origine courante des écarts de performance ultérieurs réside fréquemment au cœur de la conception elle-même. Les problèmes peuvent découler d'une communication inadéquate concernant les objectifs de performance du futur bâtiment, tant entre le client et l'équipe de conception qu'entre les membres de cette dernière (Trust, 2011 ; Newsham, 2009 ; Morant. 2012).

Les concepteurs (architectes, designers, ...) conscients de la nécessité d'une bonne intégration de la composante environnementale-énergétique dans le cadre d'une réflexion globale sur le développement durable cherchent des réponses fondées sur des dispositifs architecturaux. Il apparaît donc que, quelle que soit la démarche de l'architecte, ce qui s'avère déterminant dans l'intégration cohérente de la dimension énergie et confort, est la prise en compte de l'ensemble des contraintes dans les phases amont du projet. En effet, au-delà du fait que de mauvaises décisions à ce stade seront souvent irrécupérables, le cadre d'une approche intégrant les contraintes environnementale-énergétique rend nécessaire une confrontation avec les autres composantes au plus tôt afin d'identifier les éventuels conflits entre critères de conception.

En effet, le rôle de l'architecte revêt une importance capitale dès les phases initiales d'esquisse et de conception jusqu'à la concrétisation des bâtiments résidentiels à haute efficacité énergétique. Dans cette démarche, l'intégration des stratégies passives devient essentielle pour atteindre les objectifs de performance énergétique et de confort thermique. Étant donné que la phase initiale de conception joue un rôle déterminant dans 80% de l'investissement initial et

que la plupart des choix de conception effectués à ce moment-là ont un impact sur la consommation d'énergie pendant la période d'exploitation (Kang, 2017). La conception environnementale -ou encore bioclimatique ou éco-énergétique- consiste à planifier, édifier, exploiter, entretenir, rénover et démolir des édifices de manière à préserver les ressources naturelles, réduire la pollution et adopter une démarche respectueuse de l'environnement (Srivastava et al., 2017). La démarche conceptuelle soucieuse de la dimension environnementale du projet, implique l'utilisation proactive de l'énergie naturelle pour créer des environnements intérieurs agréables et pour économiser les ressources énergétiques en exploitant intelligemment le terrain et l'environnement.

Selon Shad et al., certains pays développés tels que le Royaume-Uni, les États-Unis et le Japon, des normes d'évaluation du cycle de vie des bâtiments (LCA) ont été élaborées afin de mettre en place des programmes de conseils énergétiques adaptés et de soutenir la conception de bâtiments respectueux de l'environnement (Shad et al., 2017). Ces outils d'évaluation environnementale varient en portée, couvrant des échelles globales, nationales et locales. Certains outils nationaux peuvent être adaptés pour une utilisation internationale en ajustant les bases de données nationales. Leur développement vise des objectifs variés, tels que la recherche, le conseil, la prise de décision et la maintenance (Haapio et Vitaniemi, 2008). Pendant la phase de conception précoce, des choix cruciaux sont souvent effectués, et les outils d'évaluation environnementale peuvent servir à faciliter ce processus en permettant la sélection d'alternatives aux impacts réduits pour les matériaux et les assemblages de construction. (Hassan et al., 2022).

Les régions du sud de l'Algérie où prédomine un climat désertique, illustrent clairement l'ampleur des problèmes environnementaux et énergétiques résultant des pratiques et dysfonctionnements caractérisant la production du cadre bâti résidentiel. Depuis l'indépendance, les constructions produites dans le sud ne répondent plus aux conditions climatiques extrêmement rigoureuses de la saison estivale et n'arrivent plus à assurer des conditions minimales de confort thermique. En conséquence, les habitants sont contraints de recourir à des systèmes de chauffage et de climatisation mécaniques pour maintenir un certain niveau de confort, ce qui entraîne de lourdes conséquences aussi bien économiques qu'environnementales.

Pour réduire la facture énergétique et garantir un confort climatique optimal, il est impératif d'intervenir au niveau de la conception architecturale. La ville d'El Oued connue pour être la capitale de la région du Souf se caractérise par un climat désertique, très chaud et sec en été des températures extrêmement élevées en été, très froides en hiver et une sécheresse persistante toute l'année. Face à ces conditions climatiques extrêmes, un défi majeur se pose pour assurer le confort thermique des habitants sans avoir recours à des systèmes mécaniques énergivores. Dans ce contexte, l'utilisation de stratégies passives inspirées de l'architecture traditionnelle locale, émerge comme une solution prometteuse pour créer des espaces de vie confortables tout en réduisant la consommation énergétique. En intégrant les principes de l'architecture traditionnelle qui ont historiquement permis de s'adapter à un climat hostile, il est envisageable de concevoir des bâtiments et des espaces intérieurs optimisant l'utilisation des stratégies passives.

Dans cet ordre d'idée, élaborer un guide de conception bioclimatique destiné aux architectes, et qui serait basé sur les conditions climatiques, sociales et économiques du contexte local se présente comme une alternative possible et prometteuse pour remédier à cette situation critique. Cet outil s'inspirerait des stratégies passives vernaculaires et se présenterait comme un ensemble de connaissances et de compétences spécialement conçu pour les architectes. A travers le développement d'une approche intégrée au processus conceptuel, cet outil pourrait s'adresser aux architectes en leur fournissant les moyens de l'utiliser dès la phase d'esquisse et devrait jouer un rôle clé dans la réalisation de bâtiments résidentiels assurant des conditions de confort thermique satisfaisantes avec une faible dépendance vis-à-vis des systèmes de conditionnement d'air et donc une moindre consommation énergétique.

## **2. Problématique**

La maîtrise de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité de vie de l'habitant tout en minimisant l'impact de l'empreinte carbone sur l'environnement. Malheureusement, la négligence des spécificités environnementales a engendré l'exploitation abusive et irrationnelle des ressources énergétiques. C'est ainsi que la consommation énergétique du secteur résidentiel en Algérie, qui représente 40% de la consommation totale d'électricité, s'avère être essentiellement destinée à couvrir les besoins d'éclairage artificiel, chauffage et climatisation.

Et c'est pour diminuer cette consommation énergétique et assurer un confort climatique optimal qu'il faut agir sur la conception architecturale. De ce point de vue, une évaluation puis une optimisation climatique et énergétique des bâtiments résidentiels doit être effectuée et finalisée par la proposition d'un guide d'assistance à la conception environnementale basé sur les conditions climatiques, sociales et économiques pour pallier aux conditions d'inconfort que ces constructions engendrent. Cela nécessite le développement de recommandations que l'architecte peut exploiter durant la phase de l'esquisse et tout au long du processus de conception pour assurer le confort des occupants tout en réduisant les dépenses énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre.

Les recherches précédentes montrent que la maîtrise de la consommation énergétique doit être intégrée à la démarche conceptuelle dès la phase amont du projet à travers certains paramètres-clés dont l'effet est déterminant en termes de confort thermique et d'efficacité énergétique. Ces paramètres incluent : l'implantation/insertion dans le contexte physique, l'orientation, la masse/volumétrie, le coefficient de forme, le ratio d'ouverture (dimensions des ouvertures), le système constructif défini par les matériaux de constructions utilisés et leur propriétés thermo-physiques, l'éclairage naturel, la ventilation...

Aujourd'hui en Algérie, le défi et la préoccupation majeure de l'architecte sont d'assurer les conditions d'un confort thermique lors de la conception des bâtiments et notamment ceux à usage résidentiel. D'un autre côté, un environnement intérieur sain et confortable dépend principalement du comportement thermique de l'enveloppe architecturale soumise aux contraintes climatiques. L'enveloppe extérieure du bâtiment est la première barrière de protection et se compose de deux types de parois : les parois opaques (murs et toiture) et les parois transparentes (fenêtres). Selon la littérature existante, un traitement judicieux des parois de l'enveloppe en fonction des conditions climatiques chaudes et arides (orientation adéquate, réduction des dimensions des fenêtres, protections solaires, choix des matériaux de construction à forte inertie thermique pour les murs et la toiture, ...etc.) permet de garantir un confort optimal à l'intérieur du bâtiment, même si les conditions extérieures sont défavorables.

Dans ce contexte, l'architecture traditionnelle qui a la capacité d'intégrer des stratégies passives en réponse aux conditions climatiques du lieu semble offrir un terrain d'investigation intéressant en vue de l'amélioration de l'adaptabilité climatique et de la performance énergétique du bâtiment résidentiel soumis aux conditions du climat désertique. De plus, la réalisation des bâtiments climatiquement et énergétiquement performants pourrait être assurée

par l'élaboration de ce guide de conception qui se présente à la fois comme un savoir et un savoir-faire conçu pour les architectes selon une manière graphique et simplifiée qui va les accompagner tout au long du processus de conception afin d'aboutir à des résultats performants et fonctionnels par rapport au confort thermique et le bien être au niveau des espaces de vie.

La présente recherche voudrait contribuer à une meilleure conception du point de vue environnemental des bâtiments résidentiels, notamment ceux situés dans les zones chaudes et arides. À travers l'étude du cadre bâti résidentiel de la ville d'El-Oued, précisément, des caractéristiques matérielles de l'enveloppe, cette étude tente de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les critères à prendre en considération dans les choix conceptuels de l'enveloppe d'un bâtiment à usage résidentiel en vue d'assurer sa performance thermique dans un contexte chaud et aride ?
- Quelles stratégies passives pourraient adapter le bâtiment résidentiel aux conditions d'un climat chaud et sec tout en assurant le confort thermique à l'occupant et une consommation énergétique rationnelle ?
- Quel sont les choix formels et constructifs à effectuer pour optimiser le fonctionnement thermique de l'enveloppe architecturale et ainsi assurer son l'adaptabilité climatique du bâtiment résidentiel, notamment, sa performance thermique et sa performance énergétique ?
- Comment peut-on développer un guide d'assistance à la conception environnementale destinés aux architectes répondant à la fois aux besoins d'assurer le bien-être de l'habitant et minimisant la facture énergétique ?
- Est-il possible d'intervenir sur le cahier de charge afin d'y inclure la dimension environnementale en l'interpréter sous la forme de prescriptions techniques que l'architecte doit prendre en considération lors de l'élaboration de son projet ?

### **3. Hypothèses**

La présente recherche s'insère dans l'ordre de la qualité de l'environnement intérieur et, plus précisément, le confort thermique et ses corollaires l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. D'un autre côté, dans les régions climatiques chaudes et arides, le problème du confort thermique s'impose comme un facteur principal à prendre en

considération durant la conception des bâtiments, et notamment, ceux à usage résidentiel. Dans cette approche, les propriétés formelles et matérielles de l'enveloppe sont déterminantes pour faire face à la surchauffe d'été.

Or, en intégrant les principes de l'architecture traditionnelle qui ont historiquement permis de s'adapter aux conditions très rudes du climat désertique, il est envisageable de concevoir des bâtiments assurant l'adaptabilité climatique et la performance énergétique. De plus, le développement d'un guide de conception bioclimatique qui soit inspiré des stratégies passives employées dans l'architecture vernaculaire et le proposer aux architectes, sous la forme de prescriptions techniques, pourrait jouer un rôle clé dans la réalisation de bâtiments résidentiels assurant les conditions du confort thermique à faible consommation énergétique tout en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub>.

Partant de cette assertion, la présente étude admet l'hypothèse suivante :

- Dans le cas d'un climat désertique (très chaud et sec) où la conception du bâtiment se concentre sur la minimisation des gains solaires des différents composants de l'enveloppe, la demande énergétique relativement élevée principalement dédiée au refroidissement pourrait être minimisée en adoptant des mesures architecturales et constructives inspirées des stratégies passives vernaculaires relatives à la forme et la matérialité du bâtiment résidentiel.

#### **4. Objectifs de la recherche et cadre de l'étude**

Dans les régions climatiques chaudes et arides, le problème du confort thermique s'impose comme un facteur principal à prendre en considération durant la conception des bâtiments, et notamment, ceux à usage résidentiel. Dans cette approche, les propriétés formelles et matérielles de l'enveloppe sont déterminantes pour faire face à la surchauffe d'été.

De ce point de vue, le principal objectif de cette recherche est d'arriver à améliorer la performance thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments à usage d'habitation relativement à un contexte climatique chaud et sec, en agissant sur les composants de l'enveloppe, notamment, les paramètres caractérisant ses aspects formels et constructif-matériel. L'étude porte sur l'évaluation et, ensuite, l'optimisation des stratégies passives vernaculaires pour atténuer les conditions d'inconfort générées par les constructions

contemporaines. Plus précisément, à son issue l'étude espère développer un outil voire un guide de conception bioclimatique des bâtiments résidentiels pour assister l'architecte durant les processus de la conception architecturale. Ce guide est élaboré sous la forme de prescriptions techniques formulées dans le cadre du cahier de charge visant à assurer une adaptabilité climatique (ambiance thermique agréable) et une consommation énergétique rationnelle.

La ville d'El Oued capitale du Souf, est choisie pour servir de contexte d'étude, son climat étant représentatif des conditions d'un climat désertique. En effet, à l'instar des autres régions du sud de l'Algérie, les habitations réalisées dans la région du Souf posent un problème de confort thermique et constituent un défi à relever lors du processus de conception des projets d'habitat. Pourtant, l'architecture vernaculaire du Souf représente un modèle exemplaire d'architecture à la fois bioclimatique et durable, mettant en avant l'adaptation harmonieuse des bâtiments dans leur contexte climatique. Cette intégration repose sur des stratégies passives qui assurent un confort thermique intérieur salubre, tout en évitant le recours aux systèmes mécaniques. Ces méthodes passives, incluant l'orientation des bâtiments, la ventilation naturelle nocturne, le rapport fenêtre-mur, ainsi que les matériaux de construction, dictent l'adaptation des constructions aux conditions locales.

Ainsi, cette ville présente une diversité de typologies architecturales en termes de logements et permet d'envisager une comparaison pertinente entre les habitations traditionnelles et les bâtiments résidentiels contemporains. A cet égard, les maisons traditionnelles du Souf sont réputées pour leurs caractéristiques de construction spécifiques favorisant une régulation thermique adéquate et une utilisation efficace de l'énergie. Par contre, les maisons contemporaines se distinguent souvent par des matériaux et des conceptions plus énergivores pouvant influencer négativement leur comportement thermique et leur consommation énergétique.

L'étude tentera également de réaliser les objectifs suivants :

- Améliorer la qualité des bâtiments résidentiels de la ville d'El Oued sur le plan du confort thermique et de l'efficacité énergétique.
- Enrichir la réglementation qui préside à la production du cadre bâti par la proposition de recommandations et d'orientations ayant trait à la thermique-énergétique et combler les insuffisances dans ce domaine.

- Réaliser des bâtiments adaptés à leur contexte assurant le confort thermique et la performance énergétique par des stratégies conceptuelles passives.
- Réduire la consommation énergétique et promouvoir une architecture passive respectueuse de l'environnement.
- Illustrer des recommandations ayant trait aux différents paramètres du confort afin de réaliser un environnement intérieur plus confortable et sain.

## **5. Méthodologie**

Le cadre méthodologique s'appuie sur deux volets complémentaires. Le premier volet est théorique ; il relève d'une approche conceptuelle basée sur une revue approfondie de la littérature existante relative au domaine climatologique et environnemental. Grâce à ce premier volet, un socle théorique a été élaboré en vue de cerner les aspects les plus pertinents pour l'analyse climatique et énergétique du bâtiment résidentiel dans un climat désertique. Une revue approfondie de la littérature a été effectuée, ce qui a donné un aperçu de l'état des connaissances sur le sujet abordé. Les grandes lignes du cadre méthodologique ont également été esquissées dans le but de servir de levier pour l'analyse, ainsi que pour mieux comprendre les concepts et aspects de la recherche.

Le deuxième volet de l'étude est pratique. Pour le réaliser, un cadre d'analyse a été élaboré selon trois approches. La première consiste à effectuer une étude empirique grâce à une analyse qualitative qui vise à identifier et, ensuite, évaluer les conditions de confort thermique dans des bâtiments résidentiels anciens et contemporains. Elle porte également sur l'identification des stratégies de refroidissement passif utilisées dans l'enveloppe des bâtiments traditionnels en réponse aux conditions climatiques désertiques. Cette approche est essentiellement basée sur un travail de terrain qui a été entrepris dans la ville d'El-Oued. Elle a donné lieu à des observations et à des notes de terrain, utilisées conjointement avec une documentation photographique, des relevés et une analyse architecturale. Une analyse climatique de la ville d'El Oued est effectuée, examinant les conditions météorologiques et climatiques prévalant dans cette région.

Après avoir effectué ce travail préliminaire, il a été possible de sélectionner deux types de bâtiments résidentiels ayant servi comme cas d'étude. Ils illustrent respectivement une maison traditionnelle typique de la région du Souf et une maison contemporaine dans la ville



d'El Oued, afin de permettre une comparaison pertinente entre ces deux cas d'étude. Les conditions de confort thermique dans les deux bâtiments ancien et contemporain, ont été évaluées à l'aide des mesures hygrothermiques in situ, durant la semaine la plus chaude et la plus froide, à l'aide d'un capteur hygrothermique (data logger), afin de comprendre le comportement thermique de chaque cas d'étude. D'autre part, considérant que le but de la présente étude est d'élaborer un guide de conception bioclimatique destiné aux architectes, une enquête menée auprès des architectes de la ville d'El Oued a été réalisée. Un formulaire de questions a été distribué à douze bureaux d'études dans le but de comprendre le processus de réflexion des architectes lors de la conception des bâtiments résidentiels dans la ville d'El Oued et la place accordée à la dimension environnementale, notamment, la prise en compte des contraintes climatiques.

La deuxième étape du volet pratique est l'évaluation thermique réalisée par le biais d'une modélisation et ensuite une simulation numérique des deux cas d'étude via le logiciel DesignBuilder/EnergyPlus. Cette étude par simulation numérique consiste à effectuer une comparaison thermique entre les deux maisons ainsi que leur consommation énergétique annuelle.

La troisième étape de la partie analytique de l'étude, vise à optimiser la performance thermique et énergétique de la maison contemporaine en intégrant les stratégies passives inspirées de l'architecture traditionnelle. A ce titre, une simulation multi-objective permettra de vérifier l'efficacité de ces stratégies et les solutions optimales seront mises en exergue à l'aide du Front de Pareto. Cette approche sera finalisée par l'élaboration d'un modèle optimal pour la réalisation des bâtiments à faible consommation énergétique dans le sud de l'Algérie, en prenant en compte les spécificités climatiques de la région.

## **6. Structure de la thèse**

La thèse est structurée en sept (7) chapitres comme suit :

- **Chapitre Introductif** : Il fournit le contexte global de la recherche et commence par une introduction générale qui explique le sujet et met en exergue ses différentes dimensions ; un aperçu sur de la littérature existante portant sur le phénomène étudié est également fourni. Sur la base de cette analyse préliminaire du sujet, des questions de recherche sont posées et une hypothèse est mise en avant qui tente de répondre au

problème soulevé et servira de fil conducteur au travail d'investigation. Cette introduction générale fixe, également, le but et les objectifs attendus, aborde les grands traits de la méthodologie adoptée, et pour finir, présente la structure globale de la thèse.

- **Le premier chapitre** de la thèse aborde les principaux aspects théoriques du sujet, et se divise en deux volets distincts. Le premier volet traite des problèmes environnementaux et climatologiques selon une approche historique, se penchant sur la présentation du climat désertique et en fournissant ses caractéristiques particulières. Le deuxième volet, quant à lui, explore la notion de confort thermique en examinant ses différentes dimensions et les approches élaborées pour l'évaluer. L'accent est ensuite mis sur les indices de confort thermique utilisés dans la littérature existante et fournit une revue approfondie des travaux réalisés sur le sujet.
- **Le deuxième chapitre**, quant à lui, est divisé en trois volets distincts. Le premier volet traite du concept de durabilité et de sa relation avec l'environnement et le développement durable. L'objectif avéré de cette partie, est de saisir la notion de durabilité ainsi que les principes inhérents à la construction bioclimatique. Le deuxième volet du chapitre explore les méthodes internationales d'évaluation environnementale et les certifications de performance énergétique, particulièrement lors de la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique (durables). Enfin, le troisième volet se focalise sur l'architecture durable et les stratégies passives, visant à identifier leurs modes de fonctionnement et leurs impacts sur l'intégration climatique et la performance énergétique des bâtiments.
- **Le troisième chapitre** est consacré à l'habitat et au cadre bâti résidentiel en Algérie. Il débute par une rétrospective de l'évolution de l'habitat dans le pays. Cette exploration chronologique englobe les divers types d'habitat présents en Algérie. Par la suite, l'attention se tourne vers l'habitat traditionnel spécifique de la ville d'El Oued. Cette partie de l'étude se penche sur les méthodes de construction traditionnelles, les approches et les stratégies passives adoptées, et le système architectural distinctif propre à cette région.
- **Le quatrième chapitre** : ce chapitre se divise en deux parties distinctes. La première partie consiste en une étude analytique de deux cas d'étude : une maison traditionnelle, représentative de l'architecture vernaculaire d'El Oued avec ses stratégies passives, et une maison contemporaine illustrant les nouvelles méthodes de construction locales. La

seconde partie aborde une enquête adressée aux architectes, visant à mieux comprendre le rôle accordé à la dimension environnementale-climatique dans le processus de conception. Une attention particulière est portée aux points de vue des architectes concernant d'éventuelles interactions avec leurs clients, que ce soit des refus ou des modifications apportées aux propositions de conception. Les résultats de l'enquête sont traités à l'aide du logiciel statistique "R" par corrélation pour mieux comprendre la relation entre les différents aspects et questions explorés.

- **Le cinquième chapitre** se présente en deux parties appuyées par une méthodologie rigoureuse sous forme d'une étude qualitative et d'une évaluation quantitative suivies d'une optimisation paramétrique par simulation. Cette partie de l'étude commence par mettre en œuvre un travail empirique minutieux incluant une campagne de mesures in situ organisée dans le but de saisir les variations des paramètres hygrothermiques au sein des bâtiments examinés. Ces mesures seront réalisées sur une période prolongée, englobant à la fois les saisons hivernales et estivales afin de prendre en compte les fluctuations saisonnières significatives. Le choix de deux bâtiments représentatifs, à savoir une maison traditionnelle d'El Oued et une maison contemporaine, permet d'avoir une idée précise sur les performances thermiques et l'adaptabilité climatique des deux cas d'étude. Par la suite, l'analyse est complétée par une simulation thermique des deux habitations sélectionnées, à l'aide du logiciel DesignBuilder/EnergyPlus. Une étape cruciale consiste à vérifier et comparer les résultats des mesures in situ avec ceux de la simulation. En amont, une calibration pour ajuster les paramètres du modèle de simulation numérique a été effectuée afin d'assurer une correspondance optimale avec les données réelles collectées sur le terrain.

Après avoir effectué la calibration dans la partie précédente, cette dernière étape se concentre sur l'élaboration d'une grille de recommandations destinée à guider les architectes dès la phase d'esquisse et tout au long du processus de conception, dans le but de réaliser des maisons à la fois confortables et économes en énergie. Tout d'abord, les stratégies passives de la maison traditionnelle d'El Oued sont intégrées à la maison contemporaine, puis l'optimisation est entreprise en recherchant les meilleures stratégies passives à l'aide du front de Pareto. Les solutions optimales les plus prometteuses sont sélectionnées dans le but de réduire les heures d'inconfort et minimiser la consommation énergétique.

- **Conclusion générale** ; En conclusion, la dernière étape englobe une synthèse exhaustive de l'ensemble du travail accompli à travers les différents chapitres. Cette synthèse est suivie d'une mise en évidence des limites intrinsèques de la recherche, clarifiant ainsi ses frontières et ses domaines d'application. Une liste de recommandations est élaborée sous forme d'un guide destiné aux architectes, visant principalement à minimiser la consommation énergétique tout en assurant un confort thermique optimal pour les habitants.

# Chapitre I :

## Climat et Confort thermique

*« Tout concepteur a besoin de connaître le climat du lieu où il doit construire. C'est-à-dire le régime de la température et de l'humidité de l'air, le régime et la nature des précipitations, l'ensoleillement, le régime et la nature des vents durant le cycle annuel complet ».*

(Fernandez et Lavigne 2009).

## **Introduction**

Aujourd'hui, l'intégration de la conception durable ainsi que l'utilisation de stratégies de construction passives adaptées au climat jouent un rôle primordial dans la réduction de la consommation énergétique, tout en garantissant le confort des résidents. Les pratiques orientées vers la durabilité ainsi que les défis liés aux changements climatiques occupent désormais une place centrale dans les discussions à l'échelle mondiale et une priorité pour la plupart des gouvernements. L'analyse des données climatiques des performances énergétiques et du confort thermique des bâtiments doit être présentée sous forme d'un modèle annuel correspondant aux facteurs climatiques de la région, tels que la vitesse du vent, l'humidité, la nébulosité, la température, etc. En outre, des diagrammes bioclimatiques devraient également être inclus.

Ce chapitre vise en premier lieu à comprendre la relation homme-climat-bâtiment. Pour ce faire, il commence par identifier le climat et ses éléments, pour ensuite se focaliser sur la classification des zones climatiques dans le monde. Le climat chaud et sec est présenté en détail et un aperçu sur le climat chaud et sec en Algérie est fourni. Enfin, cette section est finalisée par une énumération des stratégies et principes de conception adaptés au climat chaud et sec. La deuxième partie du chapitre est consacrée au confort thermique. Les exigences humaines concernant les conditions de climat intérieur sont clarifiées, le confort thermique est défini de même que ses indices avant de passer au mécanisme d'ajustement du corps humain avec le climat intérieur. Finalement, les normes, modèles et indicateurs relatifs à l'évaluation du confort thermique sont présentées, ainsi que l'importance du confort thermique et ses exigences relativement aux bâtiments résidentiels.

### **I-1. Climat et données climatiques**

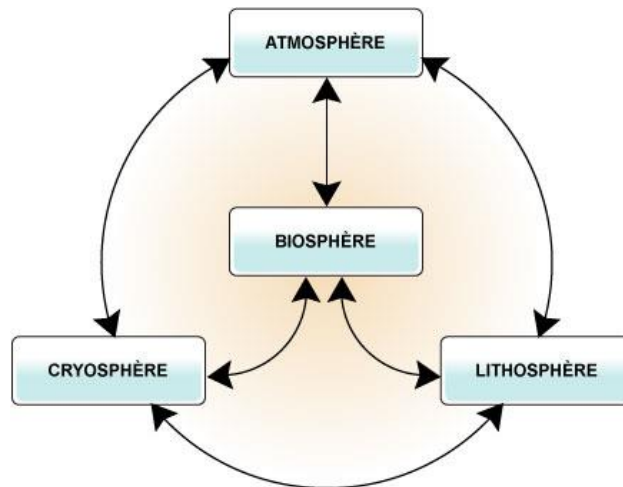
#### **I.1.1. Le climat**

Le climat est l'ensemble des conditions atmosphériques prédominantes qui règnent sur un territoire donné, englobant des facteurs tels que les précipitations, la température, la pression atmosphérique, l'humidité, l'ensoleillement, la couverture nuageuse ainsi que les vents, durant l'année, et cela en prenant en compte une moyenne des données annuelles.

Selon GIEC, les reliefs et l'énergie solaire reçue par la surface terrestre ainsi la circulation atmosphérique et la circulation océanique sont les paramètres influençant le climat. Les termes (équatorial, tropical, subtropical, continental, maritime, subarctique, méditerranéen, désertique) sont déterminés pour exprimer le climat existant.

D'après L'OMM, le climat est défini comme étant les conditions météorologiques moyennes dans le temps où il se présente comme un système complexe et interactif comprenant l'atmosphère. (OMM, 2011). NASA a défini le climat comme étant une description précise d'un modèle météorologique pour un long terme dans une région donnée. Le climat émerge des interactions entre les éléments environnementaux présents à la surface de la terre. Les interactions entre les compartiments existants tels que l'atmosphère, hydrosphère, cryosphère et lithosphère à la surface terrestre forment l'atmosphère (Berger, A 1992).

Selon Zhou & Wang, le climat joue un rôle crucial en tant que déterminant majeur des écosystèmes terrestres (Zhou & Wang, 2000). Il se caractérise comme une description statistique globale des conditions climatiques sur une période suffisamment étendue et à différentes échelles temporelles (Chen & Chen 2013).



**Figure 1.1** : Les composants de climat (source : Berger, 1992)

### **I.1.2. Les classifications climatiques**

Le climat est mondialement décrit soit par sa température en quatre catégories : climat froid, climat tempéré, climat chaud et très chaud, ou bien par son humidité qui est définie par un climat sec ou un climat humide.

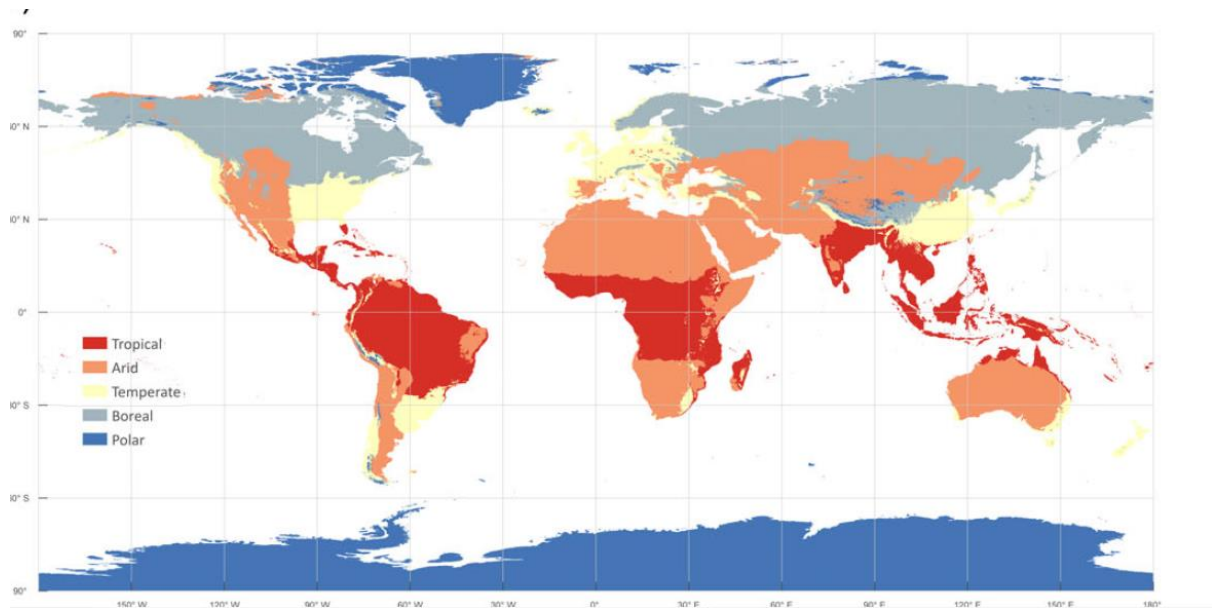


Figure 1.2 : Carte de classification climatique Köppen-Geiger. (Source : Beck et al. 2018)

### I.1.2.1. Classification climatique de Köppen

Le climat de la terre est exprimé par une carte climatique qui démontre les cinq grands types de climat au monde. D’après KÖPPEN, la classification climatologique est notamment basée sur les précipitations, les végétations et la température, interprétée par une division de cinq climats fondamentaux :

- Climat sec
- Climat continental,
- Climat polaire
- Climat tempéré
- Climat tropical

. **Tableau 1.1** : Les cinq grands types de climat d’après Köppen-Geiger

Climat	Localisation	Classification
Désertique	les tropiques.	Sécheresse et une aridité permanente
Tropical	Près de l’équateur	Température très chaude
Continental	l’hémisphère nord	Hiver très froid Forte amplitude thermique annuelle
Froid	Les régions polaires Les montagnes	Températures froides toute l’année, sans chaleur estivale (10°C au maximum) et avec des hivers glacials (souvent -60°C



**I.1.2.2. Classification climatique de Thornthwaite**

En raison de son approche rationnelle, la classification de Thornthwaite de 1948 est souvent mentionnée comme une amélioration du système de classification climatique car elle est souvent jugée trop complexe pour une utilisation quotidienne et des cartes mondiales de la classification n'ont jamais été produites (Feddema, J 2005).la classification est définie par l'indice d'aridité comme étant la moyenne annuelle des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle (Attia, S 2012). Thornthwaite a classifié les climats en treize types, répartis en trois groupes principaux en fonction de leur latitude (basse, moyenne, haute), et a également inclus un climat montagnard plus général.

**Tableau 1.2** : les trois grandes classifications de climat d’après Thornthwaite

Groupe 1 : climat à faible latitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• forêt équatoriale humide</li> <li>• littoral de pluies des alizés</li> <li>• mousson tropicale</li> <li>• savane tropicale</li> <li>• tropical sec</li> </ul>
Groupe 2 : climat de moyenne latitude.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• subtropical humide</li> <li>• méditerranéen</li> <li>• côte ouest maritime</li> <li>• zone de latitude moyenne sèche</li> <li>• continental humide</li> </ul>
Groupe 3 : climat de haute latitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• subtropical</li> <li>• la toundra</li> <li>• calotte glaciaire</li> </ul>

**I.1.2.3. La classification climatique ASHRAE**

Les zones climatiques ont été regroupées en trois principales catégories, chacune ayant sa propre définition : définition maritime, définition sèche et définition humide. Ces définitions ont été établies en fonction de critères spécifiques aux emplacements géographiques (Esiyok, 2007).

**Tableau 1.3** : Les classifications climatiques d'après ASHRAE

Définition maritime	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température moyenne du mois le plus froid entre - 3°C et 18°C</li> <li>• Température moyenne du mois le plus chaud inférieure à 22°C</li> <li>• Au moins quatre mois avec une température moyenne supérieure à 10°C</li> <li>• Saison sèche en été.</li> </ul>
Définition sèche	<p>La classification climatique ASHRAE, pour exclure les zones maritimes, utilise la condition suivante</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La précipitation annuelle en centimètres (Pcm) doit être inférieure à 2,0 fois la somme de la température moyenne annuelle (Tc) en degrés Celsius, à laquelle on ajoute 7.</li> </ul>
Définition humide	<p>La classification climatique ASHRAE exclut les zones maritimes lorsque la condition suivante est remplie :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La précipitation annuelle en centimètres (Pcm) est égale à 2,0 fois la somme de la température moyenne annuelle (Tc) en degrés Celsius, à laquelle on ajoute 7.</li> </ul>

Les normes utilisent les Journées de Degrés de Refroidissement (CDD) et les Journées de Degrés de Chauffage (HDD) pour caractériser différentes zones climatiques. Les CDD sont calculés en prenant comme référence une température de base de 10°C, tandis que les HDD utilisent une température de base de 18°C (Malatji et al., 2013). En négligeant l'humidité relative, la classification climatique ASHRAE utilise deux paramètres pour définir les différentes zones climatiques : la température de l'air et les précipitations. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les besoins en chauffage, refroidissement et ventilation dans les bâtiments en fonction des conditions climatiques spécifiques de chaque zone.

### **I.1.3. Le climat en Algérie**

Du fait de l'influence combinée des courants marins, de la topographie et de l'élévation, l'Algérie adopte un climat méditerranéen extratropical tempéré. Ce type de climat se distingue par une période prolongée de sécheresse estivale, qui s'étend sur environ :

- 3 à 4 mois le long du littoral
- 5 à 6 mois dans les Hautes Plaines
- Plus que 6 mois dans l'Atlas Saharien (Nedjraoui et al., 2003).

#### **I.1.4. Données géographiques**

Positionnée au nord de l'Afrique, l'Algérie se démarque comme étant parmi les pays les plus diversifiés géographiquement, comprenant des englobant des massifs montagneux, des étendues forestières, et comprenant le Sahara qui occupe 84% de son territoire. qui occupe 84% de son territoire. Avec une superficie de 2 381 741 km<sup>2</sup>, elle est le pays le plus vaste d'Afrique. Le pays présente une variété de zones climatiques qui se distribuent en trois groupes bien définis

- Le Tell : caractérisé par un climat tempéré humide (type méditerranéen).
- Les Hautes Plaines : présentant un climat continental
- Le Sahara un climat aride et desséché

Entre les latitudes 18° et 38° Nord et les longitudes 9° Ouest et 12° Est, l'Algérie se déploie, avec le méridien international de Greenwich (0°) traversant près de Mostaganem. Les distances entre le Nord et le Sud, ainsi qu'entre l'Est et l'Ouest, oscillent entre 1500 et 2000 km. (Ould-Henia, 2003).

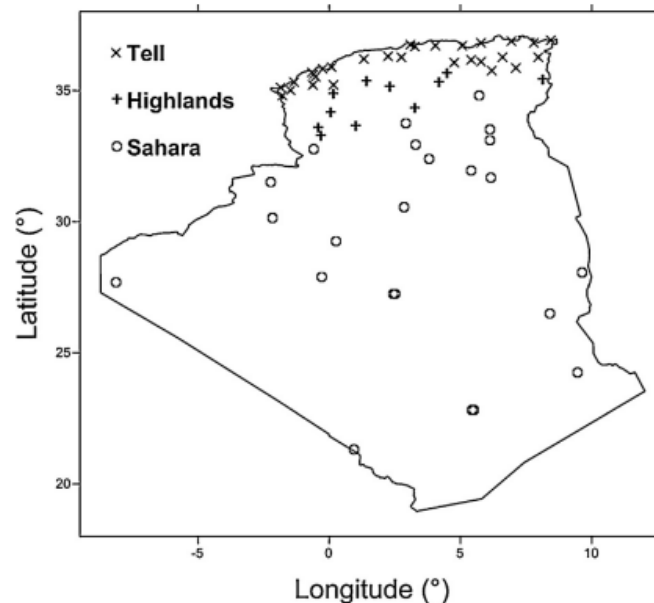


Figure 1.3 : Les trois (03) catégories climatiques en Algérie (source : Boudia et al., 2016).

### I.1.5. Les zones climatiques en Algérie

La topographie du pays, sa proximité avec la mer Méditerranée, son territoire étendu et sa situation géographique ont engendré une variété climatique qui peut être catégorisée en termes de climats hivernaux et de climats estivaux.

