

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences & Technologie

Département d'Architecture

Ref :.....



جامعة محمد خيضر – بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

المرجع:.....

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

Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement dans les Zones Arides

**Pour une optimisation des potentialités
environnementales de l'enveloppe architecturale
dans le contexte des zones chaudes et arides :
Cas des bâtiments résidentiels**

Présentée par :

AMRAOUI Khaoula

Soutenue publiquement le : **13-12-2021**

Devant le jury composé de :

Dr. BELGHAR Nouredine	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. SRITI Leila	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. HAMOUDA Abida	Professeur	Examineur	Université de Batna 1
Dr. GUEDOUH Marouane Samir	MC 'A'	Examineur	Université de Batna 1

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences & Technologie

Département d'Architecture

Ref :.....



جامعة محمد خيضر – بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

المرجع:.....

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

Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement dans les Zones Arides

Pour une adaptabilité climatique optimale de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides. Explorer l'apport du néo vernaculaire pour assister la conception des bâtiments résidentiels.

Présentée par :

AMRAOUI Khaoula

Soutenue publiquement le : **13-12-2021**

Devant le jury composé de :

Dr. BELGHAR Noureddine	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. SRITI Leila	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. HAMOUDA Abida	Professeur	Examineur	Université de Batna 1
Dr. GUEDOUH Marouane Samir	MC 'A'	Examineur	Université de Batna 1

Dédicaces

Louanges à Dieu le tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu.

Je dédie cette thèse à mes chers parents : Les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance à mon cher père et à ma chère mère dont l'amour, la patience et le sacrifice s'inscrivent à chaque page de ce document, et aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de leur juste valeur de leur amour et des efforts qu'ils ont fournis pour moi.
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A toute ma famille, mes frères et sœurs, mes belles-sœurs et mes beaux-frères. Vous m'avez toujours apporté soutien et réconfort, vos encouragements m'ont donné la force et le courage pour persévérer. Que Dieu le tout puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

A mon mari : mon soutien et ma source de puissance. Que Dieu le protège pour moi toujours.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour réaliser ce modeste travail, je vous dis à tous « MERCI ».

AMRAOUI Khaoula

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, je tiens à remercier **Allah** de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la force d'accomplir ce modeste travail.*

En préambule à cette thèse, je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux personnes qui m'ont apportée leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, ainsi qu'à la réussite de mon cursus universitaire.

*Je tiens à remercier ma directrice de thèse, Professeure **Sriti Leila** qui a toujours été attentive et disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que pour l'aide, les orientations et le temps qu'elle a bien voulu me consacrer ; sans son appui cette thèse n'aurait jamais vue le jour.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également au Professeur **Francesco Ruggiero** pour m'avoir accueillie au sein de son labo et avoir mis à ma disposition le matériel (logiciel) support de ce travail.*

*J'exprime ma profonde gratitude à Dr. **Silvia DiTuri** pour son aide, son encadrement, sa générosité et sa patience malgré la distance et ses responsabilités professionnelles.*

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 également Dr. **Machkouri Mohamed**, Dr. **Taallah Bachir** et Professeur **Zemmouri Noureddine** pour leur disponibilité et leurs précieuses aides. Ils m'ont été d'une grande utilité.*

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de mon cursus

AMRAOUI Khaoula

Résumé :

Il est bien connu que les stratégies passives appliquées dans les bâtiments traditionnels répondent de manière adéquate aux exigences climatiques et réussissent à fournir un confort intérieur maximal avec une consommation d'énergie minimale. De ce point de vue, il est intéressant d'évaluer quantitativement l'efficacité des stratégies vernaculaires pour améliorer la performance environnementale de l'enveloppe des bâtiments contemporains dans les conditions d'un climat désertique, d'autant plus que l'architecture vernaculaire est bien connue pour ses qualités d'adaptation climatique. Cette étude tente d'explorer ce sujet relativement à l'architecture résidentielle du sud de l'Algérie où le climat est très chaud et sec ce qui pose un problème de confort thermique et constitue un défi à relever lors du processus de conception des projets d'habitat.

La ville d'El-Oued qui se caractérise par un climat très chaud et aride illustre l'ampleur des problèmes environnementaux résultant des pratiques et dysfonctionnements caractérisant la production architecturale contemporaine en Algérie. Cette ville saharienne a vu depuis l'indépendance la production d'un cadre bâti résidentiel parfaitement indifférent aux conditions climatiques, ce qui pousse les habitants à se tourner vers des moyens mécaniques pour assurer un certain niveau de confort dont le coût est chaque année plus élevée. En même temps, la ville d'El-Oued présente l'avantage d'avoir servi d'assiette pour la réalisation de l'un des rares projets d'habitat conçu selon les principes de l'approche néo-vernaculaire. Il s'agit d'un ensemble d'habitations de type semi-collectif attribué aux architectes égyptiens El-Miniawy. Elle offre ainsi l'opportunité de pouvoir évaluer quantitativement des stratégies de refroidissement passif inspirées de l'architecture vernaculaire locale.

La présente recherche dont l'objectif est d'améliorer l'adaptabilité climatique des habitations en optimisant la performance thermique de l'enveloppe, a pris la ville d'El-Oued comme contexte d'étude. Les stratégies bioclimatiques passives employées dans un complexe d'habitation existant ont été investies. Ensuite, l'impact en termes de confort thermique et de consommation énergétique résultant de l'application de ces stratégies au niveau de l'enveloppe de bâtiments résidentiels contemporains, a été évalué.

La méthodologie de travail retenue est basée sur deux approches. La première est plutôt prospective qualitative fondée sur une investigation de terrain sur des bâtiments résidentiels existants sélectionnés dans la ville d'El-Oued. L'approche qualitative vise à identifier et, ensuite, évaluer les stratégies de refroidissement passif utilisées dans l'enveloppe des bâtiments en

réponse aux conditions climatiques locales. Cette approche s'est essentiellement basée sur des observations et des notes de terrain, utilisées conjointement avec une documentation photographique et des relevés architecturaux. Après avoir effectué ce travail préliminaire, il a été possible de sélectionner les bâtiments résidentiels contemporains représentant l'offre standard de logements étatiques qui ont servi comme cas d'étude. Ils illustrent respectivement une unité résidentielle typique et un bâtiment contemporain où furent appliquées des stratégies inspirées de l'architecture vernaculaire locale ; ce bâtiment est de fait considéré comme relevant de l'approche néo-vernaculaire. Les logements sélectionnés ont fait l'objet d'une étude architecturale approfondie afin d'évaluer la performance thermique de leur enveloppe ; les stratégies passives de conception climatique utilisées et leur efficacité à assurer les conditions de confort ont été également mis en évidence.

La deuxième approche retenue est quantitative. Elle a servi à quantifier ce qui a été observé et relevé de manière empirique dans la phase précédente. Dans cet objectif, deux techniques de recherche ont été appliquées : la prise de mesure in situ et la simulation. Les mesures in situ ont été effectuées durant la période estivale en utilisant l'instrument de mesure Testo et un thermomètre infrarouge. Les mesures in situ ont servi à étudier l'influence des caractéristiques architecturales et constructives de l'enveloppe sur le confort thermique. Celui-ci a été évalué à travers plusieurs paramètres, notamment : la température ambiante et surfacique, la vitesse de l'air et l'humidité relative. De son côté, la simulation thermique réalisée avec le programme Energy Plus a porté sur les éléments propres à l'enveloppe afin de mesurer leur niveau de performance vis-à-vis du confort thermique et de la consommation énergétique, et tenter ensuite leur optimisation.

A son issue, la recherche a démontré qu'en agissant de manière adéquate sur les caractéristiques architecturales et constructives de l'enveloppe, il devient possible, à la fois, d'améliorer les conditions d'adaptabilité climatique de l'enveloppe architecturale des bâtiments résidentiels soumis à un climat chaud et sec ; et d'assurer à ses occupants un confort thermique favorable tout en réduisant la consommation énergétique.

Mots-clés : Enveloppe architecturale ; adaptabilité climatique ; performance thermique ; architecture néo-vernaculaire ; stratégies passives de refroidissement ; bâtiments résidentiels ; zones chaudes et arides.

Abstract:

It is well known that passive strategies applied in traditional buildings respond adequately to climatic requirements and succeed in providing maximum indoor comfort with minimum energy consumption. From this point of view, it is interesting to quantitatively evaluate the effectiveness of vernacular strategies in improving the environmental performance of contemporary building envelopes under desert climate conditions, especially since vernacular architecture is well known for its climatic adaptation qualities. This study attempts to explore this topic in relation to the residential architecture of southern Algeria where the climate is very hot and dry which poses a thermal comfort problem and a challenge to the design process of housing projects.

The city of El-Oued, which is characterised by a very hot and arid climate, illustrates the extent of the environmental problems resulting from the practices and malfunctions characterising contemporary architectural production in Algeria. Since independence, this Saharan city has seen the production of a residential built environment that is completely indifferent to climatic conditions, which pushes the inhabitants to turn to mechanical means to ensure a certain level of comfort, the cost of which is higher every year. At the same time, the city of El-Oued has the advantage of having served as a base for the realisation of one of the rare housing projects designed according to the principles of the neo-vernacular approach. It is a semi-collective housing complex attributed to the Egyptian architect El-Miniawy. It offers the opportunity to quantitatively evaluate passive cooling strategies inspired by local vernacular architecture.

The present research, which aims to improve the climatic adaptability of dwellings by optimising the thermal performance of the envelope, took the city of El-Oued as the study context. The passive bioclimatic strategies employed in an existing housing complex were investigated. Then, the impact in terms of thermal comfort and energy consumption resulting from the application of these strategies at the envelope level of contemporary residential buildings was evaluated.

The methodology adopted is based on two approaches. The first one is rather prospective and qualitative based on a field investigation of selected existing residential buildings in the city of El-Oued. The qualitative approach aims at identifying and then evaluating the passive cooling strategies used in the building envelope in response to local climatic conditions. This approach was mainly based on observations and field notes, used in conjunction with

photographic documentation and architectural surveys. After carrying out this preliminary work, it was possible to select the contemporary residential buildings representing the standard supply of state housing that served as case studies. They illustrate respectively a typical residential unit and a contemporary building where strategies inspired by the local vernacular architecture were applied; this building is in fact considered as belonging to the neo-vernacular approach. The selected dwellings were subjected to an in-depth architectural study in order to assess the thermal performance of their envelope; the passive climate design strategies used and their effectiveness in providing comfort conditions were also highlighted.

The second approach is quantitative. It was used to quantify what was observed and empirically recorded in the previous phase. For this purpose, two research techniques were applied: in situ measurements and simulation. The in situ measurements were carried out during the summer period using the Testo measuring instrument and an infrared thermometer. The in situ measurements were used to study the influence of the architectural and constructional characteristics of the envelope on the thermal comfort. This was assessed through several parameters, including: ambient and surface temperature, air speed and relative humidity. The thermal simulation carried out with the EnergyPlus programme focused on the elements of the envelope in order to measure their level of performance with regard to thermal comfort and energy consumption, and then attempt to optimise them.

At the end of the research, it was demonstrated that by acting adequately on the architectural and constructive characteristics of the envelope, it is possible to improve the climatic adaptability of the architectural envelope of residential buildings subjected to a hot and dry climate, and to ensure favourable thermal comfort for its occupants while reducing energy consumption.

Keywords: Architectural envelope; climatic adaptability; thermal performance; neo-vernacular architecture; passive cooling strategies; residential buildings; hot and arid zones.

المخلص:

من المعروف أن الاستراتيجيات البيئية المطبقة في المباني التقليدية تلبى بشكل كاف المتطلبات المناخية وتنجح في توفير أقصى درجات الراحة في الأماكن المغلقة مع استهلاك للطاقة أقل من المعتاد. من وجهة النظر هذه، فالشيء المثير للاهتمام هو تقييم فعالية الاستراتيجيات العامة من الناحية الكمية لتحسين الأداء البيئي للغلاف المعماري في المباني المعاصرة خصوصا في ظل ظروف المناخ الصحراوي، خاصة وأن العمارة العامة معروفة جيدا بصفاتهما في التكيف مع المناخ. تحاول هذه الدراسة استكشاف هذا الموضوع فيما يتعلق بالبنية السكنية في جنوب الجزائر حيث المناخ حار وجاف للغاية، مما يطرح مشكلة الراحة الحرارية وبشكل تحديا يجب مواجهته خلال عملية تصميم مشاريع الإسكان.

مدينة واد سوف التي تتميز بمناخ حار جدا وجاف، توضح حجم المشاكل البيئية الناتجة عن الممارسات والخلل الذي يميز الإنتاج المعماري المعاصر في الجزائر. وقد شهدت هذه المدينة الصحراوية منذ الاستقلال إنتاج بيئة سكنية مبنية غير آخذة بعين الاعتبار الظروف المناخية، مما يدفع السكان للجوء إلى الوسائل الميكانيكية الحديثة لضمان مستوى معين من الراحة والتي تستنزف الكثير من الطاقات وتزداد تكاليفها كل عام. وفي الوقت نفسه تتمتع مدينة الوادي بميزة أنها كانت بمثابة قاعدة لتحقيق بعض المشاريع السكنية المصممة وفقا لمبادئ النهج العامي الجديد. إحداها والذي هو قيد دراستنا عبارة عن مجمع سكني نصف جماعي ينسب إلى المهندسين المعماريين المصريين المنيواوي. الذي بدوره يعطي لنا فرصة التقييم الكمي لإستراتيجيات التبريد السلبي المستوحاة من العمارة العامة المحلية.

وقد اتخذ هذا البحث، الذي يهدف إلى تحسين القدرة على التكيف مع المناخ للمنازل من خلال تحسين الأداء الحراري للغلاف المعماري، مدينة واد سوف كسياق للدراسة. واستثمرت استراتيجيات بيولوجية سلبية تستخدم في مجمع سكني قائم. ثم تم تقييم التأثير من حيث الراحة الحرارية واستهلاك الطاقة الناتج عن تطبيق هذه الاستراتيجيات على مستوى الغلاف المعماري للمباني السكنية المعاصرة.