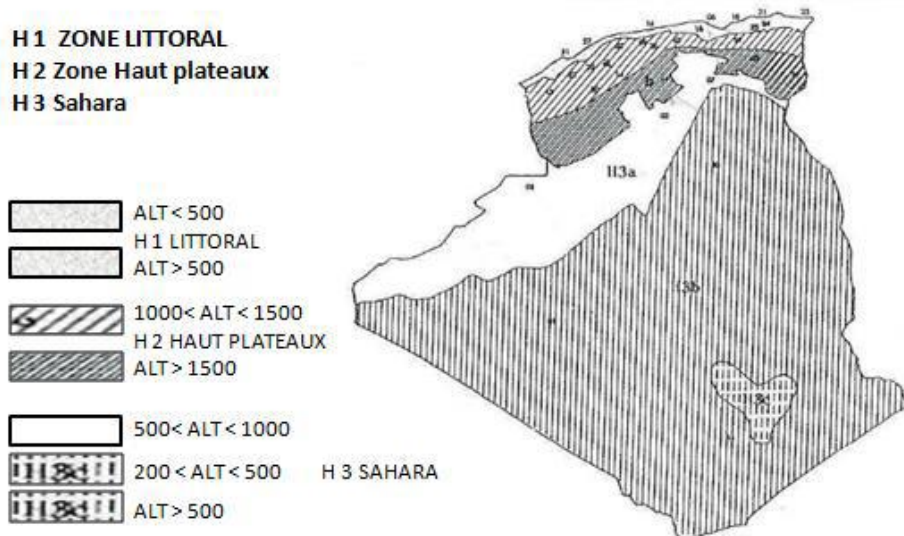
#### I.1.5.1. Les zones climatiques en hiver :

Trois zones climatiques d’hiver (tableau 1.2) qui sont classée en 7 (sept) sous-zones en fonction de l’altitude :

**Tableau 1.4** : Les zones climatique en hiver

Zones climatique	Sous zone climatique	Caractéristique
La zone H1 est soumise à l'influence de la mer	H1a : littoral mer, altitude <500m	Hivers doux avec des amplitudes faibles.
	H1b : arrière littoral montagne, altitude >500m	Hivers plus froids et plus longs
La zone H2 soumise à l'influence de l'altitude	H2a : atlas tellien- montagne, 1000m< altitude < 1500m	Hivers froids et un écart de température diurne important
	H2b : atlas saharien- montagne, altitude > 1500m	Hivers encore plus froids
La zone H3 soumise à l'influence de la latitude	H3a : présaharien, 500m< altitude < 1000m	Hivers très froids la nuit par rapport au jour. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants
	H3b : Sahara, 200m < altitude < 500m	Hivers moins froids que la zone H3a avec des écarts de température diurne
	H3c : Hoggar, altitude > 500m	Hivers très froids analogues à la zone H3a, mais qui persistent même durant la journée.

### Zones climatiques d’hiver



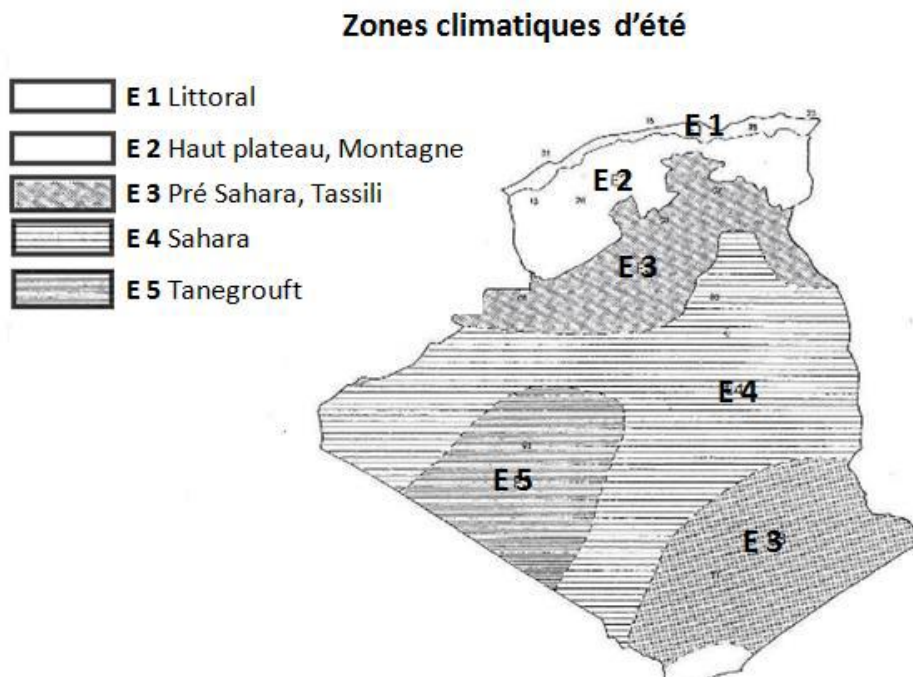
**Figure 1.4** : Les zones climatique d’hiver (source : Ould Henia 2003)

**I.1.5.2. Les zones climatiques en été :**

Elles sont classées en cinq (05) groupes :

**Tableau 1.5 :** Les zones climatique en été

Zones climatique	Caractéristique
La zone E1 est soumise à l'influence de la mer	littoral, caractérisée par des étés chauds et moins humides. L'écart de température diurne est faible.
La zone E2 soumise à l'influence de l'altitude	hauts plateaux- montagne, caractérisée par des étés plus chauds et moins humides avec des écarts de température diurne importants.
La zone E3 soumise à l'influence de la latitude	pré-Sahara – tassili, caractérisée par des étés très chauds et secs, mais moins pénibles qu'en zone E4
La zone E4 soumise à l'influence de la latitude	Sahara, caractérisée par des étés secs, mais plus chauds et plus secs qu'en zone E3
La zone E5 soumise à l'influence de la latitude	Tanezrouft, caractérisée par des étés chauds et secs et extrêmement pénibles par rapport aux zones E3 et E4, c'est la zone la plus chaude de l'Algérie.



**Figure 1.5 :** Les zones climatique d'été (source : Ould Henia 2003)

## I.2. Aperçu sur le confort thermique

### I.2.1. Confort thermique :

Selon Nicol, J, le confort thermique désigne un environnement thermique satisfaisant et exempt de stress dans les bâtiments. C'est une notion socialement déterminée qui est définie par des normes et des attentes. L'idée de ce qui est considéré comme confortable a certainement évolué au fil du temps, des lieux et des saisons (Nicol, J 2017).

La Société Américaine de Chauffage, de Réfrigération et de Climatisation des Ingénieurs" (ASHRAE) a défini le confort thermique comme la condition qui reflète le degré de confort thermique ressenti vis-à-vis de l'environnement est intimement liée, d'une part, aux échanges de chaleur du corps de l'occupant résultant des processus métaboliques et, d'autre part, aux influences environnementales.

Le confort thermique est affecté par plusieurs éléments, notamment la température de l'air, l'humidité relative, la température radiante, la vitesse de l'air, l'activité physique et les vêtements portés (Darby et al., 2005). Ces six paramètres fondamentaux opèrent en synergie pour régir les échanges thermiques entre l'individu et son environnement. Lors des processus métaboliques de digestion et de transformation de la nourriture en énergie, le corps humain génère de la chaleur. La quantité de chaleur générée dépend de l'alimentation et du niveau d'activité physique du corps. Le taux métabolique par unité de surface du corps est mesuré en 'met', et la zone de Dubois correspond à la surface moyenne de la peau d'un adulte, soit environ 1,8m<sup>2</sup>. Lorsque le corps est au repos et à l'aise, la dissipation minimale de chaleur est d'environ 80W (Fernández, A. (2007) (Chro, A, 2018).

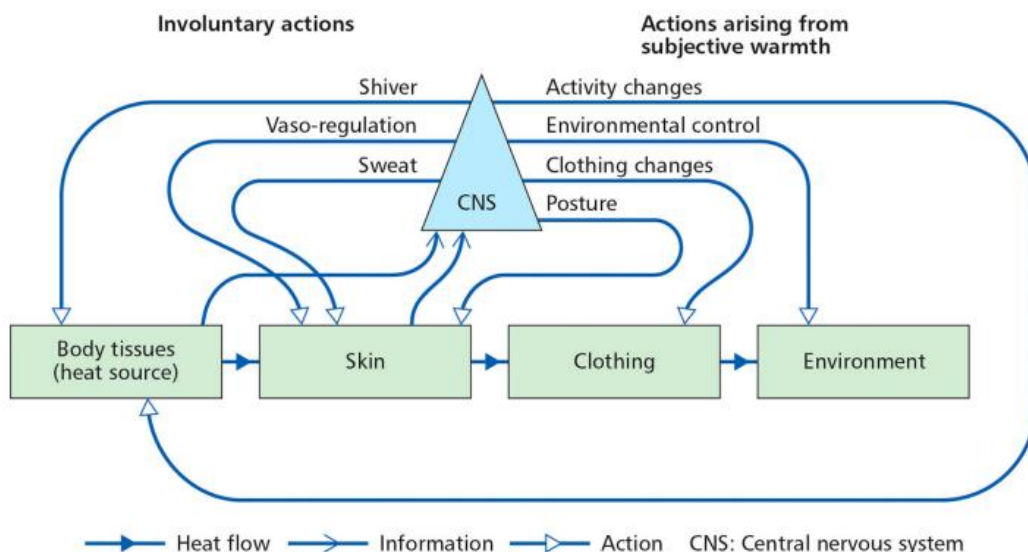


Figure 1.6 : système de régulation thermique (source : CIBSE (2013))

L'équilibre thermique dans l'environnement intérieur est influencé par des facteurs physiques et sociaux. Ainsi, les concepteurs doivent tenir compte de ces paramètres et comprendre les mécanismes de transfert thermique entre le corps humain et son environnement sont orchestrés afin d'établir un équilibre thermique pour l'organisme. La balance thermique du corps humain est évaluée en se basant sur une équation spécifique :

$$S = M - W - C - R - Esk - Cres - Eres - K(Wm - 2)$$

Ou :

S = stockage de chaleur dans le corps ;      Esk = perte de chaleur par évaporation de la peau ;  
M = production de chaleur métabolique ;      Cres = perte de chaleur par convection de la respiration ;  
W = travail externe ;      R = perte de chaleur par rayonnement ;  
C = perte de chaleur par convection ;      Eres = perte de chaleur par évaporation de la respiration ;  
K = perte de chaleur par conduction ;

## **I.2.2. Les aspects du confort thermiques**

Selon Höppe, trois dimensions principales sont prises en compte pour évaluer le confort thermique humain : la dimension psychologique, la dimension thermo-physiologique et une dimension basée sur le bilan énergétique humain (Höppe, 2002).

Dans la même étude, Lin et Deng (2008) démontrent que l'évaluation du confort est un processus cognitif impliquant de nombreux facteurs influencés par : (i) des aspects physiques, (ii) des aspects physiologiques, (iii) des aspects psychologiques et d'autres facteurs. (Lin et Deng, 2008).

### **I.2.2.1 L'aspect psychologique**

Il décrit le confort comme étant une notion très subjective et peut différer d'une personne à l'autre, ainsi que selon l'environnement et le climat. Certaines personnes peuvent trouver des conditions très chaudes confortables dans certaines situations, telles que lorsqu'elles ont vécu plusieurs jours de froid, qu'elles passent seulement un court moment à l'extérieur ou qu'elles sont en vacances (Kotz, 1984). Le confort thermique est donc influencé par des facteurs individuels et des éléments contextuels. Le tableau ci-dessous (tableau 1.6) montre les échelles de confort thermique selon Bedford et ASHRAE.

**Tableau 1.6** : les échelles de confort thermique selon Bedford et ASHRAE. (Parsons, 2010).

Bedford comfort scale		ASHRAE sensation scale	
Much too warm	7	Hot	7
Too warm	6	Warm	6
Comfortably warm	5	Slightly warm	5
Comfortable	4	Neutral	4
Comfortably cool	3	Slightly cool	3
Too cool	2	Cool	2
Much too cool	1	Cold	1

### I.2.2.2. L'aspect thermo-physiologique

Selon l'approche du bilan thermique, pour atteindre le confort thermique, Il revêt une importance capitale d'assurer l'équilibre entre les flux de chaleur entrants et sortants du corps humain, tout en préservant la température cutanée ainsi que le niveau de transpiration dans des fourchettes déterminées (Fanger 1973).L'aspect thermo-physiologique se concentre sur la physiologie humaine et considère le confort thermique comme étant atteint lorsque les signaux nerveux des récepteurs thermiques de la peau sont réduits au minimum (Höppe, 2002).

Une personne en bonne santé a une température corporelle d'environ 37 °C, tandis que la température de la peau se situe entre 31 et 34 °C. Lors d'une activité physique, le corps humain produit de la chaleur, allant de 70 W pendant le sommeil à 700 W pendant un travail intense. Cette chaleur doit être évacuée vers l'extérieur (Irem, S 2019). La formule de bilan thermique du corps est exprimée comme suit :

$$M \pm Rd \pm Cv \pm Cd - Ev = \Delta S$$

M : Production de chaleur métabolique (chaleur produite par le métabolisme du corps)

Rd : Transfert de chaleur par rayonnement (perte de chaleur par rayonnement)

Cv : Transfert de chaleur par convection (perte de chaleur par convection)

Cd : Transfert de chaleur par conduction (perte de chaleur par conduction)

Ev : Perte de chaleur par évaporation

$\Delta S$  : Variation de chaleur stockée (ce terme représente toute variation dans le stockage de chaleur du corps)





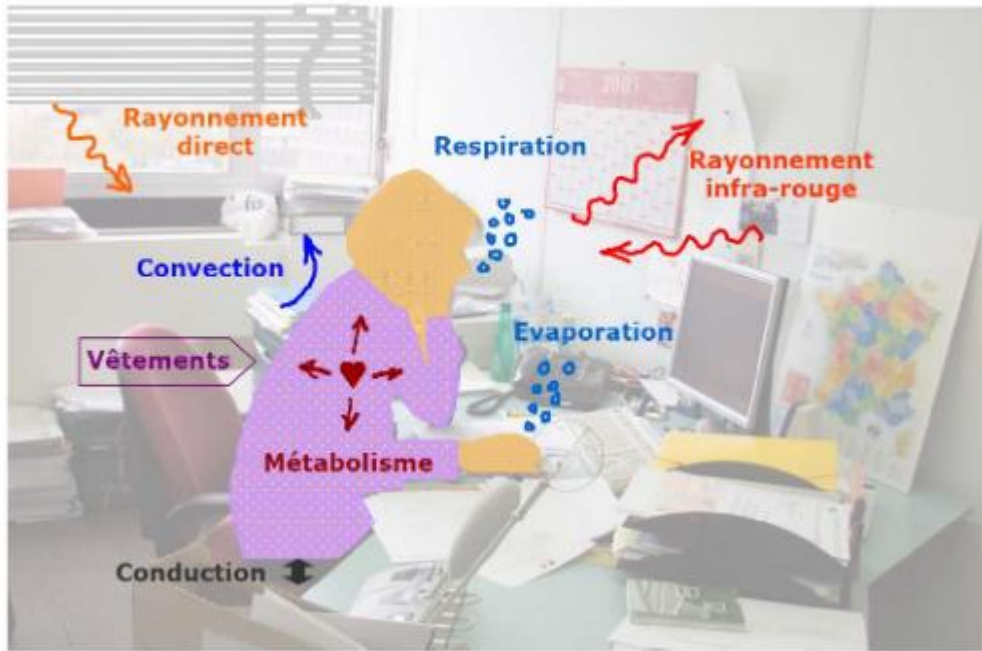
**Figure 1.7** : Transmission thermique au sein de l'organisme humain et échanges de chaleur avec l'environnement (Auliciems et Szokolay, 2007)

Lorsque le corps est en équilibre thermique, l'échange total de chaleur est égal à zéro, ce qui permet de satisfaire les conditions de confort thermique. Actuellement, la plupart des normes relatives au confort thermique sont fondées sur cette approche de bilan thermique (Irem, S 2019).

### **I.2.2.3. L'aspect physique**

Dans le contexte du confort thermique pour le corps humain, La peau assume une fonction primordiale dans la détection des sensations de chaleur et de froid. C'est pourquoi la température de la peau est devenue un facteur prépondérant déterminant le niveau de confort de l'individu. (Berkouk, D 2017).

Selon Besancenot (1990), du point de vue physique, lorsqu'il y a une différence de température entre le corps humain et son environnement, la chaleur se déplace du plus chaud vers le plus froid. Ce transfert d'énergie thermique implique quatre processus (modes) différents, à savoir la conduction, la convection, le rayonnement et l'évaporation, comme illustré dans la figure 1\_7. De plus, Njomo (2010) souligne deux autres effets qui contribuent aux échanges thermiques entre le corps humain et son environnement : l'effet des vêtements et l'effet métabolique.



**Figure 1.8** : L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement (source : GUIDEnR HQE)

### I.2.3. Les approche du confort thermique

Pour comprendre et évaluer le confort thermique, différentes approches ont été développées, parmi lesquelles l'approche analytique et l'approche adaptative. L'approche analytique repose sur des modèles mathématiques et des simulations pour étudier les paramètres thermiques et prédire les conditions de confort dans un environnement donné. D'autre part, l'approche adaptative prend en compte la capacité des individus à s'adapter aux variations environnementales, en ajustant leur comportement, leur habillement ou d'autres stratégies pour maintenir un niveau de confort thermique optimal.

#### I.2.3.1. L'approche analytique (statistique)

Selon Macpherson, six facteurs influencent la sensation thermique : la température de l'air, la température radiante, l'humidité et le mouvement de l'air sont les quatre variables environnementales de base qui affectent la réponse humaine aux environnements thermiques, tandis que la chaleur métabolique générée par l'activité humaine et les vêtements sont les deux variables personnelles (Macpherson 1962).

Cette approche repose sur l'analyse des flux de chaleur à l'intérieur et autour du corps, et a conduit à la création d'un modèle fondé sur la physique et la physiologie. Des données

issues d'études réalisées en chambre climatique ont été utilisées pour soutenir ce modèle. Les modèles de bilan thermique les plus connus sont le vote moyen prédit (PMV) (Fanger, 1970) et la température effective standard (SET) (Gagge, Fobelets, & Berglund, 1986).

#### **I.2.3.1.a. Le modèle de Fanger (PMV) et (PPD) :**

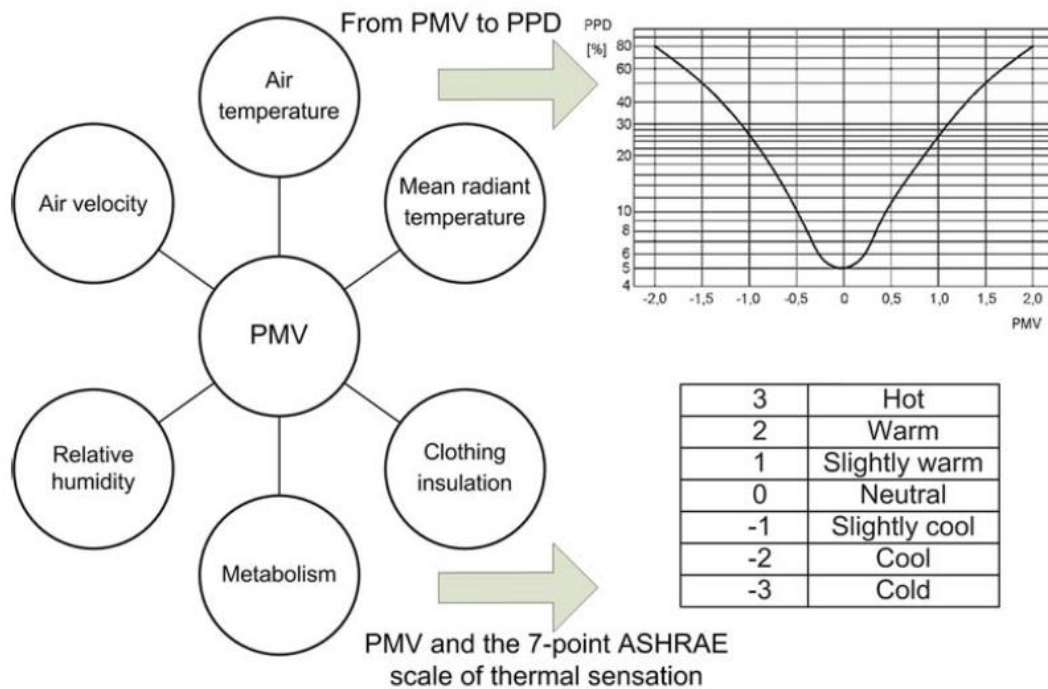
Dans les années 70, Fanger a développé une méthode permettant d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique afin de déterminer les conditions de confort thermique. Cette méthode est la plus largement utilisée pour évaluer le confort thermique et a été utilisée pour élaborer la norme française et internationale NF EN ISO 7730 (Moujalled, B 2007).

En formulant le bilan thermique et à l'aide de l'indice PMV, Fanger a exprimé la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement par rapport à celui correspondant aux conditions de confort. (Cantin et al, 2005).

Selon Butera, le but de prévoir combien pourcentage prévu des insatisfaits, % (PPD) a été introduit. Le PPD établit une estimation chiffrée du nombre de personnes insatisfaites sur le plan thermique (Butera, F 1998).

Les personnes considérées comme insatisfaites sont celles dont la sensation thermique est en dehors de l'intervalle [-1, 1] sur l'échelle de vote. Selon la relation, on prévoit un minimum de 5% de personnes insatisfaites pour un vote égal à zéro (sensation neutre). Ensuite, ce pourcentage augmente de manière symétrique de part et d'autre du vote zéro en direction des sensations chaudes et froides (Moujelled 2007).

Le modèle PMV a été appliqué pendant près de 40 ans dans divers types de bâtiments à travers le monde, bien qu'il ait été initialement conçu pour être utilisé par l'industrie du CVC (chauffage, ventilation et climatisation) pour créer des climats artificiels dans des espaces contrôlés (2,28).



**Figure 1.9 :** PMV, ses paramètres d'entrée, sa relation avec le PPD et son expression sur l'échelle de sensation thermique à 7 points de l'ASHRAE (source : Van,H et al 2010).

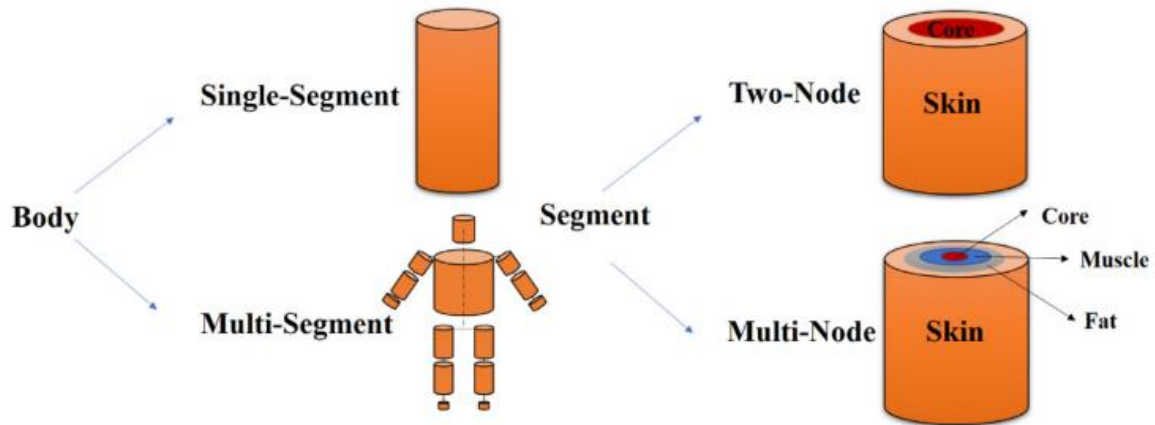
Selon les normes internationales, il est recommandé de maintenir le PMV à 0, avec une tolérance de  $\pm 0,5$  unité d'échelle, afin d'assurer un environnement intérieur confortable.

### I.2.3.1.b. Le modèle Gagge

Gagge a développé un modèle dynamique simplifié de la thermorégulation. (ASHRAE, 1997). Le modèle utilise un cylindre intérieur pour représenter le noyau du corps, comprenant le squelette, les muscles et les organes internes, tandis que le cylindre extérieur représente la couche de la peau. Ce modèle est employé pour estimer le transfert de chaleur et les réponses thermiques à l'intérieur du corps humain sous diverses conditions environnementales (Yigit, A 1999).

Selon Gagge, Le modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- L'échange de chaleur par conduction depuis la peau est négligeable.
- La température dans chaque compartiment est uniforme (noyau et peau).
- La production de chaleur métabolique.
- Le travail externe et les pertes respiratoires sont associés au compartiment du noyau ainsi qu'au compartiment du noyau et de la peau.



**Figure 1.10** : Les détails des segments du modèle pour les modèles à deux nœuds et à plusieurs nœuds. (Source : Q. Zhao et al 2021).

Les températures de la peau et le degré d'humidité cutanée sont utilisés pour calculer un indice connu sous le nom de "SET" (Standard Effective Temperature), développé par Gagge. Ce paramètre représente la température équivalente qui existerait à l'intérieur d'une enceinte isotherme avec une humidité relative de 50 %, où un individu portant des vêtements standard échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même réponse physiologique que dans l'environnement réel où il se trouve. Ainsi, le SET est étroitement lié au confort thermique (Cantin, R et al 2005). Les sensations thermiques peuvent être déterminées en se référant aux différentes valeurs de SET (**Tableau 1.7**). L'indice prend en compte l'effet des six paramètres fondamentaux, et il peut être utilisé dans des conditions thermiques chaudes, modérées ou froides.

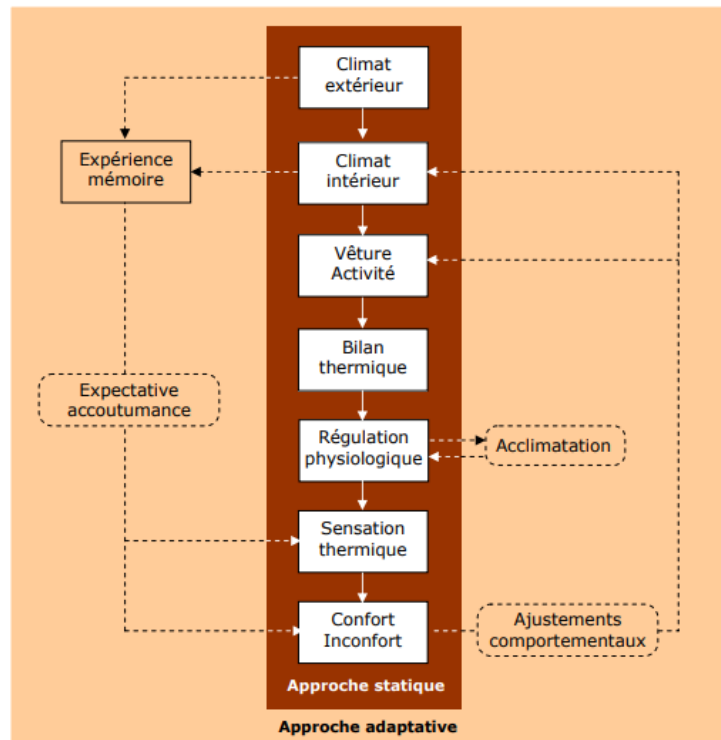
**Tableau 1.7** : La relation entre le "SET" et la sensation thermique. (Source : Parsons, 2003 ; Moujalled, 2007)

<i>SET (°C)</i>	<i>Sensation</i>	<i>L'état physiologique d'une personne sédentaire</i>
>37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec 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 et acceptable	Neutralité
17.5-22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5-17.5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10.0-14.5	Très froid, très inacceptable	Frissons

### I.2.3.2. L'approche adaptative

L'approche adaptative se fonde sur des enquêtes de terrain portant sur les réponses des individus à leur environnement, grâce à l'analyse statistique des données recueillies. Cette méthode est désignée sous le terme de "modèle empirique" ou elle considère la sensation de chaleur ou de froid comme faisant partie active d'un système de contrôle du confort, les sensations désagréables incitent les individus à réagir et à apporter des modifications au système de contrôle du confort lui-même, en plus de la réponse physiologique automatique du corps, les actions comportementales conscientes des personnes vont modifier leur relation avec le monde qui les entoure. (Nicol et al., 2012)

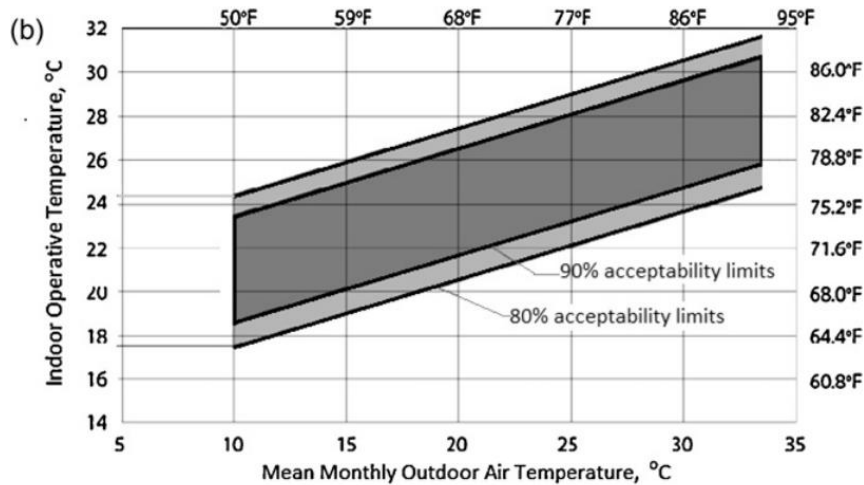
Le modèle de confort adaptatif considère que le confort n'est pas uniquement déterminé par des conditions environnementales fixes, Il prit en compte l'adaptation des occupants à leur environnement. Le modèle tient compte du concept selon lequel les occupants peuvent s'adapter à différentes conditions thermiques avec le temps, ce qui permet une baïs plus large de températures intérieures et de niveaux d'humidité adéquats.



**Figure 1.11** : Représentation des mécanismes adaptatifs (source : Moujalled, 2007)

L'apport majeur de l'approche adaptative dans la recherche sur le confort thermique a été de souligner les limites de l'échelle actuelle de confort thermique de l'ASHRAE pour refléter la sensation thermique préférée des occupants. Cette approche a révélé que le point de

neutralité thermique ne correspond pas toujours à la sensation thermique préférée des occupants d'une pièce. (Brager, G 2001, Humphreys, M 2007).



**Figure 1.12 :** Le diagramme de confort ASHRAE [10] pour : (a) les bâtiments climatisés et (b) les bâtiments à ventilation naturelle (source : E. Halawa et al 2012).

#### I.2.4. Les indices de confort thermique

Les indices de confort thermique sont principalement adaptés à la saison chaude. Pour la saison froide, des paramètres supplémentaires tels que la formule du refroidissement éolien sont pris en compte, en plus de l'utilisation d'unités spéciales de vêtements (en unités Clo) (Teodoreanu, 2016). Le confort thermique est la sensation de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. L'insatisfaction peut être causée par un inconfort général de chaleur ou de froid pour l'ensemble du corps, mais elle peut également résulter d'un chauffage ou d'un refroidissement indésirable d'une partie spécifique du corps (inconfort local) (Butera, 1998).

Les chercheurs ont mis au point diverses méthodes afin de considérer de manière simultanée les variables liées au confort. Voici quelques exemples parmi celles-ci :

- L'indice de PMV et l'indice de PPD.
- La température Effective
- La température résultante
- L'indice de contrainte thermique.
- Les diagrammes bioclimatiques.

### **I.2.4.1. L'indice de vote moyen prévisible PMV**

Le Predicted Mean Vote (PMV) est un indice largement reconnu défini par la norme ISO 7730. Il est principalement établi à partir d'approximations qui tiennent compte de légères variations d'une ou plusieurs variables. (Holopainen, R. 2012).

L'un des avantages majeurs de l'indice PMV réside dans sa capacité à fournir un paramètre unique pour évaluer le niveau de confort thermique ou la sensation thermique ressentie par une personne dans un environnement donné. (Babbah, S et al 2005).

L'indice est exprimé par la relation suivante :

$$PMV = (0.303 \cdot e^{(-0.036M+0.028)}) \cdot \{(M-W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M-W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M-W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a)) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\}$$

Ou :

- M est l'activité métabolique en W/m<sup>2</sup> (Watt par mètre carré),
- W est la puissance moyenne émise par le corps en W/m<sup>2</sup>,
- p<sub>a</sub> est la densité de l'air en kg/m<sup>3</sup>,
- t<sub>a</sub> est la température de l'air en degrés Celsius,
- t<sub>cl</sub> est la température radiante moyenne des surfaces en degrés Celsius,
- t<sub>r</sub> est la température de confort en degrés Celsius,
- f<sub>cl</sub> est un facteur de correction pour les vêtements,
- h<sub>c</sub> est un facteur de correction pour l'activité physique,
- e est l'exponentielle.

### **I.2.4.2. Pourcentage prévu des insatisfaits (PPD)**

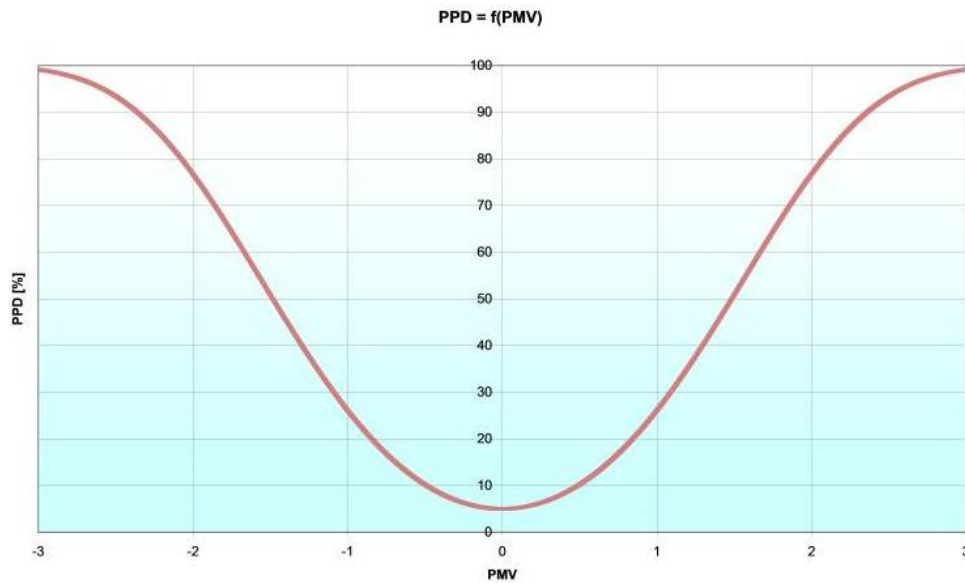
Lorsque le PMV est réglé à zéro, on peut estimer le Pourcentage (PPD) en se référant à la Figure 1.13, établissant ainsi l'équation de confort. Le pourcentage prévu de personnes insatisfaites est donné par la relation suivante :

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)}$$

Suite à l'analyse d'un vaste ensemble de données de test, il apparaît qu'environ 5% de la population serait mécontente même dans les conditions idéales, lorsque le PMV atteint son



niveau optimal de 0. Cependant, tout écart par rapport à cette condition optimale entraîne une augmentation rapide du pourcentage de personnes insatisfaites (Auliciems, A et al 1997).



**Figure 1.13** : Le PPD en fonction du PMV (source : J Med Life. 2008)  
d'utiliser les limites suivantes :

$$0,5 > PMV > -0,5$$

$$PPD < 10\%$$

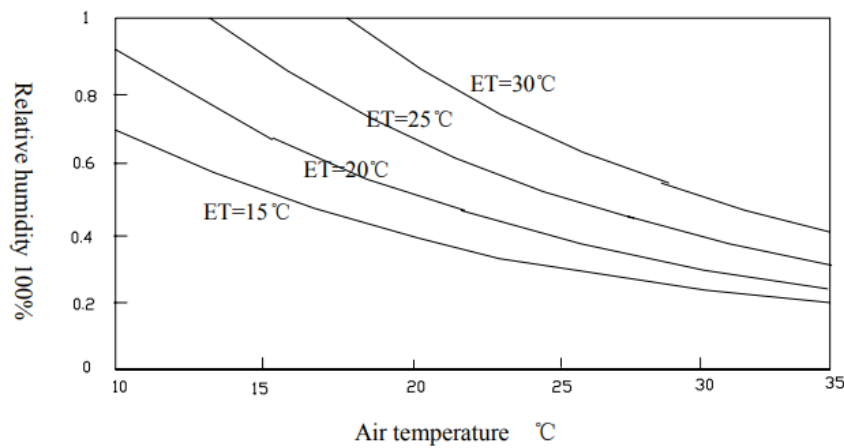
**Tableau 1.8** L'interprétation des indices PMV et PPD. (Source : Mazouz,S et al 2005).

+3	Chaud (majoritairement insatisfaits)
+2	Tiède ( 75% insatisfaits)
+1	Légèrement tiède ( 25% insatisfaits)
0	Neutre ( 5% insatisfaits)
-1	Légèrement frais (25% d'insatisfaits)
-2	Frais (75%insatisfaits)
-3	Froid (majoritairement insatisfaits)

**I.2.4.3. L'indice de température effective (ET)**

Créé par ASHRAE à Pittsburgh en 1923, l'indice de température effective était représenté par un ensemble de lignes d'égal confort tracées sur le diagramme psychrométrique. Il est défini comme la température d'une atmosphère immobile et saturée qui, en cas d'absence de rayonnement, produirait le même effet que l'atmosphère en question (Auliciems, A et al 1997). C'est un indice environnemental combine différents paramètres tels que la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité ou la vitesse de l'air en une seule variable. Il représente la température équivalente de l'air saturé au repos qui provoquerait la même sensation thermique que la combinaison des paramètres en valeur numérique. (Xie Y et al 2005).

En 1971, Gagge a développé l'indice, ou l'appellation (ET) est la température d'un environnement à 50 % d'humidité relative qui donne lieu à la même perte de chaleur totale que dans l'environnement réel. Il combine les effets de trois facteurs (rayonnement, convection et évaporation) et est largement adopté. (Xie Y et al 2005). La courbe de température effective équivalente est présentée dans la figure suivante :

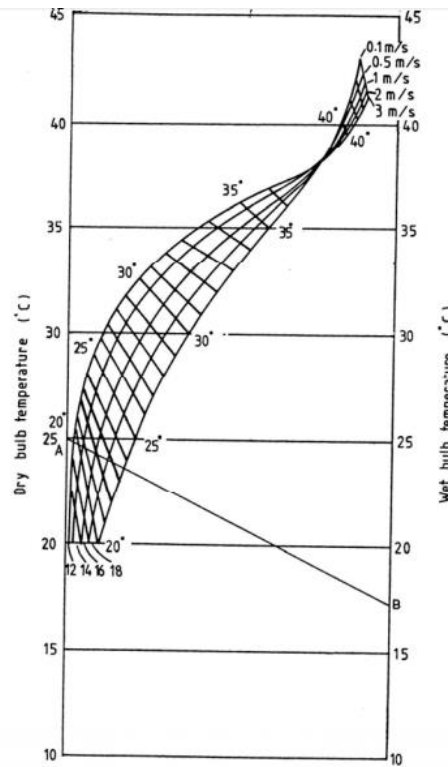


**Figure 1.14** : La courbe de température équivalente effective. (Source : Xie Y et al 2005).

**I.2.4.4. L'indice de température résultante (TR)**

Développé par Missenard en 1948, par un concept que la construction d'un indice thermique plus robuste repose sur des expériences où l'équilibre thermique est atteint entre le corps humain et l'environnement. Cela permettrait de mieux comprendre les effets de l'humidité et du vent. (Karo). Notre peau absorbe presque autant d'énergie qu'un objet noir mat, mais cette absorption peut être réduite en portant des vêtements réfléchissants. (Med,J 2008)

Des résultats expérimentaux ont conduit à l'élaboration d'un nomogramme pour le corps vêtu. Dans l'exemple de la température efficace, la valeur de la température résultante lue sur le nomogramme est de 23,5 °C. La plage de facteurs climatiques couverte par cette température résultante comprend une température de l'air comprise entre 20 et 45 °C, une température humide entre 18 et 40 °C et une vitesse de l'air comprise entre 0 et 3 m/s. (Tibermacine, 2016)



**Figure 1.15** : L'indice de la température résultante d'après Missenard en 1948 (source : cours Hamel, 2015)

#### **I.2.4.5. L'indice de température opérative (TO)**

Winslow, Herrington et Gagge ont développé cet indice en s'inspirant des travaux similaires de Bedford. Il est défini comme la température d'une enceinte uniforme et isotherme "noire" dans laquelle une personne échangerait de la chaleur par rayonnement et convection au même taux que dans l'environnement non uniforme réel. Alternativement, on peut le considérer comme la moyenne pondérée de la température radiante moyenne (MRT) et de la température de bulbe sec (DBT) en fonction de leurs coefficients de transfert respectifs (Auliciems, A et al 1997). Exprimée comme suit :

$$T_o = \frac{h_r t_{mr} + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

Où :

$h_c$  : coefficient de transfert thermique convectif.

$h_r$  : coefficient de transfert thermique radiatif linéaire.

$t_a$  : température ambiante.

$t_{mr}$  : température radiative moyenne.

Selon RAhif R, et al, la température opérative optimale désigne la température de fonctionnement à laquelle on peut s'attendre à ce que le plus grand nombre d'occupants acceptent la température intérieure (Rahif, R et al., 2021). Concernant ce sujet, les recherches de Bos et Love (2013) ont établi que la température opérative médiane optimale était d'environ 23 °C, avec une variation allant de 22 °C à 24 °C (Bos et Love, 2013).

**Tableau 1.9** : Températures opératives recommandées pour les occupants, pour l'activité sédentaire basée sur l'ISO 7730-1984 (Berkouk, D 2017 -Taleghani et al 2013).

Saison	Isolation des vêtements [clo]	Niveau d'activité [met]	Température opérative optimale [°C]	Plage de la température opérative [°C]
Hivernale	1,0	1,2	22	20 - 24
Estivale	0,5	1,2	24,5	23 - 26

Le **tableau 1.8** présente les températures opératives recommandées pour les occupants lors d'activités sédentaires, conformément à l'ISO 7730-1984, pour les deux périodes (estivale et hivernale).

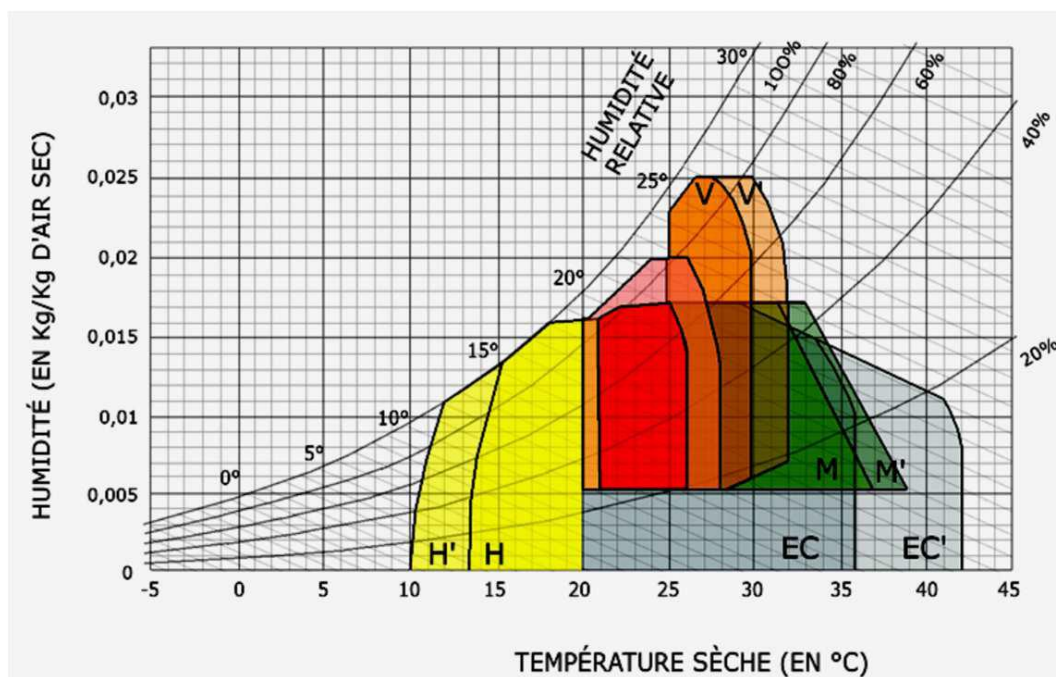
### **I.2.5. Les digrammes bioclimatiques**

Le diagramme bioclimatique est un outil d'analyse préliminaire utilisé au début des étapes de planification d'un projet de construction. Relevant du domaine de l'architecture bioclimatique, un architecte se sert du graphique bioclimatique pour concevoir des bâtiments qui intègrent les stratégies de refroidissement et de chauffage passives les plus efficaces en fonction du climat et de l'emplacement du site de construction. Cette approche vise à maximiser l'efficacité énergétique et la durabilité dans la conception des bâtiments. (Green, 2011)

Le but de ces diagrammes est de faire une étude climatique basée sur les données climatiques mensuelles telles que les variations de la température moyenne maximale et minimale, de l'humidité relative moyenne maximale et minimale, des précipitations moyennes et de la direction des vents dominants de la station la plus proche avec ses coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude).

Grâce à cette approche bioclimatique, on peut déterminer le niveau de confort optimal pour chaque mois de l'année. Une zone de confort est définie avec des limites pour la température, l'humidité de l'air, etc., dans lesquelles le climat est considéré comme confortable. (El Harrouni et al., 2020).

- Parmi les diagrammes bioclimatiques, on peut citer les exemples suivants :
- Le Diagramme bioclimatique de d'Olgay.
- Le diagramme bioclimatique de Givoni
- Le diagramme bioclimatique de Szokolay.



**Figure 1.16 :** Diagramme bioclimatique du bâtiment : Limites de la zone du confort thermique (rose), de la zone d'influence de la ventilation à 0,5m/s (VV' orangé) et de l'inertie thermique (MM' vert), de la zone d'influence du refroidissement évaporatif (EC et EC' gris), de la zone de non-chauffage par la conception solaire passive (H et H' jaune).source : (Tibermacine, I 2016 -Izard.J et al, 2008).

### **I.3. Le confort thermique dans un climat chaud et aride**

D'après la classification climatique de Köppen, les régions de type B sont considérées comme arides ou semi-arides. Ces climats occupent environ un quart de la surface terrestre de notre planète, principalement entre les latitudes 50° N et 50° S, mais ils se concentrent principalement dans la bande de latitude allant de 15° à 30° ( Kanishk Bhatt, 2017).

Le confort thermique dépend principalement des paramètres climatiques extérieurs. Dans les zones arides, les besoins de chauffage en hiver sont relativement faibles mais réels,

tandis que les besoins de refroidissement en été sont considérablement plus importants. (Mokhtari et al., 2008). Il est crucial de choisir un modèle de confort thermique adéquat afin de réduire la consommation d'énergie liée au refroidissement et d'évaluer de manière précise le confort thermique des occupants. (Attia et Carlucci, 2015). Le confort thermique dans les bâtiments résidentiels des régions chaudes et sèches est associé à un sommeil précoce et de meilleure qualité pour les occupants. Par conséquent, lorsqu'on vise à réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone des bâtiments résidentiels, il est primordial de ne pas compromettre la satisfaction des résidents. Les initiatives d'efficacité énergétique et de développement durable doivent être soigneusement équilibrées avec le maintien du confort thermique des occupants afin d'assurer leur bien-être et leur contentement (Attia, 2012).

**Tableau 1.10** : Table de recommandations pour un climat chaud et sec (source Liébard et al traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique de 1996-2004)

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<b>Plan masse</b> 1. orientation suivant un axe longitudinal E-O 2. plan compact avec cour intérieure
						<b>Espacements</b> 3. grands espacements entre les bâtiments 4. idem avec protection contre le vent 5. plan compact
						<b>Circulation d'air</b> 6. circulation d'air permanente 7. circulation d'air intermittente 8. circulation d'air inutile
						<b>Ouvertures</b> 9. grandes ouvertures des façades N et S 10. très petites ouvertures (10 à 20 %) 11. ouvertures moyennes (20 à 40 %)
						<b>Murs</b> 12. murs légers 13. murs massifs
						<b>Toitures</b> 14. toitures légères et isolantes 15. toitures lourdes
						<b>Sommeil en plein air</b> 16. sommeil en plein air
						<b>Protection contre la pluie</b> 17. protection contre la pluie

## **Conclusion**

Le climat a un impact significatif sur l'être humain ainsi que sur la façon dont il perçoit l'environnement intérieur et extérieur. Dans ce chapitre, une exploration approfondie des liens étroits entre le climat et le confort thermique, a été effectuée en mettant en lumière les aspects essentiels qui influencent l'expérience du bien-être dans des environnements variés. L'objectif était de mieux comprendre la complexité du confort thermique et de son interaction avec les caractéristiques climatiques.

Ainsi, la notion de climat et de données climatiques a été examinée. Le chapitre a également discuté les classifications du climat et a mis en évidence les propriétés du climat chaud et sec. Ce dernier est principalement caractérisé par un ciel ensoleillé et clair toute l'année, des températures élevées en raison du rayonnement solaire intense, ce qui entraîne une très faible humidité relative, des précipitations rares et vents sableux. Le climat chaud et sec en Algérie a été présenté du point de vue de sa localisation et les deux zones climatiques : estivale (E3, E4 et E5) et hivernale (H3a, H3b et H3c) le concernant ont été mis en évidence. La première section du chapitre est finalisée par une énumération des stratégies et principes de conception adaptés au climat chaud et sec qui visent à offrir des conditions confortables en réduisant les températures extrêmes et assurer une protection optimale contre le rayonnement solaire.

La deuxième partie du chapitre a été consacrée au confort thermique. La relation homme-environnement thermique a été abordée, et les différents aspects de confort thermique notamment ses dimensions psychologiques, thermo-physiologiques et physiques ont été mises en évidence. Les approches qui permettent d'évaluer le confort thermique ont été présentées, notamment, l'approche analytique (statistique) et adaptative, ainsi que les normes et standards les plus communs pour définir le confort thermique approprié, telles qu'ISO 7730, CEN 15251 et ASHRAE Standard 55. Les indices de confort thermique tels que PMV et l'indice de PPD ont également été passés en revues. Ces normes et indices spécifient différents types et catégories de critères qui peuvent avoir une influence significative sur la demande d'énergie. Enfin, une exploration des exigences du confort thermique propres à un climat chaud et aride, a été effectuée en mettant en avant les défis particuliers posés par de telles conditions.

## **Chapitre II :**

# Le concept de durabilité et les méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment

*“If every building was to consume its own sewerage that'd be huge. Then if every building made its own power, and heated and cooled itself, and caught its own water rather, then sucking water out of the aquifers – the ramifications of how people live in their own units could affect things in an unbelievable way. Ultimately it would affect the minds and hearts of people.”*

*(Michael Reynolds, JUNE 29, 2019)*



## **Introduction**

L'architecture durable, un concept reconnu sous différentes appellations à travers plusieurs pays, illustre la convergence des valeurs mondiales en faveur de la durabilité environnementale et sociale dans le domaine de la construction. En France, elle est désignée sous le nom de Haute Qualité Environnementale (HQE), tandis qu'aux États-Unis, on la qualifie de construction verte, et dans les pays d'Europe du Nord, elle est identifiée comme bâtiments durables.

Ce chapitre se concentre sur l'identification du concept de durabilité et la présentation d'une perspective concernant la durabilité dans la rénovation des bâtiments. De plus, on cherche à déterminer une approche appropriée pour encourager le développement de la rénovation durable. En outre, le chapitre aborde les outils et méthodes d'évaluation utilisés pour assister le processus de conception du point de vue environnemental et durable.

### **II.1. Le concept de la durabilité**

Les termes « durable » et « durabilité » sont couramment employés dans divers contextes et champs d'activité. L'origine du mot anglais « sustain » découle des termes latins « sus » (sous, depuis le bas) et « tenure » (tenir, maintenir). Par conséquent, soutenir signifie maintenir, préserver et prévenir l'effondrement ou la détérioration. Lorsque l'on évoque la durabilité de l'environnement naturel, on considère notre rôle consistant à « maintenir » la Terre en préservant ses ressources afin d'éviter leur épuisement. (Bainbridge, D., & Haggard, K. 2011)

Au cours des vingt dernières années, la durabilité s'est affirmée comme l'une des tendances majeures et novatrices dans le domaine de l'architecture (Genkov et al., 2015). En l'an 1972, le concept de développement durable a été initialement présenté dans le rapport intitulé "Les Limites de la Croissance" (Hama Radha, 2018). Mateus et Bragança ont caractérisé le développement durable comme l'équilibre optimal entre les trois aspects fondamentaux que sont l'environnement, le social et l'économique, avec pour objectif une harmonisation accrue. (Mateus, R., & Bragança, L. 2011).

Le développement durable est conceptualisé comme un type de développement caractérisé par un impact environnemental limité et des bénéfices économiques et sociaux substantiels. Pour réaliser les objectifs de durabilité, il est impératif de mettre en œuvre une approche pluridisciplinaire englobant divers aspects tels que la préservation de l'énergie,

l'amélioration de la réutilisation et du recyclage des matériaux, ainsi que la gestion des émissions. (Ramesh, T, et al., 2010).

Selon Costanza et Patten, la discussion concernant la croissance durable est souvent associée à l'adoption de stratégies conçues pour différentes périodes et échelles géographiques, reposant sur les pratiques actuelles et les prévisions en cours. (Costanza, R., & Patten, B. C. 1995). En raison des interactions complexes entre l'environnement, la société et l'économie, élaborer une description exhaustive des états durables demeure ardu. Toutefois, on identifie un vaste ensemble de traits inhérents à chaque domaine, largement reconnus comme des éléments majeurs favorisant la durabilité. (Gibberd, J. (2005) Ces caractéristiques sont succinctement détaillées par la suite :

**II.1.1. État de durabilité environnementale** : Systèmes biophysiques solides, dynamiques, productifs et variés, aptes à assurer de manière régulière et stable les ressources et les conditions indispensables aux populations actuelles et à venir.

**II.1.2. État de durabilité économique** : Systèmes structuraux, organisationnels et technologiques adaptatifs, capables de gérer les fluctuations et d'assurer une utilisation et une préservation optimales des ressources limitées, afin de répondre aux besoins des populations présentes et futures, tout en préservant l'intégrité de l'environnement biophysique.

**II.1.3. État de durabilité sociale** : Sociétés sécurisées, épanouies, en bonne santé, solidaires et éduquées, bénéficiant de structures organisationnelles et d'une capacité d'innovation qui favorisent une répartition équitable des ressources limitées, garantissant ainsi la satisfaction des besoins des populations présentes et futures.



**Figure II.1** : Les trois piliers de la durabilité. (Source: Hama, C 2018-Adam M., 2013)

## II.2. Méthode d'évaluation et approches de la durabilité

Selon Tebbouche H et al, Contrairement à l'architecture bioclimatique qui se focalise exclusivement sur l'aspect énergétique des bâtiments pour minimiser la consommation de combustibles fossiles classiques et favoriser l'usage d'énergies renouvelables, l'architecture durable adopte une approche visant à contrôler les multiples relations dynamiques entre l'espace construit et son environnement externe. Cette approche vise également à synchroniser l'aménagement intérieur avec les paramètres sociaux, naturels et architecturaux environnants. (Tebbouche et al., 2017).

Depuis leur apparition dans les années 1990, les outils d'évaluation de la durabilité des bâtiments ont évolué pour devenir un domaine de recherche actif et en constante évolution. (Bragança et al., 2010). Les outils les plus largement adoptés ont été examinés en prenant en considération leur accessibilité à l'information et leur renommée internationale. Parmi ces outils, on peut citer BREEAM, LEED et CASBEE. Notamment, BREEAM a été le pionnier en tant que premier outil d'évaluation déployé pour les nouveaux immeubles de bureaux en 1990. (Park et al., 2017).

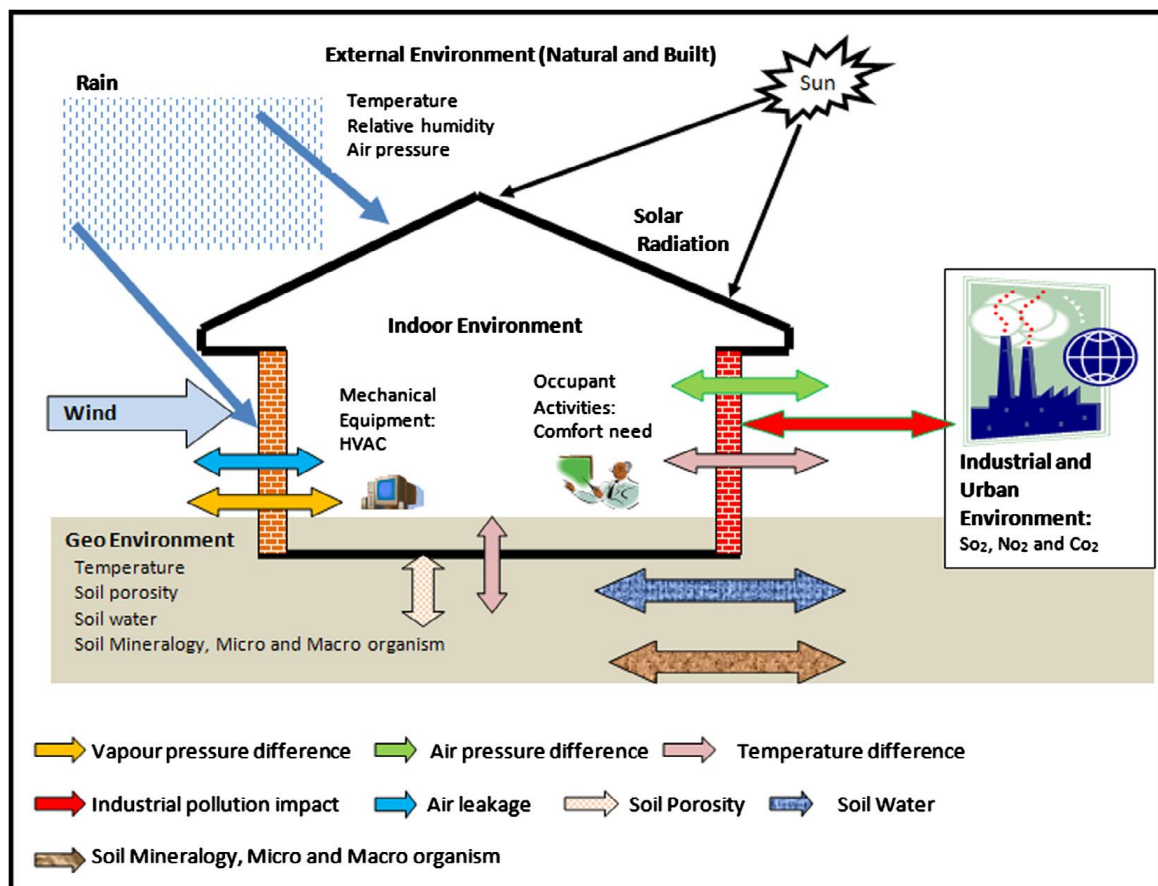


**Figure II.2** : Les approches environnementale au monde (source : ICBE 20 mars)

Ces outils exercent une influence capitale en stimulant l'adoption de normes environnementales volontairement plus élevées que celles que le marché pourrait naturellement

assumer. De surcroît, ils encouragent activement l'intégration d'innovations dans la conception, les produits, les processus, la technologie et les systèmes en vue de favoriser la construction de bâtiments plus durables (Nidumolu et al., 2009). Selon Gluszak, il y a environ soixante approches pour la construction durable qui sont à présent en vigueur à travers le monde (Gluszak, 2015).

Toutes ces approches actuellement mises en œuvre offrent une certification environnementale pour des bâtiments durables, qu'ils soient déjà existants ou en cours de conception. Parmi celles-ci, on retrouve le BREEAM au Royaume-Uni, le LEED aux États-Unis, le CASBEE au Japon, le DGNB en Allemagne, le MINERGIE en Suisse, Green Star en Australie et en Afrique du Sud, ainsi que le HQE en France, l'Estidama pour les Émirats arabes unis, l'EDAMA pour la Jordanie et le Liban, et enfin l'approche ARZ Building Rating System. (Tebbouche et al., 2017)



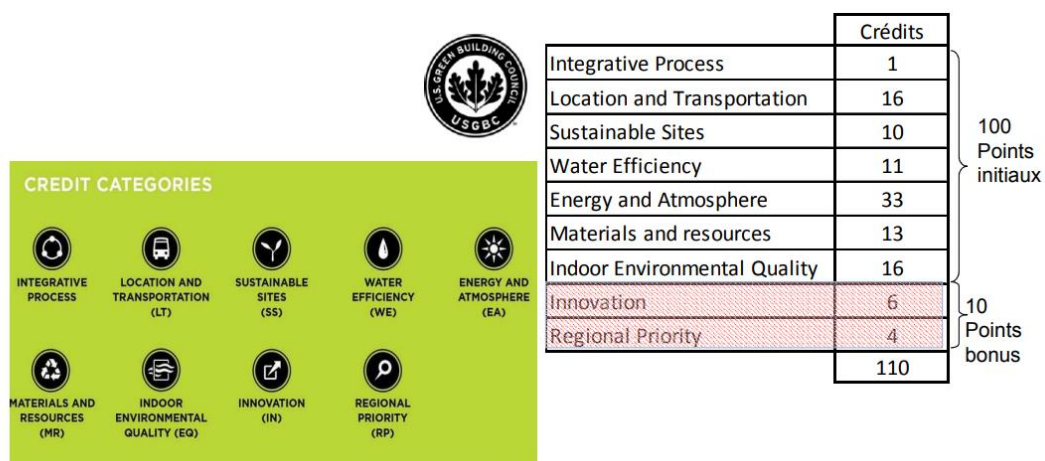
**Figure II.3** : Charges environnementales sur l'enveloppe du bâtiment. (Source : Iwano, J., & Mwashu, A. 2013)

### II.3. Les systèmes de certification internationaux

Face aux défis environnementaux majeurs tels que l'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, l'épuisement des ressources et la perte de biodiversité, la certification environnementale des bâtiments (ou des aménagements) demeure une initiative volontaire qui cherche à obtenir la reconnaissance, par un organisme externe, d'un niveau de qualité environnementale défini. Cette approche, établie dans un cadre reconnu et partagé par les parties prenantes, vise à répondre à ces enjeux en promouvant des pratiques durables et responsables.

#### II.3.1. LEED

Le mot LEED «Leadership in Energy and Environmental Design » a l'origine conçu comme un système de notation pour les nouvelles constructions de bâtiments commerciaux, LEED 2.0, dévoilé en mars 2000 après cinq années de développement et un programme pilote approfondi, a été élaboré dans le but d'évaluer des bâtiments commerciaux, institutionnels et résidentiels à plusieurs étages.( Von Paumgarten, P. (2003).



**Figure II.4** : Les catégories de l'approche LEED (source : ICBE 20 mars)

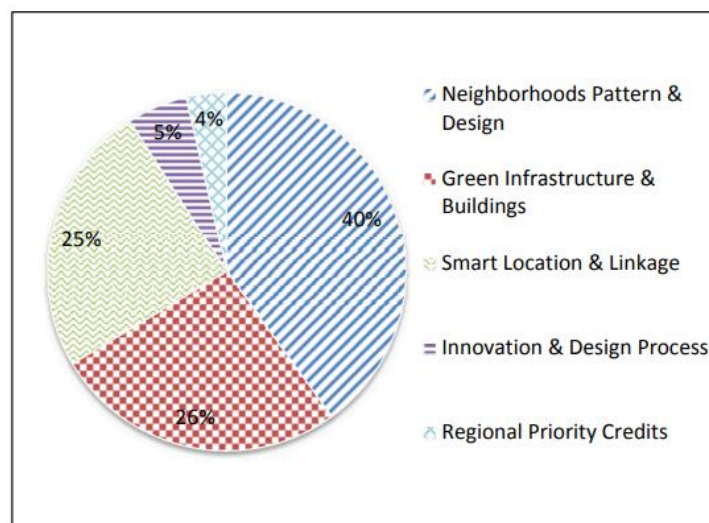
Fondée sur une approche axée sur la performance dans sept (7) secteurs liés à la santé humaine et à l'environnement, ainsi qu'un (1) domaine dédié à l'innovation, cette méthode intègre également quatre points (4) supplémentaires attribués à des crédits identifiés comme des "priorités régionales". (Parant, C 2017). LEED repose sur des crédits et des points.

**Tableau II.1** : Liste des critères liés aux matériaux dans LEED. (Source : Jiyoun P et al.,2017).

Category	I	C	Related to Material			Envir.	Econo.	Soci.
			I	C	Minor Items			
-	1	1	1	1	Integrative Process	●	●	●
Location and Transportation	8	16	0	0	-	-	-	-
Sustainable Sites	7	10	3	3	1 Site Assessment	●	●	
					3 Rainwater Management	●		
					2 Heat Island Reduction	●		
Water Efficiency	7	11	0	0	-	-	-	
Energy and Atmosphere	11	33	3	R	Minimum Energy Performance	●	●	
				18	Optimize Energy Performance	●	●	
				3	Renewable Energy Production	●	●	
Materials and Resources	7	13	6	R	Construction and Demolition Waste Management Planning	●	●	
				5	Building Life-Cycle Impact Reduction	●		
				2	Building Product Disclosure and Optimization	●	●	●
				2	Environmental Product Declarations	●	●	●
				2	Sourcing of Raw Materials	●	●	●
				2	Material Ingredient	●	●	●
Indoor Environmental Quality	11	16	5	2	Enhanced Indoor Air Quality Strategies		●	●
				3	Low-Emitting Materials		●	●
				1	Thermal Comfort		●	●
				2	Interior Lighting		●	●
				1	Acoustic Performance		●	●
Total	52	100	17	29	-			
(+Innovation)	2	6	(1)	(5)	(Innovation)	-	-	-
(+Regional Priority)	4	4	(1)	(4)	(Regional Priority: Specific Credit)	-	-	-

C: Credit; I: No. of Items; P: Prerequisite; R: Required; +: additional; ( ): can be related or not; ●: Matching.

Le but du système de classification des bâtiments écologiques LEED est de mettre à la disposition des développeurs, propriétaires et gestionnaires des informations qui les guident dans l'application de diverses solutions et technologies lors de la construction, en vue de favoriser un design, une construction et un entretien respectueux de l'environnement, tout en permettant d'identifier les mesures de durabilité propres à leur bâtiment. ( Rezaallah, A et al 2012).



**Figure II.5** : Principales catégories de critères LEED (source : Hamedani, A. et al



### II.3.2. BREEAM

« The Building Research Establishment Environmental Assessment Method » BREEAM a été Développé au Royaume-Uni. Il est constitué de neuf catégories principales, incluant la catégorie des matériaux (19/52 éléments, 6/9 catégories), et repose sur un système de pondération explicite. Ce système présente des différentes combinaisons en fonction des types de projets. Par conséquent, les valeurs attribuées sont relatives, ce qui rend difficile le calcul précis de la valeur de chaque aspect. (Park, J., 2017). Il s'agit de la certification la plus ancienne (1990) et l'une des plus largement utilisées. (Hamedani, A et al 2012). Chaque élément reçoit une quantité spécifique de crédits.

Dans une perspective globale, BREEAM accorde une préférence aux aspects environnementaux de la construction durable au détriment des aspects sociaux. En ce qui concerne les poids attribués, les crédits liés à l'« Énergie » sont les plus importants (19 %), suivis du « Santé et Bien-être » (15 %), des « Matériaux » (12,5 %) et de la « Gestion » (12 %). (Schweber, L. 2013).

SECTIONS	PONDERATION*
Management (Man)	• 11,5 %
Santé & bien-être (Hea)	• 13,5 %
Risques (Hea 07)	• 1,0 %
Energie (Ene)	• 18,5 %
Transport (Tra)	• 8,0 %
Eau (Wat)	• 8,5 %
Matériaux (Mat)	• 12,0 %
Déchets (Wst)	• 7,5 %
Occupation du sol et écologie (LE)	• 10,0 %
Pollution (Pol)	• 6,0 %
Ruissellement de surface (Pol 03)	• 3,5 %
Innovation (Inn)	• 10,0 %

**BREEAM®**

Les points de chaque catégorie n'ont pas le même poids final.  
Exemple :  
Si 17 points sont applicables en Man et 4 en Le, chaque point Man vaudra au final  $11,5/17 = 0,68\%$ , contre  $10/4 = 2,5\%$  pour les points LE.

10 points bonus

**Figure II.6** : Les sujets traités par le BREEAM (source : ICBE 20 mars 2023).

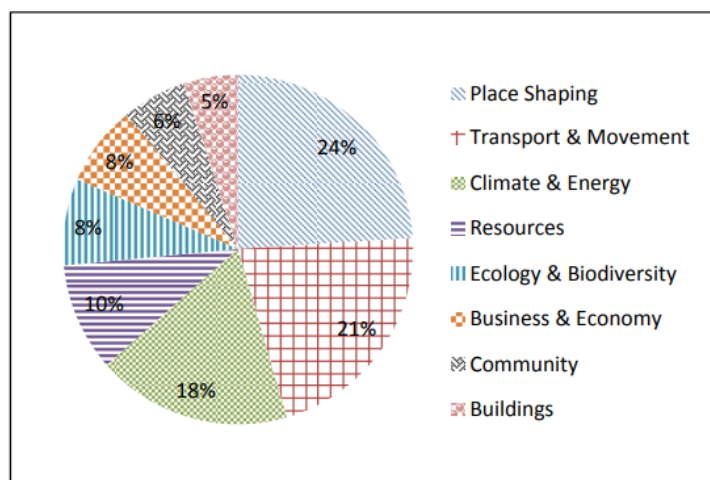
Le but de BREEAM est de promouvoir et de valoriser les emplacements de construction qui facilitent un accès aisé aux services locaux, contribuant ainsi à atténuer les conséquences environnementales, sociales et économiques des déplacements fréquents ou prolongés des occupants du bâtiment. Cela inclut la réduction des émissions liées aux transports et des problèmes de congestion routière. (Suzer, O. 2019).

**Tableau II.2** : Liste des critères liés aux matériaux dans BREEAM. (Source : Jiyoung et al., 2017).

Category	I	C	W (%)	Related to Material			Envir.	Econo.	Soci.
				I	C	Minor Items			
Management	5	21	12	3	4	Project Brief and Design	●	●	●
					4	Life-cycle Costing and Service Life Planning		●	
					6	Responsible Construction Practices	●		●
Health and Wellbeing	9	25	14	4	6	Visual Comfort		●	●
					5	Indoor Air Quality		●	●
					3	Thermal Comfort		●	●
					4	Acoustic Performance		●	●
Energy	9	21	19	2	15	Reduction of Energy Use and Carbon Emissions	●	●	
					3	Low Carbon Design	●	●	
Transportation	6	8	8	0	0	-	-	-	
Water	4	10	6	0	0	-	-	-	
Material	4	12	12.5	4	6	Life-cycle Impacts	●		
					4	Responsible Sourcing of Construction Products	●		●
					1	Designing for Durability and Resilience	●	●	
					1	Material Efficiency	●	●	
Waste	6	9	7.5	5	4	Construction Waste Management	●	●	
					1	Recycled Aggregates	●	●	
					1	Speculative Finishes	●	●	
					1	Adaptation to Climate Change	●	●	
					1	Functional Adaptability	●	●	
Land Use and Ecology	4	10	10	0	0	-	-	-	
Pollution	5	11	6.5	1	5	Surface Water Run-off	●		
Total	52	-	100	19	-	-			
(+Innovation)	1	10	(+10)	(1)	(10)	(Innovation)	-	-	-

C: Credit; I: No. of Items; W: Weight (%); +: additional; ( ): can be related or not; ●: Matching.

L'adoption de BREEAM en tant que cadre client présente une dualité. D'un côté, BREEAM offrait aux clients une méthode pour assurer le respect de leurs engagements en matière de valeurs et la reconnaissance de la valeur de réputation recherchée. D'un autre côté, cela les déchargeait de l'obligation de remettre en question et de spécifier de manière critique leurs propres connaissances, hypothèses et engagements en matière de valeurs (Schweber, L. 2013).



**Figure II.7** : Catégories principales de critères BREAM (source : Hamedani et al., 2012).



### II.3 3. DGNB

DGNB « German Sustainable Building Council » développée en 2009 est un système d'évaluation de la construction durable basé sur une liste pondérée d'indicateurs. Ces indicateurs, lorsqu'ils sont pris en compte lors du processus de conception du bâtiment, entraînent l'attribution de points dans différentes catégories. Si ces points sont correctement documentés et validés par une entité tierce indépendante, ils contribuent à l'obtention de la certification DGNB pour le bâtiment. (Brebbia, C. et al., 2017). Il s'agit d'une des certifications les plus récentes et elle est la première en provenance d'Allemagne (qui est le pays le plus industrialisé en Europe et est particulièrement actif dans la construction et le développement de villes durables). (Hamedani, A. et al 2012)

Toutefois, au Danemark, DGNB accorde une attention quasi équitable aux trois aspects de la durabilité. Le poids moyen de l'aspect économique dans les systèmes de certification s'élève à 5,6 %, principalement en raison des perspectives d'évaluation du cycle de vie et de la stabilité de la valeur. Dans des certifications telles que l'Écolabel nordique, le poids de l'aspect économique provient du choix de la méthode, où les catégories relatives à la documentation ou au processus sont réparties dans toutes les sous-catégories de durabilité. Dans ce cas, la méthode altère l'image de l'Écolabel nordique en un aspect qui n'est pas autrement représenté dans la certification (Zimmermann et al., 2019). En outre, il y a 10 ISS (indicateurs de sous-système) et 38 CRS (critères de sous-système) accompagnés de leurs IDS correspondants. Les IDS agissent comme des Unités d'Œuvre Intégrées dans le contexte de la DGNB. (Sánchez C, A et al., 2019).



**Figure II.8** : Facteurs de pondération des catégories de la DGNB issus de la version internationale de la DGNB 2020. (Source : Cordero A et al., 2019).

L'objectif du système DGNB est de colmater le vide laissé par des méthodes largement reconnues telles que la méthode d'évaluation environnementale du Building Research Establishment (BREEAM) ou le Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) : en évaluant le cycle de vie complet d'un bâtiment. (Eberl, S. 2010).

### II.3.4. HQE

La norme Haute Qualité Environnementale, connue sous son abréviation HQE, a été développée en 1994 en France par l'association HQE. L'association offre son soutien aux parties prenantes, concepteurs, partenaires, promoteurs et utilisateurs tout au long des différentes phases d'un projet, dans le but d'assurer une qualité environnementale élevée des bâtiments. L'Association HQE™ a élaboré plusieurs schémas applicables tant en France qu'à l'étranger. (Bernardi, E et al 2017).

Selon le site officiel de la certification HQE, Les certifications s'appliquent de la manière suivante (hqeabc.org 2023) :

- **Aux bâtiments**, qu'il s'agisse de logements collectifs, de logements individuels ou de bâtiments tertiaires, couvrant les phases de construction et d'exploitation. Cela concerne à la fois les projets neufs et les projets de rénovation.
- **Aux aménagements**, la certification HQE étant destinée aux maîtres d'ouvrage, qu'ils soient des collectivités, des aménageurs publics ou privés, engagés dans des opérations d'aménagement.
- **Aux infrastructures**. Ces certifications sont délivrées en France et à l'international par deux organismes (**Fig.8**) certificateurs indépendants et impartiaux :



**Figure II.9** : Deux certificateurs indépendants en France. (Source : hqeabc 2023).

## **Chapitre II** : Le concept de durabilité et les méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment.

Le système de notation HQE est basé sur quatre thèmes, 14 critères d'actions spécifiques (CAS), 37 indicateurs de sous-systèmes (ISS) et plus de 53 indicateurs de critères de référence (CRS) et de démonstration spécifiques (IDS). Chaque indicateur agit comme un indicateur de performance et toutes les catégories ont la même importance, éliminant les coefficients de pondération. Les objectifs attribuent des points à chaque catégorie avec trois niveaux de performance possibles : prérequis, performance et performance élevée. (Andújar, J. M., & Melgar, S. G. 2020). Pour obtenir la certification, un bâtiment doit atteindre le niveau de performance élevée dans au moins trois catégories et le niveau de base dans un maximum de sept catégories. Les CAS couvrent des aspects tels le site, les composants, le chantier, l'énergie, l'eau, les déchets, l'entretien, le confort thermique et hygrométrique, le confort acoustique, le confort visuel, la qualité des espaces, la qualité de l'air et la qualité de l'eau.