تستند طريقة العمل المختارة إلى منهجين: الأول نوعي إلى حد ما، استنادا إلى تحقيق ميداني في مبان سكنية قائمة مختارة في مدينة الوادي. ويهدف النهج النوعي إلى تحديد استراتيجيات التبريد السلبي المستخدمة في الغلاف المعماري للمبنى ثم تقييمها استجابة للظروف المناخية المحلية. واستند هذا المنهج أساسا إلى الملاحظات الميدانية، التي استخدمت بالاقتران مع الوثائق الفوتوغرافية والقياسات المعمارية المأخوذة على أرض الواقع. وبعد القيام بهذا العمل الأولي، أمكن اختيار المباني السكنية المعاصرة التي تمثل العرض القياسي لمسكن الدولة التي كانت بمثابة دراسة حالة. وهي توضح على التوالي وحدة سكنية نموذجية ومبنى معاصر حيث تم تطبيق استراتيجيات مستوحاة من العمارة العامة المحلية، يعتبر هذا المبنى في الواقع جزءا من النهج العامي الجديد. وكانت المساكن المختارة موضوع دراسة معمارية معمقة

لتقييم الأداء الحراري لغلافها المعماري، كما تم تسليط الضوء على استراتيجيات التصميم المناخي السلبي المستخدمة وفعاليتها في ضمان ظروف الراحة.

أما المنهج الثاني المعتمد فهو منهج كمي. وقد استخدم لتحديد ما لوحظ وتسجيله تجريبيا في المرحلة السابقة وتحقيقا لهذه الغاية طبقت تقنيتان للبحث هما: القياس في الموقع والمحاكاة. أجريت قياسات في الموقع خلال فصل الصيف باستخدام أداة القياس وميزان حرارة الأشعة تحت الحمراء. واستخدمت القياسات في الموقع لدراسة تأثير الخصائص المعمارية والبناء للغلاف المعماري على الراحة الحرارية. وقد تم تقييم ذلك من خلال عدة معايير، بما في ذلك درجة الحرارة المحيطة والسطحية، وسرعة الهواء والرطوبة النسبية. من جانبها، ركزت المحاكاة الحرارية التي أجريت على العناصر الخاصة بالغلاف المعماري من أجل قياس مستوى أدائها فيما يتعلق بالراحة الحرارية واستهلاك الطاقة، ومن ثم محاولة تحسينها.

وفي نهايته، أثبت البحث أنه من خلال العمل بشكل كاف على الخصائص المعمارية والبناء للغلاف المعماري، يصبح من الممكن، في الوقت نفسه، تحسين ظروف التكيف المناخي للمباني السكنية الخاضعة للمناخ الحار والجاف، وضمان راحة حرارية ملائمة لشاغلها مع تقليل استهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية:

الغلاف المعماري؛ القدرة على التكيف مع المناخ؛ الأداء الحراري؛ العمارة العامية الجديدة؛ استراتيجيات التبريد السلبي؛ المباني السكنية؛ المناطق الحارة والجافة.

Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Productions scientifiques	

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Fondement théorique	02
2. Situation du problème et questions de la recherche	05
3. Hypothèses	06
4. Objectifs de la recherche	07
5. Méthodologie	08
6. Structure de la thèse	09

CHAPITRE I : LA PERFORMANCE THERMIQUE DE L'ENVELOPPE ARCHITECTURALE

Introduction	15
1.1. L'enveloppe architecturale : cerner la notion	16
1.2. L'enveloppe : rétrospective historique	16
1.3. L'enveloppe : diversité des approches	17
1.3.1. L'enveloppe comme matérialité : l'expression de la construction, des matériaux et de la technologie	18

1.3.2. L'enveloppe comme élément de transition entre l'intérieur et l'extérieur	18
1.3.3. L'enveloppe, résultat d'un ensemble complexe de facteurs socioculturels	19
1.3.4. L'enveloppe, résultat d'un équilibre complexe de facteurs climatiques	20
1.4. Les typologies de l'enveloppe du bâtiment	21
1.4.1. Les principales typologies de façades	21
1.4.1.1. La façade lourde (porteuse)	21
1.4.1.2. La façade légère (non porteuse)	22
1.4.2. Les principales typologies de la toiture	22
1.5. Définition de la performance thermique	23
1.5.1. Le comportement thermique de l'enveloppe architecturale	24
1.5.2. Impact de la performance thermique sur la consommation d'énergie	24
1.5.3. Mécanisme de transfert thermique	25
1.6. Facteurs affectant la performance thermique des bâtiments	26
1.6.1. Facteurs liés aux conditions climatiques (Paramètres liés à l'ambiance extérieure)	26
1.6.1.1. La température de l'air (T_a)	26
1.6.1.2. L'humidité relative (HR)	26
1.6.1.3. La vitesse de l'air	27
1.6.1.4. L'ensoleillement	27
1.6.1.5. Les précipitations	28
1.6.2. Paramètres liés aux éléments conceptuels	28
1.6.2.1. L'implantation	28
1.6.2.2. L'orientation	28
1.6.2.3. La forme du bâtiment	29
1.6.2.4. Dispositifs d'ombrage	30
1.6.2.5. La matérialité	30
1.6.3. Paramètres liés à l'occupation et exploitation des bâtiments	31
1.7. Le bilan thermique des bâtiments	32
1.7.1. Valeur de transfert thermique de l'enveloppe	32

1.7.1.1. Taux de transfert de chaleur à travers les murs du bâtiment	33
1.7.1.2. Taux de transfert de chaleur à travers le toit du bâtiment	33
1.7.1.3. Taux de transfert de chaleur à travers les vitrages du bâtiment	33
1.7.1.4. Taux de transfert de chaleur à travers le sol	33
1.7.2. Taux de transfert de chaleur par ventilation ou infiltration	34
1.7.3. Gains de chaleur solaire des bâtiments	34
1.7.4. Gains de chaleur internes au bâtiment	35
1.7.5. Perte de chaleur par évaporation	35
1.8. Le confort thermique dans les bâtiments	35
1.8.1. La zone de confort	36
1.8.2. Les diagrammes bioclimatiques	37
1.8.3. Modèles de confort thermique	38
1.8.3.1. L'approche du bilan thermique (le modèle de Fanger)	38
1.8.3.2. L'approche adaptative	39
1.9. Amélioration de la performance thermique de l'enveloppe	39
Conclusion	40

CHAPITRE II : L'ARCHITECTURE NÉO-VERNACULAIRE ET SON RAPPORT À L'ADAPTABILITÉ CLIMATIQUE DU BÂTIMENT

Introduction	42
2.1. Architecture néo-vernaculaire « Renaissance » de l'architecture vernaculaire	43
2.1.1. Aux origines du néo-vernaculaire	44
2.1.2. Fondements, principes et philosophie	45
2.1.2.1. Adhésion culturelle	46
2.1.2.2. L'efficacité énergétique	46
2.1.2.3. L'influence vernaculaire	47
2.1.2.4. La cohérence avec les pratiques courantes (actuelles)	47
2.1.2.5. Harmonie avec le site et l'environnement	48

2.1.3. L'enveloppe du bâtiment : du vernaculaire au néo-vernaculaire	49
2.2. Aperçu de la conception climatique de bâtiments	50
2.2.1. Définition de la conception climatique de bâtiments	50
2.2.2. L'importance de la conception adaptée au climat	50
2.3. Classification du climat	51
2.3.1. Climat chaud-humide (tropical humide)	51
2.3.2. Climat chaud et aride	52
2.3.3. Climats tempérés (latitude moyenne humide)	52
2.3.4. Climats froids (neige)	52
2.3.5. Climats polaires	52
2.4. Caractéristiques des climats chauds et secs	53
2.5. Stratégies d'adaptabilité climatiques inspirées de l'architecture vernaculaire	54
2.5.1. L'architecture vernaculaire	54
2.5.2. Principes d'adaptabilité climatique de l'architecture vernaculaire : cas des régions chaudes et arides	57
2.5.2.1. La forme du bâtiment	57
2.5.2.2. Le traitement de la toiture	59
2.5.2.3. La masse thermique	61
2.5.2.4. La couleur	64
2.5.2.5. Les stratégies d'ombrage	65
2.5.2.6. Système de fenestration	66
2.6. Exemples contemporains illustrant l'utilisation des stratégies d'adaptabilité climatique inspirées de l'architecture vernaculaire	68
2.6.1. Centre Culturel Jean-Marie Tjibaou	68
2.6.2. La maison Cuckoo, Vietnam	69
2.6.3. Centre d'accueil Jianamani, Tibet	70
2.6.4. Masdar city Abu Dhabi	71
2.7. L'expérience des bâtiments néo-vernaculaires en Algérie	73
Conclusion	73

CHAPITRE III : CONCEPTION CLIMATIQUE DES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS EN ALGÉRIE

Introduction	75
3.1. Aperçu historique	75
3.2. Au sujet de la notion d’habitat	78
3.3. Types d’habitat	78
3.3.1. Influence du facteur socioculturel sur le type d’habitat	79
3.3.2. Influence du climat sur le type d’habitat	79
3.3.2.1. Habitats des climats polaires	79
3.3.2.2. Habitats des régions tempérés	80
3.3.2.3. Habitats des climats chauds et humides	80
3.3.2.4. Habitats des climats chauds et arides	81
3.3.3. La performance du modèle vernaculaire	81
3.3.4. La performance du modèle néo-vernaculaire	82
3.3.5. Influence du facteur technique sur le type d’habitat	83
3.3.5.1. Le choix des matériaux et la mise en œuvre	84
3.3.5.2. La toiture	84
3.3.5.3. Les murs	84
3.4. L’évolution de l’habitat en Algérie	84
3.4.1. L’époque précoloniale	85
3.4.1.1. Les types d'habitat de l'époque précoloniale	85
3.4.2. L’époque coloniale	86
3.4.3. L’époque post-indépendance	87
3.5. Les types d’habitat en Algérie	88
3.5.1. L’habitat individuel	88
3.5.2. L’habitat collectif	88
3.5.3. L’habitat semi-collectif	89
3.6. Politique de l’habitat et situation du logement en Algérie	89

3.6.1. Législations de durabilité en Algérie dans le secteur résidentiel	91
3.6.2. Potentiel de la conception bioclimatique des bâtiments résidentiels en Algérie	92
3.6.3. Zones climatiques en Algérie	93
3.6.4. Caractéristiques climatiques de sud algérien	93
Conclusion	94

CHAPITRE IV : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Introduction	96
4.1. Exploration des démarches évaluatives ayant traité la question de l'adaptabilité climatique en architecture	96
4.1.1. L'utilisation de la méthode comparative	97
4.1.2. Choix du corpus et études de cas	98
4.1.3. Méthodes d'analyse des données	99
4.1.3.1. L'évaluation quantitative	100
4.1.3.2. L'évaluation qualitative	100
4.1.3.3. L'approche mixte	100
4.1.4. La simulation	101
4.1.4.1. Quelques outils de simulation thermique	102
4.1.4.2. Aperçu sur l'utilisation de la simulation comme outil d'évaluation thermique	104
4.2. Aperçu sur les recherches précédentes relatives au traitement de l'enveloppe architecturale dans les zones chaudes et arides	105
4.3. Le choix de la méthodologie	115
Conclusion	116

CHAPITRE V : IDENTIFICATION DU CONTEXTE ET PRÉSENTATION DES CAS D'ÉTUDE

Introduction	119
5.1. Un aperçu du contexte de l'étude	119
5.2. Les données climatiques de la ville d'El-Oued	121
5.3. Analyse bioclimatique de la ville d'El Oued	122
5.4. Présentation du 1er cas d'étude	125
5.5. Présentation du 2ème cas d'étude	125
5.6. Brève biographie des frères El-Miniawy	126
5.7. Philosophie et principes des architectes	127
5.7.1. L'intégration du bâtiment avec son environnement climatique	127
5.7.2. Le respect de l'aspect socio-culturel	127
5.7.3. La réalisation de bâtiments à faible coût	128
5.7.4. L'utilisation de formes, de matériaux et de méthodes de construction traditionnels	128
5.8. Quelques projets réalisés par les frères El-Miniawy en Algérie	129
5.8.1. Projet 200 logements à Ouled Djellal	129
5.8.2. Le village de Maàdher M'sila	130
5.8.3. Projet des 400 logements à El-Oued (2ème cas d'étude)	131
Conclusion	138

CHAPITRE VI : ÉVALUATION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES STRATÉGIES PASSIVES APPLIQUÉES

Introduction	140
6.1. Adaptabilité climatique des 02 bâtiments de référence	140
6.1.1. Propriétés matérielles et système constructif des unités d'habitation du « Quartier 19 Mars 1962 » : Cas d'étude -1-	141
6.1.2. Performance climatique du Cas d'étude -1-	142

6.1.2.1. Le choix de la forme et volumétrie	142
6.1.2.2. Le choix des matériaux	143
6.1.2.3. Le traitement de la toiture	145
6.1.3. Propriétés matérielles et système constructif des unités d’habitation du « Quartier 400 logements El-Miniawy » : Cas d’étude-2-	146
6.1.4. Performance climatique du cas d’étude -2-	147
6.1.4.1. Le choix de forme et de la volumétrie	147
6.1.4.2. Le choix des matériaux	148
6.1.4.3. Le traitement du soubassement	151
6.1.4.4. L’utilisation du patio	151
6.1.4.5. Le traitement de la toiture	153
6.1.4.6. La protection des ouvertures	154
6.2. La campagne de mesures in Situ	155
6.2.1. Protocole de la prise des mesures	156
6.2.1.1. Périodes des prises de mesures	156
6.2.1.2. Le lieu de prise de mesures	156
6.2.1.3. Conditions de la prise des mesures	157
6.2.1.4. Instruments de mesures	157
6.2.2. Résultats des mesures et discussion	158
Conclusion	160

CHAPITRE VII : SIMULATION ET ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Introduction	162
7.1. Processus de modélisation et simulation dans Design Builder	162
7.1.1. Données relatives au site et aux facteurs climatiques	163
7.1.2. Modélisation du bâtiment	163
7.1.3. Matérialité de l’enveloppe	164
7.1.4. Définition de l’activité et du mode d’occupation	164

7.1.5. Ombres des bâtiments	165
7.1.6. Services et fonctionnement	165
7.2. Les données météorologiques	165
7.3. Modélisation des bâtiments étudiés	166
7.4. Caractéristiques thermiques	169
7.4.1. Infiltration (en été)	169
7.4.2. Renouvellement de l'air (toutes saisons)	169
7.4.3. Scénario d'occupation	170
7.5. Simulation et validation	170
7.5.1. Protocole de simulation	170
7.5.2. Validation du modèle de la simulation	170
7.6. Résultats et discussion	178
Conclusion	181