**Tableau II.3** : Répartition des objectifs pour les bâtiments résidentiels. (Source : Bernardi, E et al., 2017)

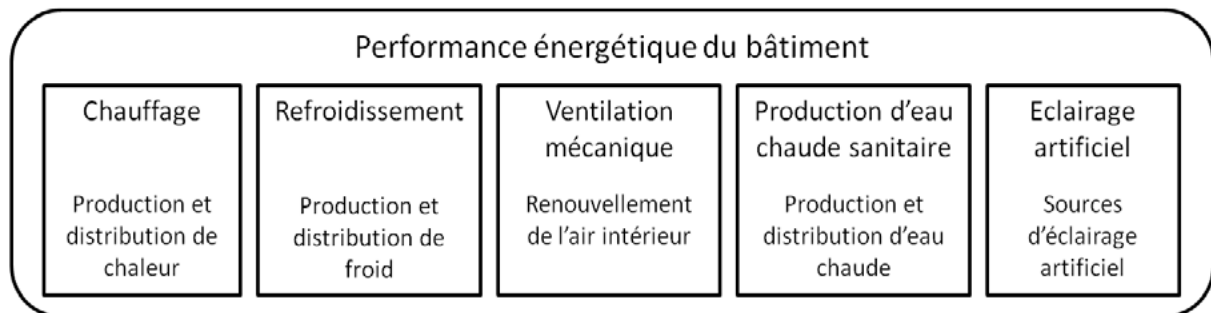
Environment	Energy and Savings	Comfort	Health and Safety
Target 1: Building's relationship with its immediate environment	Target 4: Energy management	Target 8: Hygrothermal comfort	Target 12: Quality of spaces
Target 2: Quality of components	Target 5: Water management	Target 9: Acoustic comfort	Target 13: Air quality and health
Target 3: Sustainable worksite	Target 7: Maintenance management	Target 10: Visual comfort	Target 14: Water quality and health
Target 6: Waste management		Target 11: Olfactory comfort	

### **II.5. Certificat de Performance Énergétique du Bâtiment (CPEB)**

Au début des années 1990, les systèmes de certification énergétique des bâtiments ont fait leur apparition en tant qu'approche essentielle visant à renforcer l'efficacité énergétique, à minimiser la consommation d'énergie et à favoriser une transparence accrue en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie dans les constructions. (Pérez-Lombard, L et al., 2009)

La disparité de rendement énergétique des bâtiments peut être représentée comme la distinction entre la consommation d'énergie théorique (définie méthodologiquement) et la consommation d'énergie réelle. Cette donnée marque le premier pas vers l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment. (Anđelković, A. et al., 2021). Selon Li, Y et al, L'établissement de programmes de Certificat de Performance Énergétique (CPE) au sein de l'Union européenne constitue une ressource d'information exhaustive et efficace permettant d'estimer de manière quantitative la demande énergétique annuelle du stock de bâtiments,

favorisant ainsi l'émergence d'un marché orienté par la demande en faveur de bâtiments à haute efficacité énergétique. (Li, Y et al., 2019).



**Figure II.10** : Sources de consommation énergétique à considérer dans le calcul de la performance énergétique d'un bâtiment selon la directive européenne 2010/31/UE. (Source : Romo E. E., 2015)

Selon Romo, la performance énergétique d'un bâtiment en termes de quantité d'énergie requise pour satisfaire les besoins énergétiques associés à une utilisation standard du bâtiment, ce qui englobe l'énergie utilisée par ses systèmes techniques. (Romo E. E., 2015)

## II.6. L'architecture durable

Selon Hariwan et Rojhat, L'architecture durable consiste à étendre la durée de vie de l'architecture existante en minimisant son processus de vieillissement. (Zebari, H. N., & Ibrahim, R. K. 2016). L'idée de l'architecture durable est unique et novatrice, exigeant une remise en question de notre approche de l'environnement. Elle met l'accent sur le fait que les individus devraient reconnaître la nature limitée des ressources et l'impératif de les préserver pour répondre aux besoins des générations futures. (Leyzerova, A. et al 2016)

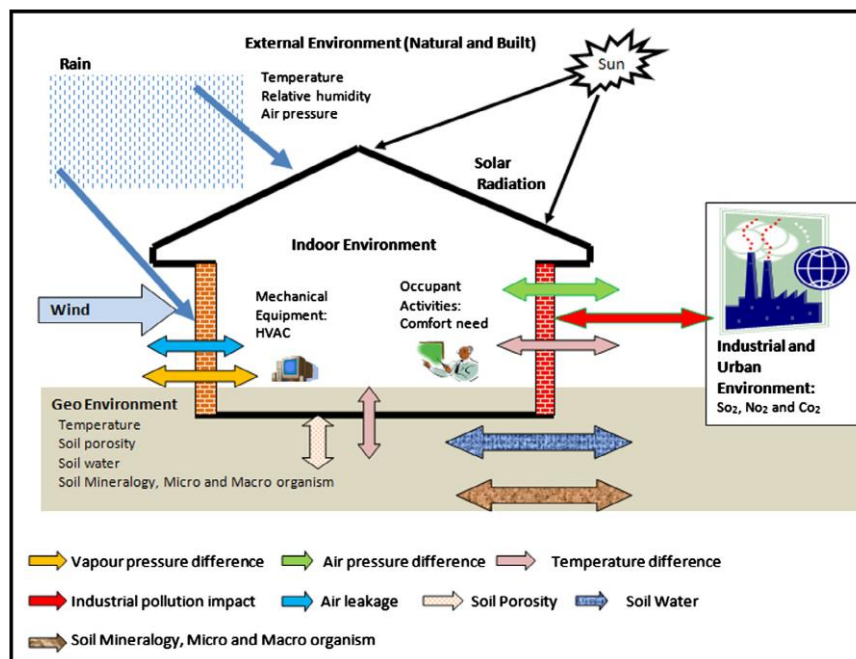


de ces impératifs est évaluée selon les critères des systèmes de notation visant à évaluer la durabilité de l'habitat.

## II.6. Les stratégies de l'architecture durable

Les bâtiments, depuis leur construction jusqu'à leur utilisation et leur élimination, ont un impact considérable sur l'environnement naturel et le tissu social de notre société. L'architecture durable peut jouer un rôle crucial dans la mise en pratique voire la promotion d'un mode de vie durable. Cependant, la question se pose : comment concevoir et édifier des bâtiments de manière à contribuer de manière positive à l'agenda de la durabilité (Sassi, P 2006)

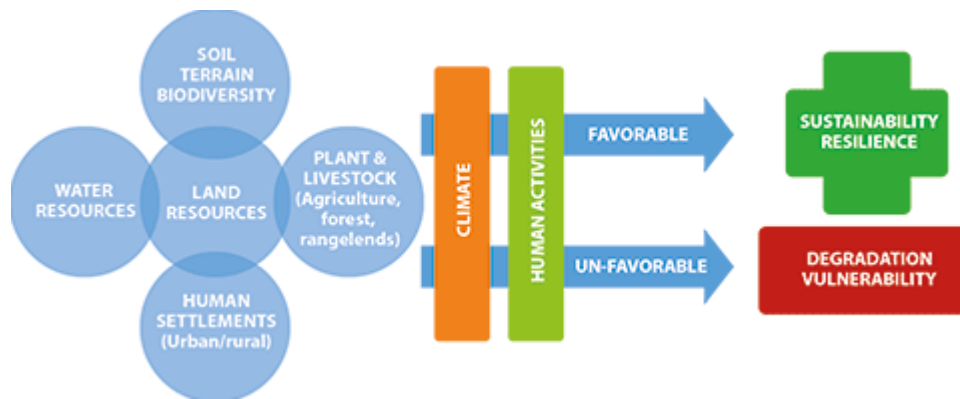
Afin d'atteindre un avenir durable dans le secteur de la construction, Asif et al recommandent l'adoption d'une approche pluridisciplinaire couvrant divers aspects tels que : la réduction de la consommation énergétique, l'amélioration de l'utilisation des matériaux, la minimisation des déchets de matériaux, la maîtrise de la pollution et des émissions, etc. (Asif et al., 2007)



**Figure II.12** : Charges environnementales sur l'enveloppe du bâtiment. (Source : Iwano, J., & Mwashia, A. (2013)

Se focalise sur les répercussions locales de la gestion des sites de développement tout en prenant en considération les répercussions mondiales qui y sont liées. Elle démontre des approches pour une utilisation efficiente du terrain, pour réduire au minimum l'impact sur les écosystèmes naturels et pour développer de nouveaux écosystèmes ou améliorer ceux déjà existants. (Paola, S 2006).

De la même manière que d'autres ressources, le terrain est recyclable et devrait être restauré en vue d'une utilisation productive chaque fois que cela est réalisable. Le réaménagement de terrains perturbés, tels que d'anciennes zones industrielles (terrains pollués) et des secteurs urbains dégradés (terrains en déclin), en les réintégrant dans une utilisation productive, favorise la préservation foncière et stimule la revitalisation économique et sociale dans les zones en détresse. (Kibert, C. J. (2016).



**Figure II.13** : La gestion durable des sols et des terres en lien avec le climat. (Source : Ao, Climate-Smart Agriculture Sourcebook)

### II.6.1. Énergie et optimisation

Conception visant à minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> et la pollution. L'objectif de l'architecture durable en matière d'énergie vise à permettre aux occupants d'un bâtiment de maintenir voire d'améliorer leur qualité de vie, tout en réduisant au maximum les émissions de CO<sub>2</sub> et optimiser le confort thermique. Une solution directe consisterait à passer des systèmes alimentés par des combustibles fossiles à des sources renouvelables à faibles émissions de CO<sub>2</sub>. (Sassi, P 2006)

Selon Palich, N et al, l'efficacité énergétique peut être illustrée à travers les exemples de décisions de conception suivants (Palich N et al., 2017) :

- Ombrage efficace.

- Amélioration du matériau de construction au-delà des exigences minimales du Code du bâtiment de l'Australie (BCA).
- Services de chauffage et de refroidissement efficaces.
- Production d'énergie sur place.

Par ailleurs, les limitations diverses pourraient restreindre la contribution des ressources renouvelables dans les bâtiments. Dans de telles circonstances, une gestion efficace de l'énergie des bâtiments joue un rôle crucial pour parvenir à une économie à faible émission de carbone et à une durabilité, potentiellement à un rythme accéléré. Les bâtiments à haute efficacité énergétique, favorisant un contrôle intelligent du bâtiment, deviennent une tendance pour la prochaine génération de constructions. (Shaikh, P et al., 2014)



**Figure II.14** : Les principales catégories liées à l'énergie durable dans le contexte des villes intelligentes. (Source : Cortese, T. et al., 2022)

### **II.6.2. Eau : Conception pour une réduction de la consommation d'eau et des déchets**

L'eau est l'élément vital de la planète. Des ressources en eau sûres et en quantité suffisante sont cruciales pour les trois dimensions de la durabilité : sociale, économique et environnementale. (Wang,Z et al., 2015).la stratégie de préservation de l'eau est basé sur la réutilisation des eaux usées et d'autres déchets tels que les débris de construction, le verre, les matériaux dragués, les tapis recyclés, les pneus, etc.( Wang, N., & Adeli, H. 2014).



Selon Akadiri, P et al, la conservation de l'eau est fondée sur :

- Utilisation d'équipements de plomberie à faible consommation d'eau.
- Conception d'une plomberie double.
- Collecte des eaux pluviales.
- Utilisation de systèmes de recyclage.
- Conception d'aménagements paysagers à faible demande en eau.
- Réduction de la pression. (Akadiri, P et al., 2012)



**Figure II.15** : Recyclage de l'eau dans les habitations. (Source : (Palich N et al., 2017)

### II.6.3. Qualité de l'air intérieur

Ces dernières décennies, l'importance de la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) a gagné en visibilité au sein de la communauté scientifique internationale, des institutions politiques et des instances environnementales. Cela vise à améliorer le confort, la santé et le bien-être des

personnes qui occupent les bâtiments. (Cincinelli, A., & Martellini, T. 2017). Dans le but de garantir le bien-être des occupants du bâtiment, la stratégie cherche à créer un environnement intérieur sain et de haute qualité.

Une gestion appropriée de la qualité de l'air intérieur (QAI) au sein des unités de soins de santé a des conséquences significatives sur les résultats en termes de durabilité, du fait de son impact sur la sécurité des patients, la santé et la sécurité au travail, ainsi que la consommation d'énergie.( Fonseca, A et al 2018). Selon Persily et Emmirech, la stratégie d'efficacité énergétique la plus apparente susceptible de compromettre la qualité de l'air intérieur (QAI) est la réduction des débits de ventilation d'air extérieur. Bien que la relation entre les débits de ventilation et les niveaux de contaminants intérieurs puissent être complexes en raison des effets transitoires, des emplacements et des caractéristiques de sources spécifiques, ainsi que d'autres facteurs, une réduction des débits de ventilation dans les bâtiments entraînera des niveaux de contaminants intérieurs plus élevés lorsque la source est présente à l'intérieur du bâtiment.( Persily, A. K., & Emmerich, S. J.2012)

**Tableau II.4** : Stratégies pouvant favoriser à la fois l'efficacité énergétique et la qualité de l'air intérieur (QAI). (Source Persily, A. K., & Emmerich, S. J.2012)

Stratégie de qualité de l'air intérieur (QAI)	Commentaire
Une meilleure gestion de l'humidité grâce à la conception et à la construction de l'enveloppe pour réduire le potentiel de croissance des bio aérosols.	Si l'humidification de l'isolant thermique est réduite dans le processus, cela améliorera les performances thermiques.
Contaminant source control	En supposant qu'il n'y ait pas de réduction concurrente des taux de ventilation.
Pratiques améliorées de nettoyage et d'entretien	Réduit l'exposition à la poussière et aux produits chimiques associés aux produits de nettoyage.
Gestion intégrée des nuisibles	Réduit l'exposition aux allergènes et aux irritants associés aux nuisibles ainsi qu'aux pesticides.
Ventilation avec récupération de chaleur	Maintient les taux de ventilation de l'air extérieur Obligatoire dans certaines normes d'efficacité énergétique

Fonctionnement de l'économiseur	
Ventilation à la demande	<p>Permet une ventilation réduite en cas de faible occupation</p> <p>Obligatoire selon les normes 90.1 et 189.1</p> <p>Autorisé par la norme 62.1</p> <p>Doit maintenir la ventilation de base pour les sources non occupantes</p> <p>La performance des capteurs peut poser problème</p>
Systèmes d'air extérieur dédiés	<p>Potentiel de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer la qualité de l'air intérieur (QAI)</p> <p>Potentiel de simplifier les contrôles</p> <p>Plus facile à nettoyer, à conditionner et à contrôler l'air extérieur</p> <p>Plus de flexibilité dans les stratégies de chauffage et de refroidissement</p>
Ventilation par déplacement	<p>Moins d'air extérieur avec la même qualité d'air intérieur (QAI) ou meilleure dans la zone de respiration</p> <p>Non applicable dans tous les espaces</p>
Ventilation par tâche/contrôle par l'occupant	<p>Moins d'air extérieur avec la même qualité d'air intérieur (QAI) ou meilleure dans la zone de respiration</p> <p>Les occupants préfèrent le contrôle individuel</p>
Ventilation naturelle/hybride	<p>Moins de refroidissement mécanique, plus d'air extérieur</p> <p>La pollution de l'air extérieur et l'humidité peuvent entraîner des complications</p> <p>Outils de conception limités et méthodes de mesure de performance</p>
Étanchéité de l'enveloppe	<p>L'infiltration est néfaste pour l'énergie et la qualité de l'air intérieur (QAI)</p> <p>Il faut tenir compte de la dynamique de l'humidité au sein de l'enveloppe du bâtiment</p>
Étanchéité du système de distribution d'air	<p>Contribue à la fois à l'efficacité énergétique et à une bonne qualité de l'air intérieur (QAI)</p> <p>Plus significatif dans les bâtiments résidentiels et les petits bâtiments commerciaux</p> <p>surtout lorsque les conduits d'air se trouvent dans des espaces non conditionnés</p>

Filtration des particules plus efficace	Amélioration de l'efficacité de l'équipement, air de soufflage plus propre L'installation et l'entretien des filtres sont essentiels
Purification de l'air gazeux ; taux de ventilation réduits	Moins d'air extérieur avec la même qualité d'air intérieur (QAI) ou meilleure Aucune méthode de test ni norme de cotation pour la purification de l'air gazeux La procédure de taux de ventilation de la norme 62.1 ne permet pas de réduire la ventilation
Contrôle des sources et réduction de la ventilation	Moins d'air extérieur avec la même qualité d'air intérieur (QAI) ou meilleure Les méthodes de caractérisation des sources ne sont pas encore matures Les informations sont insuffisantes sur les contaminants clés et les valeurs de conception La procédure de taux de ventilation de la norme 62.1 ne permet pas de réduire la ventilation
Exploitation et maintenance / remise en service	Contribue à la fois à l'efficacité énergétique et à une bonne qualité de l'air intérieur (QAI) L'accès au système est essentiel

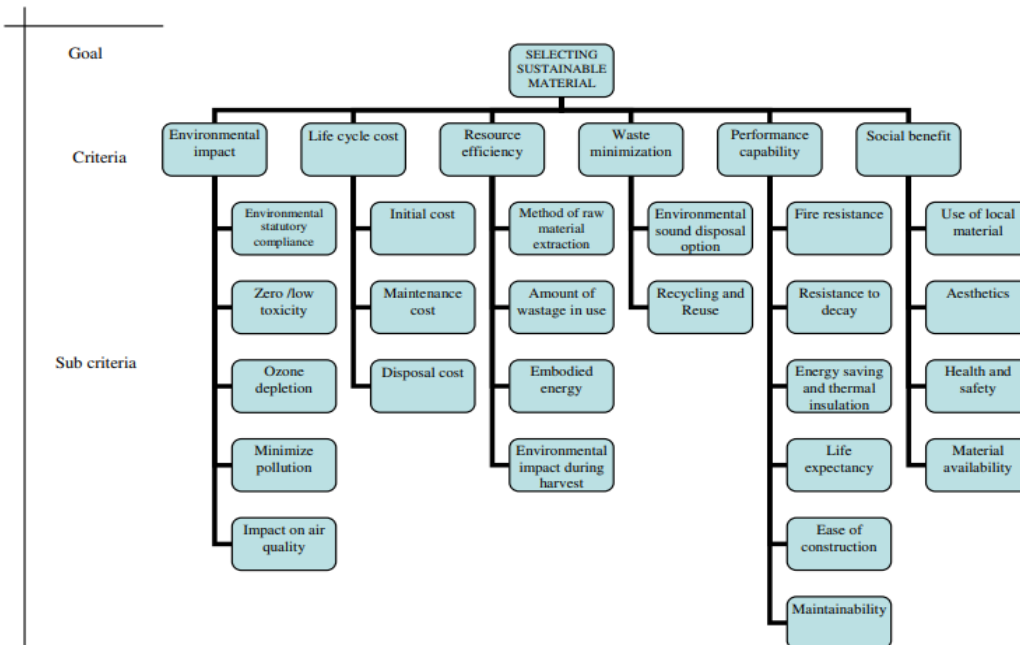
#### II.6.4. Matériaux de construction

Choisir des matériaux de construction durables est une stratégie cruciale lors de la conception et de la construction d'un bâtiment. Cependant, un défi majeur réside dans la création de critères d'évaluation en accord avec les concepts et principes de durabilité. (Akadiri, P. O., & Olomolaiye, P. O. 2012). En raison des préoccupations environnementales croissantes, il est primordial de développer de nouveaux matériaux et méthodes de construction respectueux de l'environnement. (Joseph, P., & Tretsiakova-McNally, S. 2010).

Selon Chen, Y, et al, un total de six facteurs latents ont été extraits pour présenter la structure sous-jacente des critères utilisés pour la sélection des matériaux pour un projet de construction. Trois facteurs se trouvaient dans la catégorie environnementale, deux facteurs appartenaient à la catégorie socio-économique et un facteur concernait la dimension technique. (Chen, Y., et al 2010) :

- **Premier facteur : Coût du cycle de vie** : Facteur d'évaluation "coût du cycle de vie" comprend des critères tels que le coût initial (coût d'achat), le coût d'entretien et le coût d'élimination.

- **Deuxième facteur : capacité de rendement** : Lié à la résistance au feu, à la résistance à la décomposition, à l'économie d'énergie et à l'isolation thermique, à la durée de vie du matériau (durabilité), à la facilité de construction et à la facilité d'entretien.
- **Troisième facteur : Efficacité des ressources** : La variation des charges sur le troisième facteur latent se centre sur "l'efficacité des ressources", incluant des éléments tels que les méthodes d'extraction des matières premières, l'impact environnemental pendant la récolte, la probable quantité de déchets lors de l'utilisation du matériau et l'énergie intégrée.
- **Quatrième facteur : Impacts environnementaux** : Notamment la conformité légale en matière d'environnement, la toxicité, le potentiel de déplétion de la couche d'ozone, la pollution et la qualité de l'air.
- **Cinquième facteur : minimisation des déchets** : Englobent des éléments tels que la disponibilité d'options d'élimination respectueuses de l'environnement et le potentiel de recyclage et de réutilisation.
- **Sixième facteur : Avantage social** : Englobe des aspects tels que l'esthétique, l'utilisation de matériaux locaux, la disponibilité de la main-d'œuvre et la santé et la sécurité.



**Figure II.16** : Sélection de matériaux durables. (Source : Akadiri & Olomolaiye, 2012)

## **Conclusion**

Ce chapitre, nous a permis d'explorer en profondeur la notion de durabilité relativement au secteur du bâtiment, en mettant l'accent sur divers aspects tels que : la certification environnementale, l'évaluation de la performance énergétique et les systèmes de notation internationaux. La durabilité architecturale englobe des concepts variés, allant de l'efficacité énergétique à la gestion des matériaux et à l'harmonie avec l'environnement. Les certifications, qui varient selon les pays, s'efforcent de promouvoir des pratiques de construction plus durables et de minimiser l'impact environnemental des bâtiments. Les évaluations énergétiques et les certificats de performance énergétique jouent un rôle crucial pour quantifier et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, contribuant ainsi à l'atteinte des objectifs environnementaux mondiaux.

En résumé, notre exploration a mis en lumière l'importance croissante de la durabilité dans le secteur de la construction et du bâtiment, avec des initiatives et des certifications visant à guider les acteurs du secteur vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement. À mesure que les enjeux environnementaux continuent de prendre de l'ampleur, il est essentiel de poursuivre ces efforts pour façonner un avenir où les bâtiments jouent un rôle actif dans la conservation des ressources et la protection de notre planète.

## **Chapitre III :**

Sagesse passive : leçons de  
l'architecture vernaculaire à travers le  
monde « Etat de l'Art »

*« L'histoire de l'architecture est  
l'histoire de la lutte pour la lumière. »  
(Le Corbusier)*

## **Introduction**

L'architecture vernaculaire et la durabilité représentent un domaine de recherche essentiel dans le contexte de la conception et de la réalisation de bâtiments respectueux de l'environnement. Ce chapitre examine en profondeur différents aspects liés à l'architecture vernaculaire, en se penchant sur sa signification en tant que source d'enseignement pour réaliser une architecture durable et adaptée à son contexte.

Il sera question de passer en revue la littérature existante concernant les stratégies traditionnelles utilisées à l'échelle mondiale, avec en sous-jacent, la compréhension des principes de conception climatique passive pour optimiser le confort thermique et les performances énergétiques des bâtiments résidentiels. Cette revue exhaustive des recherches effectuées, sera finalisée par une synthèse mettant en évidence les principaux résultats réalisés dans ce domaine.

En outre, nous exposons en détail notre méthodologie d'investigation, notamment, le choix des techniques et outils de recherche. A ce titre, le choix de l'enquête par questionnaire, le travail de terrain à travers les mesures in situ et l'étude par simulation numérique, seront argumentés et largement documentés.

En ce qui concerne l'approche par simulation, quelques-uns des outils de simulation énergétique les plus pertinents pour l'étude vont être présentés. En effet, dans le secteur du bâtiment, les logiciels de simulation sont exploités pour étudier les différents phénomènes physiques (ambiance thermique, éclairage naturel, ...) et énergétiques relatifs aux bâtiments et leurs composants notamment l'enveloppe 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. A cet égard, ces outils s'avèrent cruciaux pour évaluer et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, une préoccupation de plus en plus importante dans le contexte de la durabilité architecturale.



### **III.1. Architecture vernaculaire et durabilité**

Au cours de la décennie écoulée, on a observé une nette augmentation de l'intérêt académique pour la durabilité de l'architecture vernaculaire (Rasulo, 2003 ; Stasinopoulos, 2006 ; Eyüce, 2007 et Singh et al., 2009). A cet égard, les études portant sur des aspects telles que les propriétés thermiques, la consommation d'énergie et l'utilisation des ressources, se distinguent par leur diversité en ce qui concerne leur champ thématique et leur méthodologie.

Une tendance commune se dégage cependant de ces recherches : l'idée fondamentale que les acteurs engagés dans le développement contemporain de l'architecture durable auraient tout à gagner d'étudier l'architecture vernaculaire. Globalement, l'argument avancé repose sur le constat que, dans une époque marquée par une multitude de défis environnementaux, les traditions vernaculaires ont depuis longtemps développé des liens étroits avec leurs environnements naturels. Cette approche davantage axée sur la "durabilité" est considérée comme une source précieuse d'enseignements pour les professionnels de la pratique architecturale contemporaine (Asquith et Vellinga, 2006). Les technologies vernaculaires de refroidissement passif peuvent servir d'inspiration pour concevoir des habitations adaptatives et résilientes dans des climats arides et en réchauffement. Elles indiquent également notre capacité à survivre dans de telles régions sans recourir à la climatisation.

En examinant les facteurs qui influent sur le succès ou l'échec des stratégies de construction vernaculaires, nous pouvons envisager des moyens de mettre en œuvre efficacement des programmes de logements communautaires écoénergétiques à l'avenir. (Foruzanmehr et Nicol, 2008). Les conditions climatiques, le contexte socioculturel, l'économie, la disponibilité des matériaux et de la technologie sont des éléments essentiels qui exercent une influence considérable sur l'architecture des bâtiments et leur viabilité. Étant donné que le climat varie d'un lieu à l'autre, les solutions architecturales adaptées à l'environnement bâti sont spécifiques à chaque région. L'architecture vernaculaire, édifée par les résidents locaux, reflète leurs besoins ainsi que les valeurs socioculturelles qui leur sont propres. (Singh et al., 2009).

L'architecture vernaculaire exploite ces conditions pour offrir aux habitants le niveau de confort qu'ils désirent. Un édifice vernaculaire est érigé par les habitants locaux en utilisant des méthodes traditionnelles et des matériaux disponibles in situ, s'adaptant ainsi au contexte environnemental pour satisfaire les besoins du quotidien (Foruzanmehr, 2015). Par ailleurs, selon Sahebzadeh et al. (2015), l'architecture vernaculaire a évolué au fil du temps pour refléter et s'adapter durablement aux contextes environnementaux et culturels dans lesquels elle existe.

Ce type d'architecture recèle une multitude de pratiques et de technologies originales et astucieuses pour répondre aux divers besoins imposés par le contexte (Sahebzadeh et al., 2017). Les techniques de construction à faible technologie appliquées dans l'architecture vernaculaire peuvent être mises en œuvre pour concevoir des bâtiments et des environnements parfaitement adaptés au climat et à la culture locale. Cette approche se distingue nettement de la conception de nombreuses constructions modernes qui négligent souvent les caractéristiques propres au contexte local (Nguyen et al., 2019).

Du fait de son intégration harmonieuse dans l'environnement, de l'utilisation de ressources naturelles et climatiques, de la réduction de la pollution et des déchets, de la préservation du confort humain, ainsi que de la réduction des effets des catastrophes naturelles, l'architecture vernaculaire illustre clairement sa durabilité environnementale (Uysal, 2023). Selon Ali 2023, les matériaux vernaculaires ont un impact environnemental moins néfaste, en particulier en ce qui concerne le potentiel de réchauffement climatique. De plus, une évaluation des résultats de l'étude a clairement démontré que la majorité de ces matériaux et des procédés locaux sont essentiels pour la construction respectueuse de l'environnement. En outre, d'un point de vue économique et social, l'utilisation de ces matériaux et techniques contribue aux bénéfices de la région et génère de meilleures opportunités d'emploi. Enfin, leur adéquation avec la vie culturelle locale renforce encore davantage leur pertinence et leur durabilité (Ali, 2023).

### **III.2. L'architecture vernaculaire à travers le monde**

L'architecture vernaculaire, reflétant les traditions locales et les connaissances empiriques, les sites du patrimoine mondial avec une expression vernaculaire deviennent essentiels pour la préservation de ce patrimoine unique, mettant en avant l'engagement des communautés locales, et soulignant le caractère exceptionnel de cette architecture vivante (Dipasquale et al., 2020).

**(Supic, 1982)** : Cette étude explore la signification de l'architecture vernaculaire en tant que précieuse source d'enseignements pour la conception durable à l'avenir. Elle souligne l'importance de comprendre les pratiques de construction traditionnelles et les principes de conception qui se sont développés au fil des générations en réponse aux conditions environnementales locales. En s'appuyant sur des exemples historiques, elle met en avant le potentiel d'intégrer ces stratégies éprouvées par le temps dans les pratiques architecturales contemporaines, ce qui pourrait améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité. L'étude met

en évidence la pertinence continue de l'architecture vernaculaire en offrant des pistes pour la conception de bâtiments plus respectueux de l'environnement et mieux adaptés aux besoins contemporains.

**(Glassie, 2000)** : L'objectif est d'explorer l'architecture vernaculaire à travers le monde, en mettant en évidence ses caractéristiques, ses significations culturelles et ses méthodes de construction. Le résultat de cet ouvrage est une compréhension approfondie de la richesse et de la diversité de l'architecture vernaculaire à l'échelle mondiale, tout en soulignant son rôle essentiel dans la préservation de la culture et de l'identité locales, ainsi que dans la relation entre les sociétés humaines et leur environnement bâti.

**(Foruzanmehr et Nicol 2008)** : le développement de nouvelles approches visant à intégrer les systèmes de refroidissement passif vernaculaires dans les bâtiments modernes situés dans les climats chauds et secs de l'Iran. L'objectif principal de cette recherche était d'explorer comment les systèmes traditionnels de refroidissement passif, qui ont fait leurs preuves dans l'architecture vernaculaire, pourraient être adaptés et efficacement incorporés dans les conceptions contemporaines de bâtiments, dans le but de réduire la dépendance à la climatisation mécanique. Les résultats obtenus à l'issue de cette étude ont révélé plusieurs approches et technologies issues de l'architecture vernaculaire qui présentaient un fort potentiel pour contribuer à la réduction de la consommation énergétique associée au refroidissement des bâtiments dans les climats chauds et secs. Parmi ces approches figuraient l'exploitation de techniques de ventilation naturelle, l'utilisation judicieuse de pare-soleil, l'emploi de matériaux à haute efficacité thermique, ainsi que d'autres méthodes traditionnelles de refroidissement passif. Ces découvertes ont ouvert la voie à une réflexion novatrice sur la manière d'intégrer de manière optimale les connaissances vernaculaires dans les pratiques de conception contemporaines des bâtiments, dans le but d'améliorer leur efficacité énergétique, notamment dans les régions caractérisées par des climats chauds et secs.

**(Zhai et Previtali, 2010)** : L'objectif est d'analyser l'architecture vernaculaire ancienne en identifiant ses caractéristiques spécifiques, de les catégoriser en fonction de leur impact sur la performance énergétique des bâtiments, et enfin d'évaluer cette performance énergétique. Les résultats de l'étude montrent que l'architecture vernaculaire ancienne présente un certain nombre de caractéristiques qui contribuent à une meilleure efficacité énergétique, telles que l'utilisation de matériaux locaux, la disposition des bâtiments pour maximiser l'utilisation de la lumière naturelle et la ventilation, ainsi que l'utilisation de techniques de construction adaptées

au climat local. Ces caractéristiques peuvent inspirer des approches plus durables dans la conception architecturale contemporaine, en mettant l'accent sur l'utilisation judicieuse des ressources naturelles et l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments.

**(Kazemi et al., 2011)** : L'objectif de cet article est de fournir une vue d'ensemble des techniques vernaculaires utilisées dans l'architecture durable en Iran, en mettant l'accent sur les citernes et les glacières. Les résultats mettent en lumière comment ces techniques traditionnelles, telles que la collecte et le stockage d'eau de pluie dans les citernes et la conservation de la glace dans les glacières, contribuent à la durabilité environnementale et à l'efficacité énergétique dans le contexte iranien. L'article souligne également comment ces pratiques traditionnelles peuvent offrir des enseignements pertinents pour la conception contemporaine axée sur la durabilité en Iran et ailleurs.

**(Rezazadeh et Shafiei 2016)** : L'objectif d'analyser comment les maisons vernaculaires en Iran répondaient aux conditions climatiques chaudes. Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont examiné les caractéristiques architecturales et les techniques de construction utilisées dans ces maisons traditionnelles. Ils ont également étudié comment ces maisons étaient conçues pour maximiser le confort thermique et la ventilation naturelle tout en minimisant les effets néfastes du climat chaud. Les résultats de l'étude ont montré que l'architecture vernaculaire iranienne était remarquablement adaptée aux conditions climatiques chaudes. Les maisons traditionnelles étaient conçues avec des éléments tels que des cours intérieures, des pare-soleil et des systèmes de ventilation naturelle pour créer des environnements intérieurs plus confortables. Ces conclusions ont mis en lumière l'efficacité de l'architecture vernaculaire dans la réponse aux contraintes climatiques locales et ont offert des enseignements précieux pour la conception de bâtiments adaptés au climat chaud.

**(Sahebzadeh et al., 2017)** : L'étude s'est concentrée sur l'architecture vernaculaire en Iran, en particulier dans les régions chaudes et arides, ainsi que dans les régions chaudes, arides et venteuses. L'objectif de l'étude était de comparer les caractéristiques de durabilité de l'architecture traditionnelle dans ces deux contextes climatiques distincts. Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont analysé en détail les éléments architecturaux, les techniques de construction et les matériaux utilisés dans les deux types de régions. Ils ont examiné comment ces éléments répondaient aux défis posés par les conditions environnementales difficiles, notamment la chaleur et la sécheresse, ainsi que les vents forts dans les régions venteuses. Les

résultats de l'étude ont permis de mettre en évidence les adaptations spécifiques à chaque région et les pratiques architecturales traditionnelles qui ont contribué à la durabilité des bâtiments dans ces contextes. Cette recherche a fourni des informations importantes sur la manière dont l'architecture vernaculaire en Iran a évolué pour répondre aux besoins climatiques locaux, offrant ainsi des pistes pour la conception durable dans des environnements similaires.

**(El Haridi et al., 2019)** : fondé sur une analyse comparative de l'architecture vernaculaire dans les oasis d'Égypte, en se concentrant sur les différences entre l'architecture désertique et l'architecture verte. L'objectif de cette recherche est d'examiner comment les conditions environnementales spécifiques des oasis ont influencé l'architecture vernaculaire et comment cette architecture répond aux besoins des habitants. Les chercheurs comparent les caractéristiques architecturales des bâtiments dans les oasis désertiques et celles dans les oasis verdoyantes, en mettant en lumière les stratégies de conception uniques utilisées dans chaque contexte. Les résultats de cette étude contribuent à la compréhension de l'adaptation de l'architecture vernaculaire aux conditions environnementales locales en Égypte.

**(Samalavičius et Traškinaitė 2021)** : L'étude se penche sur les bâtiments vernaculaires traditionnels, le patrimoine architectural et la durabilité. L'objectif de cette étude est d'explorer la relation entre les bâtiments vernaculaires traditionnels et la durabilité, en mettant l'accent sur leur importance en tant que patrimoine architectural. Les chercheurs examinent comment ces bâtiments peuvent contribuer à la durabilité à travers leur utilisation de matériaux locaux, leurs techniques de construction adaptées à l'environnement, et leur rôle dans la préservation de la culture locale. L'article offre une réflexion sur la manière dont le patrimoine architectural vernaculaire peut être intégré dans des approches contemporaines de la durabilité architecturale.

**(Ergöz Karahan, E et al., 2021)** : La recherche examine le comportement des occupants en matière d'économie d'énergie dans les maisons vernaculaires de Behramkale (Assos). L'objectif de cette recherche est d'investiguer comment les habitants de ces maisons vernaculaires adoptent des comportements visant à économiser l'énergie. Les chercheurs examinent comment les occupants interagissent avec l'environnement bâti, les matériaux et les systèmes de construction pour réduire leur consommation d'énergie. Cette étude offre des perspectives sur la manière dont les pratiques traditionnelles dans les maisons vernaculaires peuvent inspirer des comportements écoénergétiques dans les habitations contemporaines.

**(Femmam et al., 2022)** : Le travail se concentre sur la recherche de solutions pour rendre les bâtiments résidentiels plus durables dans les climats chauds et arides, en s'inspirant de l'architecture traditionnelle de la région de Souf en Algérie. L'objectif principal de cette recherche était d'acquérir des connaissances à partir des pratiques de construction traditionnelles de Souf afin d'améliorer la conception de bâtiments contemporains mieux adaptés aux conditions climatiques locales. Les résultats de l'étude ont mis en évidence plusieurs éléments importants issus de l'architecture vernaculaire de Souf. Il s'agit notamment de l'utilisation de matériaux locaux et adaptés au climat, de techniques de construction qui favorisent la régulation thermique, de la disposition des bâtiments pour maximiser l'ombre et la ventilation naturelle, ainsi que de l'exploitation des caractéristiques du paysage environnant pour améliorer la durabilité des bâtiments. Ces conclusions offrent des enseignements pratiques pour la conception de bâtiments résidentiels plus respectueux de l'environnement dans des climats chauds et arides, en tirant parti des connaissances accumulées au fil du temps dans l'architecture vernaculaire de la région de Souf en Algérie.

**(Al-Hashim et al., 2023)** : L'étude se focalise sur l'évaluation des caractéristiques durables de l'architecture vernaculaire dans les régions chaudes et arides, en se basant sur des enquêtes de terrain et des analyses de deux maisons vernaculaires situées dans la région d'Al Batinah, Oman. L'objectif principal de cette recherche était de comprendre comment l'architecture traditionnelle de cette région était adaptée pour répondre aux défis environnementaux locaux et si elle pouvait offrir des pistes pour la conception de bâtiments durables. Les résultats de l'étude fournissent des informations cruciales sur les caractéristiques de durabilité présentes dans l'architecture vernaculaire de la région d'Al Batinah, Oman, offrant ainsi des enseignements pour la création de bâtiments résilients dans des climats chauds et arides.

### **III.3. Étude de la littérature sur l'application des stratégies passives pour l'optimisation des bâtiments résidentiels**

**(Sadinen et al., 2011)** : L'étude propose une revue des composants de l'enveloppe du bâtiment en relation avec les économies d'énergie passives. L'étude explore les différentes technologies et stratégies utilisées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments grâce à leur enveloppe, notamment l'isolation thermique, les matériaux de construction, les fenêtres à haute performance, les toits verts et d'autres éléments. Cette revue met en évidence l'importance

de l'enveloppe du bâtiment dans la réduction de la consommation d'énergie et offre un aperçu des avancées dans ce domaine, contribuant ainsi à la compréhension des pratiques de conception de bâtiments plus économes en énergie.

**(Gong et al., 2012)** : L'article se concentre sur l'optimisation des mesures de conception passive pour les bâtiments résidentiels dans différentes régions de Chine. L'objectif de cette étude est d'identifier et de mettre en œuvre des mesures de conception passive spécifiques à chaque région pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Les chercheurs ont examiné comment des stratégies telles que l'isolation, l'orientation, la ventilation naturelle et d'autres facteurs de conception pouvaient être adaptées en fonction des variations climatiques et géographiques en Chine. Les résultats de cette recherche offrent des informations précieuses pour la conception de bâtiments résidentiels écoénergétiques adaptés à des contextes géographiques variés en Chine.

**(Fesanghary et al., 2012)** : le travail se concentre sur la conception de bâtiments résidentiels à faibles émissions et à haute efficacité énergétique en utilisant un algorithme d'optimisation multi-objectif. L'objectif de cette recherche est de développer une approche qui permet de concevoir des bâtiments résidentiels capables de réduire les émissions et de maximiser l'efficacité énergétique. Les chercheurs proposent un algorithme d'optimisation qui tient compte de plusieurs objectifs, notamment la réduction des émissions de carbone et la minimisation de la consommation d'énergie. Les résultats de cette étude offrent des solutions potentielles pour la conception de bâtiments résidentiels plus respectueux de l'environnement et écoénergétiques.

**(Deng et al., 2014)** : Le travail se penche sur l'évaluation de la performance des bâtiments à bilan énergétique net nul, également connus sous le nom de Net Zero Energy Buildings (NZEB). L'étude réalise une revue de la littérature afin de comprendre comment évaluer de manière adéquate la performance de ces bâtiments. Les chercheurs examinent les différentes méthodologies et indicateurs utilisés dans la recherche et la pratique pour mesurer l'efficacité énergétique et environnementale des NZEB. Cette revue de la littérature offre un aperçu des approches couramment utilisées pour évaluer la performance des NZEB et contribue à l'avancement des connaissances dans ce domaine crucial de la conception et de la construction durables.

**(Jalaei et al., 2015)** : L'article traite de l'intégration d'un système d'aide à la décision (DSS) et de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour optimiser la sélection des composants de construction durables. L'objectif de cette recherche est de développer un cadre qui combine des technologies DSS et BIM pour aider les professionnels de la construction à prendre des décisions éclairées lors du choix de composants de bâtiment durables. L'étude explore comment ces technologies peuvent être intégrées de manière à améliorer la durabilité des projets de construction. Les résultats de cette recherche fournissent des insights sur les avantages potentiels de l'intégration du DSS et du BIM dans le processus de conception et de construction de bâtiments durables.

**(Harkouss, 2018)** : Le travail se concentre sur l'optimisation de la conception de bâtiments à bilan énergétique nul, également connus sous le nom de bâtiments à consommation nette d'énergie zéro (Net Zero Energy Buildings - NZEB), dans des environnements climatiques variés. L'étude examine les défis spécifiques liés à la conception de ces bâtiments, qui visent à produire autant d'énergie qu'ils en consomment sur une base annuelle, en prenant en considération les fluctuations climatiques d'une région à l'autre. La contribution de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine de la conception de bâtiments durables et écoénergétiques. En explorant des approches adaptées à divers climats, cette thèse offre des informations précieuses pour les praticiens de l'architecture et de l'ingénierie, ainsi que pour les décideurs, afin de favoriser la création de bâtiments plus respectueux de l'environnement et économes en énergie dans des contextes climatiques variés.

**(Rosso, F et al., 2020)** : L'étude se concentre sur l'optimisation multi-objectif de la rénovation de bâtiments dans le climat méditerranéen en utilisant l'application d'un algorithme génétique. L'objectif de cette recherche est de développer une approche permettant de rénover des bâtiments de manière à atteindre plusieurs objectifs simultanément, notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des émissions de carbone et l'augmentation du confort intérieur. Les chercheurs utilisent un algorithme génétique pour explorer différentes combinaisons de mesures de rénovation afin de trouver des solutions optimales qui répondent à ces objectifs multiples. Les résultats de cette étude offrent des perspectives sur la manière dont la rénovation des bâtiments peut être planifiée de manière efficace dans le contexte du climat méditerranéen en utilisant des méthodes d'optimisation multi-objectif.



**(Benincá et al., 2023)** : La recherche est fondée sur l'optimisation multi-objectifs de l'orientation solaire de deux bâtiments résidentiels collectifs situés dans le sud du Brésil. L'objectif de cette recherche est d'optimiser l'orientation des bâtiments afin d'améliorer leur efficacité énergétique grâce à une meilleure utilisation de l'énergie solaire disponible. L'étude examine les aspects liés à la conception architecturale et à l'orientation des bâtiments pour maximiser les avantages du rayonnement solaire. Les résultats de cette recherche contribuent à la compréhension des meilleures pratiques en matière de conception de bâtiments résidentiels durables dans des climats spécifiques, tout en prenant en compte des objectifs multiples.

**(Amaripadath, D et al., 2023)** : La recherche réalise une évaluation comparative de la performance de la ventilation nocturne dans un bâtiment de bureau à consommation d'énergie presque nulle (Nearly Zero-Energy Building - NZEB) pendant des vagues de chaleur à Bruxelles. L'objectif de cette étude est d'analyser comment la ventilation nocturne peut contribuer à maintenir le confort thermique et à réduire la consommation d'énergie dans un NZEB en cas de conditions climatiques extrêmes. Les chercheurs examinent les performances du système de ventilation nocturne et comparent ses avantages lors de vagues de chaleur. Les résultats de cette recherche offrent des informations précieuses sur l'efficacité de la ventilation nocturne dans les NZEB, en particulier dans des conditions climatiques difficiles.

#### **III.4. Synthèse des recherches dans le domaine**

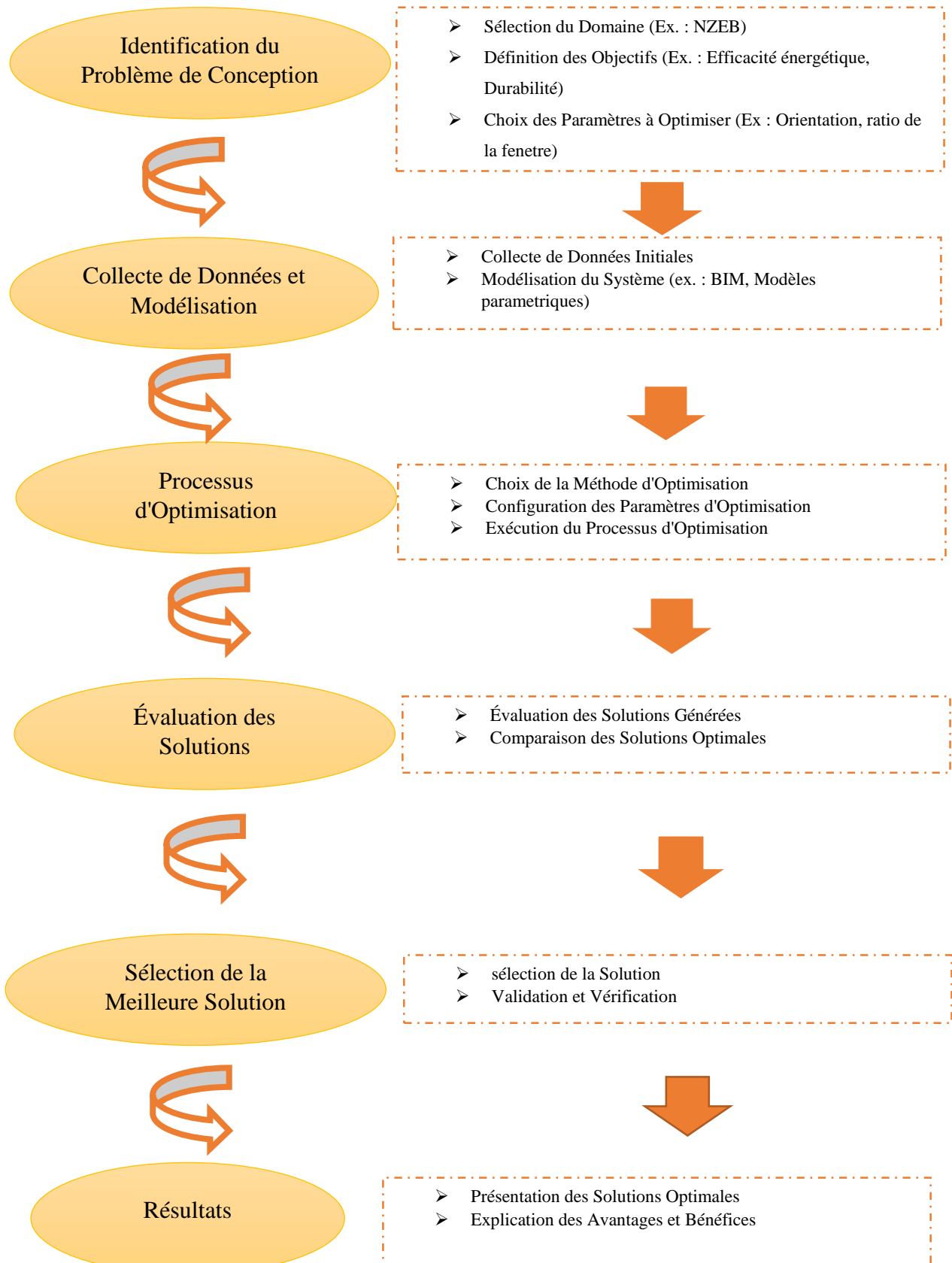
L'objectif des études sont les suivants :

- Amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments : Les études visent à trouver des solutions pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments, en mettant l'accent sur des stratégies passives, durables et respectueuses de l'environnement.
- Adaptation aux contextes géographiques variés : Certaines études se concentrent sur l'adaptation des pratiques de conception aux spécificités géographiques et climatiques, notamment en Chine et au Brésil, afin de concevoir des bâtiments écoénergétiques adaptés à ces régions.
- Optimisation multi-objectif : Plusieurs travaux utilisent des méthodologies d'optimisation « multi-objectif » pour concevoir des bâtiments qui répondent à plusieurs critères simultanément, tels que la réduction des émissions de carbone, l'efficacité énergétique et le confort intérieur.

- Intégration de technologies et de modélisation : les recherches explorent l'intégration de technologies telles que les systèmes d'aide à la décision (DSS) et la modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour prendre des décisions éclairées lors de la sélection de composants durables.

Les méthodologies utilisées comprennent l'application d'algorithmes d'optimisation, la collecte de données, la modélisation des systèmes de construction, l'analyse des performances énergétiques et environnementales, ainsi que l'évaluation des avantages potentiels de différentes stratégies de conception. Les chercheurs utilisent des outils informatiques avancés pour analyser et comparer les solutions proposées.

Les résultats incluent des recommandations spécifiques pour la conception de bâtiments plus économes en énergie, des solutions potentielles pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments, des perspectives sur l'intégration de technologies avancées dans le processus de conception et des simulations sur l'efficacité des stratégies passives, comme la ventilation nocturne, l'orientation, les matériaux de constructions et le refroidissement passif dans des conditions climatiques difficiles. Dans l'ensemble, ces études contribuent de manière significative à l'avancement des connaissances en matière de conception et de bâtiments résidentiels durables, en fournissant des solutions adaptées à divers contextes climatiques.



**Figure III.1** : Schématisation de processus de validation des solutions optimaux (source : auteur).

### **III.5. Méthodologie d'investigation et choix des méthodes et techniques de recherche**

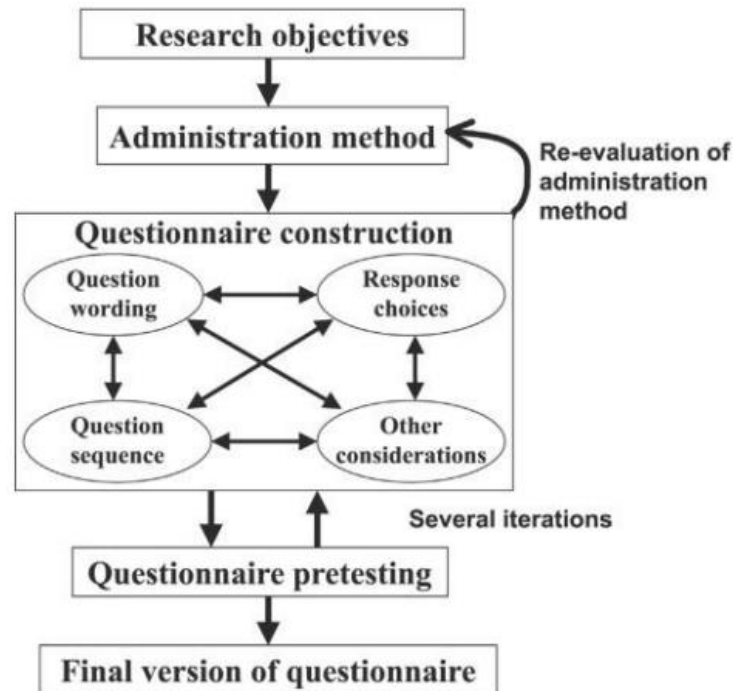
Pour répondre de manière approfondie à notre problématique et obtenir des résultats fiables qui contribueront à la résolution des questions de recherche, nous devons soigneusement choisir les méthodes d'investigation les plus appropriées. Ces méthodes joueront un rôle crucial dans la collecte, l'analyse et l'interprétation des données nécessaires à notre étude.

L'une des méthodes que nous envisageons d'utiliser est l'élaboration d'un questionnaire ciblé, destiné à être administré aux personnes directement concernées par la présente étude. Ce questionnaire permettra de recueillir des informations précises et des opinions pertinentes, tout en fournissant un moyen efficace de quantifier les données qualitatives. Parallèlement, nous envisageons de réaliser un travail de terrain afin d'effectuer des observations directes et de recueillir des mesures in situ. Cette approche nous donnera une compréhension plus approfondie du contexte et des variables mises en jeu, ainsi que des informations de première main sur les conditions et les facteurs qui ont trait au sujet traité. Enfin, pour valider nos résultats et garantir leur fiabilité, nous avons l'intention de recourir à la simulation numérique via des logiciels adaptés. Ces logiciels nous aideront à modéliser, évaluer et optimiser les bâtiments étudiés, ce qui nous permettra de vérifier la validité de nos hypothèses et de confirmer la pertinence de nos conclusions.

#### **III.5.1. La méthode d'investigation par un questionnaire**

Les débuts des enquêtes modernes remontent aux sondages d'opinion publique et aux études marketing du début du XXe siècle. Depuis lors, elles ont proliféré dans divers domaines et sont fréquemment employées pour recueillir une variété d'informations au sein des contextes organisationnels. (Kraut, A. et Saari, L, 1999). Grover, R., et Vriens, M. ont défini le questionnaire par une série de questions structurées visant à recueillir des informations auprès des participants. Son objectif principal est de transformer les besoins d'information du chercheur en un ensemble de questions précises auxquelles les participants sont disposés et en mesure de répondre (Grover et Vriens, 2002).

Selon Carpino et al., (2019), de nombreuses études ont utilisé un questionnaire pour recueillir les informations nécessaires à diverses fins. Le questionnaire est principalement utilisé comme un outil exclusif de collecte de données, bien que des situations aient également été observées où le questionnaire est associé à d'autres méthodes d'enquête, telles que les mesures sur le terrain et les enquêtes sur l'utilisation du temps (Carpino et al., 2019).



**Figure III.2** : Le processus de construction d'un questionnaire  
(source : Synodinos, N. E. 2003)

Obtenir les données essentielles pour effectuer des calculs représente un défi complexe. Par ailleurs, l'exactitude et la fiabilité des informations collectées sont des éléments essentiels pour garantir la qualité des résultats de la recherche. Souvent, on se tourne vers les bases de données statistiques constituées par des organisations publiques ou privées pour mettre à disposition les informations nécessaires, telles que la consommation d'énergie, les caractéristiques des bâtiments ou les profils des ménages, par exemple (Zheng et al., 2014 ; Santin et al., 2009).

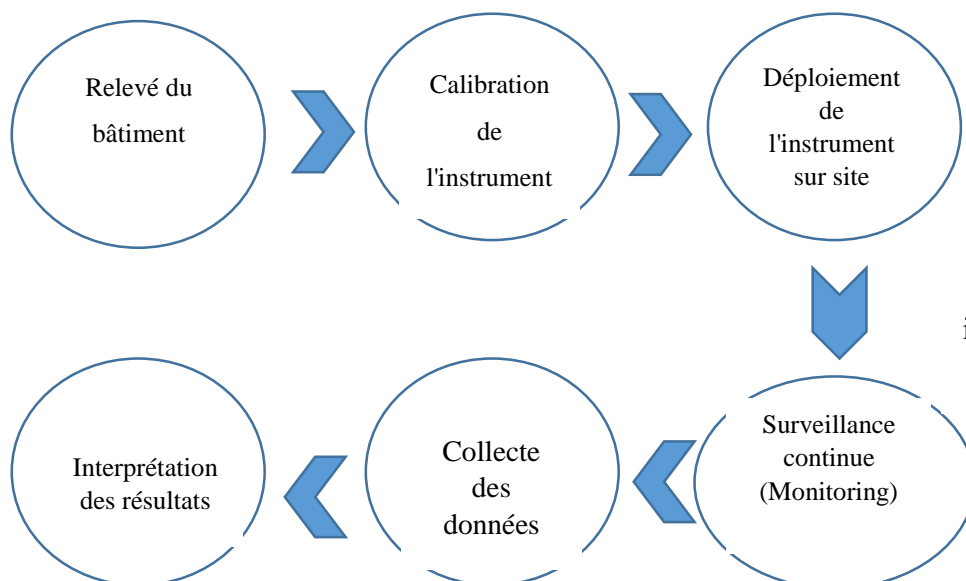
Concernant la présente étude, un questionnaire a été élaboré dans le but de recueillir des informations sur l'expérience et les connaissances des architectes de la wilaya d'El-Oued en matière de conception de bâtiments résidentiels bioclimatique. Les questions avaient pour objectifs d'évaluer la formation académique des architectes interrogés, leur expérience pratique sur le terrain, ainsi que leur sensibilité vis-à-vis des préoccupations environnementales. Un autre objectif du questionnaire, consistait à recueillir l'opinion des architectes sur le cahier des charges utilisé dans la réalisation des bâtiments résidentiels, ainsi que leurs approches en matière de conception intégrant les données climatiques spécifiques à la région du Souf.

### III.5.2. Le travail empirique : collecte des données et mesures in situ

Les mesures réalisées sur place se sont révélées précieuses pour évaluer la véritable efficacité thermique des composants de bâtiments existants, surtout parce que les valeurs obtenues en conditions réelles peuvent différer considérablement des valeurs théoriques (Teni et al., 2019). Selon Koški et al., dans un processus de développement et d'amélioration des mesures in situ, il est essentiel de considérer les interactions entre les paramètres qui influencent un environnement de travail sain et les coefficients U (coefficients de transmission thermique). Outre la qualité de l'enveloppe thermique, l'étanchéité à l'air joue un rôle majeur dans son incidence sur la consommation énergétique (Koški et al., 2013).

Les méthodes expérimentales se fondent sur la collecte de données sur le terrain (in situ). Ces mesures peuvent être réalisées soit par des procédures destructives, comme l'utilisation d'un endoscope et des méthodes d'échantillonnage, soit par des procédures non destructives, telles que la méthode du débit calorifique (ISO, E. 2014). La mesure de la résistance thermique (valeur R) in situ des murs de bâtiments par exemple est cruciale pour une évaluation précise des performances thermiques de l'enveloppe, et elle fait récemment l'objet d'une attention de plus en plus marquée (Teni et al., 2019). Il existe également divers outils professionnels pour mesurer in situ les propriétés des matériaux et des composants du bâtiments (Feng et al., 2020).

Dans notre travail, les mesures in situ ont été effectuées aux niveaux des deux cas d'études pour comprendre le comportement thermique de chaque cas et de comparer la température intérieure et extérieure selon les deux saisons hivernale et estivale par l'utilisation d'un data logger approprié.



**Figure III.3** : Le processus des mesures in situ (source : auteur).

### **III.5.3. La méthode de simulation : étude quantitative**

La simulation numérique via l'utilisation d'un programme informatique représente la technique de recherche la plus exploitée par les chercheurs dans la quasi-totalité des études vue ses innombrables avantages. En effet, en plus de la précision et la fiabilité des résultats, la simulation numérique est la moins coûteuse (en comparaison avec les mesures in situ, les modèles réduits, etc.), en plus, d'être plus flexible, dans la mesure où elle permet d'évaluer les performances thermiques d'une construction tout en agissant à volonté sur des variables relatives au climat, au bâtiment, aux matériaux, à l'occupation, etc.

Dans le secteur du bâtiment, les logiciels de simulation sont exploités pour étudier les différents phénomènes physiques (ambiance thermique, éclairage naturel, ...) et énergétiques relatifs aux bâtiments et leurs composants notamment l'enveloppe 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, d'une saison, etc.

Un grand nombre de logiciels de simulation de bâtiments ont été créés à travers le monde depuis les débuts de la technologie de simulation assistée par ordinateur dans les années 1960. (Yan et al., 2008). Les logiciels de simulation énergétique peuvent revêtir une importance cruciale pour la réduction des coûts énergétiques des bâtiments. (Clarke J, 2001). Selon Sousa, les logiciels de simulation énergétique jouent un rôle essentiel pour les architectes et les concepteurs de bâtiments en réduisant les coûts énergétiques. Ils permettent d'analyser avec précision diverses variables, aidant ainsi à prendre des décisions éclairées pour l'efficacité énergétique lors de la construction ou de la rénovation de bâtiments. (Sousa J, 2012).

Avec l'intérêt croissant pour la préservation de l'environnement et la promotion du développement durable, les simulations de bâtiments révèlent les interactions complexes entre le bâtiment, ses occupants, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ainsi que le climat extérieur. De plus, elles permettent de développer des options de conception respectueuses de l'environnement pour répondre à ces défis. (Hong et al, 2000).

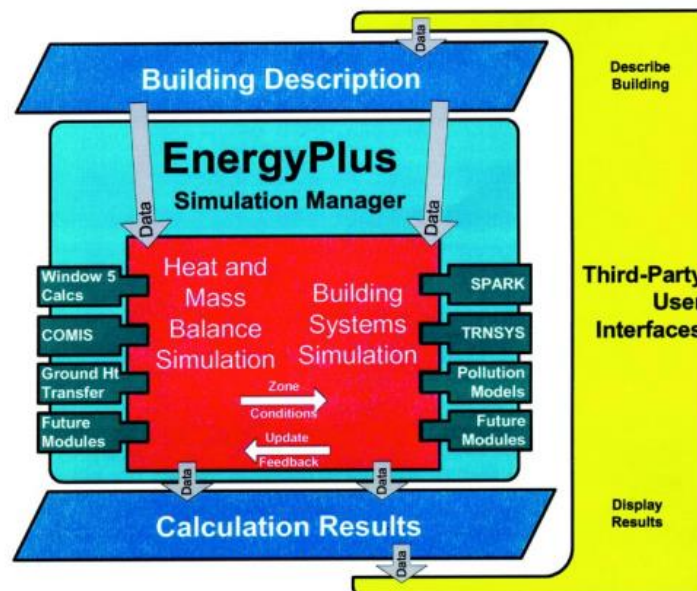
La conception et l'optimisation basées sur la simulation des bâtiments peuvent contribuer à atteindre plusieurs objectifs spécifiques, tels que la réduction de la consommation d'énergie et des impacts environnementaux, ainsi que l'amélioration de la qualité de l'environnement intérieur. Cela ouvre ainsi une nouvelle ère de conception pour les architectes

et les ingénieurs (Wang H et Zhai Z, 2016). Afin d'optimiser l'efficacité de ces systèmes et de réduire les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments en accord avec les objectifs internationaux, il est impératif de disposer d'un outil d'optimisation complet et convivial, axé sur la conception et le contrôle, qui puisse s'intégrer facilement aux logiciels de conception architecturale géométrique dans le domaine de la simulation des bâtiments ( Barber K et Krarti M, 2022).

### III.5.3.1. Présentation de quelques outils de simulation énergétique

#### III.5.3.1.1. EnergyPlus

Un programme de simulation énergétique développé pour l'industrie du bâtiment. EnergyPlus est conçu pour modéliser la performance énergétique des bâtiments en prenant en compte divers paramètres, tels que le climat, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ainsi que les matériaux de construction. L'article met en évidence les fonctionnalités et les avantages de ce logiciel, qui offre une capacité avancée de simulation énergétique pour aider les concepteurs de bâtiments à prendre des décisions éclairées en matière d'efficacité énergétique. (Crawley et al., 2000).



**Figure III.4** : La structure générale d'EnergyPlus (source : Crawley et al., 2000).



### **III.5.3.1.2. DesignBuilder/Energyplus**

DesignBuilder est un logiciel puissant qui donne aux architectes, ingénieurs et concepteurs de bâtiments les moyens de créer des bâtiments à la fois économes en énergie et durables. Cette plateforme permet la modélisation et la simulation d'une variété de types de bâtiments, du résidentiel au commercial, avec une grande facilité et une précision exceptionnelle. L'un de ses principaux avantages réside dans son interface conviviale, simplifiant la modélisation des bâtiments et l'analyse énergétique. De plus, DesignBuilder autorise l'importation de données BIM et CAO existantes, accélérant ainsi le processus de modélisation. Selon Jean M, Il offre également la possibilité de générer des rapports détaillés et des résultats, facilitant la comparaison approfondie des performances entre différentes options de conception. Cette solution polyvalente permet l'optimisation des bâtiments à divers stades du processus de conception, en alignant chaque étape sur les objectifs spécifiques du client. En outre, DesignBuilder offre des capacités de rendu impressionnantes, permettant aux utilisateurs de créer des représentations visuelles captivantes de leurs projets. En résumé, DesignBuilder représente un outil inestimable pour les professionnels qui aspirent à concevoir des bâtiments économes en énergie et durables. (Jean M, 2023).

### **III.5.3.1.3. TRNSYS**

TRNSYS est construit autour d'une approche modulaire pour résoudre les systèmes d'énergie thermique, demandant un fichier d'entrée où l'utilisateur précise les éléments composant le système et leurs interconnexions. La version 14.1 de TRNSYS inclut de nouvelles méthodes de résolution d'équations et de contrôle, ainsi que de nombreux composants additionnels, et elle propose également des améliorations au niveau des procédures d'entrée et de sortie. (Beckman et al., 1994). TRNSYS est un logiciel de simulation axé principalement sur la modélisation de systèmes thermiques dynamiques, et il produit des résultats qui sont en accord satisfaisant avec des marges d'erreur acceptables. (Jani et al., 2020). L'objectif de l'utilisation de la simulation TRNSYS est de déterminer la pertinence, la faisabilité et les avantages potentiels des systèmes de refroidissement thermique à absorption pour optimiser les économies d'énergie et de coûts dans le contexte de la climatisation des bâtiments. TRNSYS est un logiciel de simulation des systèmes transitoires qui présente une bonne concordance avec une marge d'erreur comprise entre 5% et 10%. Cette étude comprend une évaluation critique de la simulation des systèmes de chauffage solaire de l'eau. (Shrivastava et al., 2017).

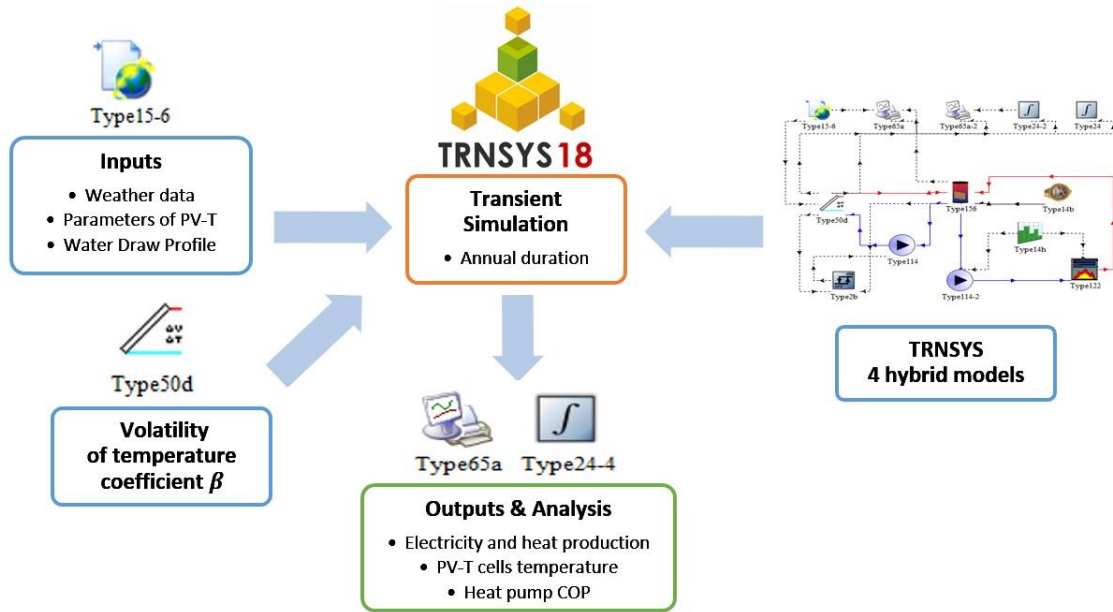


Figure III.5 : La structure générale de TRNSYS (source : Pater S, 2021).

### III.5.3.1.4. IDA-ICE

IDA ICE a fait ses débuts avec sa première version en 1998, et la version actuelle, numérotée 3.0, a été mise à disposition en novembre 2001. (Jarić M ,2013). Le logiciel de simulation thermique IDA « Indoor Climate Energy » est construit sur une plateforme de simulation système générale avec une structure modulaire. Les systèmes physiques multidomains sont représentés dans IDA à l'aide d'équations symboliques, utilisant un langage de simulation appelé Format de Modèle Neutre (NMF - Neutral Model Format). (Sousa J, 2012)

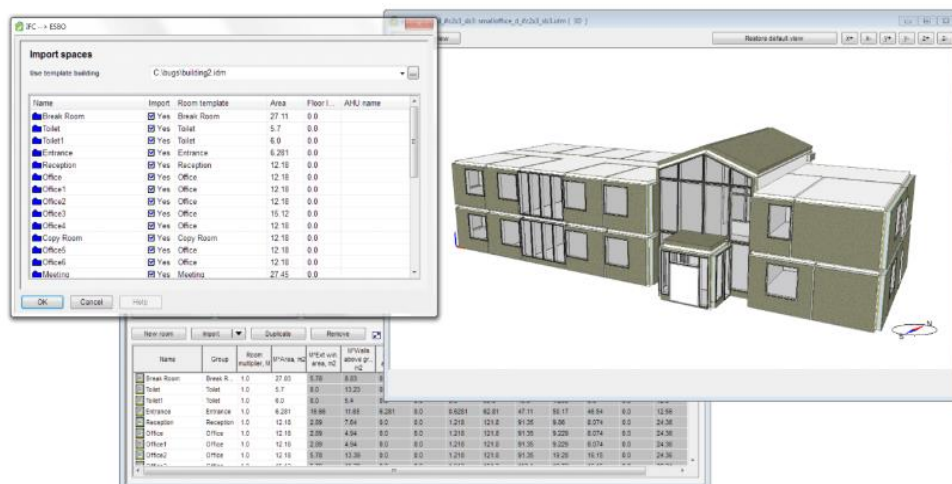


Figure III.6 : le logiciel de simulation IDA-ICE (source : <https://www.equa.se/en/ida-ice>)

## **Conclusion**

Ce chapitre a été dédié à l'étude approfondie de l'architecture vernaculaire, en mettant en lumière son importance comme source d'inspiration dans le contexte de la durabilité et de la conception de bâtiments respectueux de l'environnement. Ainsi, le concept d'architecture vernaculaire à l'échelle mondiale, a été examiné selon différentes cultures et régions du monde. De ce point de vue, l'architecture vernaculaire a un réel potentiel pour améliorer l'intégration déficiente de la dimension climatique dans les nouvelles constructions, tant du point de vue de la performance thermique des bâtiments que du confort thermique humain.

De plus, le chapitre a examiné la littérature existante sur l'application de stratégies passives pour optimiser les performances énergétiques des bâtiments résidentiels. Cette analyse a permis de synthétiser les connaissances actuelles et de dégager des tendances clés dans ce domaine de recherche en pleine expansion. D'un autre côté, la méthodologie d'investigation, notamment, le choix des techniques et outils de recherche préconisés ont été présentés. A ce titre, le recours à l'enquête par questionnaire et au travail de terrain à travers les mesures in situ ainsi que l'étude par simulation numérique, ont été argumentés et largement documentés.

En ce qui concerne l'approche par simulation, quelques-uns des outils de simulation énergétique les plus pertinents pour l'étude ont été examinés. A cet égard, ces outils s'avèrent cruciaux pour évaluer et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, une préoccupation de plus en plus importante dans le contexte de la durabilité architecturale.

En somme, cette section constitue une base solide pour l'appréhension de deux notions clés de la présente recherche, en l'occurrence, l'architecture vernaculaire et la durabilité. De plus, elle établit le cadre méthodologique essentiel pour mener l'investigation dans la réalité, à savoir, la collecte des données, le traitement et d'analyse des résultats.

## **Chapitre IV :**

### Identification du contexte et présentation des cas d'études

*“Le verdict du passé est toujours le  
verdict d'un oracle. Vous ne le  
comprendrez que si vous êtes les  
architectes de l'avenir, les  
connaisseurs du présent.”*

(Friedrich Nietzsche).

## **Introduction**

Le rôle de l'architecte revêt une importance primordiale lors de la phase d'esquisse et de conception des bâtiments. Il doit faire des choix judicieux afin d'adopter les stratégies les plus efficaces permettant de garantir un environnement intérieur de qualité pour les habitants, tout en limitant au maximum le recours aux systèmes mécaniques. Pour atteindre nos objectifs, nous avons défini trois approches distinctes.

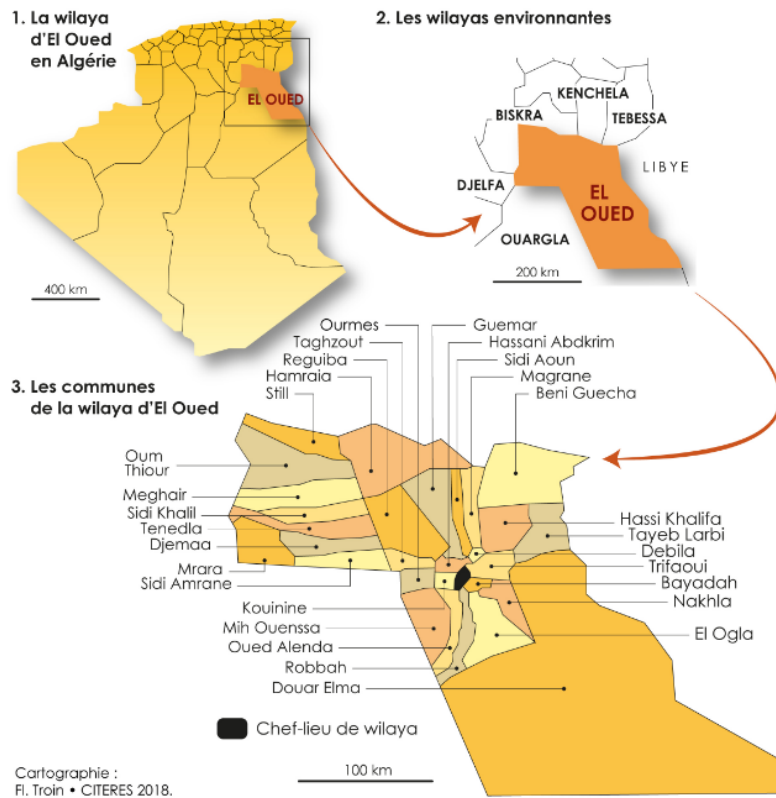
Tout d'abord, une approche analytique a été adoptée, comprenant une étude approfondie du contexte local ainsi que des données climatiques spécifiques à la ville d'El Oued. Ensuite, nous avons opté pour une approche qualitative comparative entre une maison traditionnelle typique de la région du Souf et une maison contemporaine. Cette analyse nous permettra d'étudier l'adaptabilité climatique de l'enveloppe architecturale de chaque maison, ainsi que leur performance thermique ; les matériaux de construction utilisés et leurs conséquences sur l'efficacité énergétique de chaque bâtiment, seront également examinés.

Un autre volet de l'investigation consiste à distribuer un questionnaire auprès des bureaux d'études et des architectes de la région afin de connaître leur démarche conceptuelle et leurs décisions vis-à-vis des considérations climatiques au cours du processus de l'élaboration du projet. En combinant ces approches complémentaires, nous pourrions obtenir une vision complète du mode de production de l'architecture résidentielle vernaculaire et contemporaine du Souf et de ses spécificités. Cette étude approfondie nous permettra de mieux comprendre les aspects techniques, climatiques et culturels qui caractérisent la production du cadre bâti résidentiel. De plus, elle nous aidera à formuler des recommandations pertinentes en vue de préserver le style architectural unique du Souf et d'adapter les nouvelles constructions aux contraintes environnementales de la région.

### **IV.1. Présentation de contexte d'étude**

Le Souf est une région saharienne située dans le sud-est de l'Algérie. Elle fait partie du bassin aride du Grand Erg Oriental, dans le nord-est du Sahara. Selon la classification climatique de Köppen, le Souf se trouve dans un climat de désert chaud (classé BWh, d'après Köppen). Le climat du Souf est généralement extrêmement sec et aride, avec des étés chauds, arides à ciels dégagés, tandis que les hivers sont froids, secs et principalement à ciels clairs. Au cours de l'année, la température varie généralement de 5,5°C à 40,5°C et est rarement inférieure

à 2°C ou supérieure à 45°C. La température la plus élevée est enregistrée en août de l'ordre de 49,0°C. Les précipitations sont légères et sporadiques, et les étés sont particulièrement secs. La pluviométrie moyenne varie entre 80 et 100 mm/an (période d'octobre à février). Le sirocco (un vent chaud et sec) et les tempêtes de sable peuvent souffler tout au long de l'année pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines.



**Figure IV.1 :** El Oued dans le Bas-Sahara algérien : proximités et découpage communal (source : Fl. Troin • CITERES 2018.)

En tant que région saharienne, le Souf possède un héritage architectural historique et traditionnel unique qui s'est développé au fil du temps pour répondre aux besoins matériels, spirituels et culturels de ses habitants. La région est particulièrement reconnue pour l'originalité de son architecture domestique, mettant en avant l'utilisation de dômes (appelés goubas) et de voûtes. Ces éléments distinctifs, avec leurs toits courbes caractéristiques, ont joué un rôle majeur dans la formation de l'identité architecturale du Souf, devenant l'expression prédominante de l'architecture vernaculaire de la région. L'architecture vernaculaire de la ville d'El-Oued, qui est la capitale du Souf, est également renommée pour son utilisation de matériaux locaux, en particulier la "lous" (pierre du désert) et la "tefza" autrement dit "tufla" (une pierre calcaire qui, une fois cuite, donne un plâtre d'excellente qualité). Ces ressources

naturelles abondantes dans la région ont façonné le paysage architectural local, conférant à ses bâtiments une esthétique distinctive et une intégration harmonieuse avec l'environnement environnant. Ce qui rend l'architecture du Souf encore plus remarquable, c'est qu'elle est spécifique à cette région et ne se retrouve nulle part ailleurs en Algérie. C'est une combinaison unique de deux éléments essentiels du système de construction : les matériaux de construction indigènes et la technique des dômes. L'utilisation des dômes permet de créer des espaces intérieurs spacieux et bien ventilés, tandis que les matériaux locaux apportent durabilité, isolation thermique et esthétique régionale.