CONCLUSION GÉNÉRALE

Synthèse des principaux résultats	184
Recommandations	188
Les limites de la recherche et ses perspectives futures	189

BIBLIOGRAPHIE

Liste des figures

Figure 1.1 : Vue en perspective des bâtiments examinés	30
Figure 1.2 : Relation humidité (RH) / température (T) diagramme basé sur la zone de confort selon les normes ASHRAEE 55-1992	36
Figure 1.3 : Digramme bioclimatique d'Olgay	37
Figure 1.4 : Digramme bioclimatique de Givoni	38
Figure 2.1 : Effet de la conception passive sur la consommation énergétique	51
Figure 2.2 : Carte mondiale de la classification climatique de Köppen-Geiger	53
Figure 2.3 : Carte des types de climat en Afrique (Le climat chaud et sec est présenté par la couleur rouge)	53
Figure 2.4 : Différentes formes d'architecture vernaculaire à travers le monde	56
Figure 2.5 : (a) Vieilles maisons avec cour intérieure à Sharjah. (b) L'utilisation de la cour intermédiaire -patio-	59
Figure 2.6 : (a) Utilisation des dômes dans la région de Souf. (b) L'usage de la voûte nubienne	61
Figure 2.7 : Vue de face et coupe sur mur mixte à assise en bois de palmier, Biskra, Algérie	63
Figure 2.8 : (a) Vue d'un moucharabieh. (b) Détails et fonctionnement du moucharabieh	67
Figure 2.9 : Centre Culturel Jean-Marie Tjibaou. Nouvelle-Caledonia, 1991/1998	69
Figure 2.10: Cuckoo House, Vietnam, 2012	70
Figure 2.11 : Centre d'accueil Jianamani, Tibet	71
Figure 2.12 : Vues sur Masdar city Abu Dhabi	72
Figure 3.1 : La répartition de logement selon leur type	89
Figure 3.2 : Les zones climatiques d'été en Algérie	93
Figure 3.3 : Les zones climatiques d'été en Algérie	93
Figure 4.1 : Schéma qui présente l'intégration de la simulation thermique au cours du processus conceptuel	102

Figure 4.2 : L'interface du logiciel Design Builder	103
Figure 4.3 : L'interface du logiciel Grasshopper	104
Figure 4.4 : Éléments et matériaux de construction	109
Figure 4.5 : Plan et coupes de l'ancienne maison de Ghadamès	111
Figure 4.6 : (a) Toit pour s'asseoir et dormir la nuit en été. (b) Ouverture au niveau du toit	112
Figure 4.7 : Stratégies de ventilation et d'éclairage naturels dans une ancienne maison	112
Figure 5.1 : La situation de la Wilaya d'El Oued	120
Figure 5.2 : Température journalière	121
Figure 5.3 : Humidité journalière	122
Figure 5.4 : Rayonnement global journalier	122
Figure 5.5 : Le diagramme bioclimatique de Givoni pour la ville d'El-Oued	123
Figure 5.6 : Localisation du 1 ^{er} cas d'étude	125
Figure 5.7 : Vue extérieure du 1 ^{er} cas d'étude	125
Figure 5.8 : Localisation du 2 ^{ème} cas d'étude	126
Figure 5.9 : Vue extérieure du 2 ^{ème} cas d'étude	126
Figure 5.10 : Quelques photos du projet '200 logements à Ouled Djellal	129
Figure 5.11 : Le village de Maàdher en construction	131
Figure 5.12 : (a) Le matériau local 'tufla'. (b) L'utilisation de la voûte et des coupole	133
Figure 5.13 : Rez-de-chaussée utilisé pour les activités commerciales et sociales	133
Figure 5.14 : Plans et typologies de différentes unités	134
Figure 5.15 : L'assemblage des unités de logement procure une volumétrie riche et ombragée	135
Figure 5.16 : L'opération du regroupement de deux logements	136
Figure 5.17 : Jeu de pleins et de vides et diversité du système de fenestration	137
Figure 6.1 : La volumétrie du premier cas	142
Figure 6.2 : Imagerie solaire de la façade principale	142
Figure 6.3 : Coupe détaillée du premier cas d'étude	143

Figure 6.4 : Coupe détaillée du mur extérieur	144
Figure 6.5 : Détail de la paroi interne et de plancher	144
Figure 6.6 : Détail de la toiture	145
Figure 6.7 : Vue extérieure du dôme et section détaillée	145
Figure 6.8 : Imagerie solaire de la toiture	146
Figure 6.9 : Zoom d'imagerie solaire du dôme	146
Figure 6.10 : La volumétrie du 2 ^{ème} cas d'étude	148
Figure 6.11 : Image solaire de la façade principale	148
Figure 6.12 : Coupe détaillée du deuxième cas d'étude	148
Figure 6.13 : Coupe détaillée d'un mur extérieur	150
Figure 6.14 : Détail d'une paroi intérieure	150
Figure 6.15 : Tufla (rose de sable)	150
Figure 6.16 : Gypse du Tafza	150
Figure 6.17 : Détail de la ventilation du sous-sol	151
Figure 6.18 : Vue du patio central	152
Figure 6.19 : Schéma de ventilation du patio central	152
Figure 6.20 : Section détaillée du dôme	154
Figure 6.21 : Section transversale détaillée de la voûte	154
Figure 6.22 : Imagerie solaire du toit du 2 ^{ème} cas	154
Figure 6.23 : Zoom d'imagerie solaire de la voûte	154
Figure 6.24 : Vue de Moucharabieh	155
Figure 6.25 : Détail de Moucharabieh	155
Figure 6.26 : Présentation des instruments de mesure - Testo 480 -	157
Figure 6.27 : Températures externes et internes mesurées pour les 2 bâtiments pris comme cas d'étude	159
Figure 6.28 : Humidités externes et internes mesurées pour les 2 bâtiments pris comme cas d'étude	159
Figure 7.1 : Données météorologiques relatives à la ville d'El Oued	166
Figure 7.2 : Modèle - Design Builder - du 1 ^{er} cas d'étude	167

Figure 7.3 : L'organisation spatiale du 1 ^{er} cas	167
Figure 7.4 : Modèle - Design Builder - du 2 ^{ème} cas d'étude	168
Figure 7.5 : L'organisation spatiale du 2 ^{ème} cas	168
Figure 7.6 : Pourcentage d'erreur des températures extérieures	173
Figure 7.7 : Pourcentage d'erreur des températures interne du 1er cas (a) et 2 ^{ème} cas (b)	173
Figure 7.8 : Pourcentage d'erreur des humidités internes du 1er cas (a) et 2 ^{ème} cas (b)	174
Figure 7.9 : Humidités de l'air intérieur simulées et mesurées du 1 ^{er} cas	176
Figure 7.10 : Températures simulées et mesurées du 1 ^{er} cas	176
Figure 7.11 : Humidités de l'air intérieur simulées et mesurées 2 ^{ème} cas	177
Figure 7.12 : Températures simulées et mesurées 2 ^{ème} cas	177
Figure 7.13 : Températures de l'air extérieures et intérieures des cas étudiés	180
Figure 7.14 : Variation du taux d'humidité intérieure pour les cas étudiés	180
Figure 7.15 : Détail des fluctuations de la température de l'air extérieure et intérieure des cas étudiés	181

Liste des tableaux

Tableau 6.1 : Matériaux constituant l'enveloppe du cas d'étude -1-	144
Tableau 6.2 : Matériaux constituant l'enveloppe du deuxième cas d'étude	149
Tableau 7.1 : Calcul de pourcentage d'erreur	172
Tableau 7.2 : Calcul du coefficient d'inégalité IC	175

Nomenclature

Abréviations

ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
BIM	: Building Information Modeling (Modélisation des données du bâtiment).
BTC	: Bloc de Terre Compressé.
BTS	: Béton de Terre Stabilisé.
CAO	: Conception Assistée par Ordinateur.
CVC	: Chauffage, Ventilation et Climatisation.
CV(RMSE)	: Coefficient of Variance of the Root Mean Square Error (Coefficient de variance de l'erreur quadratique moyenne).
DOE	: Department of Energy (Département de l'énergie des US).
DTR	: Documents Technique Réglementaire et Normalisation.
ECO-BAT	: Ecological Building (bâtiment écologique).
HPE	: Haute Performance Énergétique.
IC	: The Inequality Coefficient (Le coefficient d'inégalité).
IPB	: Indice de Performance Du Bâtiment.
MBE	: Mean Bias Error (Erreur moyenne de biais).
NREL	: National Renewable Energy Laboratory.
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé.
ONU	: Organisation des Nations Unies.
OTTV	: Overall Thermal Transfer Value (la valeur globale de transfert thermique).
PMV	: Predicted Mean Vote (Vote Moyen Prévisible).
STD	: Simulation Thermique Dynamique.
UNEP-SBCI	: The UN Environment Programme (UNEP) Sustainable Buildings and Climate Initiative (UNEP-SBCI).
ZHUN	: Zones d'Habitat Urbain Nouvelles.
ZUP	: Zone à Urbaniser en Priorité.

Indices :

CLO	: Unité d'isolement vestimentaire.
HR	: Humidité relative (%).
R	: Résistance thermique d'un matériau (m^2k/w).
Ta	: Température ambiante de l'air ($^{\circ}C$).
U	: Coefficient de transmission thermique (w/m^2k).

Symboles :

Cf	: Coefficient de forme.
ρ	: Densité, (kg/m^3).
λ	: Conductivité thermique (w/mk).
V	: Taux de ventilation, (m^3/s).
qv_{inf}	: Débit par infiltration du vent.
$qv_{o_{inf,i}}$: Taux d'infiltration de l'ouverture.
$S_{ouv,i}$: Surface (m^2) de l'ouverture (i).
Q_v	: Débit de ventilation spécifique.
V_h	: Volume de l'appartement (pièces à vivre) (m^3).
$Q_{vréf}$: Débit d'extraction de référence.
Q_{vmin}	: Débit d'extraction minimal (m^3/h).
Q_{vmax}	: Débit d'extraction maximal (m^3/h).

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Publications

Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., & Kaihoul, A. (2021). *Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria*. *Building Simulation*, 14(5), 1567–1584. doi:10.1007/s12273-021-0764-0

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. doi:10.1016/j.jobee.2021.103023.

Communications et participations

Amraoui, K. (2017). *Le SIG, pour une démarche de développement durable*. Journée d'étude sur l'utilisation des technologies modernes pour la durabilité et la bonne gouvernance - Réalité et Espoir -, Oum El Bouaghi, Algérie.

Amraoui, K., Sriti, L., Ilich, E. (2017). *Les espaces publics urbains : attractivité-répuulsivité, fréquentation et usage cas de jardins communal Ain M'lila et Bachir Ben Nacer Biskra*. La 6ème journée d'étude, Espaces Publics Urbains, composition urbaine et ambiances - Entre théorie & Pratique -, Oum El Bouaghi, Algérie.

Amraoui, K. (2017). *Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides : cas des bâtiments résidentiels*. Workshop Algéro-Portugais : patrimoine et cultures historiques de l'eau dans les milieux arides et semi-aride, Biskra, Algérie.

Amraoui, K., Sriti, L. (2017). *Investigation sur l'impact environnementale de l'enveloppe architecturale et son rôle de modulateur thermique à l'échelle urbaine*. Le 1^{er} colloque international : Préfigurer et concevoir le paysage architectural et urbain dans la perspective d'une qualité durable de la ville du futur des pays Méditerranéens- Climat, société, concept et outils opérationnels, Batna, Algérie.

Amraoui, K., Sriti, L. (2017). *L'impact de l'enveloppe architecturale sur la performance énergétique d'un bâtiment dans les zones à climat chaud et arides. Congrès International : bâtiment et villes durables, Fès, Maroc.*

Amraoui, K., Sriti, L. (2018). *La détérioration visuelle de l'enveloppe du cadre bâti en Algérie – cas des bâtiments résidentiels- Biskra. Journée d'étude : infractions urbaines dans les villes Algériennes : entre absence de culture urbaine et incapacité des mécanismes de surveillance et de discussion, Oum El Bouaghi, Algérie.*

Amraoui, K. (2018). *Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides : cas des bâtiments résidentiels. Workshop international zone humide et villes durables, Biskra, Algérie.*

Amraoui, K. (2018). *Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides : cas des bâtiments résidentiels. Le 1er colloque doctoral sur la méthode d'élaboration d'une thèse et d'une publication en Doctorat, El Oued, Algérie.*

Amraoui, K. (2018). *Investigation sur l'impact de la façade en double peau sur la performance énergétique d'un bâtiment dans les zones à climat chaud et aride. La première conférence nationale sur la protection de l'Environnement et les Energies Renouvelables, Batna, Algérie.*

Amraoui, K. (2019). *Certificate of attendance. International Education and Research Services-UK. The Research Methods Workshop at the department of architecture delivered by IERS-UK and organized by LACOMOFA Laboratory, Biskra, Algeria.*

Amraoui, K. (2020). *La qualité architecturale en conception et réalisation, la concurrence et le management de la qualité totale. La deuxième conférence nationale sur les marchés publics, Sétif, Algérie.*

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Fondement théorique

À l'instar de la plupart des pays en développement, l'Algérie a dû faire face, depuis son indépendance, à plusieurs défis dont une surcroissance et une explosion démographique ainsi qu'un exode rural massif et une surpopulation urbaine. Face à cette situation, les pouvoirs publics ont dû prendre des décisions d'urgence, notamment, dans le secteur du bâtiment en réalisant des projets de construction qui, entre autres, ne respectaient pas les normes de qualité architecturale et négligeaient les questions climatiques et environnementales.

Malheureusement, ces mesures d'urgence ont, non seulement, eu des effets négatifs sur la qualité de vie des habitants en termes de confort thermique intérieur, de santé et de bien-être, mais ont, également, conduit à des bâtiments entièrement dépendants de la climatisation mécanique pour assurer le minimum requis pour le bien-être physique des occupants. Au final, ces bâtiments sont devenus d'énormes consommateurs d'énergie (Rais et al., 2019 ; Semahi et al., 2019 ; Zeinelabdein et al., 2019). Cette situation regrettable qui pèse sur le secteur du bâtiment en Algérie est en contradiction avec la tendance mondiale vers un avenir durable. En effet, face au risque de réchauffement climatique et à la disparition prépondérante des énergies fossiles, la protection de la planète est devenue une préoccupation majeure et une priorité pour tous les acteurs et intervenant du bâtiment pour garantir un avenir plus sûr et un environnement plus sain aux générations futures.