**Figure IV.2 :** Dômes et voutes utilisée à l'Oued (source : le Sahara a vol de oiseau)

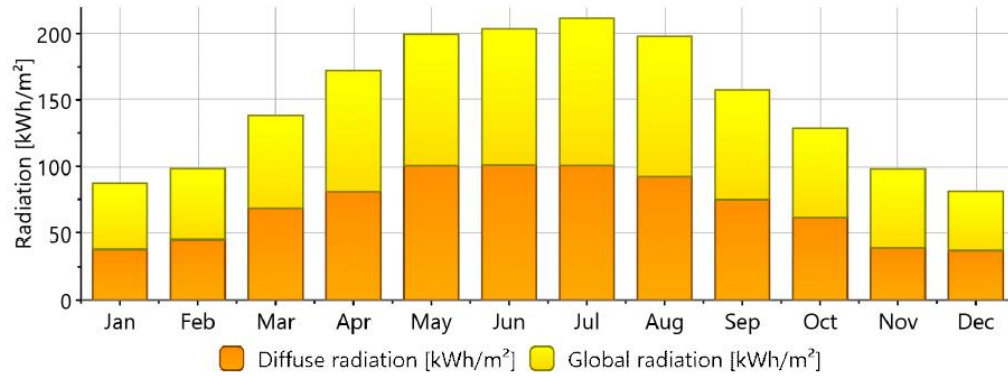
L'architecture vernaculaire du Souf est non seulement un témoignage tangible de l'histoire et de la culture de la région, mais elle représente également un patrimoine précieux à préserver. En comprenant et en préservant ces caractéristiques architecturales uniques, il est possible de maintenir une connexion avec le passé, de promouvoir une identité locale forte et de créer des espaces de vie adaptés aux défis climatiques spécifiques de la région saharienne. (Fezzai et al., 2012).

#### **IV.2. Les données climatiques de la ville**

La région d'El-Oued, située dans le Sahara en Algérie, présente un climat désertique chaud et sec. Les températures sont extrêmement élevées en été, dépassant souvent les 40°C, tandis que les hivers sont relativement doux avec des températures diurnes autour de 15-20°C. Les précipitations sont rares, généralement inférieures à 100 mm par an, et se produisent principalement pendant les mois d'hiver. L'humidité est faible, oscillant entre 20% et 40%, et

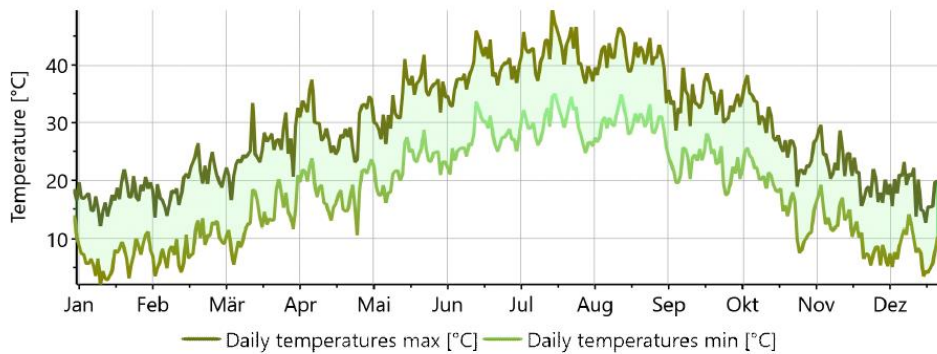
les vents modérés à forts sont fréquents, avec des épisodes occasionnels de vents du nord apportant des tempêtes de sable. Oued Souf bénéficie d'un ensoleillement abondant tout au long de l'année, avec des journées ensoleillées et peu nuageuses.

Monthly radiation



**Figure IV.3 :** Rayonnement mensuel de la ville d'El-Oued (Source : météoforme).

Daily temperature



**Figure IV.4 :** Température journalière de la ville d'El-Oued (Source : météoforme).



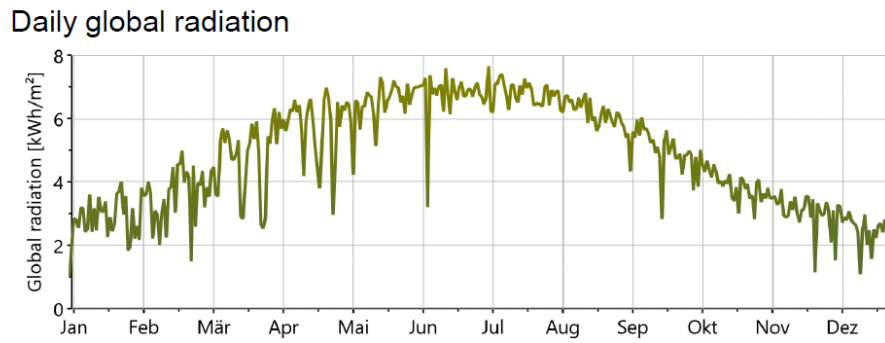


Figure IV.5 : Rayonnement global journalier de la ville d'El-Oued (Source : météonorme).

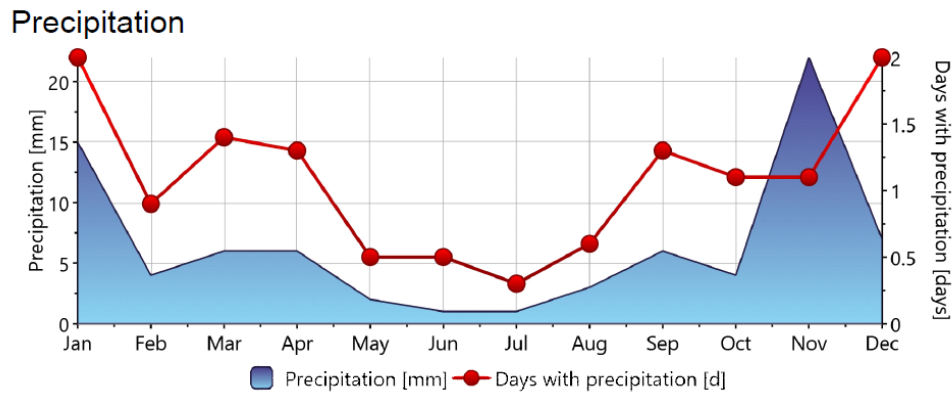


Figure IV.6 : Précipitation mensuelle de la ville d'El-Oued (Source : météonorme).

### IV.3 Analyse climatique à l'aide des outils bioclimatiques

#### IV.3.1. Les table de Mahoney

Les Tables Mahoney ont été développées par le Département du Développement des Études Tropicales de l'Association Architecturale de Londres. Elles sont conçues pour évaluer le climat en se basant sur des données telles que la température, l'humidité relative et les précipitations. Les informations fournies par ces tables sont ensuite utilisées pour formuler des recommandations de conception dans divers domaines tels que l'aménagement, l'espacement, la ventilation, l'enveloppe du bâtiment (murs et toiture), les ouvertures, les espaces extérieurs et la protection contre les intempéries. Ces outils sont couramment utilisés par les chercheurs afin d'étudier les recommandations de conception appropriées (Santy et al., 2017).

L'ensemble de tables utilisées lors de la phase de préconception pour faciliter le processus de prise de décision et identifier l'orientation, la compacité et les ouvertures

appropriées du bâtiment en fonction des données climatiques de la région afin d'assurer le confort de jour et de nuit. En conséquence, les données climatiques de la ville d'El-Oued ont été intégrées dans les Tables Mahoney, qui fournissent des recommandations de conception préliminaires. Elles sont regroupées sous huit rubriques : agencement, espacement, mouvement d'air, ouvertures, position des ouvertures, protection des ouvertures, murs et toits. Les tables suivantes donnent les recommandations pour la région de Souf.

### IV.3.2. Diagramme psychrométrique ASHRAE

Des données mensuelles d'humidité relative minimale et maximale ainsi que de température sont tracées sur le graphique pour chaque mois. Si la ligne tracée se situe à l'intérieur de la zone de confort, les conditions sont confortables à l'ombre et dans un air immobile. Si la ligne se situe partiellement ou totalement en dehors de la zone de confort, des mesures correctives sont nécessaires, telles que l'utilisation du rayonnement solaire, le mouvement d'air ou le refroidissement par évaporation (Amraoui et al., 2021). Un outil directeur très utile qui identifie la zone de confort et les stratégies passives appropriées en fonction des données climatiques locales téléchargées au format EPW à l'aide de la version 6.0 du logiciel de climate consultant.

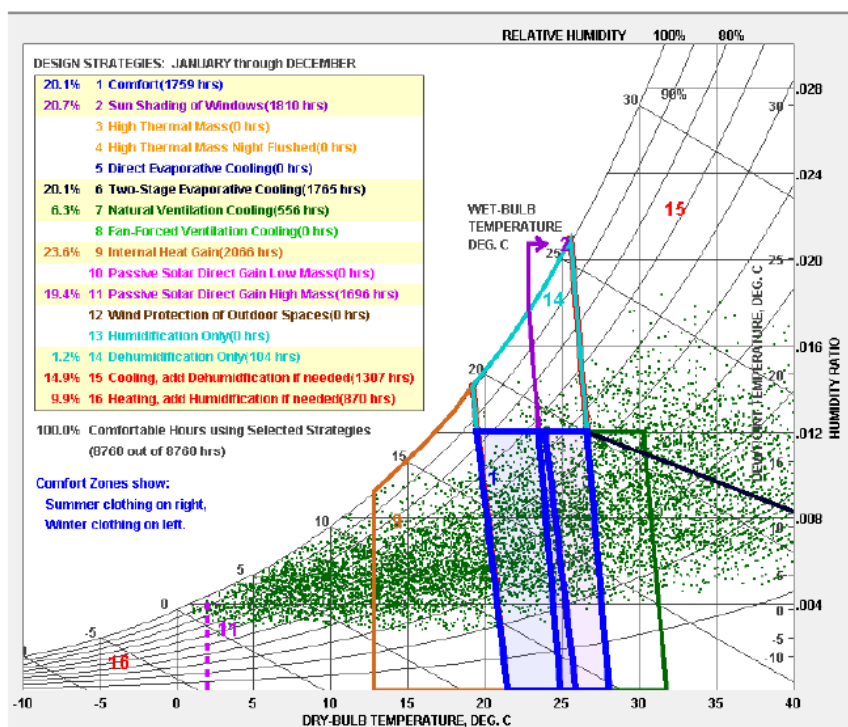


Figure IV.7 : Diagramme psychrométrique basé sur les conditions climatiques d'El Oued. (Source : auteurs)

### IV.3.3. Résultats et discussion de l'analyse

#### IV.3.3.1. Stratégies de conception adaptées au climat selon les tables de Mahoney

Selon l'analyse climatique effectuée avec les tables de Mahoney, les résultats obtenus montrent que le stress thermique pendant la journée et la nuit en juillet et août tout au long de l'année est classé H (Chaud), (**annexe B.1**) ce qui signifie que la température est toujours au-dessus de la limite de confort. Les nuits de septembre et juin, le stress thermique est (/), ce qui signifie qu'il est confortable. Les mêmes résultats sont observés pendant les journées de mars. Cependant, le reste de l'année est classé C (Froid) pendant la journée et la nuit, ce qui signifie que le stress thermique est toujours en dessous de la limite de confort.

Aucun mouvement d'air n'est nécessaire selon la table des indicateurs (Tableau 2.f), et aucune protection contre les précipitations n'est nécessaire car elles sont très rares. La table permet de déterminer les indicateurs de chaleur et d'aridité, et le résultat indique que l'indicateur pour El Oued est A1, en raison de températures élevées en été, de températures basses en hiver et d'une faible humidité pendant la journée et la nuit. De janvier à novembre, la différence de température est supérieure à 10 °C, ce qui nécessite un stockage thermique pour cette condition. Dormir à l'extérieur est approprié, comme le présente la table avec l'indicateur A2 pour les nuits de juillet et août. L'indicateur A3 montre un problème de saison froide de janvier à mars et de novembre à décembre (ASADI, S et al 2016).

Les recommandations des tables de Mahoney ci-dessus offrent un guide pour la phase de préconception que l'architecte peut utiliser pendant le processus de conception afin d'atteindre le confort thermique.

**Table IV.1 :** Résumé des recommandations de Mahoney

Orientation	Allongée sur l'axe est/ouest
Enveloppe	Compact avec une cour intérieure
Ouvertures intérieurs	De 20% à 35% de la surface des murs placés dans les murs
Éléments constructifs	Murs massifs, toits et planchers (temps de déphasage de 8 heures)
Espace extérieur	Dormir à l'extérieur

#### **IV.3.3.2. Stratégies de conception adaptées au climat selon le diagramme psychrométrique**

Le diagramme psychrométrique permet d'évaluer les conditions de confort thermique dans différentes plages de température. La zone de confort se situe généralement entre 21°C et 28°C, et correspond à la zone centrale du diagramme. Cette zone représente les heures de confort où les occupants se sentent à l'aise thermiquement. En utilisant différentes stratégies de conception climatique, il est possible d'élargir la zone de confort et d'augmenter le nombre d'heures de confort disponibles. Par exemple, l'utilisation de dispositifs de protection solaire tels que des auvents, des brise-soleil ou des stores peut aider à réduire l'apport de chaleur solaire directe dans les espaces intérieurs, ce qui permet d'obtenir davantage d'heures de confort.

De même, la ventilation naturelle peut être utilisée pour favoriser la circulation de l'air et maintenir une température plus agréable à l'intérieur. La tour à vent, en tant que solution architecturale et environnementale aux contraintes climatiques, a joué un rôle crucial tout au long de l'histoire en régulant le microclimat à l'intérieur de la maison, et ce, grâce à une utilisation d'énergie propre (Torkia, 2021). Les gains solaires passifs, tels que l'utilisation de surfaces vitrées orientées au sud pour capter la chaleur du soleil en hiver, peuvent également contribuer à améliorer le confort thermique. Enfin, les constructions massives, caractérisées par des murs, des toits et des planchers épais et bien isolés, peuvent offrir une meilleure inertie thermique. Cela signifie que ces éléments peuvent absorber et stocker la chaleur pendant les périodes chaudes, puis la libérer lentement pendant les périodes plus fraîches, contribuant ainsi à maintenir une température stable et confortable à l'intérieur.

En combinant ces différentes stratégies de conception, il est possible de créer des environnements plus confortables sur une plus longue période de temps, en augmentant le nombre d'heures de confort disponibles. Cela permet aux occupants de profiter d'un espace intérieur agréable tout au long de l'année, même dans des conditions climatiques changeantes.





**Figure IV.10 :** La rue principale Larbi Taleb (Source : auteur).

La maison se situe dans le nord-est de la ville d'El-Oued, dans un quartier appelé Achèche, l'un des anciens quartiers de la ville. Le quartier d'Achèche présente deux extrémités distinctes. La première extrémité du quartier s'ouvre vers le cœur du souk, le marché animé où se déroulent les échanges commerciaux et les transactions quotidiennes et La deuxième extrémité du quartier conduit vers la rue principale Taleb Larbi, qui est une artère importante de la ville. Cette rue principale est souvent bordée de magasins, de restaurants, de cafés et d'autres établissements commerciaux.

Les ruelles étroites et sinueuses offrent de multiples avantages sur le plan climatique. Elles permettent notamment de faire face aux conditions météorologiques difficiles en empêchant le soleil de frapper directement les piétons. De plus, le ratio entre les bâtiments et la rue est élevé, ce qui crée une bonne zone d'ombre et un environnement piéton agréable, particulièrement pendant la saison estivale (Chro H, 2018).





**Figure IV.11 :** Les ruelles étroites du quartier d’Achèche. (Source : auteurs).

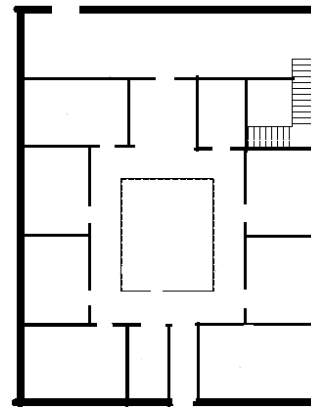


**Figure IV.12 :** Localisation de la maison traditionnelle (source Google earth 2023).

Il est important de souligner que l'architecture traditionnelle des bâtiments résidentiels vernaculaires du Souf, qu'ils se trouvent dans les centres urbains ou dans les habitations rurales détachées (nezla), est étroitement inspirée de la maison arabo-islamique typique. La maison traditionnelle du Souf présente une organisation autour d'une cour, qui peut être fermée dans le cas des maisons villageoises ou ouverte dans le cas des maisons rurales (Belhadj, 2011). Ce modèle a servi de référence pour les habitants du Souf, qui l'ont adapté à leur culture locale. (Mazouz 2005).

Sur le plan architectural, la conception des maisons soufies repose sur une organisation centrale autour d'une cour extérieure. De petites cellules d'un seul étage, de forme carrée ou rectangulaire, sont regroupées autour de cette cour, constituant ainsi le type de construction traditionnel. Chaque cellule est surmontée d'une coupole autoportante.

De plus, la cour (haouch) revêt une importance particulière. Elle est l'élément structurant du plan architectural et occupe également une place prépondérante en termes de taille. La superficie de la cour dépasse généralement un tiers de la surface totale de la parcelle. Bien qu'elle soit entourée de différentes pièces, sa configuration suit un ordre géométrique, favorisant des formes proches du carré, du rectangle ou une combinaison de ces formes de base.



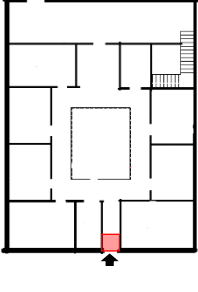

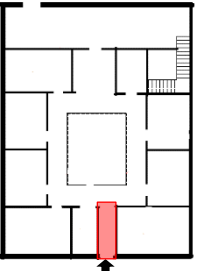

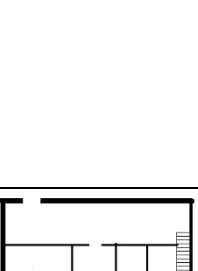

**Figure 13 :** 1<sup>er</sup> cas d'étude : la maison traditionnelle (Source auteurs).

#### **IV.4.1.2. Analyse qualitative de la maison traditionnelle**

Afin de mieux comprendre l'organisation spatiale et les activités qui se déroulent à l'intérieur de la maison traditionnelle, le tableau 2 présente les principaux composants d'une maison vernaculaire typique dans la région du Souf. Cette classification et analyse typologique sont basées sur des caractéristiques fonctionnelles, telles que la localisation dans l'unité résidentielle de base, l'orientation et les modèles d'utilisation.



Tableau IV.2 : Analyse typologique de la maison traditionnelle d'El-Oued. (Source : auteurs)

	<p>1-Entrée en chicane</p>	<p>Est de la maison</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transition entre l'extérieur et l'intérieur</li> <li>• La seule ouverture vers l'extérieur est conçue de manière de favoriser l'intimité.</li> </ul>
	<p>2- Zone de transition d'entrée "Sguifa"</p> 	<p>Est de la maison</p>	<p>Elle joue plusieurs rôles :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est un espace de séjour en été car c'est un coin très frais pendant la saison chaude.</li> <li>• Elle sert à cacher la cour de la vue extérieure.</li> <li>• Elle peut être utilisée par le propriétaire de la maison comme salle de réception pour rencontrer ses amis.</li> </ul>
	<p>3- la cour intérieure « Haouch »</p> 	<p>Centre de la maison</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'espace principal et le cœur de la maison dans la tradition du Souf.</li> <li>• C'est l'espace qui relie toutes les parties de la maison.</li> <li>• Il permet l'accès à tous les espaces qui l'entourent (cuisine et chambres).</li> <li>• Il est utilisé par les habitants pour effectuer certaines activités domestiques et passer les nuits d'été.</li> <li>• C'est l'espace où se déroulent les événements sociaux et religieux.</li> <li>• Le portique situé au sud de la cour peut être utilisé par les femmes comme salle de réception pour recevoir leurs invités.</li> </ul>

	<p>4-Chambre d'invités : "Dar dyaf" ou "Dar sguifa"</p>	<p>Nord-Est de la maison</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espace réservé uniquement aux invités.</li> <li>• Se trouve uniquement dans les familles aisées.</li> </ul>	
		<p>5-Galerie de la cour « Sabat »</p>	<p>Au sud et/ou au nord de la cour.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espace couvert mais ouvert sur la cour.</li> <li>• Élément essentiel pour assurer le confort thermique lorsqu'il est exposé à la chaleur du soleil.</li> <li>• Utilisé comme zone de détente, pour recevoir des invités ou pour diverses activités familiales.</li> <li>• Sabat du sud : frais et ombragé pour une utilisation estivale.</li> <li>• Sabat du nord : bénéficie du soleil en hiver.</li> <li>• Utilisés pour effectuer des activités domestiques.</li> <li>• Offrent un espace polyvalent pour diverses activités familiales.</li> </ul>
		<p>6-la cuisine</p>	<p>Sud de la maison</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La plus grande pièce de la maison.</li> <li>• Souvent située dans les coins sud de la maison.</li> <li>• Généralement réservée aux femmes (cuisine, tâches ménagères, etc.).</li> </ul>
		<p>7-Salle de stockage "khabya"</p>	<p>Sud de la maison</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un espace destiné à stocker différents aliments (dattes, nourriture, etc.) où l'orientation est très importante pour préserver la qualité des réserves.</li> </ul>

	<p>8-chambres / Espaces de vie "Biout / dar"</p> 	<p>Nord et sud de la maison</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Réparties autour de la cour.</li><li>• Les biout du sud sont utilisées en été où il fait plus frais.</li><li>• Les biout sont surmontées de coupoles "gouba" ou de dômes "demsa".</li></ul>
---	--	---------------------------------	---

## IV.4.2. Deuxième cas d'étude : La maison contemporaine d'El Oued

### IV.4.2.1. Situation de la maison

La maison est située dans le quartier Belle Vue à El Oued, dans la partie sud de la ville, à proximité du centre-ville. Ce quartier se distingue par ses habitations auto-construites, anciennes et non planifiées, conçues localement par les résidents en fonction de leurs besoins. Les ruelles du quartier sont larges qui entraîne une faible présence d'ombre dans la zone.



**Figure IV.14 :** Les ruelles du quartier Belle Vue. (Source : auteurs).



**Figure IV.15 :** Localisation de la maison contemporaine (source Google earth 2023).

#### **IV.4.2.2. Analyse qualitative de la maison contemporaine**

Les maisons contemporaines récemment construites présentent souvent des différences marquées par rapport aux maisons traditionnelles en termes d'ouverture sur l'espace public, de matériaux utilisés et d'organisation spatiale. Ces changements ont eu un impact significatif sur les modèles socioculturels et les pratiques spatiales des habitants.

##### **IV.4.2.2.1. L'ouverture sur l'espace public**

Les maisons contemporaines ont tendance à être moins isolées de leur environnement immédiat. Au lieu de se retirer derrière des murs épais, les nouvelles constructions favorisent une plus grande interaction entre les espaces intérieurs et extérieurs. Cela se traduit souvent par des ouvertures plus grandes, telles que de grandes baies vitrées, des vérandas ou des patios, créant ainsi une continuité visuelle et spatiale entre la maison et l'espace public.

##### **IV.4.2.2.2. Matériaux de construction**

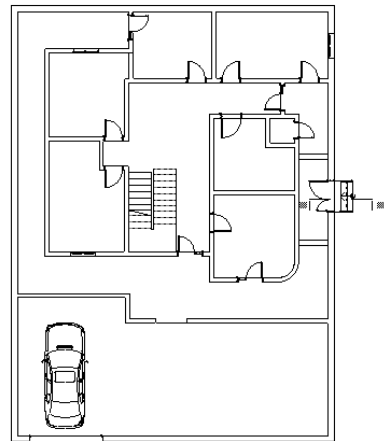
Les maisons contemporaines utilisent souvent davantage de matériaux modernes tels que le béton, par opposition aux matériaux locaux traditionnels tels que la pierre (louss) ou la terre cuite. Bien que le béton offre des avantages en termes de résistance structurelle et de flexibilité de conception, cela peut également entraîner une perte de l'identité architecturale locale et de la relation harmonieuse avec l'environnement bâti et naturel ainsi une insolation au niveau des matériaux de construction.

##### **IV.4.2.2.3. Problèmes liés aux ouvertures**

Les maisons contemporaines peuvent souffrir de problèmes liés aux ouvertures, tels que des fenêtres surdimensionnées ou mal dimensionnées par rapport aux conditions environnementales. Des fenêtres trop grandes peuvent entraîner une surchauffe excessive et des problèmes d'éblouissement, tandis que des fenêtres trop petites peuvent entraîner un manque de lumière naturelle et de ventilation adéquate. Il est important de trouver un équilibre entre l'ouverture sur l'extérieur et la création d'un environnement intérieur confortable et fonctionnel.

#### **IV.4.2.2.4. Disparition du "haouch"**

Le "haouch" est une caractéristique traditionnelle de l'architecture traditionnelle de la région, qui se réfère à une cour intérieure entourée de pièces. Dans les maisons contemporaines, cette organisation spatiale traditionnelle tend à disparaître, avec une préférence pour des espaces plus ouverts et fluides. Cela peut avoir des conséquences sur la vie privée, la convivialité et les interactions sociales des habitants.



**Figure IV.16 :** 2eme cas d'étude : la maison Contemporaine (Source auteurs).

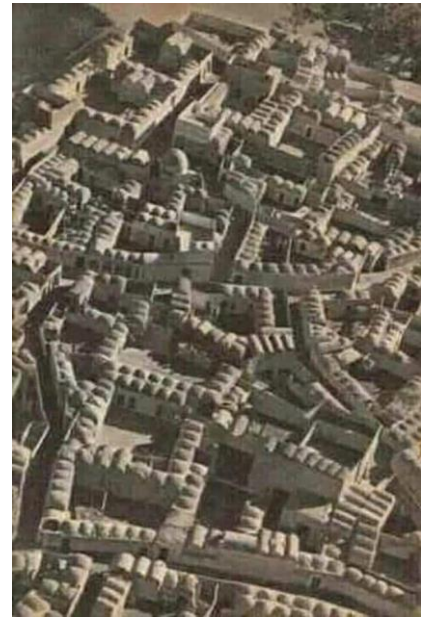
#### **IV.5. Les stratégies passives de l'architecture traditionnelle de Souf**

L'architecture vernaculaire découle de plusieurs siècles d'optimisation visant à créer un habitat confortable adapté au climat local, en utilisant les ressources et les techniques de construction disponibles. En l'absence de dispositifs mécaniques, les constructions traditionnelles font appel à des méthodes passives d'utilisation de l'énergie passive pour parvenir à des conditions de confort thermique. (Bodach et al., 2014). Pour élaborer un bâtiment doté d'un système de refroidissement passif performant, il est essentiel d'analyser toutes les origines de gain de chaleur et de concevoir des solutions visant à réduire leur impact en utilisant une série de systèmes intégrés. (Sayigh, 2019).



### IV5.1. La compacité

La mitoyenneté et la juxtaposition des murs de plusieurs maisons ont créé un tissu urbain compact et dense, illustrant ainsi la stratégie de la compacité, qui s'harmonise parfaitement avec le climat désertique de la région. Cette morphologie a permis le développement de rues étroites et ombragées. La compacité urbaine offre une forme de protection mutuelle aux habitations en réduisant leur exposition à l'irradiation solaire. Cette compacité renforce la présence d'ombres entre les bâtiments, ce qui a pour effet de minimiser à la fois les gains de chaleur en été et les pertes de chaleur internes en hiver. Par conséquent, cette ombrage à l'échelle urbaine contribue à atténuer le stress thermique dans l'environnement bâti.



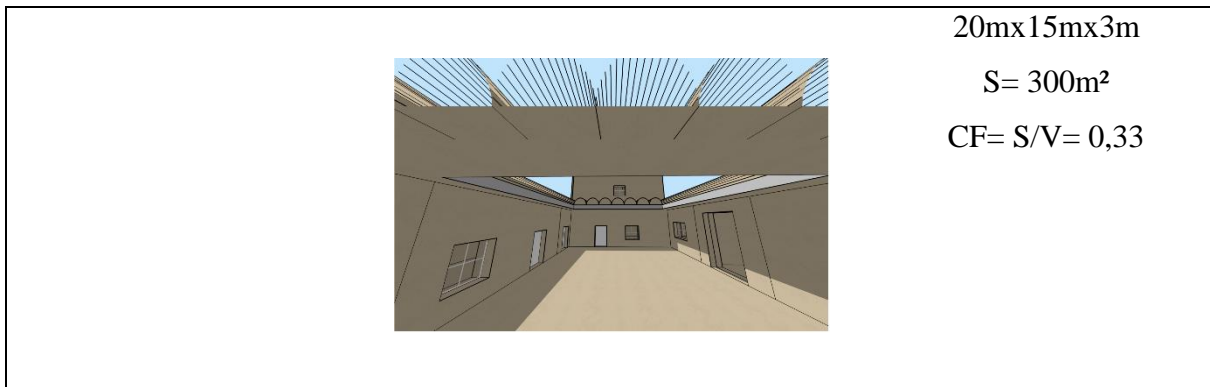
**Figure IV.17 :** morphologie urbaine compacte de Souf  
(Source :

<https://amazighouedsouf.home.blog/2018/11/02/berberes-de-oued-souf/#jp-carousel-13>, consulté le

La corrélation entre cette enveloppe et le volume qu'elle englobe est couramment désignée sous le terme de coefficient de forme  $CF=S/V$  ou d'indice de compacité d'un édifice. Ce paramètre est chargé de la caractérisation du rapport de contact entre le bâtiment et son environnement extérieur. (Bekkouche et al., 2011).

**Tableau IV.3 :** la compacité de la maison traditionnelle d'EL Oued (Source : auteurs)

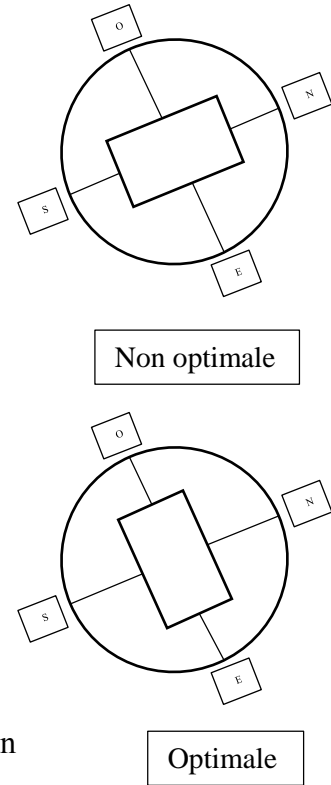
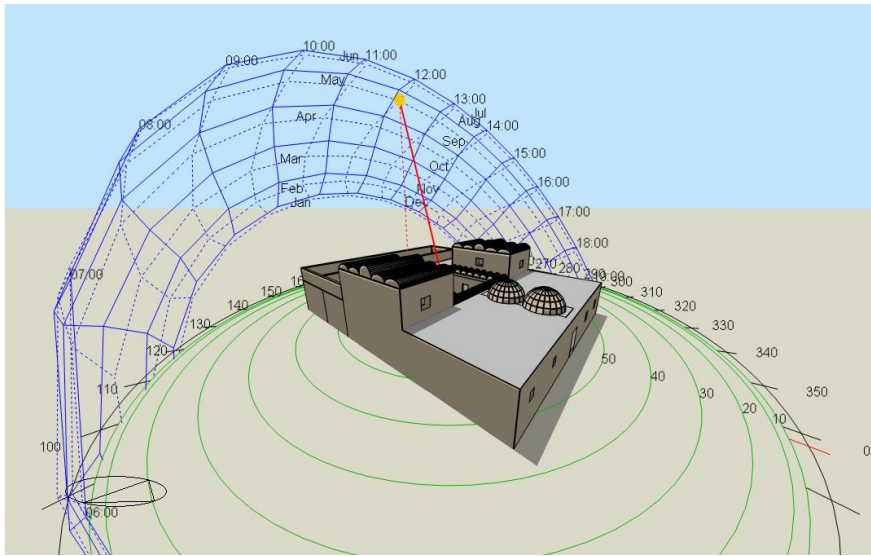
Plan	Maison	Coefficient de forme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• La cour (Haouch) : 4.5mx4.5mx 3m <math>S = 20,25 \text{ m}^2</math> <math>CF = S/V = 0,33</math></li> <li>• La maison :</li> </ul>



Le coefficient de forme est égale à 0,33 ce qui signifie que la maison traditionnelle est compacte. Cela contribue à la réduction des besoins en chauffage et en climatisation, résultant de principes géométriques visant à optimiser le volume intérieur de la structure en corrélation avec sa configuration. (Bekkouche et al., 2015)

#### **IV.5.2. L'orientation**

Parmi les stratégies passives de l'architecture traditionnelle d'El Oued, on trouve l'orientation adéquate des bâtiments résidentiels. Cette orientation est déterminée par l'intensité du soleil à l'est le matin et à l'ouest le soir, favorisant ainsi une orientation nord-sud comme la plus optimale le long de l'axe est-ouest. Cette disposition vise à éviter la surchauffe en été tout en profitant de l'ensoleillement en hiver. L'orientation a un impact sur l'angle auquel le soleil entre par les fenêtres, ce qui peut entraîner une surchauffe en été. Une orientation adéquate du bâtiment peut améliorer les avantages passifs, réduisant ainsi la nécessité de recourir à des systèmes de chauffage ou de climatisation mécaniques. (Chro, 2018) Selon Hootman Il est nécessaire que l'orientation du bâtiment tienne compte à la fois de l'exposition au soleil et de l'influence du vent. (Hootman, 2013).



**Figure IV.18 :** la stratégie passive de l'orientation optimale dans un climat désertique (source : auteurs)

### IV.5.3. Matériaux et techniques de construction

L'architecture traditionnelle d'El Oued est une architecture durable par excellence grâce à l'exploitation des matériaux locaux dans la réalisation des bâtiments résidentiels, ainsi qu'à l'adaptabilité climatique et à l'utilisation des techniques de construction élaborées par les habitants de la ville (savoir-faire).

L'inertie thermique élevée, également connue sous le nom de masse thermique, se caractérise par une construction robuste qui présente un important décalage thermique. Cela permet de réduire le stress thermique et d'assurer le confort thermique en été en diminuant les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur. De plus, elle permet de minimiser les apports de chaleur et agit comme un écran protecteur contre le rayonnement solaire, contribuant ainsi à maintenir une atmosphère agréable à l'intérieur des bâtiments.

#### IV.5.3.1. Les murs

La pierre lous se caractérise par sa composition riche en silice et en sulfate de chaux. Elle est utilisée dans la production du plâtre, qui joue un rôle essentiel en tant que liant dans



diverses applications de construction et de design intérieur. Le processus de fabrication du plâtre implique la cuisson de blocs de tafza à des températures élevées, généralement atteignant environ 140°C, ce qui provoque la déshydratation des blocs de tafza pour obtenir la poudre de plâtre. (Voisin, 2004). Cette poudre de plâtre est ensuite mélangée avec de l'eau pour former une pâte malléable qui peut être utilisée pour la création de revêtements de plâtre, de moulages, et d'autres éléments de constructions.



**Figure IV.19 :** la pierre lous (rose de sable) (source : auteurs)

Le mur de la maison traditionnelle d'El Oued se caractérise par une épaisseur de 40 à 45 cm et est composé de trois (03) couches : **a** .revêtement gypse de tefza 15 cm, **b** . la pierre lous 15 cm et **c** . gypse de tefza 15 cm, comme illustré dans la figure suivante :



**Figure IV.20 :** Coupe 3D des composants d'un mur de la maison traditionnelle d'El Oued (source : auteurs)

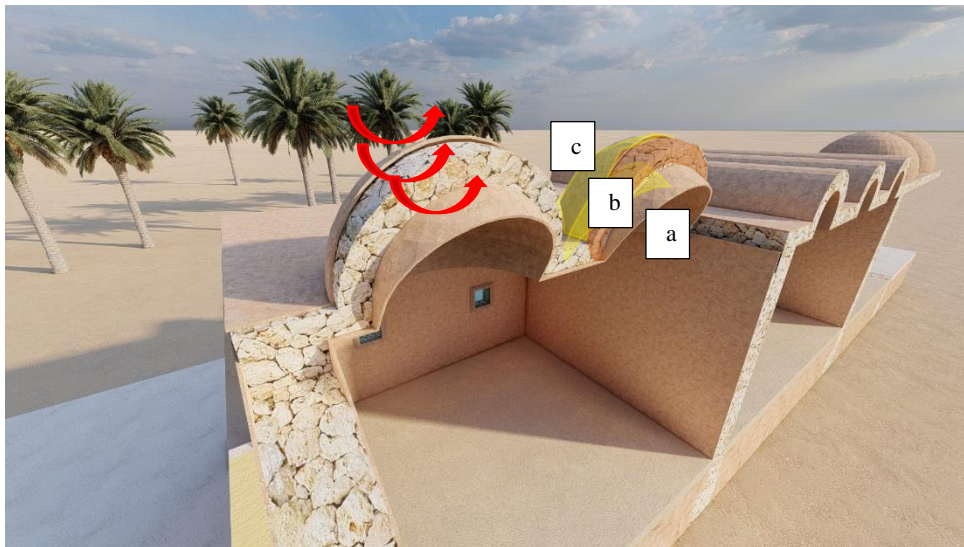
Les murs porteurs, érigés à partir de matériaux locaux tels que la pierre lous (ou pierre du désert) et le gypse de tefza, présentent une résistance à la chaleur exceptionnelle et assurent un déphasage thermique considérable, qui dépasse les 8 heures. Pour leur part, ces murs sont recouverts d'un enduit traditionnel, appliqué manuellement avec les doigts, créant ainsi une

texture rugueuse caractéristique agrémentée de rainures courbes. Ce revêtement contribue à créer des zones d'ombre sur les murs extérieurs, offrant ainsi une protection contre l'impact direct du soleil et améliorant le confort thermique à l'intérieur des habitations.

#### **IV.5.3.2. Coupole et voûtes**

Les systèmes de toiture composés de dômes et de voûtes présentent l'avantage de minimiser la surface du toit exposée au soleil. Cette conception en formes courbes offre également l'avantage de prévenir tout risque de surcharge due à l'accumulation de sable sur la toiture. Les dômes et les voûtes agissent ainsi comme une protection efficace contre l'irradiation solaire excessive tout en maintenant la stabilité structurelle des toits dans les environnements désertiques.

Une voûte ou un dôme est généralement composé de trois couches : **a.** 2,5 cm de gypse de tefza, **b.** 20 cm de lous, et à nouveau **c.** 2,5 cm de gypse de tefza.