En effet, la consommation énergétique attribuée au secteur du bâtiment correspond, aujourd'hui, à environ un tiers des besoins d'énergie dans le monde et ce secteur est responsable d'une part égale des émissions de dioxyde de carbone dans les pays développés et en développement (Rais et al., 2019). De ce point de vue, il devient impératif de minimiser l'utilisation des énergies non renouvelables dans les bâtiments en proposant des alternatives à long terme. Heureusement, il existe de nombreuses possibilités de déployer des solutions efficaces sur le plan énergétique et à faible teneur en carbone pour les bâtiments et la construction. Parmi ces solutions, l'enveloppe du bâtiment est l'un des éléments les plus importants qui peuvent réduire la demande énergétique (ainsi que les émissions de dioxyde de carbone correspondantes), améliorer le confort thermique et diminuer la température intérieure de pointe (Samy et al., 2019 ; Mohamed et al., 2017 ; Zeinelabdein et al., 2017 ; Koch-Nielsen, 2013). Selon l'initiative des Nations Unies pour la construction durable, grâce aux technologies disponibles aujourd'hui, la consommation d'énergie dans les bâtiments neufs

et existants pourrait être réduite de 50 % (UNEP-SBCI, 2009). Dans le même contexte, une étude réalisée par Harvey (2009) a confirmé que les économies d'énergie pourraient atteindre 50 à 75 %, grâce à des mesures telles que l'amélioration de l'enveloppe et des systèmes des bâtiments, sans que les coûts de construction soient plus élevés que ceux des solutions de conception conventionnelles (Zhang et al., 2020 ; Frang et al., 2014). À partir de ce qui précède, il est utile de souligner qu'une bonne conception doit choisir des systèmes et des principes de construction appropriés et adaptés aux conditions environnementales. De telles techniques permettraient d'obtenir la meilleure adéquation possible entre la forme architecturale, les matériaux et les données climatiques (Ameur et al., 2020 ; Mwashia et al., 2011).

Assurer le confort thermique dans un bâtiment durant toute l'année dépend principalement du comportement thermique de son enveloppe (toiture et parois verticales), lequel est tributaire des matériaux de construction ainsi que des caractéristiques architecturales (Latreche, 2019). La quantité des gains thermiques reçus par les composants de l'enveloppe est divisée comme suit : la toiture est responsable de 70.62% des gains de chaleur, les quatre façades 27.11% et les fenêtres de 2.27% (Necib et Necib, 2020). La majorité du temps, cette enveloppe renferme des points de déperdition (ponts thermiques) et constitue une source d'inconfort dans toutes les saisons à cause des échanges thermiques importants qui s'effectuent à son niveau. Un traitement judicieux des parois de l'enveloppe en fonction des conditions climatiques chaudes et arides (choix des matériaux de construction à forte inertie thermique pour les murs et la toiture, réduction des dimensions des fenêtres, protections solaires, ...etc.) permet de garantir un confort optimal à l'intérieur du bâtiment, même si les conditions extérieures sont défavorables. De plus, le potentiel d'économies d'énergie résultant de l'amélioration de la performance de l'enveloppe du bâtiment est considérable (Forouzandeh, 2019 ; Stazi et al., 2014).

Par ailleurs, il est bien connu que les stratégies passives appliquées dans les bâtiments traditionnels (anciens vernaculaires) répondent de manière satisfaisante aux exigences climatiques et parviennent à fournir un confort intérieur maximal avec une consommation d'énergie minimale (Rais et al., 2019 ; Alrashad et al., 2017 ; Leo Samuel et al., 2017). En effet, l'architecture vernaculaire ancienne a réussi à développer des solutions ingénieuses en réponse au climat qui ont fourni un environnement bâti satisfaisant avec des moyens naturels simples. Dans les régions chaudes et arides, les stratégies de refroidissement passif utilisées

dans les bâtiments traditionnels répondaient aux exigences climatiques et permettaient d'obtenir des conditions de confort thermique sans avoir recours à la climatisation. En tant que telles, ces stratégies vernaculaires mériteraient d'être étudiées en vue de les utiliser comme outils de conception pour améliorer la performance environnementale de l'enveloppe des bâtiments contemporains (Al-Sallal et Rahmani, 2019 ; Fernandes et al., 2015).

De ce point de vue, il est pertinent de se pencher sur l'architecture vernaculaire des régions sahariennes de l'Algérie en raison de sa capacité à répondre à l'un des climats les plus rudes de la planète (Bouchair et al., 2013). L'environnement bâti séculaire développé par les habitants locaux est le résultat de leur longue expérience historique. Il était intrinsèquement lié aux conditions locales et les stratégies ingénieuses de conception en fonction du climat ont été élaborées au fil du temps pour atténuer les effets du climat et pour fournir les meilleures conditions de confort possibles uniquement en utilisant au mieux les matériaux et les ressources disponibles localement. Les stratégies employées dans les constructions vernaculaires sont généralement passives et ne dépendent pas de l'énergie non renouvelable, ce qui les rend adaptées à la construction contemporaine.

La ville saharienne d'El-Oued, où règne un climat très chaud et aride, présente l'avantage d'avoir servi d'assiette pour la réalisation de l'un des rares projets d'habitat conçu selon les principes de l'approche néo-vernaculaire. Il s'agit d'un ensemble d'habitations de type semi-collectif attribué aux architectes égyptiens El-Miniawy. Elle offre ainsi l'opportunité de pouvoir évaluer quantitativement des stratégies de refroidissement passif inspirées de l'architecture vernaculaire locale et appliquées dans des bâtiments résidentiels. En se référant à la région du Souf, ce travail de recherche met en évidence le lien étroit entre l'approche néo-vernaculaire et l'architecture bioclimatique.

Qu'il soit ancien ou contemporain (néo), l'environnement bâti vernaculaire a été produit selon des principes bioclimatiques inhérents tels que la limitation des ressources imposée par des facteurs économiques ou naturels, mais a réussi à offrir des solutions rationnelles aux climats rigoureux et aux besoins humains (Salman, 2018). L'approche néo-vernaculaire a permis de réinterpréter avec succès les caractéristiques durables de l'architecture traditionnelle ancestrale, notamment les stratégies de conception passive. En tant que telle, cette approche 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 de l'homme (Kersenna et Chaouche, 2018).

2. Situation du problème et questions de la recherche

Depuis l'indépendance de l'Algérie, le développement démographique accéléré et une demande croissante en matière de logements ont engendré l'adoption par les pouvoirs publics d'une approche quantitative pour assurer une production de masse de l'habitat. Cette politique du nombre a entraîné le recours à des décisions d'urgence qui se sont avérées inefficaces sur le plan de la qualité. D'après Sriti (1996), l'évolution des conditions techno-économiques qui entourent le projet, l'apparition de nouveaux matériaux et l'introduction de nouvelles techniques, ont fait reculer les solutions traditionnelles et le savoir-faire qui s'y rattache. Paradoxalement, l'évolution des techniques et des procédés de construction, s'est surtout faite au détriment des performances climatiques (thermiques) du cadre bâti. Les exemples qui illustrent cette situation ne manquent pas : choix aléatoire de l'orientation des bâtiments, tendance à l'extraversion avec des ouvertures surdimensionnées, absence de protections solaires, inadaptation du choix des matériaux de construction, ... et la liste est longue. Nul besoin de préciser que la question du confort du bâtiment se pose, aujourd'hui, avec acuité en Algérie et dans ce domaine un retard considérable a été accumulé. Au final, cette production massive de logements est passée à côté des spécificités du contexte climatique diversifié, négligeant et faisant peu de cas des solutions ancestrales développées par des générations pour améliorer leurs habitats.

La ville d'El-Oued qui se caractérise par un climat chaud et aride, illustre l'ampleur de ce phénomène. Depuis l'indépendance, le cadre bâti produit dans cette ville ne répond plus aux conditions climatiques très rudes de la saison estivale, ce qui pousse les habitants à se tourner vers les moyens mécaniques. Cette situation a conduit, non seulement, à une exploitation abusive et irrationnelle des ressources énergétiques avec des conséquences désastreuses sur l'environnement, mais, elle a contribué aussi à alourdir la facture énergétique qui devient de plus en plus hors de portée du citoyen.

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).

Un traitement judicieux des parois de l'enveloppe en fonction des conditions climatiques chaudes et arides (choix des matériaux de construction à forte inertie thermique pour les murs et la toiture, réduction des dimensions des fenêtres, protections solaires, ...etc.) permet de garantir un confort optimal à l'intérieur du bâtiment, même si les conditions extérieures sont défavorables. Dans ce contexte, l'architecture néo-vernaculaire qui a la capacité d'intégrer des stratégies inspirées de l'architecture vernaculaire en réponse aux conditions climatiques du lieu semble offrir un terrain d'investigation intéressant en vue de l'amélioration de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe du bâtiment.

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 recherche tente de répondre aux questions suivantes :

- 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 ?
- Dans quelles mesures la conception de l'enveloppe selon les principes de l'approche néo-vernaculaire permettra d'optimiser son adaptabilité climatique ?

3. Hypothèses

Au cours des dernières années, le monde a connu un développement considérable dans plusieurs domaines et particulièrement le domaine de la construction et de l'architecture. À partir des années 90 marquées par l'avènement de la notion de durabilité (*sustainability*), la pratique architecturale a subi de grandes transformations. Aujourd'hui, "l'art de bâtir" se veut plus respectueux de l'environnement et plus sage dans l'exploitation des ressources énergétiques.

De son côté, l'enveloppe du bâtiment a connu des transformations spectaculaires grâce au développement technologique qui ne cesse de chercher les moyens les plus innovants pour assurer sa performance thermique et son efficacité énergétique. À cet effet, il n'y a pas une typologie unique d'enveloppe climatiquement performante, elle diffère, plutôt, en fonction du type de bâtiment et du contexte environnemental considéré. Ceci laisse supposer que

l'enveloppe architecturale, à travers sa forme et sa matérialité, a un effet déterminant sur l'adaptabilité climatique d'un bâtiment. Partant de cette assertion, nous émettons l'hypothèse suivante : en intégrant des stratégies passives à la conception de l'enveloppe des bâtiments résidentiels, dans un contexte climatique chaud aride, il est possible d'améliorer sensiblement son adaptabilité climatique et, implicitement, éviter ou du moins minimiser le phénomène de surchauffe et d'inconfort thermique, tout en réduisant la consommation énergétique et l'impact du bâtiment sur son environnement extérieur.

4. Objectifs de la recherche

Cette recherche s'apparente à un débat scientifique qui est toujours d'actualité et qui porte sur l'homme et son habitat. À ce titre, le secteur résidentiel a déjà fait l'objet d'investigations qui ont couvert différents aspects : historique, urbain, politique, ou architectural. La présente réflexion s'insère dans l'ordre de la qualité de l'environnement intérieur et, plus précisément, le confort thermique et son corollaire l'efficacité énergétique.

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. En agissant sur les caractéristiques de l'enveloppe, la présente recherche vise à améliorer la performance climatique des bâtiments résidentiels pour assurer un niveau de confort thermique acceptable pour les habitants. Ceci constitue l'objectif principal à atteindre, cependant, l'étude tentera également de :

- Mettre en évidence le potentiel d'adaptabilité climatique de l'architecture néo-vernaculaire, utile pour concevoir des bâtiments contemporains économes en énergie et thermiquement confortables grâce au choix approprié de stratégies passives.
- Connaitre l'impact des éléments de l'enveloppe sur la température intérieure quand un bâtiment est soumis aux conditions d'un climat chaud et aride ;
- Définir les caractéristiques architecturales des bâtiments résidentiels dans un contexte chaud et aride, pouvant être utilisées pour améliorer leur adaptabilité climatique ;

- Identifier le rapport conception/hygro-thermie pour pouvoir introduire des corrections au niveau du confort ;

- Élaborer des recommandations qui peuvent être utilisées dans la conception d'un cadre bâti résidentiel (des modèles de construction alternatifs entre tradition et modernité) assurant de bonnes conditions de confort thermique relativement à un climat chaud et aride.

5. Méthodologie

Afin de mieux comprendre l'impact des stratégies passives de conception sur l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe architecturale dans des conditions climatiques chaudes et arides, l'étude s'est déroulée selon deux étapes principales.

Dans la première étape, un socle théorique a été élaboré en vue de cerner les aspects les plus pertinents pour l'analyse de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment 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. La ville d'El-Oued, qui représente le climat chaud et sec (désert) de l'Algérie, a été choisie comme site spécifique pour cette étude. À ce titre, les conditions climatiques à El-Oued ont été étudiées sur la base des données recueillies au niveau de la station météorologique locale de Guemar. En utilisant le tableau psychométrique de Givoni, l'analyse a déterminé les stratégies passives de conception bioclimatique adaptées au climat désertique prédominant d'El-Oued. En outre, une étude rétrospective définissant les modalités de production des logements relatifs au secteur de l'habitat en Algérie, ainsi que le contexte technique (techniques de construction, matériaux employés, etc.) a été réalisée.

La deuxième étape est analytique et comprend deux approches : une enquête qualitative et une évaluation quantitative. L'approche qualitative vise à identifier et, ensuite, évaluer les stratégies de refroidissement passif utilisées dans l'enveloppe des bâtiments étudiés 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. Après avoir effectué ce travail préliminaire, il a été possible de sélectionner deux types de bâtiments résidentiels contemporains représentant l'offre de logements émanant du secteur public. Les deux

bâtiments sélectionnés sont de type habitat semi-collectif, ils ont été utilisés comme cas d'étude. Ils illustrent respectivement un immeuble résidentiel typique et un bâtiment attribué aux architectes égyptiens El-Miniawy réalisé selon l'approche néo-vernaculaire. Ce dernier est conçu en fonction du contexte culturel, social et physique local ; en tant que tel, il incarne diverses stratégies de conception climatique passives inspirées de l'architecture vernaculaire et intégrées/réinterprétées dans un bâtiment contemporain. Les types de logements sélectionnés ont fait l'objet d'une étude (qualitative) approfondie en ce qui concerne leur conception et leur construction afin d'évaluer la performance thermique de leurs enveloppes respectives ; les stratégies de conception climatique employées et leur efficacité à assurer les conditions de confort ont également été mises en évidence.

Pour sa part, l'approche quantitative a été consacrée à l'expérimentation. Elle comprend une campagne de mesures in-situ (température de l'air, température surfacique, humidité, etc.) qui a été réalisée sur les deux unités résidentielle sélectionnées. La collecte des données hygro-thermique a eu lieu pendant les journées les plus chaudes de la saison estivale. Une simulation thermique a ensuite été réalisée à l'aide du logiciel Designbuilder/EnergyPlus pour évaluer le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment pendant toute la période estivale. Dans cette dernière partie de la recherche, la variabilité des conditions de mesure et la possibilité de réaliser des études paramétriques ciblées en isolant l'influence de chaque élément de l'enveloppe ont été exploitées.

6. Structure de la thèse

La présente recherche porte sur les moyens d'optimiser l'adaptabilité climatique de l'enveloppe architecturale avec en filigrane une exploration de l'impact des stratégies de refroidissement passif sur l'amélioration de la performance thermique du bâtiment. Ces stratégies sont inspirées de l'architecture vernaculaire locale, et de fait, elles sont censées fournir un confort thermique intérieur satisfaisant pour les utilisateurs et, implicitement, réduire la demande énergétique de refroidissement des bâtiments résidentiels relativement à un climat chaud et aride. L'étude est focalisée sur l'enveloppe architecturale tout en consacrant une attention particulière aux éléments définissant sa forme et matérialité, et qui pourraient contribuer à l'amélioration de son adaptabilité et performance climatique. Le but de la recherche est d'examiner les multiples rôles joués par l'enveloppe et son effet pertinent, aussi bien, sur le confort thermique des occupants que sur la performance du bâtiment par rapport à un climat chaud et aride.

Différentes méthodes ont été exploitées afin de répondre aux questions fondant ce travail de recherche, de vérifier son hypothèse et d'atteindre ses objectifs. Le déroulement de la recherche s'est effectué selon une structure qui s'articule autour de deux parties. La première partie est théorique, elle porte sur une analyse documentaire et une revue de littérature liée au sujet de la thèse, destinées à maîtriser le thème de la recherche et de mieux cerner ses concepts. Cette partie comprend quatre (04) chapitres. La seconde partie est pratique, elle est fondée sur un travail expérimental et se développe en trois (03) chapitres. Cette partie définit le contexte et le cas d'étude ainsi que les méthodes adoptées dans le traitement du sujet. Ces deux parties sont parachevées par un chapitre introductif et une conclusion générale.

- **Chapitre introductif** : Il présente une introduction au sujet de la recherche, le but et les objectifs attendus ; un aperçu sur de la littérature existante portant sur le phénomène étudié et des questions de recherche sont également fournies. Sur la base de cette analyse préliminaire du sujet, une hypothèse est mise en avant qui tente de répondre au problème soulevé en proposant une solution provisoire qui sera le fil conducteur du travail d'investigation. Cette introduction générale, aborde aussi les grands traits de la méthodologie adoptée, et pour finir, la structure globale de la thèse est présentée.

- **Premier chapitre** : le premier volet de ce chapitre est consacré à l'enveloppe architecturale. Précisément, la notion d'enveloppe est définie et une rétrospective de son évolution historique est donnée ; faisant apparaître la diversité des aspects et des approches pour traiter cette thématique. De plus, en se basant sur les deux composants de l'enveloppe, à savoir le toit et la façade, une énumération des principaux types d'enveloppe et de leurs propriétés sont présentées. Dans son deuxième volet, le chapitre aborde la question de la performance thermique des bâtiments et de sa relation avec l'enveloppe architecturale ainsi que les paramètres pouvant l'affecter. Un état des lieux est fait sur la question de la demande énergétique et du rôle des choix formels et matériels concernant l'enveloppe dans la réalisation de l'équilibre thermique. Dans cette section, les méthodes de transfert de chaleur, le rayonnement solaire et les facteurs qui affectent le comportement thermique du bâtiment sont traitées. Enfin, la notion de confort thermique, ses échelles de mesures et ses modèles ainsi que les stratégies de régulation et d'amélioration de la performance thermique de l'enveloppe dans des conditions climatiques chaudes et arides, sont clarifiées.

- **Deuxième chapitre** : Ce chapitre commence par donner un aperçu sur l'approche néo-vernaculaire en architecture ; il remonte à ses origines notamment sa relation au vernaculaire,

défini ses fondements et retrace son évolution. Ensuite, la démarche de conception basée sur le climat est définie, mettant en exergue le rôle que peuvent jouer les stratégies de conception passives et sensible au climat à résoudre les problèmes liés à l'environnement, à la consommation énergétique et au confort thermique. Ce chapitre définit également les facteurs climatiques ; il présente la classification climatique mondiale usuelle afin de déterminer les paramètres essentiels pouvant fonder une conception passive adaptée au climat prédominant. En outre, les caractéristiques des climats chauds et secs sont mises en exergue, de même qu'un ensemble de stratégies d'adaptabilité climatiques inspirées de l'architecture vernaculaire de ces régions, à savoir : la forme du bâtiment, le traitement de la toiture, la masse thermique (propriétés du matériau), la couleur, les stratégies d'ombrage et les systèmes de fenestration. Enfin, le chapitre est conclu par des exemples contemporains illustrant l'utilisation de stratégies d'adaptabilité climatique inspirées de l'architecture vernaculaire dans des projets contemporains. L'expérience de l'Algérie concernant l'approche néo-vernaculaire est également examinée.

- **Troisième chapitre** : après avoir défini la notion d'habitat, ce chapitre présente ses types et les facteurs qui l'affectent. Ensuite, il donne un aperçu sur le secteur résidentiel public en Algérie et dans le Sud algérien en particulier, et fait le point sur son évolution. Il présente également les politiques du logement en Algérie ainsi que les législations visant à promouvoir la durabilité et relever les défis environnementaux et énergétiques du secteur. Enfin, des exemples de réalisation de bâtiment bioclimatiques et de projets pilotes de logements à haute performance énergétique (HPE) ont été examinés.

- **Quatrième chapitre** : présente l'état des publications sur le sujet traité et dévoile le positionnement épistémologique de la thèse par rapport au champ des recherches existantes. À ce titre, la revue de la littérature effectuée sur les études précédentes permettra d'acquérir des connaissances solides sur les travaux de recherche réalisés ainsi que sur les techniques et outils ayant été exploités pour l'investigation. Les études à consulter seront celles ayant portées sur le thème de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe architecturale relativement à un climat chaud et sec ; avec en filigrane un intérêt pour les recherches focalisées sur l'exploration de l'impact des stratégies de refroidissement passif inspirées du vernaculaire, sur l'amélioration de la performance thermique du bâtiment résidentiel. Le premier volet du chapitre permettra d'examiner les principaux aspects et facteurs influençant la performance de l'enveloppe. De plus, il mettra en évidence l'impact du système constructif, la matérialité et la

forme des composants de l'enveloppe sur sa performance thermique et énergétique. Enfin, le deuxième volet du chapitre présentera la méthodologie de recherche adoptée et ses limites.

- **Cinquième chapitre** : présente le contexte de l'étude ainsi que les 2 bâtiments choisis comme cas de référence. Ainsi, le premier volet donne un aperçu sur la ville d'El Oued, en tant que cadre pour l'étude, il définit ses caractéristiques climatiques et les soumet à une analyse bioclimatique selon le diagramme de Givoni ; ce qui permet d'identifier les stratégies de conception bioclimatique dominantes pour la région du Souf. Le deuxième volet, présente les 2 bâtiments choisis pour servir en tant que cas d'étude. Le premier est un appartement typique dans un immeuble collectif de 3 étages qui représente la conception architecturale contemporaine courante (usuelle) où les conditions climatiques ne sont pas prises en charge. En revanche, le deuxième cas d'étude illustre la conception soucieuse du climat ; le bâtiment attribué aux frères architectes El-Miniawy, intègre des solutions d'adaptation environnementale inspirées de l'architecture vernaculaire locale. Il s'agit d'un des rares projets en Algérie conçu selon les principes de l'architecture bioclimatique. Dans sa dernière partie, le chapitre examine le vocabulaire formel et les principes de conception des frères El-Miniawy.

- **Sixième chapitre** : ce chapitre présente l'analyse effectuée sur les deux bâtiments choisis comme cas d'étude, pour évaluer l'impact des stratégies bioclimatiques passives utilisées au niveau de l'enveloppe architecturale, en termes, d'adaptabilité climatique et de confort thermique. Les deux types de bâtiments illustrent respectivement, la pratique architecturale courante négligeant les facteurs climatiques, et une conception soucieuse de son contexte. D'abord, les 2 bâtiments choisis ont fait l'objet d'une étude qualitative approfondie en ce qui concerne leur conception et leur construction afin d'évaluer la performance thermique de leurs enveloppes respectives ; les stratégies de conception climatique employées et leur efficacité à assurer les conditions de confort ont également été mises en évidence. Pour sa part, l'approche quantitative a été consacrée à l'expérimentation. Il s'agit d'une campagne de mesures in-situ (température de l'air, température surfacique, humidité, etc.) réalisée sur les deux logements sélectionnés. La collecte des données hygro-thermiques a eu lieu pendant les journées les plus chaudes de la saison estivale.

- **Septième chapitre** : une étude par simulation numérique à l'aide du logiciel DesignBuilder a été réalisée. Le premier volet du chapitre décrit le modèle numérique utilisé pour la simulation ainsi que les détails de l'étude paramétrique effectuée. Le modèle a d'abord été validé en effectuant une comparaison entre les données expérimentales et les données

simulées selon des équations spécifiques qui ont permis de calculer les marges d'erreur avec le logiciel de calcul numérique Matlab. Dans son deuxième volet, le chapitre expose les détails de l'étude paramétrique effectuée afin d'évaluer le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment pendant toute la période estivale ; la performance thermique et l'efficacité énergétique de certains des attributs matériels de l'enveloppe ont également été examinées. Dans cette partie, la variabilité des conditions de mesure et la possibilité de réaliser des études paramétriques ciblées en isolant l'influence de chaque élément de l'enveloppe ont été exploitées. Par la suite, une analyse des résultats obtenus est effectuée et des conclusions sont fournies.

- **Conclusion générale** : le travail est finalisé par une conclusion générale qui fait une synthèse des principaux résultats obtenus ; les limites de la recherche, les recommandations pour optimiser le comportement thermique de l'enveloppe architecturale dans les régions chaudes et arides, sont également, présentées.

CHAPITRE I :

LA PERFORMANCE THERMIQUE DE L'ENVELOPPE ARCHITECTURALE

Introduction

La nécessité de créer un environnement intérieur confortable, non seulement, grâce à des systèmes de climatisation mécanique et de conditionnement d'air, mais aussi, par l'utilisation passive des facteurs climatiques et des ressources énergétiques renouvelables, a fait que ces dernières années, la recherche scientifique a concentré son attention sur l'élément qui sépare l'environnement extérieur et intérieur à savoir l'enveloppe du bâtiment. En effet, cet élément du bâtiment occupe une place particulière dans les stratégies de conception basées sur le climat, et cela, non seulement, comme composant du bâtiment directement exposé aux facteurs climatiques, mais aussi, en tant que partie cruciale de la conception architecturale qui détermine les qualités formelles, matérielles et esthétiques du bâtiment. Dans le triptyque de Vitruve, l'enveloppe du bâtiment contribue plus que d'autres éléments à l'attraction ou à l'appréciation de la beauté du bâtiment. Mais en plus de l'intention esthétique qu'elle doit exprimer, elle est sensée, également, abriter et contribuer à réguler les fluctuations climatiques et thermiques du bâtiment. C'est pourquoi le développement des enveloppes de bâtiment s'est concentré sur la combinaison de l'adéquation climatique et de l'affectation d'un bâtiment donné.

Le présent chapitre commence par examiner les différentes facettes de la notion d'enveloppe architecturale considérant que celle-ci est généralement conçue en fonction de divers déterminants environnementaux, technologiques, socioculturels, fonctionnels et esthétiques. Tout d'abord, l'enveloppe en tant qu'élément du bâtiment est définie et une rétrospective de son évolution historique est donnée ; faisant apparaître la diversité des aspects et des approches pour traiter cette thématique. De plus, en se basant sur les deux composants de l'enveloppe, à savoir le toit et la façade, une énumération des principaux types d'enveloppe et de leurs propriétés sont présentées. Dans sa deuxième partie, le chapitre aborde la question de la performance thermique des bâtiments et de sa relation avec l'enveloppe architecturale ainsi que les paramètres pouvant l'affecter. Un état des lieux est fait sur la question de la demande énergétique et du rôle des choix formels et matériels concernant l'enveloppe dans la réalisation de l'équilibre thermique. Dans cette section, les méthodes de transfert de chaleur, le rayonnement solaire et les facteurs qui affectent le comportement thermique du bâtiment sont traitées. Enfin, la notion de confort thermique, ses échelles de mesures et ses modèles ainsi que les stratégies de régulation et d'amélioration de la

performance thermique de l'enveloppe dans des conditions climatiques chaudes et arides, sont clarifiées.

1.1. L'enveloppe architecturale : cerner la notion

Selon Del Grosso et Basso (2010), la plupart des définitions présentent l'enveloppe d'un bâtiment comme une enceinte, une séparation entre l'environnement intérieur et extérieur, qui assure les fonctions suivantes : soutien, contrôle, apparence (esthétique) et distribution des services. En effet, beaucoup d'auteurs s'accordent sur le fait que l'enveloppe d'un bâtiment désigne le pourtour d'un environnement bâti, qui comprend les murs, les portes, les fenêtres, le toit, les lucarnes et autres ouvertures pour la lumière et la ventilation. Oral et al., (2004) admettent que c'est la totalité des éléments et des composants qui séparent l'intérieur du bâtiment de l'environnement extérieur. En tant qu'abri, l'enveloppe protège l'intérieur du bâtiment et ses occupants des conditions météorologiques et d'autres éléments extérieurs. De ce point de vue, la conception et les caractéristiques des éléments de l'enveloppe affectent fortement le confort visuel et thermique des occupants, ainsi que la consommation d'énergie (Wang et al., 2016). Cependant, d'autres chercheurs considèrent qu'il est plus intéressant d'aborder l'enveloppe du bâtiment, sans distinction entre les murs et le toit, en tant qu'interface et non séparation, entre les facteurs environnementaux extérieurs et les exigences intérieures des occupants (López et al., 2012).