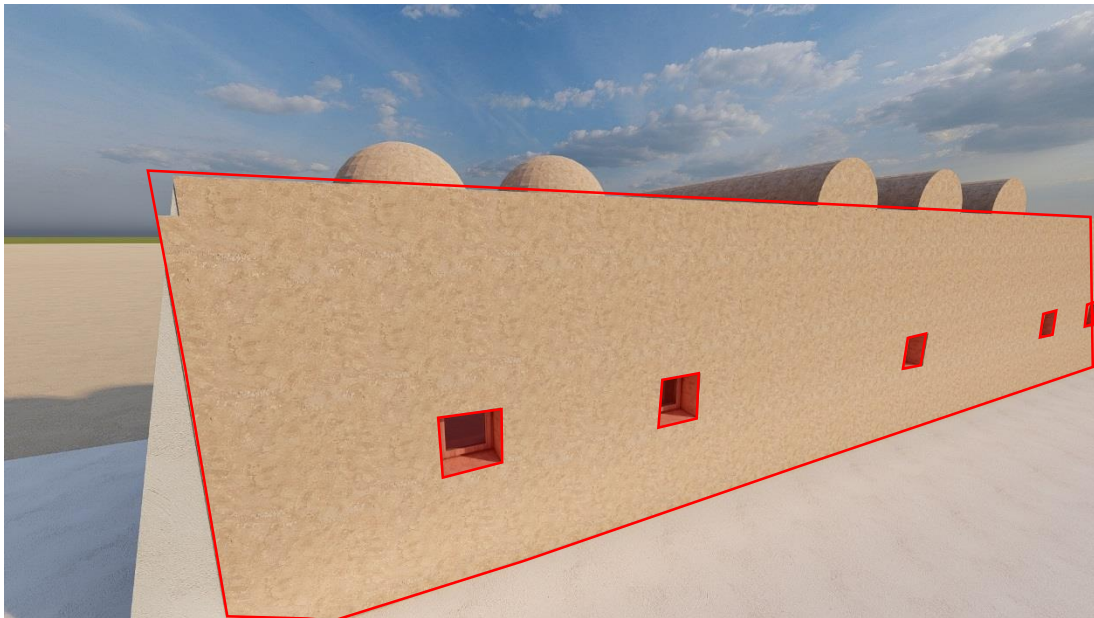
**Figure IV.21 :** Coupe 3D d'un dôme de la maison traditionnelle d'El Oued  
(source : auteurs)

#### **IV.5.4. Le ratio de la fenêtre (WWR)**

Dans un climat désertique, l'ensoleillement prévaut sur la ventilation. C'est pourquoi la maison traditionnelle d'El Oued est généralement pourvue de petites ouvertures percées au niveau de ses murs épais, dans le but de fournir l'éclairage naturel nécessaire tout en limitant la pénétration de la chaleur et des rayons solaires. Le ratio de la fenêtre présente une stratégie

passive par des dimensions réduites, placées en haut des murs, remplissent deux fonctions essentielles : préserver l'intimité des espaces intérieurs tout en réduisant l'exposition à la chaleur et au soleil. Les fenêtres positionnées en hauteur ont pour objectif d'éviter la réflexion des rayons solaires venant du sol. Une caractéristique importante est que les fenêtres sont exclusivement présentes sur les murs donnant sur la cour, tandis que les murs extérieurs demeurent dépourvus d'ouvertures. En outre, le processus naturel de convection thermique est utilisé à l'intérieur de l'espace : l'air plus chaud et plus léger s'élève et est évacué par les ouvertures des dômes, créant ainsi un courant d'air dans les pièces ouvertes, contribuant ainsi à la ventilation et au confort thermique.

En général, le ratio recommandé pour les fenêtres dans les bâtiments résidentiels situés dans un climat chaud et aride est d'environ 20 à 30 % de la surface totale des murs.



**Figure IV.22 :** le ratio de la fenêtre dans la maison traditionnelle d'El Oued  
(source : auteur)

#### **IV.5.5. La ventilation nocturne**

La ventilation naturelle repose sur l'utilisation des forces motrices naturelles pour assurer la circulation de l'air à l'intérieur d'un bâtiment, sans avoir recours à des composants mécaniques ou électriques. (Halderaker, 2016). Les systèmes de refroidissement passif sont

envisagés comme des substituts aux systèmes de ventilation mécanique (Abdallah, 2021). La chaleur thermique est évacuée vers l'extérieur pendant la nuit, lorsque la température ambiante ( $T_{ext}$ ) est plus basse que la température intérieure ( $T_{int}$ ), ce qui entraîne un refroidissement de la masse du bâtiment.

De plus, la chaleur thermique est évacuée à travers les surfaces de l'enveloppe vers le ciel dégagé pendant la nuit, contribuant au refroidissement de la masse du bâtiment. L'effet de la ventilation nocturne avec une masse thermique exposée peut réduire les charges de refroidissement, la taille de l'équipement de refroidissement, et la consommation énergétique globale. (Attia, 2012)

#### **IV.5.6. Masse thermique**

L'idée d'utiliser la masse thermique pour réduire les écarts de température diurnes semble particulièrement appropriée dans les régions chaudes et arides, qui se distinguent par d'importantes variations de température quotidiennes en été et un grand nombre de journées ensoleillées en hiver. (Meir et al., 2002).

La maison reçoit des gains de chaleur tout au long de la journée, avec des températures dépassant les  $50^{\circ}\text{C}$ , mais elle parvient à maintenir un confort thermique intérieur frais grâce à la masse thermique de son enveloppe et au comportement thermique des matériaux locaux (la pierre lous). Ces matériaux se caractérisent par une faible valeur U, ce qui se traduit par un déphasage thermique de 8 heures. La nuit quand les températures sont plus basses, un refroidissement passif est produit par la ventilation nocturne entre les ouvertures, la cour (haouch) et la masse thermique.





Figure IV.23 : la masse thermique de la maison traditionnelle d'El Oued (source : auteur)

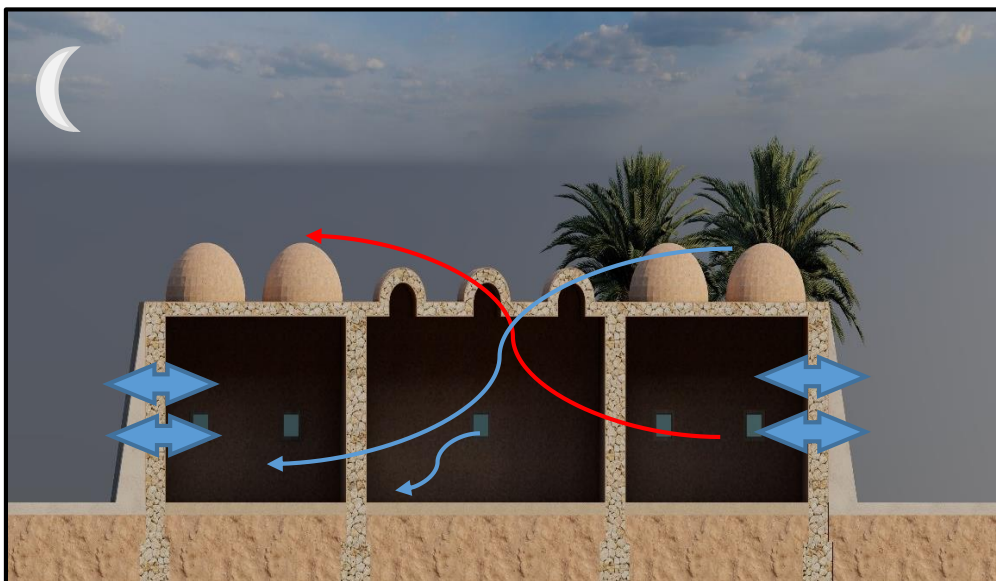


Figure IV.24 : la stratégie passive de la ventilation nocturne (effet de cheminée) dans la maison traditionnelle d'El Oued (source : auteur)

## Deuxième partie : Evaluation subjective enquête par questionnaire

#### **IV.6. L'objectif de l'enquête**

Nous avons élaboré un questionnaire dans le but de recueillir des informations sur l'expérience et les connaissances des architectes de la wilaya d'El-Oued en matière de conception de bâtiments résidentiels bioclimatique dans la région de Souf. Ce questionnaire vise à évaluer la formation académique en architecture, l'expérience pratique sur le terrain, ainsi que la sensibilité des architectes aux préoccupations environnementales. Nous souhaitons également recueillir l'opinion des architectes sur le cahier des charges utilisé dans la réalisation des bâtiments résidentiels, ainsi que leurs approches en matière de conception intégrant les données climatiques spécifiques à la région du Souf.

Nous sommes particulièrement intéressés par les retours des architectes concernant les éventuelles confrontations avec les clients, que ce soit des refus ou des modifications des conceptions proposées. De plus, nous aimerions savoir si les architectes ont déjà été sollicités pour concevoir des résidences bioclimatiques et quelles stratégies environnementales ils considèrent comme essentielles pour la conception d'un bâtiment résidentiel bioclimatique dans la région du Souf. Les réponses fournies nous permettront de mieux comprendre l'approche des architectes et d'identifier les éventuels défis liés à l'intégration des stratégies bioclimatiques dans la conception des bâtiments résidentiels.

Pour mener cette étude, nous avons distribué le questionnaire dans 10 bureaux d'études à El-Oued, chaque questionnaire contenant 20 questions différentes (Annexe D). Afin d'analyser les réponses de manière approfondie, nous avons choisi d'étudier la dépendance entre les bureaux d'études, en nous intéressant à la corrélation entre leurs données. Nous utilisons les copules comme outil pour détecter ces corrélations et trouver les relations entre la formation des architectes, leur rôle dans la prise de décision et les contraintes auxquelles ils sont confrontés lors de la phase de conception et de remise de projet. Cette approche nous permettra d'obtenir une vision plus complète des facteurs influençant la conception de bâtiments résidentiels climatiquement intégrés dans la région du Souf.

IV.6.1. Résultat et discussions

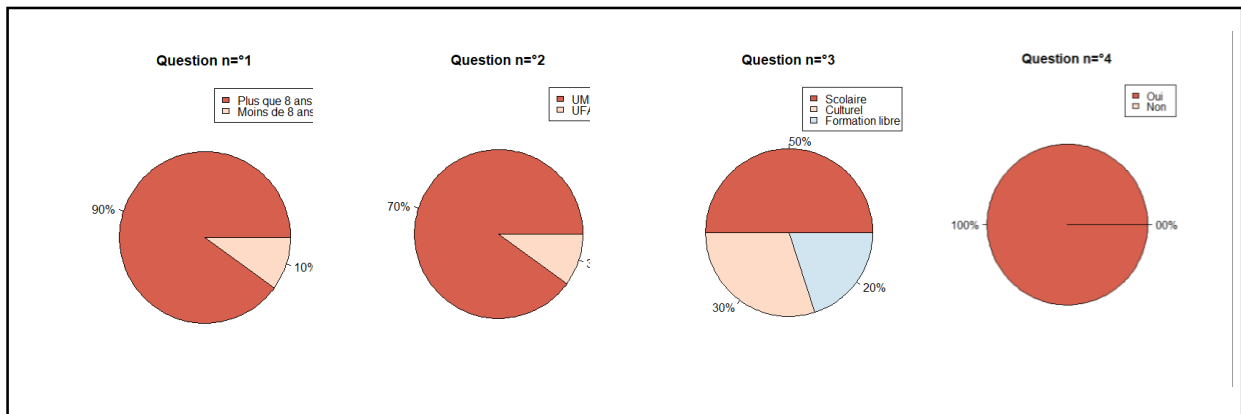


Figure IV.25 : le parcours de l'architecte (formation et expertise) (source : auteur)

Les quatre premières questions concernent la durée de l'expérience, la formation universitaire et la connaissance de l'aspect environnemental de l'architecte. Les résultats sont presque identiques. La majorité ayant plus de 8 ans d'expérience (90 %). Le lieu de formation présente 70 % de diplômés de l'université de Biskra et 20 % de l'université de Sétif. La troisième question concerne la connaissance de l'aspect environnemental du concepteur : 50 % des réponses indiquent avoir reçu une formation universitaire à ce sujet, tandis que 30 % ont effectué des recherches indépendantes et 20 % possèdent des connaissances culturelles (savoir-faire).

En dernier, on a demandé aux architectes s'ils ont de l'expérience dans la conception et la réalisation des bâtiments résidentiels. 100 % ont répondu positivement.

La cinquième question aborde le rôle des maîtres d'ouvrage lors de la prise de décisions. Toutes les réponses indiquent qu'ils interviennent dans le budget du projet, la forme et les matériaux de construction, ainsi que le caractère architectural et culturel (coupole, etc.). Une réponse supplémentaire a été ajoutée, mentionnant la superficie du projet.

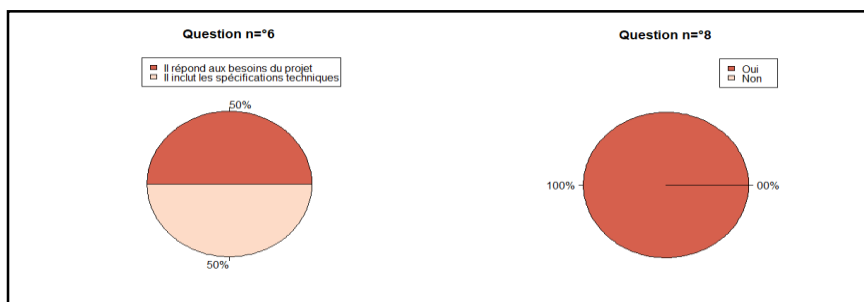


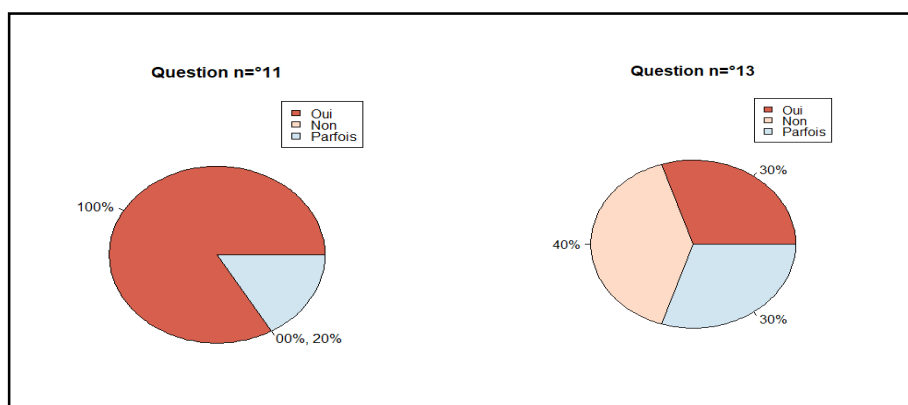
Figure IV.26 : l'avis de l'architecte sur le cahier des charges et son rôle dans la prise des décisions



La question six vise à recueillir l'avis de l'architecte sur le cahier des charges utilisé dans le cadre de la réalisation des bâtiments résidentiels. Les réponses à 100 % indiquent que le cahier des charges présente plusieurs lacunes. Dans la réponse à la septième question, où il est question des lacunes du cahier des charges, les architectes ont souligné les préoccupations liées à la superficie et au budget. Ils ont également mentionné que le cahier des charges contient des lois et des normes standard qui ne sont pas compatibles avec l'architecture de la ville et ne tiennent pas compte du climat désertique en ce qui concerne l'utilisation des matériaux de construction et les stratégies passives de l'architecture locale.

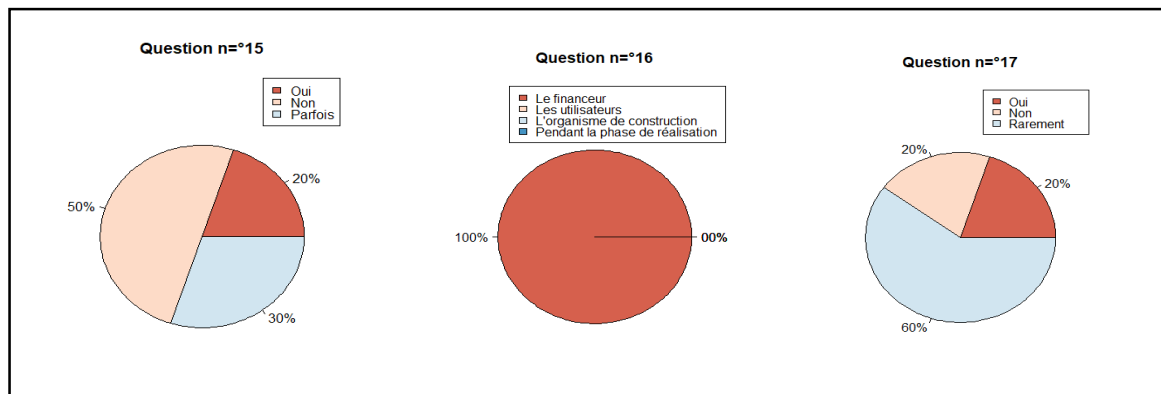
La huitième question interroge les architectes sur la prise en compte ou non des conditions climatiques de la ville d'El Oued lors de la conception des bâtiments résidentiels. Ils ont tous répondu positivement (100 % oui). Suite à la réponse positive à la huitième question, on a demandé aux architectes quelles conditions climatiques ils prennent en compte lors de la conception en tant que données climatiques. La majorité a choisi la chaleur, tandis que 20 % ont choisi l'ensoleillement et les vents. Cependant, toutes les réponses ont négligé la lumière naturelle, les vents de sable et l'humidité.

La dixième question se concentre sur la manière dont les données climatiques sont intégrées dans la conception des bâtiments résidentiels. Nous avons obtenu différentes réponses, certaines similaires et d'autres différentes, telles que l'orientation des bâtiments, la forme et l'enveloppe. Cependant, toutes les réponses ont négligé l'utilisation de matériaux de construction locaux, la conception des ouvertures, les dispositifs de protection solaire (brise-soleil), etc.



**Figure IV.27 :** l'importance du confort thermique et données climatiques lors la conception des bâtiments résidentiels (source : auteurs)

La onzième question interroge les architectes sur la prise en compte du confort thermique des occupants lors de la conception des bâtiments résidentiels. 20 % ont répondu "parfois" et 80 % ont répondu "oui". La douzième question développe la réponse à la onzième question dans le cas de réponse « oui ». Comment prendre en considération la réalisation du confort thermique des occupants ? Leurs réponses présentent différentes réactions : 30 % ont choisi les matériaux de construction, 30 % l'enveloppe et 40 % la forme géométrique. La treizième question concerne la présence de documents proposés par l'autorité de tutelle pour orienter la conception environnementale des bâtiments dans la région. Les réponses ont été divisées en 30 % pour "oui", 30 % pour "parfois" et 40 % pour "non".



**Figure IV.28 :** l'emploi des stratégies passives lors la conception des bâtiments résidentiels (source : auteurs)

La quinzième question cette fois-ci cherche à savoir si l'architecte a déjà conçu un bâtiment résidentiel éco énergétique qui a été refusé ou modifié. Les réponses présentent un taux de 50 % de "non", 20 % de "oui" et 30 % de "parfois". Ensuite, pour en savoir plus sur le rôle des clients, nous leur avons demandé s'ils avaient déjà conçu ou envisagé une résidence bioclimatique auparavant. Les réponses montrent que 20 % des clients ont rejeté l'aspect bioclimatique, 20 % ont répondu par "non", et les 60 % restants ont répondu "occasionnellement". Pour obtenir plus de détails, nous avons cherché à savoir quels aspects intéressent les clients pour la réalisation de bâtiments durables. Leur contribution se manifeste à travers la fonction et les matériaux de construction.

La dix-neuvième question aborde les stratégies environnementales qui devraient être mises en œuvre pour concevoir un bâtiment résidentiel écologique dans la région d'El' Oued. Les réponses montrent des différences dans les choix de chaque architecte. Certains ont choisi la morphologie et l'enveloppe (30 %), d'autres ont choisi la forme et la végétation (20 %),

d'autres ont choisi les matériaux de construction (30 %), et d'autres encore ont choisi l'orientation et les ouvertures.

Pour la dernière question, on a demandé aux architectes de décrire les solutions selon leur avis, permettant ainsi d'intégrer et d'appliquer légalement les stratégies bioclimatiques dans la conception initiale des bâtiments résidentiels. Les réponses sont presque similaires, nous les avons résumées comme suit :

- Entamer la réalisation d'une résidence bioclimatique modèle au sein de chaque projet, en vue de sa diffusion à l'échelle générale, tout en considérant l'intégration de la main-d'œuvre artisanale traditionnelle.
- Intégrer des réglementations et des clauses dans le cahier des charges des appels d'offres publics relatifs aux projets de construction résidentielle, tout en imposant la conformité au modèle architectural environnemental spécifique au milieu désertique au sein du système de conception desdits bâtiments résidentiels.

#### **IV.6.2. La méthode d'investigation**

##### **IV.6.2.1. Définition de la copule**

Une copule est une fonction de distribution cumulative multi-variée avec  $m$  marges uniformes dans l'intervalle  $[0,1]$ . Son but est d'exprimer et de modéliser l'interdépendance entre les variables aléatoires (les architectes). Les copules nous permettent de mesurer la dépendance entre les variables sans avoir besoin d'estimer les fonctions de distribution cumulative (CDF) des distributions marginales, grâce au théorème de Sklar (Nelsen 2006). Ce théorème stipule que toute distribution conjointe multi-variée peut être exprimée en termes de fonctions de distribution marginales univariées et d'une copule  $C$   $m$ -dimensionnelle unique définie sur  $[0,1]^m$  avec des distributions marginales uniformes standard  $(U_1, \dots, U_m)$ . Cette copule représente la structure de dépendance entre les variables. Cette relation est définie dans l'équation (1).

$$F(X_1, \dots, X_m) = C(F_1(X_1), \dots, F_m(X_m)) \dots \dots \dots (1)$$

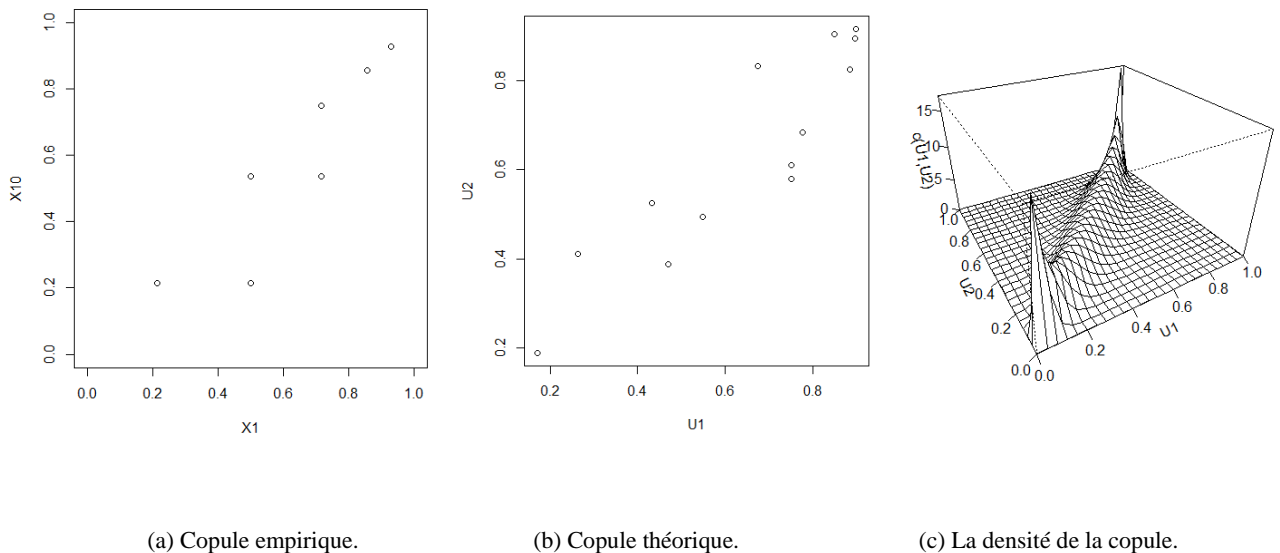
##### **IV.6.2.2. Estimation de la copule correspondante :**

Tout d'abord, il est nécessaire d'estimer la copule correspondante. Pour ce faire, nous pouvons utiliser le test goodness of fit (Genest et al., 2007) entre la copule empirique multivariée et la copule gaussienne théorique multivariée afin de déterminer si elles appartiennent à la même distribution. Le résultat du test indique une valeur de  $p = 0,3713$ , ce

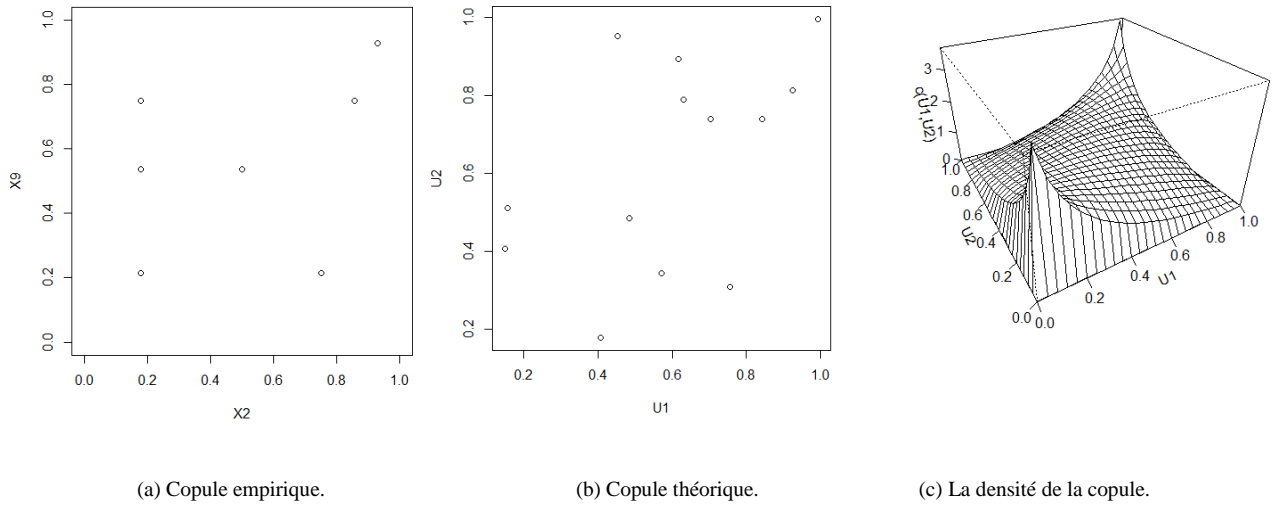
qui signifie que nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les données ne correspondent pas à une copule gaussienne. Cela signifie qu'il est possible de modéliser les données en utilisant la copule gaussienne.

Les Figures **IV.29-31** représentent le graphe des copules  $(X_1, X_{10})$ ,  $(X_2, X_{10})$  et  $(X_2, X_9)$  ou  $X$  présente l'architecte, respectivement. On distingue une corrélation positive forte entre l'architecte  $X_1$  et  $X_{10}$ , une corrélation positive entre l'architecte  $X_2$  et  $X_{10}$  et une corrélation faible négative entre l'architecte  $X_2$  et  $X_9$ .

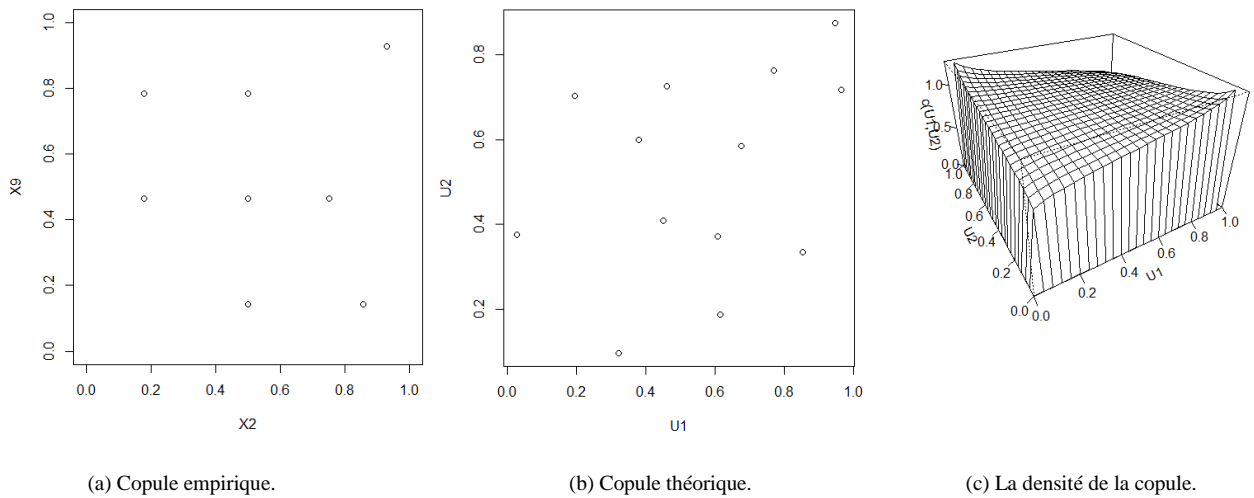
Cela nous permettra d'étudier la différence entre chaque architecte et ses réponses concernant la prise de décision lors de la phase d'esquisse et de conception. Nous avons sélectionné trois (3) scénarios représentant les faibles, moyennes et fortes corrélations entre les architectes. Les résultats sont présentés comme suit :



**Figure IV.29.** Le couple de variables  $(X_1, X_{10})$ , corrélation positive forte entre les architectes (0.964). (Source : auteur).

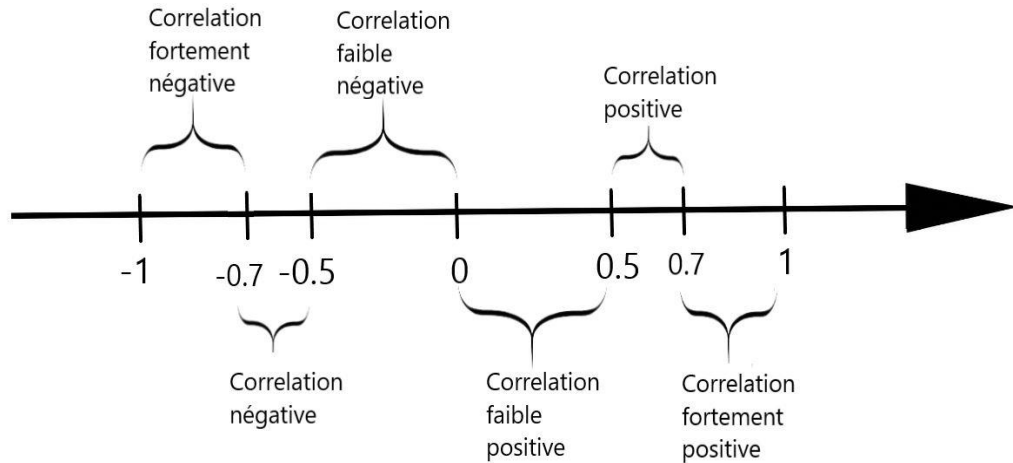


**Figure IV.30.** Le couple de variables ( $X_2, X_{10}$ ), corrélation positive (0.558). (Source : auteurs)



**Figure IV.31.** Le couple de variables ( $X_2, X_9$ ), corrélation faible négative (-0.080). (Source : auteurs).

La table IV.4 présente la matrice de corrélation entre les variables (les architectes). L'intervalle  $[-1,1]$  reflète la corrélation, allant d'une forte négative à une forte positive, en fonction des réponses des architectes. Cette relation est expliquée dans la figure IV.32.



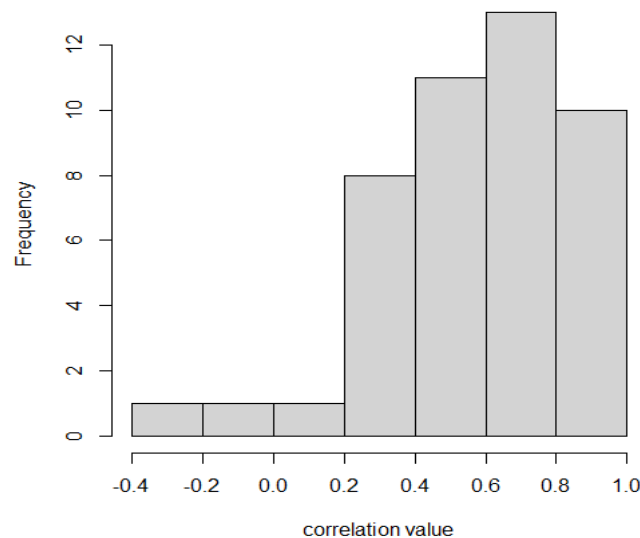
**Figure IV.32.** Schéma de corrélation.  
(Source : auteurs).

On constate que la matrice de corrélation révèle des différences dans la façon dont les architectes raisonnent. Cela signifie que chaque individu a sa propre manière de prendre des décisions, et il n'existe pas de guide d'assistance standardisé pour la conception des bâtiments résidentiels dans la ville d'El Oued.

**Tableau IV.4 :** La matrice de corrélation. (Source : auteurs)

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>
X <sub>1</sub>	1	0.467	0.383	0.467	0.721	0.541	0.608	0.721	0.694	0.964
X <sub>2</sub>	0.466	1	0.339 7	0.857	0.824	0.793	0.954	0.966	- 0.080	0.558
X <sub>3</sub>	0.383	0.339 7	1	0.316	0.589	0.273	0.446	0.150	- 0.302	0.620
X <sub>4</sub>	0.467	0.857	0.316	1	0.879	0.650	0.954	0.891	0.461	0.424
X <sub>5</sub>	0.721	0.824	0.589	0.879	1	0.698	0.953	0.716	0.492	0.707
X <sub>6</sub>	0.541	0.793	0.273	0.650	0.698	1	0.768	0.638	0.268	0.650
X <sub>7</sub>	0.608	0.954	0.446	0.954	0.953	0.768	1	0.944	0.334	0.485
X <sub>8</sub>	0.721	0.966	0.150	0.891	0.716	0.638	0.944	1	0.319	0.566
X <sub>9</sub>	0.694	-0.08	-0.30	0.461	0.492	0.268	0.334	0.319	1	0.314
X <sub>10</sub>	0.964	0.558	0.620	0.424	0.707	0.650	0.485	0.566	0.314	1

L'histogramme de la matrice de corrélation, en considérant la partie triangulaire inférieure, représente les valeurs de corrélation en fonction de leur fréquence d'occurrence. Les valeurs de corrélation comprises entre -0.4 et 0.2 présentent une fréquence inférieure à 2, ce qui indique une corrélation faible et négative. Les valeurs de corrélation entre 0.2 et 0.8, avec une fréquence de 8 à 12, démontrent une corrélation positive entre les réponses des architectes. Enfin, les valeurs de corrélation comprises entre 0.8 et 1, avec une fréquence d'environ 10, traduisent une corrélation positive forte, suggérant une forte similarité dans les réponses des architectes.



**Figure IV.33.** Histogramme de la matrice de corrélation triangulaire inférieure.  
(Source : auteurs).

## Conclusion

Ce chapitre est divisé en trois parties principales. Dans la première partie, nous avons effectué une analyse climatique de la ville d'El Oued, en examinant les conditions météorologiques et climatiques qui prévalent dans cette région. Dans la deuxième partie, nous avons mené une analyse qualitative sur les deux cas d'études : la maison traditionnelle et la maison contemporaine de la ville d'El Oued. Cette analyse nous a permis de saisir les spécificité de la maison traditionnelle laquelle était mieux adaptée aux conditions climatiques désertiques

grâce à l'utilisation de matériaux locaux tels que le lous et le tefza, ainsi qu'à la distribution des espaces en fonction des activités sociales et quotidiennes des habitants. En revanche, la maison contemporaine a négligé les considérations climatiques en utilisant des matériaux standards tels que le béton, en ayant une abondance de pièces importantes comme la cour (haouch) et en ayant recours à des systèmes mécaniques. Ensuite, nous avons examiné les stratégies passives de la maison traditionnelle d'El Oued afin de comprendre son adaptabilité climatique et son comportement thermique, dans le but de maintenir un environnement intérieur adéquat sans recourir aux systèmes mécaniques.

La troisième partie de ce chapitre présente une enquête menée auprès des architectes de la ville d'El Oued. Une série de questions a été distribuée à douze bureaux d'études dans le but de comprendre le processus de réflexion des architectes lors de la conception des bâtiments résidentiels dans la ville d'El Oued, ainsi que d'analyser le cahier des charges utilisé pendant la phase de conception. Nous avons utilisé le logiciel R pour comprendre la corrélation entre les décisions prises par les architectes lors de la conception des bâtiments résidentiels. Les résultats de cette enquête montrent à la fois des similitudes et des différences dans les réponses des architectes, mettant en évidence une diversité dans leurs décisions.

Ces résultats soulignent la nécessité de développer un guide d'assistance standardisé de conception bioclimatique qui soit inspiré des stratégies passives employées dans l'architecture vernaculaire et le proposer aux architectes, sous la forme de prescriptions techniques. Ce guide sera élaboré sous la forme de prescriptions techniques formulées dans le cadre du cahier de charge visant à assurer une adaptabilité climatique (ambiance thermique agréable) et une consommation énergétique rationnelle. Ce guide qui devra accompagner les architectes dès la phase d'esquisse, pourrait jouer un rôle clé dans la réalisation de bâtiments résidentiels assurant les conditions du confort thermique à faible consommation énergétique tout en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub>.



# **Conclusion Générale**

## **1. Synthèse de la recherche et rappel des principaux résultats**

La maîtrise de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel vise à améliorer la qualité de vie tout en réduisant l'impact de l'empreinte carbone sur l'environnement. Malheureusement, la négligence des spécificités environnementales a entraîné une utilisation abusive et irrationnelle des ressources énergétiques à l'échelle de la planète. Les régions du sud de l'Algérie où prédomine un climat désertique, illustrent clairement l'ampleur des problèmes environnementaux et énergétiques résultant des pratiques et dysfonctionnements caractérisant la production du cadre bâti résidentiel. Depuis l'indépendance, les constructions produites dans le sud ne répondent plus aux conditions climatiques extrêmement rigoureuses de la saison estivale et n'arrivent plus à assurer des conditions minimales de confort thermique. En conséquence, les habitants sont contraints de recourir à des systèmes de chauffage et de climatisation mécaniques pour maintenir un certain niveau de confort, ce qui entraîne de lourdes conséquences aussi bien économiques qu'environnementales.