En général, l'émergence de l'enveloppe en tant que matérialité dépend de la « peau » (matériau utilisé), forme construite, modèle et échelle du bâtiment ou ses proportions. À ce titre, les éléments de l'enveloppe du bâtiment peuvent être divisés en composants opaques et transparents. Les composants opaques comprennent les murs, les toits, les dalles, les murs des sous-sols et les portes opaques. Les composants transparents (système de fenêtrage) de l'enveloppe d'un bâtiment concernent les fenêtres, les puits de lumière, les ventilateurs, les portes qui sont à plus d'un demi-vitrage et les murs en blocs de verre. Les mesures courantes de l'efficacité des composants de l'enveloppe d'un bâtiment comprennent la protection physique contre les intempéries et le climat (confort), la qualité de l'air intérieur (hygiène et santé publique), la durabilité et l'efficacité énergétique.

1.2. L'enveloppe : rétrospective historique

L'étude de l'histoire et de l'évolution de l'enveloppe architecturale est un vaste sujet, mais c'est une clé indispensable et inestimable pour comprendre la vision de chaque génération et

la façon dont les gens de chaque époque pensaient à faire face aux contraintes extérieures. L'architecture a toujours été très proche du développement de la civilisation humaine. En fait, l'architecture peut être vue comme un miroir reflétant les changements, les progrès et les espoirs des civilisations tout au long de l'histoire et il en va de même pour les autres formes d'art et de culture. Pourtant, ce qui distingue l'architecture, c'est qu'elle n'est pas seulement une forme d'art, mais aussi, une réponse à des besoins humains fondamentaux ; de fait, elle peut parfois être un témoignage infaillible de ce qui s'est passé dans un certain lieu à une certaine époque. En étudiant l'histoire de l'architecture, ce n'est pas seulement l'histoire des civilisations qui est mise en lumière, mais aussi une chaîne cohérente d'événements, de styles, de tendances, de croyances et de techniques (Najafi et Faizi, 2017).

L'homme par sa nature biologique a toujours été à la recherche d'abris et d'enveloppes pour s'assurer un confort déçant. Dès sa création, l'être humain est conçu dans le ventre de sa mère dans une enveloppe naturelle (liquide amniotique). Ensuite vient l'ère d'hominidés qui trouva l'enveloppe dans les grottes et, plus tard, dans les tentes après l'invention du tissu ; une enveloppe architecturale selon les besoins de l'homme à son époque. Quant aux édifices actuels et modernes, la recherche en matière de matériaux pour le développement de l'enveloppe architecturale, ne souffre d'aucune défaillance ; la technologie de pointe est mise au service de l'innovation pour pousser toujours plus loin les limites du possible (Emile, 2009 ; Mendoza, 2020). De ce point de vue, il est possible de dire que l'évolution de l'enveloppe est liée à l'évolution de l'architecture elle-même. En effet, une plongée dans le passé d'hier à aujourd'hui pour évoquer l'évolution du concept de beauté artistique riche en scénarios historiques permet de comprendre comment les différentes technologies et matériaux de construction utilisés notamment au niveau de l'enveloppe ont réussi à créer aussi bien de grandes œuvres architecturales qu'une architecture anodine.

1.3. L'enveloppe : diversité des approches

Au cours des derniers siècles, la conception de l'enveloppe architecturale a subi plusieurs changements et innovations. Les nouvelles techniques, méthodes et matériaux de construction ont joué un rôle majeur dans l'émergence de nouvelles formes et expressions matérielles. Les exigences attendues de l'enveloppe ont également changé, de sorte que l'enveloppe actuelle doit non seulement remplir la fonction de protection, mais aussi répondre à de nombreuses autres exigences telles que celles relatives aux aspects esthétiques, culturels, sociaux et environnementaux.

1.3.1. L'enveloppe comme matérialité : l'expression de la construction, des matériaux et de la technologie

Dans de nombreuses solutions primitives audacieuses, il est possible de reconnaître des formes ancestrales résultant d'une technologie complexe, telles que : la préfabrication, la standardisation des éléments de construction, les constructions flexibles et portables, mais aussi certaines solutions spécifiques telles que le chauffage par le sol, la climatisation, le contrôle de l'éclairage, ou même les ascenseurs (Khalil et al., 2018). Si nous oblitérons l'expression de la forme traditionnelle, nous oblitérons également la culture qui l'a créée. Chaque forme traditionnelle est différente et possède un haut degré de complexité visuelle en termes de vocabulaire visuel et de combinaisons possibles de caractéristiques (Chen et Ja'faruddin, 2021). Les facteurs physiques de l'environnement sont définis par les matériaux disponibles, la technologie, le terrain et les caractéristiques climatiques du lieu et, en tant que tels, sont des déclencheurs importants de nouveaux développements. Une telle procédure de construction peut se dérouler en trois grandes phases : l'identification des matériaux disponibles, la sélection des matériaux de construction pertinents et la réponse dans la forme du bâtiment par rapport à la matérialisation choisie (Usta, 2021).

Ainsi, la matérialisation peut être considérée comme l'une des premières empreintes de l'authenticité. Avec l'introduction des structures préfabriquées, la construction a été confrontée à un manque d'originalité par rapport à la construction sur site par des artisans qui improvisaient et adaptaient leurs besoins aux solutions formelles offertes par les matériaux disponibles au moment de la construction. C'est pourquoi la transposition des matériaux traditionnels se manifeste par deux méthodes : l'utilisation des principes vernaculaires de matérialisation et de construction pour créer de nouvelles formes et la contrefaçon de la forme, en enveloppant les structures contemporaines avec les matériaux disponibles pour créer une forme adaptée à l'ambiance. Les deux méthodes sont légitimes si elles sont correctement mises en œuvre et fondées sur l'identité des solutions locales. Si les formes sont aptes à suivre le flux évolutif du processus du patrimoine bâti, cela permettrait de réaffirmer sa propre tradition (Žarić et al., 2016).

1.3.2. L'enveloppe comme élément de transition entre l'intérieur et l'extérieur

La pré-architecture n'impliquait pas le développement de barrières physiques entre l'habitation et le contexte immédiat. Aristote a examiné la relation entre la nature et

l'environnement construit, dans laquelle la nature représente une anthologie où chaque partie de la composition du bâtiment (comme c'est le cas pour la nature) est un élément important pour la fonction de la composition dans son ensemble (Lopez et al., 2013). Vitruve a décrit cette relation interactive entre l'enveloppe et la nature en utilisant l'exemple des chalets primitifs, où les processus métaphysiques et physiques entre ce qui est à l'intérieur et ce qui est à l'extérieur du bâtiment sont visibles et temporaires (Vitruve, 1960).

L'esprit du site influence directement le choix de l'emplacement, la structure et sa mise en forme, la densité de population, la relation de la structure bâtie avec l'établissement et l'établissement avec la région. Les facteurs locaux ont limité le rôle de l'enveloppe à une simple formalité conditionnée par les matériaux locaux disponibles et les technologies de construction, ce qui s'est directement reflété dans le traitement de l'enveloppe comme élément de formation du microclimat à l'intérieur. Walter et al., (2019) ont défini deux concepts opposés pour la conception des enveloppes de bâtiments en relation avec les contextes naturels dans lesquels ils ont été créés : le cadre ouvert et la membrane fermée. Dans le premier cas, l'enveloppe du bâtiment interagit avec les facteurs naturels, tandis que la membrane fermée peut être mise en œuvre dans des climats plus rudes avec des conditions défavorables de l'environnement.

1.3.3. L'enveloppe, résultat d'un ensemble complexe de facteurs socioculturels

Les facteurs socioculturels sont les coutumes, les traditions, les perceptions et les croyances qui caractérisent un groupe culturel et influencent les pensées, les sentiments, les actions et les comportements des individus. Il s'agit par exemple des structures familiales et communautaires, de la parenté, du pouvoir, de la religion et des rituels, qui sont souvent ancrés dès la naissance et renforcés par l'expérience vécue (Sharp et al., 2019). Les relations au sein des familles, la position des femmes dans les sociétés, l'intimité et les relations sociales ont une influence directe sur la façon dont l'enveloppe est traitée dans l'architecture vernaculaire, ainsi que dans l'architecture contemporaine.

L'interaction sociale, l'intimité, les coutumes et les croyances locales, les facteurs climatiques changeants et les aspects pratiques, ont contribué à l'architecture vernaculaire en relation avec la continuité des établissements classés comme : lieux de résidence nomades et permanents. Les modes de vie et la façon dont les résidents utilisent leurs abris, la taille de la cellule familiale, le régime alimentaire et les méthodes de stockage et de préparation de la

nourriture, ont grandement contribué à la forme du bâtiment à atrium ou du bâtiment avec cour (Huang et Chow, 2001).

L'architecture contemporaine se concentre sur les bâtiments eux-mêmes plutôt que sur des questions socioculturelles plus complexes et leurs relations systématiques avec les potentiels bioclimatiques de l'environnement et les progrès technologiques. À cet égard, la technologie doit servir de base à l'établissement d'une relation stable, équilibrée et durable entre le développement socioculturel et socio-économique et l'incitation à préserver et à réhabiliter la maçonnerie populaire traditionnelle (Causevic et al., 2018).

1.3.4. L'enveloppe, résultat d'un équilibre complexe de facteurs climatiques

L'enveloppe adaptative vis-à-vis du climat a le potentiel de répondre à des conditions météorologiques variables et changeantes, conformément aux demandes des différents utilisateurs, en transformant l'intérieur par la médiation et non par la fabrication d'un environnement artificiel. En tant que telle, chaque enveloppe conçue de manière adaptative est unique car elle réunit et combine de nombreux modèles et méthodes de conception spécifiques. Coch (1998) considère que les êtres humains dès l'antiquité se sont efforcés à s'adapter et à rendre leurs abris résistants en utilisant les avantages de la lumière naturelle et en s'adaptant aux facteurs climatiques d'un endroit particulier.

De fait, pour examiner la relation entre le climat et l'habitat vernaculaire, il est nécessaire de comparer et de classer les différents types de climat dans le monde. À ce titre, la température et l'humidité moyennes peuvent être considérées comme les paramètres les plus représentatifs permettant d'identifier les grands types de climats : climats froids, climats secs et chauds, climats secs et humides. La forme des fenêtres et la fenestration reflètent la zone climatique du bâtiment ainsi que son contexte culturel. Les fenêtres contrôlent la circulation de la lumière du jour, de l'air et du bruit dans le bâtiment et protègent l'intérieur des conditions climatiques défavorables tout en encadrant la vue depuis l'intérieur.

Le Corbusier a introduit des principes anciens dans le paradigme scientifique moderne en analysant des paramètres climatiques et géographiques spécifiques et en identifiant puis en essayant de résoudre les problèmes architecturaux qui en découlent. Ainsi, il a divisé les paramètres en trois catégories : catégorie 1 : facteurs naturels (comme la température et l'humidité), catégorie 2 : aspects de l'amélioration du niveau de confort de l'intérieur, et

catégorie 3 : solutions/éléments architecturaux qui amélioreraient le niveau de confort de l'intérieur (Mohammad, 2013).

De nos jours, l'une des réponses aux conditions climatiques complexes a été l'enveloppe du bâtiment adaptée au climat (enveloppe intelligente/cinétique) en termes de signification et de caractéristiques fonctionnelles en tant que membrane active, dynamique et flexible. Contrairement aux solutions traditionnelles qui sont statiques et ne répondent pas aux besoins des utilisateurs, l'enveloppe adaptative est perçue comme le moyen de connecter et de séparer l'intérieur du bâtiment avec son environnement tout en façonnant des espaces de vie et de travail confortables. En même temps, elle permet à l'enveloppe d'agir comme un élément indépendant et primaire de la forme et de l'apparence (Milardi et Musarella, 2019).

1.4. Les typologies de l'enveloppe du bâtiment

1.4.1. Les principales typologies de façades

Le terme "façade" désigne généralement la surface extérieure du mur. Parfois, cependant, le terme est réservé pour désigner uniquement la partie frontale d'un bâtiment. Le terme vient du latin post-classique "facial" (qui signifie "visage humain"). Au départ, une façade était simplement un sous-produit d'un type de matériau utilisé dans la construction des murs, car les surfaces extérieures et intérieures n'étaient pas différentes. Progressivement, avec l'importance croissante de l'esthétique, la couche extérieure des abris humains a acquis des raffinements qui étaient agréables à l'œil. Cela a conduit, avec le développement de la géométrie et des mathématiques, à l'expansion de l'architecture, qui s'est caractérisée par des styles de construction, des proportions (par exemple, le nombre d'or) et des ordres classiques différents. Tout au long de l'histoire, les fonctions des façades ont été modifiées et améliorées en réponse aux nouvelles technologies et des matériaux. Elles évoluent et s'adaptent en permanence afin de satisfaire les exigences des occupants (Capeluto et Ochoa, 2017).

1.4.1.1. La façade lourde (porteuse)

La façade lourde ou façade porteuse fait partie intégrante des murs porteurs d'un bâtiment, pour supporter les différents éléments, les façades sont appelées porteuses lorsqu'elles servent d'appui aux planchers et charpentes. La façade lourde est construite avec des matériaux de construction conformes à ceux des murs extérieurs : briques, pierres, parpaings, etc. Elle peut également contenir des fenêtres et supporter des balcons. Après la construction des murs, la façade lourde peut être recouverte par des crépis ou des enduits. Pour donner plus d'esthétique

à ce type de façade, on doit effectuer des travaux de peinture ou de façonnage des crépis ou des enduits qui la composent. En revanche, une façade lourde est plus facile à entretenir, grâce à sa solidité (Knaack, 2014).