Pour réduire la facture énergétique et garantir un confort climatique optimal, il est impératif d'intervenir au niveau de la conception architecturale. Cette étude a permis d'explorer ce sujet relativement à l'architecture résidentielle du sud de l'Algérie, en prenant la ville d'El Oued comme cas d'étude. En effet, le climat désertique, en particulier dans la ville d'El Oued, est caractérisé par des températures extrêmement élevées en été, très froides en hiver et une sécheresse persistante toute l'année. Face à ces conditions climatiques extrêmes, un défi majeur se pose pour assurer le confort thermique des habitants sans avoir recours à des systèmes mécaniques énergivores. Dans ce contexte, l'utilisation de stratégies passives inspirées de l'architecture traditionnelle locale, émerge comme une solution prometteuse pour créer des espaces de vie confortables tout en réduisant la consommation énergétique. En intégrant les principes de l'architecture traditionnelle qui ont historiquement permis de s'adapter à un climat hostile, il est envisageable de concevoir des bâtiments et des espaces intérieurs optimisant l'utilisation des stratégies passives.

Partant de cette assertion, la présente étude a été effectuée dans le but d'élaborer un guide de conception bioclimatique destiné aux architectes, et qui serait basé sur les conditions climatiques, sociales et économiques du contexte local. Cet outil s'inspire des stratégies passives vernaculaires et se présente comme un ensemble de connaissances et de compétences spécialement conçu pour les architectes. A travers le développement d'une approche intégrée au processus conceptuel, cet outil s'adresse aux architectes en leur fournissant les moyens de l'utiliser dès la phase d'esquisse. Il les accompagne tout au long du processus de conception et

devrait jouer un rôle clé dans la réalisation de bâtiments résidentiels assurant des conditions de confort thermique satisfaisantes avec une faible dépendance vis-à-vis des systèmes de conditionnement d'air et donc une moindre consommation énergétique.

Pour mener à bien cette recherche, un cadre d'analyse a été élaboré. Il s'appuie sur deux approches : une enquête qualitative et une évaluation quantitative suivi d'une optimisation paramétrique par simulation. L'approche qualitative vise à identifier et, ensuite, évaluer les conditions de confort thermique dans des bâtiments résidentiels anciens et contemporains. Elle porte également sur l'identification des stratégies de refroidissement passif utilisées dans l'enveloppe des bâtiments traditionnels en réponse aux conditions climatiques désertiques. Cette approche est essentiellement basée sur un travail de terrain qui a été entrepris dans la ville d'El-Oued. Elle a donné lieu à des observations et à des notes de terrain, utilisées conjointement avec une documentation photographique, des relevés et une analyse architecturale. Une analyse climatique de la ville d'El Oued est effectuée, examinant les conditions météorologiques et climatiques prévalant dans cette région. Après avoir effectué ce travail préliminaire, il a été possible de sélectionner deux types de bâtiments résidentiels ayant servis comme cas d'étude.

Ils illustrent respectivement une maison traditionnelle typique de la région du Souf et une maison contemporaine dans la ville d'El Oued, afin de permettre une comparaison pertinente entre ces deux cas d'étude. Les maisons traditionnelles du Souf sont réputées pour leurs caractéristiques de construction spécifiques favorisant une régulation thermique adéquate et une utilisation efficace de l'énergie. A l'opposé, les maisons contemporaines se distinguent souvent par des matériaux et des conceptions plus énergivores pouvant influencer négativement leur comportement thermique et leur consommation énergétique.

Cette analyse a montré que la maison traditionnelle est mieux adaptée aux conditions climatiques de la ville grâce à l'utilisation de matériaux locaux tels que le lous et le tefza, ainsi qu'à la distribution des espaces en fonction des activités sociales et quotidiennes des habitants. En revanche, la maison contemporaine néglige les contraintes climatiques, notamment, le système constructif adopté au niveau de l'enveloppe est inadapté au contexte local tels que le confirme l'emploi sans restriction aucune des matériaux standards (béton, ciment, ...), l'absence de certains espaces comme le sabat et la sguifa, les ouvertures en façade, ainsi que le recours aux systèmes mécaniques de climatisation.

D'autre part, considérant que le but de la présente étude est d'élaborer un guide de conception bioclimatique destiné aux architectes, une enquête menée auprès des architectes de la ville d'El Oued a été réalisée. Un formulaire de questions a été distribué à douze bureaux

d'études dans le but de comprendre le processus de réflexion des architectes lors de la conception des bâtiments résidentiels dans la ville d'El Oued et la place accordée à la dimension environnementale, notamment, la prise en compte des contraintes climatiques. Des questions ont également été posées sur le cahier des charges utilisé pendant la phase de conception. Le logiciel R a été utilisé pour saisir la corrélation entre les décisions et choix pris par les architectes lors de la conception des bâtiments résidentiels et ce qui les motive. Les résultats de cette enquête ont montré à la fois des similitudes et des différences dans les réponses des architectes, mettant en évidence une diversité d'approches conceptuelles. Finalement, l'enquête a mis en exergue la nécessité de développer un guide d'assistance standardisé dès la phase d'esquisse à l'intention des architectes, dans le but de prendre en charge la dimension climatique et énergétique lors du processus de conception des bâtiments résidentiels.

Afin de pousser plus avant notre appréhension du comportement thermique des bâtiments traditionnels et contemporains, une approche quantitative rigoureuse a été adoptée dans le but d'évaluer de manière exacte les conditions de confort thermique générées ainsi que leurs niveaux d'efficacité énergétique. Cette approche, fondée sur une méthodologie comparative, s'est appuyée sur des expérimentations minutieuses comprenant une campagne de mesures in situ soigneusement élaborée en vue de saisir les variations des paramètres hygrothermiques au sein des bâtiments étudiés. Ces mesures ont été effectuées sur une période prolongée, couvrant à la fois la saison hivernale et la saison estivale, et ainsi, rendant compte des fluctuations saisonnières significatives. La sélection de deux bâtiments spécifiques, à savoir une maison traditionnelle typique de la région du Souf et une maison contemporaine dans la ville d'El Oued, a été effectuée afin de permettre une comparaison pertinente entre ces deux cas d'étude.

Une fois les données collectées in situ, une simulation thermique a été réalisée à l'aide du logiciel DesignBuilder/EnergyPlus. Des modèles virtuels représentant chacun des deux bâtiments pris comme cas d'étude ont été élaborés, puis une calibration-validation des modèles a été effectuée. Une fois les modèles validés, les tests de simulation ont porté sur l'évaluation du comportement thermique de l'enveloppe de chaque bâtiment pris comme cas d'étude tout au long des périodes hivernale et estivale, en tenant compte des caractéristiques propres à chaque bâtiment et des conditions environnementales réelles.

Dans cette phase, une attention particulière a été accordée à la variabilité des conditions de mesure, afin d'assurer une représentation précise des performances thermiques des bâtiments étudiés. De plus, des études paramétriques ciblées ont été réalisées, permettant d'isoler l'influence de chaque élément constitutif de l'enveloppe du bâtiment, afin de mieux comprendre

leur impact sur la performance thermique du bâtiment considéré. De plus, afin d'atteindre des conditions satisfaisantes de confort thermique dans la maison contemporaine, une évaluation et une optimisation ont été réalisées sur les différentes stratégies passives de l'architecture traditionnelle de Souf. Pour vérifier l'efficacité de ces stratégies, une simulation multi-objective a été réalisée, et les solutions optimales ont été mises en exergue à l'aide du Front de Pareto. Cette approche a été finalisée par l'élaboration d'un modèle optimal pour la réalisation des bâtiments à faible consommation énergétique dans le sud de l'Algérie, en prenant en compte les spécificités climatiques de la région.

Pour rappel, l'objectif ultime de l'étude est de fournir des informations précieuses sur le comportement thermique et les stratégies des bâtiments traditionnels et contemporains, afin de guider les décisions de conception et de rénovation vers des solutions à la fois plus économes en énergie et plus confortables sur le plan thermique. Ces connaissances pourraient contribuer à l'amélioration des pratiques architecturales et à la promotion de bâtiments durables et performants sur le plan énergétique.

Ainsi, les tests de simulations et d'optimisations paramétriques effectués ont montré que l'emploi de certaines stratégies de conception passive telles qu'une bonne orientation, un ratio d'ouverture approprié, une ventilation naturelle adéquate ainsi que le recourt à des matériaux avec masse thermique importante et faible coefficient U (bonne isolation), sont capables d'optimiser le fonctionnement thermique de la maison contemporaine sous les conditions d'un climat désertique. L'objectif de la solution optimale était de réduire les températures intérieures pendant la saison de surchauffe et de maintenir la température interne dans une plage acceptable tout en minimisant la consommation d'énergie.

Ainsi, les résultats de l'étude montrent que l'orientation appropriée des bâtiments dans un climat chaud et aride joue un rôle crucial. L'orientation nord/sud a permis de réduire la consommation d'énergie de 17% par rapport à la consommation annuelle. Un ratio d'ouverture de 28% a permis d'améliorer le confort intérieur et de fournir un éclairage naturel adéquat dans un bâtiment allongé selon l'axe est/ouest. La stratégie passive de ventilation naturelle joue un rôle essentiel dans l'efficacité énergétique de bâtiment. Dans un climat chaud et aride, les problèmes de surchauffe estivale peuvent être minimisés grâce à un système de refroidissement passif indépendant. Celui-ci nécessite la combinaison judicieuse entre la masse thermique et les matériaux isolants au niveau de l'enveloppe et simultanément l'exploitation de la ventilation naturelle nocturne. Celle-ci garantit un refroidissement passif de l'enveloppe du bâtiment pendant la nuit grâce au système de construction massif à faible coefficient de transmission de chaleur.

Ses stratégies réunies ont servi à l'élaboration d'un modèle de référence que les architectes peuvent utiliser pour réaliser des bâtiments résidentiels assurant un confort thermique pour les occupants avec une consommation énergétique réduite. Ce modèle de référence est se présente sous forme d'une grille de recommandations destinées aux architectes en vue de son application dès la phase d'esquisse pour une conception adaptée aux conditions d'un climat désertique.

En conclusion, cette étude a ainsi contribué à une meilleure compréhension des relations complexes entre le climat, le confort thermique et la durabilité des bâtiments. Les résultats et les recommandations issus de cette recherche offrent aux architectes des moyens pratiques pour concevoir des bâtiments résidentiels durables, économes en énergie et confortables, tout en contribuant à la préservation de l'environnement. À mesure que nous continuons à faire face à des enjeux environnementaux croissants, il est impératif de mettre en œuvre ces connaissances pour façonner un avenir où les bâtiments joueront un rôle actif dans la conservation des ressources et la protection de notre planète.

## **2. Recommendations**

Un guide de conception environnementale assistant les architectes pour la réalisation de bâtiments résidentiels adaptées à leur contexte, et donc, assurant une performance thermique et énergétique, a été élaboré. L'objectif de ce guide est d'optimiser la performance thermique dans les bâtiments résidentiels soumis à un climat chaud et aride, tout en réduisant la consommation d'énergie et les périodes d'inconfort. Les recommandations clés découlant de cette étude sont les suivantes :

- Orientation adéquate : Il est recommandé de privilégier une orientation nord/sud des bâtiments. Cela permet de réduire la consommation d'énergie annuelle tout en maintenant un confort thermique optimal.
- Ratio Fenêtre/Mur (WWR) : Il est conseillé de sélectionner un ratio fenêtre/mur optimal compris entre 25 % et 30 % pour garantir un éclairage naturel suffisant. Cela atténue la dépendance vis-à-vis de l'éclairage artificiel et des systèmes mécaniques de chauffage et de refroidissement, réduisant ainsi la consommation d'énergie.
- Ventilation naturelle : L'intégration d'une ventilation naturelle efficace dans la conception des bâtiments est fortement recommandée. Cela permet de réduire la consommation d'énergie ainsi que les heures d'inconfort. La ventilation nocturne s'avère particulièrement efficace dans les climats chauds et secs en exploitant les écarts de température jour/nuit.

- Masse thermique et isolation : Le choix de matériaux de construction massifs avec une faible conductivité thermique, de préférence locaux, est préconisé. Cela contribue à maintenir une température intérieure stable et à réduire la consommation d'énergie.
- Construction bioclimatique traditionnelle : La priorité devrait être donnée à la construction traditionnelle, qui s'est avérée optimale dans les simulations en tant qu'option dominante. Cette stratégie passive de l'enveloppe massive s'avère efficace pour les climats chauds et arides.

Ce guide d'assistance vise à fournir aux architectes, concepteurs et décideurs un ensemble de directives pratiques pour la conception de bâtiments dans des environnements climatiques similaires. En suivant ces recommandations, il est possible de créer des bâtiments offrant un confort thermique optimal, une efficacité énergétique accrue, et une satisfaction des occupants, tout en minimisant l'impact sur l'environnement.

### **3. Limites et perspectives de recherche**

Tout travail de recherche admet des limites et ouvre la voie vers des investigations futures. Dans notre cas, l'étude s'est principalement concentrée sur l'optimisation de certains paramètres inhérents à l'enveloppe architecturale, plus précisément, à ses propriétés formelles et matérielles dans le but de réduire les heures d'inconfort et la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels. Le contexte climatique chaud et aride propre à l'étude étant représenté par la ville d'El Oued. Cependant, plusieurs limites doivent être mentionnées :

- Limitation au confort thermique : l'étude s'est principalement axée sur le confort thermique. Il serait judicieux d'explorer d'autres critères, tels que le confort lumineux, pour une réduction encore plus significative de la consommation énergétique.
- Négligence de l'environnement immédiat : L'impact de l'environnement immédiat sur la réduction de la consommation énergétique a été largement négligé dans l'étude. L'environnement extérieur, y compris les bâtiments voisins, peut jouer un rôle essentiel dans la modération des besoins en chauffage et en climatisation.
- L'importance de la végétation : La végétation possède un potentiel significatif en termes de protection contre les rayons solaires et de rafraîchissement de l'air pendant les périodes de surchauffe. Par conséquent, une étude portant sur le type et l'implantation de la végétation pourrait avoir un impact majeur sur la réduction de la consommation énergétique.

En ce qui concerne les perspectives de recherche, plusieurs pistes méritent d'être explorées :

- Étude de l’habitat semi-collectif et du collectif : Une analyse plus détaillée de bâtiments réalisés en semi-collectifs et collectifs permettrait d'obtenir des résultats plus précis sur la consommation d'énergie, en vue de la création de cités bioclimatiques, tout en améliorant le secteur résidentiel dans son ensemble.
- Intégration de systèmes hybrides : Bien que les stratégies passives aient prouvé leur efficacité pour créer un environnement intérieur confortable, il serait pertinent d'envisager l'intégration de systèmes hybrides. Ces systèmes pourraient tirer parti des énergies renouvelables pour étudier le comportement thermique des espaces de vie, conduisant ainsi à la conception de bâtiments résidentiels à la fois plus confortables et plus économes en énergie.



**Bibliographie :**

**Abdallah, A. S. H. (2021).** *Passive air cooling system and solar water heater with Phase Change Material for low energy buildings in hot arid climate.* Energy and Buildings, 239, 110854.

**Ahmed Q. A., 2013,** *Modelling Solar Performance of Innovative Forms for Courtyard and Atria in Different Latitudes,* University of Nottingham, UK, pp.5-23.

**Akadiri, P. O., & Olomolaiye, P. O. (2012).** *Development of sustainable assessment criteria for building materials selection.* Engineering, Construction and Architectural Management, 19(6), 666-687.

**Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., & Olomolaiye, P. O. (2012).** *Design of a sustainable building : A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector.* Buildings, 2(2), 126-152.

**Akin, Ö. (2001).** *Variants in design cognition. In Design knowing and learning: Cognition in design education* (pp. 105-124). Elsevier Science.

**Al-Sanea, S. A., & Zedan, M. F. (2011).** *Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass.* Applied Energy, 88(9), 3113-3124

**American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings; American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE):** Atlanta, GA, USA, 2002

**Amraoui, K 2021.** *Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides : cas des bâtiments résidentiels.* These de doctorat.

**Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., & Kaihoul, A. (2021)**, October. *Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria*. In Building Simulation (Vol. 14, pp. 1567-1584). Tsinghua University Press.

**Andelković, A. S., Kljajić, M., Macura, D., Munćan, V., Mujan, I., Tomić, M., ... & Stepanov, B. (2021)**. *Building energy performance certificate—a relevant indicator of actual energy consumption and savings?*. *Energies*, 14(12), 3455.

**Andújar, J. M., & Melgar, S. G. (2020)**. *Energy Efficiency in Buildings*. Huelva: MDPI.

**ASADI, S, FAKHARI, M, & SENDI, M, A (2016)**. *Study on the thermal behavior of traditional residential buildings: Rasoulia house case study*. *Journal of Building Engineering*.7.334-342. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.07.012>

**Attia S., 2012**, *Zero Energy Residential Buildings in Hot Humid Climates, A Tool for Design Decision Making*, Doctoral thesis, University catholique de louvain/ Architecture & Climate, Louvain-la- Neuve, Belgique, Pp.44-53.

**Attia, S 2012**. *A Tool for Design Decision Making Zero Energy Residential Buildings in Hot Humid Climates*. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme, LOCI.

**Attia, S., & Carlucci, S. (2015)**. *Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate*. *Energy and Buildings*, 102, 117-128.

**Attia, S., 2012**, *Zero Energy Residential Buildings in Hot Humid Climates, A Tool for Design Decision Making*, Doctoral thesis, University catholique de louvain/ Architecture & Climate, Louvain-la- Neuve, Belgique, Pp. 17-38.

**Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (1997, January)**. *Thermal comfort. sl : PLEA*.

**Babbah, S., Draoui, A., Menezo, C. H., Yezou, R., & Abdelouahab, J. B. (2005).** *Evaluation Energétique des Bâtiments au Nord du Maroc*. 12èmes Journées Internationales de Thermique, 235-38.

**Bainbridge, D., & Haggard, K. (2011).** *Passive solar architecture: heating, cooling, ventilation, daylighting and more using natural flows*. Chelsea green publishing.

**Barber, K. A., & Krarti, M. (2022).** *A review of optimization based tools for design and control of building energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 160, 112359.

**Beckman, W. A., Broman, L., Fiksel, A., Klein, S. A., Lindberg, E., Schuler, M., & Thornton, J. (1994).** *TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software*. Renewable energy, 5(1-4), 486-488.

**Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Yaiche, M. R., & Benamrane, N. (2015).** *Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate*. Journal of Building Engineering, 1, 42-52.

**Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Yaiche, M. R., Cherier, M. K., Hamdani, M., & Chellali, F. (2011).** *Introduction to control of solar gain and internal temperatures by thermal insulation, proper orientation and eaves*. Energy and buildings, 43(9), 2414-2421.

**Belhadj, N (2011)** *.L'habitat traditionnel a Oued Souf*

**Berkouk, D 2017.** *Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif: Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra*. Architecture, environnement et patrimoine.

**Bernardi, E., Carlucci, S., Cornaro, C., & Bohne, R. A. (2017).** *An analysis of the most adopted rating systems for assessing the environmental impact of buildings*. Sustainability, 9(7), 1226.

**Bielek, B. (2016).** *Green building—towards sustainable architecture.* Applied Mechanics and Materials, 824, 751-760.

**Bodach, S., Lang, W., & Hamhaber, J. (2014).** *Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal.* Energy and Buildings, 81, 227-242.

**Boemi, S. N., Irulegi, O., & Santamouris, M. (2016).** *Energy Performance of Buildings.* N. Boemi, O. Irulegi, M. Santamouris.—Cham: Springer.

**Bos, M. A., & Love, J. A. (2013).** *A field study of thermal comfort with underfloor air distribution.* Building and Environment, 69, 233-240.

**Bragança, L., Mateus, R., & Koukkari, H. (2010).** *Building sustainability assessment.* Sustainability, 2(7), 2010-2023.

**Brager, G. S., & De Dear, R. (2001).** *Climate, comfort, & natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE standard 55.*

**Brebba, C. A., & Sendra, J. J. (Eds.). (2017).** *the Sustainable City XII* (Vol. 223). WIT Press.

**Butera, F. M. (1998).** —*Principles of thermal comfort.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2(1-2), 39-66.

**C. Genest, B. Rémillard, and D. Beaudoin.** “*Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study,*” Insurance: Mathematics and economics, vol. 44, no. 2, pp. 199-213, Apr. 2009. doi: 10.1016/j.insmatheco.2007.10.005]

**Cantin, R., Moujalled, B., Guarracino, G., & Audin, R. M. (2005).** *Complexité du confort thermique dans les bâtiments.* VIème congrès Européen de Science des Systèmes, 02-04.

**Carolyn Green, eHow, 2011.** *Bioclimatic and passive design.*

- Carpino, C., Mora, D., & De Simone, M. (2019).** *On the use of questionnaire in residential buildings. A review of collected data, methodologies and objectives.* Energy and Buildings, 186, 297-318.
- Chen, D., & Chen, H. W. (2013).** *Using the Köppen classification to quantify climate variation and change : An example for 1901–2010.* Environmental Development, 6, 69-79.
- Chen, Y., Okudan, G. E., & Riley, D. R. (2010).** *Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings.* Automation in construction, 19(2), 235-244.
- Chro Ali Hama Radha 2018.** *Sustainable renovation of residential buildings in subtropical climate zone.* Architectural Engineering programme of UNIVERSITY OF PECS/.
- Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017).** *Indoor air quality and health.* International journal of environmental research and public health, 14(11), 1286.
- Clarke, J. A. (2001).** *Energy simulation in building design.* Routledge.
- Cortese, T. T. P., Almeida, J. F. S. D., Batista, G. Q., Storopoli, J. E., Liu, A., & Yigitcanlar, T. (2022).** *Understanding sustainable energy in the context of smart cities: a PRISMA review.* Energies, 15(7), 2382.
- Costanza, R., & Patten, B. C. (1995).** *Defining and predicting sustainability.* Ecological economics, 15(3), 193-196.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., & Winkelmann, F. C. (2000).** *Energy plus : energy simulation program.* ASHRAE journal, 42(4), 49-56.
- Cui, D., Liang, S., & Wang, D. (2021).** *Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification.* Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 12(3), e701.

**De Boeck, L., Verbeke, S., Audenaert, A., & De Mesmaeker, L. (2015).** *Improving the energy performance of residential buildings: A literature review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 960-975.

**De Wilde, P. (2014).** *The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation.* Automation in construction, 41, 40-49.

**Eberl, S. (2010, June).** DGNB vs. LEED: *A comparative analysis.* In *Conference on Central Europe towards Sustainable Building* (pp. 1-5).

**El Harrouni, K., Kharmich, H., & Karibi, K. (2020).** *L'architecture traditionnelle à base de terre comme outil de durabilité et moyen d'adaptation au changement climatique (chaleur et froid).* African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism, 2(2).

**Esiyok, Umit 2007.** *Energy consumption and thermal performance of typical residential buildings in Turkey,* 10.17877/DE290R-8226

**Fanger, P. O. (1973).** *Assessment of man's thermal comfort in practice.* Occupational and Environmental Medicine, 30(4), 313-324.

**Feddema, J. J. (2005).** A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*, 26(6), 442-466.

**Feng, Y., Duan, Q., Wang, J., & Baur, S. (2020).** *Approximation of building window properties using in situ measurements.* Building and Environment, 169, 106590.

**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.

**Fezzai, S., Ahriz, A., & Alkama, D. (2012).** *Evaluation des performances énergétiques de l'habitat traditionnel dans la région de SOUF.*

**Fonseca, A., Abreu, I., Guerreiro, M. J., Abreu, C., Silva, R., & Barros, N. (2018).** *Indoor air quality and sustainability management—Case study in three Portuguese healthcare units. Sustainability*, 11(1), 101.

**Genkov, A., Kudryashova, A., & Mo, T. (2015).** *Certification Schemes for Sustainable Buildings: Assessment of BREEAM, LEED and LBC from a Strategic Sustainable Development Perspective.*

**Gibberd, J. (2005, September).** *Assessing sustainable buildings in developing countries—the sustainable building assessment tool (SBAT) and the sustainable building lifecycle (SBL).* In Proceedings of the world sustainable building conference. Tokyo (pp. 1605-12).

**Givoni, B. (1992).** *Comfort, climate analysis and building design guidelines.* Energy and Buildings, 18(1), 11–23.

**Grover, R., & Vriens, M. (Eds.). (2006).** *The handbook of marketing research: uses, misuses, and future advances.* Sage.

**Guedes, M. C., Pinheiro, M., & Alves, L. M. (2009).** *Sustainable architecture and urban design in Portugal: An overview.* Renewable energy, 34(9), 1999-2006.

**Haapio, A., & Viitaniemi, P. (2008).** *A critical review of building environmental assessment tools.* Environmental impact assessment review, 28(7), 469-482.

**Halawa, E., & Van Hoof, J. (2012).** *The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview.* Energy and buildings, 51, 101-110.

**Halderaker, I. D. (2016).** *Design and Energy Analysis of Natural and Hybrid Ventilation Strategies for Norwegian Office Buildings* (Master's thesis, NTNU).

**Hama Chro, R (2018)** *Sustainable renovation of residential buildings in subtropical climate zone.*

**Hamedani, A. Z., & Huber, F. (2012).** *A comparative study of DGNB, LEED and BREEAM certificate systems in urban sustainability.* The sustainable city VII : Urban regeneration and sustainability, 1121, 121-132.

**Hassan, S. R., Megahed, N. A., Eleinen, O. M. A., & Hassan, A. M. (2022).** *Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support.* Energy and Buildings, 267, 112144.

**Henze, G. P., Pfafferott, J., Herkel, S., & Felsmann, C. (2007).** *Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control.* Energy and Buildings, 39(2), 221-235.

**Holopainen, R. (2012).** *A human thermal model for improved thermal comfort.* VTT Technical Research Centre of Finland.

**Hong, T., Chou, S. K., & Bong, T. Y. (2000).** *Building simulation: an overview of developments and information sources.* Building and environment, 35(4), 347-361.

**Höppe, P. (2002).** *Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort.* Energy and buildings, 34(6), 661-665.

**Humphreys, M. A., & Hancock, M. (2007).** *Do people like to feel 'neutral'? : Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale.* Energy and buildings, 39(7), 867-874.

**Ibrahim, H. S., Khan, A. Z., Mahar, W. A., Attia, S., & Serag, Y. (2021).** *Assessment of passive retrofitting scenarios in heritage residential buildings in hot, dry climates.* Energies, 14(11), 3359.



**İrem SÖZEN 2019.** *An approach to the evaluation of vernacular settlements in hot dry climate in terms of thermal comfort: the case of mardin*, Department of Architecture Construction Sciences Programme.

**ISO, E. (2014). 9869-1: 2014** *Thermal insulation, Building elements, In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance-Part 1: Heat flow meter method.* London : BSI.

**Iwaro, J., & Mwashu, A. (2013).** *The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model.* International Journal of Sustainable Built Environment, 2(2), 153-171.

**Jani, D. B., Bhabhor, K., Dadi, M., Doshi, S., Jotaniya, P. V., Ravat, H., & Bhatt, K. (2020).** *A review on use of TRNSYS as simulation tool in performance prediction of desiccant cooling cycle.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 140, 2011-2031.

**Jarić, M., Budimir, N., Pejanović, M., & Svetel, I. (2013).** *A review of energy analysis simulation tools.* In International Working Conference''Total Quality Management–Advanced and Intelligent Approaches'', 4 th–7 th June, 2013, Belgrade, Serbia.

**Joseph, P., & Tretsiakova-McNally, S. (2010).** *Sustainable non-metallic building materials.* Sustainability, 2(2), 400-427.

**Kaihoul, A., Sriti, L., Amraoui, K., Di Turi, S., & Ruggiero, F. (2021).** *The effect of climate-responsive design on thermal and energy performance: A simulation based study in the hot-dry Algerian South region.* Journal of Building Engineering, 43, 103023.

**Kang, H. J. (2017).** *Development of an nearly Zero Emission Building (nZEB) life cycle cost assessment tool for fast decision making in the early design phase.* Energies, 10(1), 59.

**Kanishk Bhatt 2017.** *Thermal comfort in hot dry climate.*

**Kefayati, Z., & Moztarzadeh, H. (2015).** *Developing effective social sustainability indicators in architecture.* Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 4(5), 40-56.

**Kibert, C. J. (2016).** *Sustainable construction : green building design and delivery.* John Wiley & Sons.

**Koppen, W. (1936).** *Das geographische System de Klimate. Handbuch der klimatologie.*

**Koški, Ž., Ištoka Otković, I., & Miličević, I. (2013).** *Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrakopropusnosti.* Građevinar, 65(03.), 222-233.

**Kraut, A. I., & Saari, L. M. (1999).** *Organizational surveys: Coming of age for a new era. Evolving practices in human resource management : Responses to a changing world of work,* 302-327.

**Leyzerova, A., Sharovarova, E., & Alekhin, V. (2016).** *Sustainable strategies of urban planning.* Procedia Engineering, 150, 2055-2061.

**Li, Y., Kubicki, S., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2019).** *Review of building energy performance certification schemes towards future improvement.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, 109244.

**Macpherson, R. K. (1962).** *The assessment of the thermal environment. A review.* Occupational and Environmental Medicine, 19(3), 151-164.

**Mahar, W.A.; Verbeeck, M.K.S.G.; Attia, S.** *An investigation of thermal comfort of houses in dry and semi-arid climates of quetta, pakistan.* Sustainability 2019, 11, 5203.

**Malatji, E. M., Zhang, J., & Xia, X. (2013).** *A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision.* Energy and Buildings, 61, 81-87.

**Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015).** *Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736-755.

**Mateus, R., & Bragança, L. (2011).** *Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT–H. Building and environment*, 46(10), 1962-1971.

**MAZOUZ, S: (2005)** "*Mémoire et trace : le patrimoine ksourien, en Côte. La ville et le désert, le Sahara algérien méridional, en Côte. Teremam-Karthala, Paris. 123-156.*"

**Meir, I. A., & Roaf, S. C. (2002).** *Thermal comfort–thermal mass: housing in hot dry climates. Indoor Air*, 2002, 1050-1055.

**Michalos, A. C. (1970).** *Herbert A. Simon, the Sciences of the Artificial (Book Review). Technology and Culture*, 11(1), 118.

**Mokhtari, A., Brahimi, K., & Benziada, R. (2008).** *Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. Revue des énergies renouvelables*, 11(2), 307-315.

**Morant, M. (2012).** *The Performance Gap-Non Domestic Building: Final Report.*

**Moujalled, B 2007.** *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. L’Institut des Sciences Appliquées de Lyon*

**Newsham, G. R., Mancini, S., & Birt, B. J. (2009).** *Do LEED-certified buildings save énergie ? Yes, but.... Energy and Buildings*, 41(8), 897-905.

**Nicol, J. F., & Roaf, S. (2017).** *Rethinking thermal comfort. Building Research & Information*, 45(7), 711-716.

**Nidumolu, R., Prahalad, C. K., & Rangaswami, M. R. (2009).** *Why sustainability is now the key driver of innovation. Harvard business review*, 87(9), 56-64.

**Olesen, B. (2008).** *Radiant floor cooling systems*. Ashrae Journal, 50(9), 16-22.

**OMM-N ° 1071** Organisation météorologique mondiale, 2011 L ' OMM se réserve le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n ' importe quelle langue . De courts extraits des publications de l ' OMM peuvent. (n.d.).

**Ould-Henia, A. (2003).** *Choix climatiques et construction : zones arides et semi arides : maison à cour de Bou-Saada* (No. 2795). EPFL.

**Palich, N., Ramachandran, L. Moxham, S. (2017).** *City of Port Phillip | Sustainable Design Strategy*, Australia.

**Park, J., Yoon, J., & Kim, K. H. (2017).** *Critical review of the material criteria of building sustainability assessment tools*. Sustainability, 9(2), 186.

**Pater, S. (2021).** *Long-term performance analysis using trnsys software of hybrid systems with pv-t*. Energies, 14(21), 6921.

**Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., González, R., & Maestre, I. R. (2009).** *A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes*. Energy and Buildings, 41(3), 272-278.

**Persily, A. K., & Emmerich, S. J. (2012).** *Indoor air quality in sustainable, energy efficient buildings*. Hvac&R Research, 18(1-2), 4-20.

**Radha, C. (2018).** *Sustainable renovation of residential Buildings in Subtropical Climate Zon* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Pécs, Pécs, Hungary).

**Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011).** *Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology*. Energy and Buildings, 43(9), 2356-2364.

**Rahif, R., Amaripadath, D., & Attia, S. (2021).** *Review on time-integrated overheating evaluation methods for residential buildings in temperate climates of Europe.* Energy and Buildings, 252, 111463

**Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010).** *Life cycle energy analysis of buildings: An overview.* Energy and buildings, 42(10), 1592-1600.

**Ramos Ruiz, G., & Fernandez Bandera, C. (2017).** *Validation of calibrated energy models: Common errors.* Energies, 10(10), 1587.

**Rezaallah, A., Bolognesi, C., & Khoraskani, R. A. (2012, May).** *LEED and BREEAM; Comparison between policies, assessment criteria and calculation methods.* In Proceedings of the 1st International Conference on Building Sustainability Assessment (BSA 2012), Porto, Portugal (pp. 23-25).

**Sánchez Cordero, A., Gómez Melgar, S., & Andújar Márquez, J. M. (2019).** *Green building rating systems and the new framework level (s) : A critical review of sustainability certification within Europe.* Energies, 13(1), 66.

**Santin, O. G., Itard, L., & Visscher, H. (2009).** *The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock.* Energy and buildings, 41(11), 1223-1232.

**Santy, Matsumoto, H., Tsuzuki, K., & Susanti, L. (2017).** *Bioclimatic analysis in pre-design stage of passive house in Indonesia.* Buildings, 7(1), 24.

**Sassi, P. (2006).** *Strategies for Sustainable Architecture.* ISBN10: 0-415-34142-6 (pbk)

**Sayigh, A. (Ed.). (2019).** *Sustainable vernacular architecture : how the past can enrich the future.* Springer.

**Schweber, L. (2013).** *The effect of BREEAM on clients and construction professionals.* Building Research & Information, 41(2), 129-145.

**Semahi, S.; Noureddine, Z.; Manoj, K.S.; Attia, S.** *Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria.* Build. Environ. 2019, 161, 106271.

**Semahi, S. (2013).** *Contribution méthodologique à la conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie.* Mémoire de magistère, non publié, EPAU, Alger, Algérie.

**Shad, R., Khorrani, M., & Ghaemi, M. (2017).** *Developing an Iranian green building assessment tool using decision-making methods and geographical information system: Case study in Mashhad city.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 324-340.

**Shaeri, J., Habibi, A., Yaghoubi, M., & Chokhachian, A. (2019).** *The optimum window-to-wall ratio in office buildings for hot-humid, hot-dry, and cold climates in Iran.* Environments, 6(4), 45.

**Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., & Ibrahim, T. (2014).** *A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34, 409-429.

**Shrivastava, R. L., Kumar, V., & Untawale, S. P. (2017).** *Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective.* Renewable and sustainable energy reviews, 67, 126-143.

**Sousa, J. (2012, September).** *Energy simulation software for buildings : review and comparison.* In *International Workshop on Information Technology for Energy Applications-IT4Energy*, Lisbon (pp. 1-12).

**Srivastava, A., Singh, P., Janhavi, N. N., & Singh, A. (2017).** *Green Buildings: Eco-friendly Technique for Modern Cities. Sustainable Smart Cities in India: Challenges and Future Perspectives*, 415-432.

**Suzer, O. (2019).** *Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects.* *Building and Environment*, 147, 158-170.

**Synodinos, N. E. (2003).** *The “art” of questionnaire construction : some important considerations for manufacturing studies.* *Integrated manufacturing systems*, 14(3), 221-237.

**Tebbouche, H., Bouchair, A., & Grimes, S. (2017).** *Towards an environmental approach for the sustainability of buildings in Algeria.* *Energy Procedia*, 119, 98-110.

**Teni, M., Krstić, H., & Kosiński, P. (2019).** *Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance.* *Energy and Buildings*, 203, 109417.

**Teodoreanu, E. (2016).** *Thermal comfort index.* *Present Environment and Sustainable Development*, (2), 105-118.

**Tibermacine Islem 2016.** *L'impact de la typologie des habitats collectifs sur les conditions thermiques intérieures et l'efficacité énergétique – Cas de climat chaud et sec -.*

**Torkia, A. (2021).** *Évaluation qualitative de l'impact de la tour à vent pour une ventilation naturelle et un rafraichissement passif dans les régions chaudes arides et semi arides cas des wilayas Oued Souf et Biskra*, Doctoral Dissertation, Université Mohamed Khider, Biskra.

**Trust, C. (2011).** *Closing the Gap—Lessons Learned on Realising the Potential of Low Carbon Building Design.* Carbon Trust London : London, UK.

**Van Hoof, J., Mazej, M., & Hensen, J. L. (2010).** *Thermal comfort: research and practice*. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 15(2), 765-788.

**Von Paumgarten, P. (2003).** *The business case for high performance green buildings : Sustainability and its financial impact*. *Journal of Facilities Management*, 2(1), 26-34.

**Wang, H., & Zhai, Z. J. (2016).** *Advances in building simulation and computational techniques : A review between 1987 and 2014*. *Energy and Buildings*, 128, 319-335.

**Wang, N., & Adeli, H. (2014).** *Sustainable building design*. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(1), 1-10.

**Wang, Z., Song, H., Watkins, D. W., Ong, K. G., Xue, P., Yang, Q., & Shi, X. (2015).** *Cyber-physical systems for water sustainability: challenges and opportunities*. *IEEE Communications Magazine*, 53(5), 216-222.

**Xie Yingbai, Yu Zhun, Yang Xianliang 2005.** *The evaluation on indoor thermal comfort index*, 03-030.

**Yan, D., Xia, J., Tang, W., Song, F., Zhang, X., & Jiang, Y. (2008, June).** *DeST—An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals*. In *Building Simulation* (Vol. 1, pp. 95-110). Tsinghua Press.

**Yigit, A. (1999).** *Combining thermal comfort models*. *ASHRAE Transactions*, 105, 149.

**Yung, E. H. K., Chan E. H. W.,** *Implementation challenges to the adaptive reuse of heritage buildings: Towards the goals of sustainable, low carbon cities*, *Habitat International*, 36 (2012) 352 - 361.

**Zahiri, S., & Altan, H. (2016).** *The effect of passive design strategies on thermal performance of female secondary school buildings during warm season in a hot and dry climate*. *Frontiers in built environment*, 2, 3.



**Zebari, H. N., & Ibrahim, R. K. (2016).** *Methods & strategies for sustainable architecture in Kurdistan region, Iraq. Procedia Environmental Sciences*, 34, 202-211.

**Zheng, X., Wei, C., Qin, P., Guo, J., Yu, Y., Song, F., & Chen, Z. (2014).** *Characteristics of residential energy consumption in China : Findings from a household survey. Energy Policy*, 75, 126-135.

**Zhou, G., & Wang, Y. (2000).** *Global change and climate-vegetation classification. Chinese Science Bulletin*, 45, 577-585.

**Zimmermann, R. K., Skjelmose, O., Jensen, K. G., Jensen, K. K., & Birgisdottir, H. (2019, February).** *Categorizing building certification systems according to the definition of sustainable building. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 471, No. 9, p. 092060). IOP Publishing.*

<https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/designbuilder> consulté en 2023

<https://doi.org/10.3846/13923730.2013.871330>

[https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)