1.4.1.2. La façade légère (non porteuse)

La façade légère ou façade non porteuse est également connue sous l'appellation de façade rideau. Elle joue un rôle purement esthétique pour le bâtiment, car elle n'apporte rien à la consolidation de ce dernier. La façade légère sert à couvrir la partie des murs extérieurs d'un bâtiment avec des matériaux légers et décoratifs, pour rehausser au maximum son apparence. Elle est fixée directement sur cette partie de mur porteur sans avoir à supporter quoi que ce soit (Cuerda, 2014). La façade légère comme son nom l'indique est construite avec des matériaux peu pesants, comme des panneaux en bois ou en bois composite, des panneaux de tôles métalliques, des panneaux de fibres ou des panneaux de verre. Elle apporte un aspect remarquable à un bâtiment tout en étant très facile à installer. Les façades légères peuvent être construites en préfabriqués et installées sur le mur d'un bâtiment par la suite. De plus, une façade légère peut contribuer à l'isolation thermique d'un bâtiment, suivant les matériaux qui la composent. Elle peut être également composée de panneaux photovoltaïques pratiques et très écologiques, mais ils sont plutôt coûteux (Diouf, 2013).

1.4.2. Les principales typologies de la toiture

Le terme "toiture" désigne la partie qui recouvre la charpente d'un toit, elle lui apporte des propriétés d'étanchéité et de résistance, favorisant l'écoulement des eaux de pluie et y ajoute parfois un côté esthétique, permettant principalement de protéger son intérieur contre les intempéries et l'humidité. Le toit est un élément important dans tout type de bâtiment grâce à sa propriété garantissant des fonctions fondamentales dans le contexte global de la construction. Il protège contre les facteurs climatiques, permettant l'évacuation des eaux de pluie ; il contribue à l'isolation thermique et acoustique ; comme il peut lui-même être un élément de la définition des espaces habitables. De plus, les différentes formes de toit ont non seulement une esthétique particulière, mais aussi des spécifications structurelles différentes.

- **Les toitures en pente :** Il existe plusieurs types de toiture en pente, parmi lesquels la toiture mono-pente à versant unique, ce genre de toiture est utilisée dans certaines régions montagneuses elle évite que la neige ne s'accumule. Elle permet de l'évacuer plus facilement et empêchant que le poids endommage la structure. Ce type de toiture généralement recouverte d'ardoises, présente une esthétique originale. Pour garantir l'isolation et le bon

écoulement des eaux pluviales sur cette pente unique, un calcul précis est indispensable. Il existe aussi la toiture à 2 pans, c'est la forme la plus simple et la plus courante. Elle offre une surface sous les combles beaucoup plus importants.

- **La toiture plate** : comme son nom l'indique, la toiture plate ne présente aucune pente ce qui permet d'aménager une terrasse ou un espace végétalisé. Un seul pan la compose, il ne s'agit pas véritablement d'une charpente mais plutôt d'un support.

- **La toiture arrondie** : encore peu répandue mais de plus en plus appréciée, ce type de toiture au design novateur et aux formes douces optimise les combles et offre un côté original et esthétique. L'isolation est aussi meilleure. La couverture peut être en zinc, en tuiles, en bois... et s'adapte à la forme arrondie. La toiture arrondie autorise un large choix de formes, dont le principal est le dôme qui est une structure hémisphérique ayant évolué à partir de l'arche, formant généralement un plafond ou un toit. Le terme désigne la couverture d'un comble de plan centré (circulaire, elliptique ou polygonal). Dans sa forme la plus simple, un dôme est un élément structurel semi-sphérique creux. Toutefois, il existe de nombreuses variantes de cette forme de base. Les dômes ont évolué à partir des arcs, n'étant à l'origine adaptés qu'aux petits bâtiments tels que les huttes et les tombes ; cependant, avec le développement des techniques de construction et de conception, ils sont devenus plus populaires étant un moyen de mise en valeur des grandes structures.

1.5. Définition de la performance thermique

Nayak et Prajapati (2006) ont défini la performance thermique d'un bâtiment comme "le processus de modélisation du transfert d'énergie entre un bâtiment et son environnement". La différence de température entre le bâtiment et l'environnement extérieur est le principal moteur du flux d'énergie dans un bâtiment. Elle est également proportionnelle à la qualité thermique de l'enveloppe du bâtiment. La performance thermique est considérée comme l'un des aspects les plus importants de la gestion de l'utilisation de l'énergie fossile dans les bâtiments. La prédiction de la performance thermique des bâtiments par le recours à des stratégies bioclimatiques passives est essentielle pour améliorer les conditions intérieures. Cette section présente une revue générale de la performance thermique et de son impact sur la consommation d'énergie et les mécanismes de transfert de chaleur.

1.5.1. Le comportement thermique de l'enveloppe architecturale

Dans un premier constat de chaque bâtisse, l'enveloppe ne devrait pas être qu'un élément esthétique mais aussi un élément d'évaluation de la qualité architecturale dans le but d'assurer le confort de l'utilisateur, notamment le confort thermique. En tant qu'interface entre l'environnement intérieur et extérieur, l'enveloppe du bâtiment peut non seulement assurer la sécurité, l'intimité, l'accès et la vue, mais aussi réguler diverses formes de flux d'énergie (lumière, chaleur, bruit, humidité, etc.). L'enveloppe du bâtiment est une enceinte qui contrôle l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur et joue un rôle clé dans les conditions de confort thermique des résidents.

Ces dernières années, en raison de la nécessité d'économiser l'énergie et de prévenir une pollution environnementale accrue, l'importance de la construction durable a été doublée. En effet, le comportement thermique des matériaux et des formes de l'enveloppe du bâtiment, a des influences immédiates sur les charges de refroidissement et la consommation d'énergie des bâtiments (Mariani et al., 2018). De ce point de vue, la possibilité de contrôler et de modifier la perméabilité de l'enveloppe du bâtiment permet à celui-ci de réagir aux changements des conditions climatiques locales. Cela signifie que les parois extérieures doivent agir comme filtre sensible au climat local.

L'enveloppe du bâtiment est exposée à des températures variables au cours de la journée. En d'autres termes, en plus de l'isolation thermique, la masse thermique utile des murs et du toit, qui est fonction de la capacité thermique, de la densité et de la conductivité thermique de ses couches constitutives, joue également un rôle important dans le fonctionnement de ces dernières. Une enveloppe architecturale adaptative est une enveloppe qui réagit aux conditions environnementales changeantes, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, tout en gérant l'environnement intérieur. Les enveloppes architecturales adaptatives doivent avoir des stratégies adaptatives pour anticiper les changements dans l'environnement extérieur ainsi que les activités intérieures et leurs interactions avec les occupants (Hwaish,2018).

1.5.2. Impact de la performance thermique sur la consommation d'énergie

Ghisi et Massignani (2007) ont déclaré que la consommation d'énergie des bâtiments est associée à leur performance thermique. Le transfert de chaleur à travers les composants du bâtiment, tels que les murs, les fenêtres et les sols, sous la forme de gains ou de pertes de chaleur s'ajoutant aux gains de chaleur internes et aux gains de ventilation, sont considérés

comme les facteurs les plus importants affectant la performance thermique. À son tour, cette réponse thermique détermine l'énergie de chauffage et de refroidissement requise afin de maintenir des conditions thermiques acceptables pour les occupants. Après l'étude qu'ils ont effectuée par Yu et al., (2011) ont conclu que le facteur le plus influent sur la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement est le coefficient de transfert thermique du mur suivi par le coefficient de forme du bâtiment.

Dans le but d'améliorer la performance de l'enveloppe et implicitement de réduire la consommation énergétique du bâtiment, il est nécessaire de connaître son mode de comportement thermique, les facteurs liés à son fonctionnement et ce qui l'affecte.

1.5.3. Mécanisme de transfert thermique

La chaleur est considérée comme l'une des formes d'énergie qui se transmet entre les objets en raison de la différence de température. Elle se déplace toujours de l'objet le plus chaud vers l'objet le plus froid. Dans le bâtiment, trois mécanismes thermiques, à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement, sont indispensables à connaître afin de contrôler le processus de distribution de la chaleur dans l'espace habitable (NREL, 2001).

a. Conduction : La conduction est la façon dont la chaleur se déplace entre les molécules à travers les matériaux. La chaleur provoque des vibrations dans les molécules proches de la source de chaleur et ces vibrations se propagent aux molécules voisines, transférant ainsi l'énergie thermique. La conduction nécessite le contact physique de deux objets. Elle se produit à travers les différents composants de l'enveloppe du bâtiment où la chaleur est conduite du côté le plus chaud vers le côté le plus froid. La quantité de chaleur transférée à travers un matériau est proportionnelle à sa conductivité thermique. (Nayak et Prajapati, 2006).

b. Convection : Roos et al., (2008) ont défini la convection comme un "transfert de chaleur dû à un écoulement de fluide (gaz ou liquide) ou d'air". Cela explique pourquoi l'air chaud monte et l'air froid descend sur la surface intérieure d'un mur. La convection de l'air peut être utilisée dans les maisons solaires passives pour transporter la chaleur solaire d'un mur sud vers l'intérieur du bâtiment. La transmission thermique par convection se produit de l'air extérieur du bâtiment vers la surface extérieure du mur et de la surface intérieure du mur vers l'air intérieur du bâtiment (Mahlia et al., 2007). Elle peut être divisée en deux catégories : la convection naturelle, qui se produit en raison d'une différence de température entre les zones,

et la convection forcée, qui se produit en raison du mouvement de l'air par des moyens mécaniques. Dans ces deux cas, la convection est responsable de la distribution de la chaleur dans l'espace occupé et entre les zones. Les matériaux du bâtiment jouent un rôle important dans la convection. Un matériau léger moderne avec une isolation thermique perméable est sensible au transfert de chaleur par convection (Svoboda, 2000).

c. Rayonnement : Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux surfaces au moyen d'ondes électromagnétiques, telles que la lumière, le rayonnement infrarouge, le rayonnement ultra-violet ou les micro-ondes, sans rien entre elles. Le rayonnement a lieu sur les surfaces exposées au soleil des bâtiments et sa valeur augmente lorsqu'il y a de grandes différences de température. Les propriétés des matériaux telles que la transparence et les couleurs jouent un rôle important dans la détermination du pourcentage de rayonnement solaire absorbé, réfléchi ou transmis, en fonction de certaines propriétés de cet objet. Le rayonnement solaire qui a traversé le verre et a été absorbé par la maison est à nouveau émis par les surfaces intérieures sous forme de rayonnement infrarouge (Wald, 2020).

1.6. Facteurs affectant la performance thermique des bâtiments

La performance thermique d'un bâtiment dépend d'un grand nombre de facteurs. Nayak et Prajapati (2006) ont résumé ces facteurs comme suit : variables de conception, propriétés des matériaux, données météorologiques et données d'utilisation d'un bâtiment.

1.6.1. Facteurs liés aux conditions climatiques (Paramètres liés à l'ambiance extérieure)

1.6.1.1. La température de l'air (T_a) : Elle présente une variation quotidienne, avec un maximum en milieu d'après-midi et un minimum le matin avant le lever du soleil. La différence entre les valeurs extrêmes est variable l'on constate en règle générale qu'elle est plus élevée quand le ciel est clair et à l'intérieur du sol (Morin et al., 2018).

1.6.1.2. L'humidité relative (HR) : Elle correspond à la quantité de vapeur d'eau que contient l'air ambiant par unité de masse ou de volume. L'humidité relative, pour une température donnée, correspond au rapport de la quantité de vapeur réellement contenue par l'air, sur la quantité maximale qu'il peut contenir (saturation). L'humidité relative est donc une grandeur sans unité qui s'exprime en %. La norme ASHRAE 55P (2003) définit l'humidité relative HR comme "le rapport entre la pression partielle (ou la densité) de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation (ou la densité) de la vapeur d'eau à la même

température et à la même pression totale". Le taux d'humidité acceptable diffère selon le climat. Si un faible taux d'humidité est préférable dans les climats secs, il est source d'inconfort dans les régions à climat tropical (Biket, 2006).

Il existe une relation inverse entre l'humidité relative et la température de l'air. Elle diminue lorsque la température de l'air augmente. La diminution de l'humidité relative vers midi tend à être la plus importante en été. En outre, un taux d'humidité élevé réduit la transmission du rayonnement solaire en raison de l'absorption atmosphérique. En outre, une humidité élevée diminue l'évaporation de l'eau et de la sueur et provoque ainsi une température ambiante élevée et un inconfort. L'humidité affecte le taux d'évaporation de la transpiration, ce qui affecte la capacité du corps à dissiper la chaleur à des températures ambiantes plus élevées (Ridley, 1990).

1.6.1.3. La vitesse de l'air : La vitesse de l'air a une grande influence sur le mécanisme de convection et la capacité évaporatoire de l'air ainsi que sur la sudation. Lorsque la température de l'air est inférieure à celle de l'enveloppe, la vitesse de l'air augmente la convection et l'évaporation en conséquence le refroidissement s'élève. Le vent a une grande influence sur la conception des bâtiments et leurs performances thermiques. Il affecte les échanges thermiques convectifs de l'enveloppe d'un bâtiment et l'infiltration d'air. Il est nécessaire d'éviter l'effet du vent d'hiver qui augmente les pertes de chaleur par infiltration et d'utiliser le vent d'été pour favoriser la ventilation. De nombreux facteurs affectent le vent, au niveau local, tels que la topographie, la végétation et la configuration des bâtiments. Aussi, il est important de prendre en compte le facteur vent lors de la planification urbaine et de la conception architecturale. La hauteur des bâtiments et les distances entre eux peuvent affecter la formation de zones de pression, ce qui est inévitable dans la direction du vent. Les différentes régions climatiques exigent des conditions de vent différentes (Biket, 2006).

1.6.1.4. L'ensoleillement : Le soleil joue un rôle capital en architecture, l'interaction entre les formes du bâtiment et l'ensoleillement d'une façade régit les phénomènes de captation et de protection solaire. Le rayonnement solaire affecte la température intérieure d'un bâtiment de deux manières la première c'est quand le rayonnement solaire est absorbé par l'enveloppe externe d'un bâtiment, augmentant la température des surfaces externes ; et la deuxième c'est quand le rayonnement solaire qui arrive sur une fenêtre passe directement à l'intérieur.

Nayak et Prajapati (2006) ont défini le rayonnement solaire comme "l'intensité des rayons du soleil tombant par unité de temps et par unité de surface, généralement exprimée en watts par mètre carré (W/m²)". Ils ont déterminé que certains facteurs affectent le rayonnement incident sur une surface, à savoir la situation géographique (latitude et longitude du lieu), l'orientation, la saison, l'heure du jour et les conditions atmosphériques. Le rayonnement solaire est la variable météorologique qui influence le plus les températures de l'air. Il se compose du rayonnement direct (ID) et du rayonnement diffus (Id) qui varient en fonction des conditions du ciel. D'autres variables affectent le rayonnement solaire total : les réflexions du sol et des bâtiments adjacents, l'ombrage des bâtiments adjacents et la végétation (Rosenlund, 2000).

1.6.1.5. Les précipitations : pluie, grêle, neige sont les manifestations d'un même processus fondamental, celui du cycle de l'eau. La température de l'air et les précipitations sont des mesures fondamentales pour décrire le climat et peuvent avoir des effets très variés sur la vie humaine et son confort.

1.6.2. Paramètres liés aux choix conceptuels

Toute réalisation architecturale interagit avec son environnement extérieur à travers son enveloppe. Cet élément a une grande influence sur les conditions des espaces intérieurs et extérieurs. C'est l'un des principaux composants qui affecte le gain de chaleur totale et le coefficient de transfert de chaleur global. À titre d'exemple, il a été constaté que l'enveloppe du bâtiment représente 36%, 25% et 43% de la charge de refroidissement maximale à Hong Kong, Singapour et en Arabie Saoudite respectivement. Il est donc important que les enveloppes des bâtiments aient un niveau de résistance thermique et un minimum de ponts thermiques afin d'éviter la pénétration de la vapeur d'eau à l'intérieur des bâtiments (Matrosov et al., 2007). De ce point de vue, une conception climatique passive n'a de sens que si l'enveloppe du bâtiment est performante ; ce qui fait intervenir plusieurs paramètres.

1.6.2.1. L'implantation : selon Liébard et De Herde (2005), l'implantation judicieuse d'un édifice est la tâche la plus importante de l'architecte. Elle détermine l'éclairément, les apports solaires, les déperditions, les possibilités d'aération, etc., mais aussi les qualités de l'habitat : communications, vues, rapport de voisinage, etc.

1.6.2.2. L'orientation : L'orientation du bâtiment peut affecter sa performance thermique en minimisant le rayonnement solaire direct affectant les composants de l'enveloppe, à savoir :

les ouvertures et les parties opaques (Al Tamimi et al., 2010). De nombreux facteurs doivent être pris en compte lors du choix de l'orientation du bâtiment. Ils comprennent l'impact attendu de l'ombrage et les mouvements du soleil en fonction de la latitude, de l'heure du jour et de la période de l'année.

1.6.2.3. La forme du bâtiment : ce paramètre joue un rôle important dans la détermination de la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface du bâtiment et le flux d'air autour de celui-ci (Wang et al., 2006). Alwetaishi et Elamary (2016), considèrent que la plupart des travaux publiés sur la performance de l'enveloppe, se concentrent sur la partie physique de celle-ci, comme les matériaux à changement de phase, le transfert de chaleur et l'influence de la masse thermique. Cependant, peu d'attention est accordée à l'impact de la forme du bâtiment, quelle que soit sa superficie. Pourtant, la forme du bâtiment est un facteur considérable dans les bâtiments durables et écologiques en raison de son impact important sur la performance énergétique et la consommation totale d'énergie comme cela a été démontré (Zhang et al., 2017). L'étude d'Al Anzi et al., (2009) a mis en évidence la performance des formes les plus basiques en se basant sur des immeubles de bureaux. L'article a mis en évidence trois facteurs principaux affectant la forme des bâtiments. Le premier est la distance qui sépare les bâtiments les uns des autres. Cela aura un effet sur la vitesse de l'air autour du bâtiment, en particulier dans le cas de bâtiments de grande hauteur. De plus, il y a le facteur du ratio vitrage/mur et enfin le type de système de vitrage utilisé dans le bâtiment. De plus, la surface totale de la forme du bâtiment peut également être responsable de grandes différences dans la quantité d'énergie requise pour le refroidissement et le chauffage. Ceci est dû à la surface du mur extérieur qui est exposée à l'extérieur. Il est admis dans le domaine de la performance énergétique des bâtiments et du confort thermique que l'un des éléments les plus efficaces dans le transfert de chaleur est la surface totale du mur extérieur. De plus, l'échange avec l'extérieur deviendra plus important au fur et à mesure que la surface totale augmentera, comme indiqué par Al Anzi et al., (2009). Les résultats de l'étude de Alwetaishi et Elamary (2016), montrent que le triangle et le pentagone se sont avérés être les meilleurs modèles testés (Fig. I.1).

En revanche, l'hexagone, l'octogone et le cercle ont été jugés les moins bons. En outre, les recherches menées ont permis d'observer que les bâtiments avec moins de côtés ont la capacité de se protéger par la technique de l'autoprotection contre les radiations solaires

directes, tandis que les bâtiments les plus articulés ont tendance à laisser plus de radiations solaires directes atteindre la face externe du bâtiment, d'où un gain de chaleur plus important.

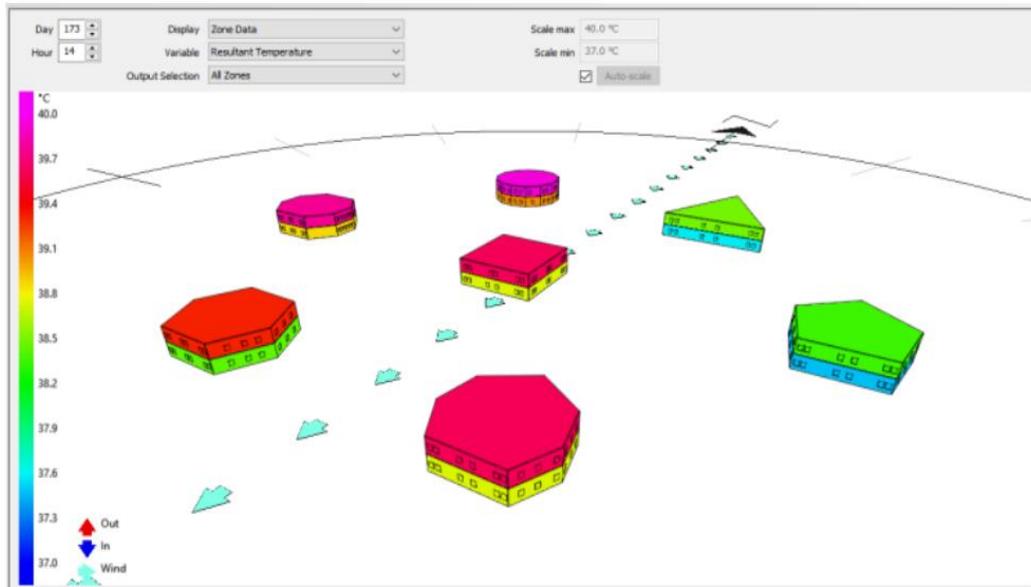


Figure I.01 : Vue en perspective des bâtiments examinés (Source : Alwetaishi et Elamary, 2016).

1.6.2.4. Dispositifs d'ombrage : Les dispositifs d'ombrage ont un impact utile, surtout dans les climats méditerranéens et semi-désertiques. Une étude d'Abd El-Monteleb et Ahmed (2012), a montré que des persiennes verticales avec une saillie de 38cm ou plus entraînent une diminution de 2°C de la température intérieure dans le climat chaud et aride de l'Egypte. De même, dans une étude d'Al-Tamimi et Fadzil (2011), il est conclu que la sélection des meilleurs dispositifs d'ombrage peut améliorer le nombre d'heures de confort d'environ 26% et 4,7% dans des conditions non ventilées et ventilées, respectivement sous les tropiques.

1.6.2.5. La matérialité : Les propriétés des matériaux des composants du bâtiment jouent un rôle fondamental dans le contrôle du processus de transfert de chaleur. Les propriétés thermiques les plus importantes sont : la conductivité thermique, la résistance thermique, la transmittance thermique et la densité. Givoni, (1976) a identifié de nombreuses propriétés liées aux matériaux de l'enveloppe du bâtiment qui influent le taux de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur, et implicitement, ces propriétés ont une influence sur les conditions thermiques intérieures et le confort des occupants du bâtiment. Les propriétés de l'enveloppe opaque d'un bâtiment comprennent la conductivité thermique, la résistance thermique, et la capacité thermique, la transparence aux rayonnements de différentes

longueurs d'onde, le coefficient de convection de surface, et les caractéristiques du rayonnement de surface telles que l'absorptivité, la réflectivité, et l'émissivité.

a. Conductivité thermique λ : La conductivité thermique est une propriété du matériau, qui représente " la quantité de chaleur par unité de temps en watts, qui circule à travers une couche régulière de 1m d'épaisseur de matériau d'une surface de 1m², à travers un gradient de température de 1 K (Kelvin) dans la direction du flux de chaleur ". Plus la valeur de la conductivité thermique est faible, moins la transmission thermique sera importante (Mahlia et al., 2007).

b. Résistance thermique d'un matériau, R : La résistance thermique d'un matériau est la résistance au flux de chaleur entre deux surfaces à des températures différentes. Elle peut être exprimée par la valeur R qui est fonction de l'épaisseur du matériau et de l'inverse de sa conductivité thermique (Manuel technique CSR Hebel, 2006). Elle peut être définie comme "le temps nécessaire à une unité de chaleur pour traverser une unité de surface d'un matériau d'une unité d'épaisseur lorsqu'une unité de différence de température existe entre les faces opposées" (Code on Envelope Thermal Performance for Buildings).

c. Transmission thermique, U : Le coefficient de transmission thermique, U , est une mesure directe de la capacité d'isolation thermique d'un élément de construction donné, air contre air. Elle est obtenue en inversant la résistance thermique totale de l'élément de construction, R (c'est-à-dire $U = 1/ R$) (Manuel technique CSR Hebel, 2006). Elle peut être définie comme "la quantité de chaleur qui circule à travers une unité de surface d'une section de bâtiment dans des conditions stables, par unité de temps et par unité de différence de température de l'air de chaque côté de la section".

d. Densité, porosité : La densité, ρ (kg/m³), est "la masse d'une unité de volume du matériau, comprenant le solide lui-même et les pores remplis de gaz". La densité joue un rôle important pour propriétés thermiques : plus le matériau est léger, plus il est isolant et lourd, et plus il stocke la chaleur (Rosenlund, 2000).

1.6.3. Paramètres liés à l'occupation et exploitation des bâtiments

L'utilisation des bâtiments produit de la chaleur en raison de leur occupation, de l'utilisation de la lumière électrique et des équipements. Les densités d'occupation et les types d'activités affectent le gain de chaleur total. Elle peut être importante dans les espaces

surpeuplés. Les personnes dégagent la chaleur du métabolisme pour maintenir une température corporelle constante. Les lampes et les équipements électriques dégagent dans le bâtiment une chaleur égale à l'énergie électrique qu'ils consomment (Utzinger et Wasley, 1997).

1.7. Le bilan thermique des bâtiments

Le principe de base du bilan thermique des bâtiments est le transfert de chaleur entre les bâtiments et l'environnement. Ce terme peut être exprimé par la valeur globale de transfert thermique OTTV qui est considérée comme une mesure du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'environnement intérieur à travers l'enveloppe extérieure d'un bâtiment. Elle prend en compte trois composantes du gain de chaleur qui sont la conduction à travers une surface opaque, la conduction à travers une fenêtre en verre et le rayonnement solaire à travers une fenêtre en verre. Les deux autres sources de gain de chaleur mentionnées par Utzinger et Wasley (1997) sont les gains de chaleur internes et l'échange d'air par ventilation ou infiltration. Afin d'obtenir un équilibre thermique dans un bâtiment, les sources de gain de chaleur (conduction, ventilation, gains solaire et gains internes) doivent être égales aux pertes de chaleur.

1.7.1. Valeur de transfert thermique de l'enveloppe

L'enveloppe du bâtiment est l'un des composants les plus importants affectant le gain de chaleur total et le coefficient de transfert thermique global (Al-Tamimi et al. 2010). La valeur de transfert thermique de l'enveloppe représente la performance thermique de l'ensemble de l'enveloppe. Dans un souci d'économie d'énergie, la valeur maximale admissible du transfert thermique de l'enveloppe a été fixée à 50 W/m².

La valeur de transfert thermique de l'enveloppe prend en compte les trois composantes de base du gain de chaleur à travers les murs extérieurs et les fenêtres d'un bâtiment, à savoir : la conduction thermique à travers les murs opaques, la conduction thermique à travers les fenêtres en verre et le rayonnement solaire à travers les fenêtres en verre. Le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment dépend de la surface de ses composants et de la conductivité thermique de leurs matériaux. Afin d'établir une comparaison entre les bâtiments, les taux de transfert de chaleur par unité de surface au sol du bâtiment doivent être estimés.

1.7.1.1. Taux de transfert de chaleur à travers les murs du bâtiment

Ling et al., (2007) ont estimé que les murs verticaux des immeubles de grande hauteur recevaient 86,6 % de l'insolation solaire annuelle. Le taux de transfert de chaleur à travers les murs opaques est égal au produit de la surface du mur et du coefficient de transmission thermique du mur. Pour permettre la comparaison de bâtiments de tailles différentes, le taux de transfert de chaleur à travers les murs est divisé par la surface de plancher, ce qui donne le taux de transfert de chaleur à travers les murs des bâtiments opaques par unité de surface de plancher, \hat{U} mur.

1.7.1.2. Taux de transfert de chaleur à travers le toit du bâtiment

Le toit est l'un des principaux composants de l'enveloppe du bâtiment, car il a une incidence sur le chauffage, la ventilation et la climatisation du bâtiment. Dominguez et al., (2010) ont indiqué que l'augmentation de l'albédo du toit de 0,09 à 0,75 sur un bâtiment sans isolation a permis de réaliser des économies d'énergie de 28 %. Le taux de transfert de chaleur à travers le toit du bâtiment est égal au produit de la surface du toit et du coefficient de transmission thermique du toit. Comme dans l'estimation de \hat{U} mur, le taux de transfert de chaleur à travers le toit est divisé par la surface de plancher donnant le taux de transfert de chaleur à travers le toit du bâtiment par unité de surface de plancher, \hat{U} roof.

1.7.1.3. Taux de transfert de chaleur à travers les vitrages du bâtiment

Les vitrages ont une grande influence sur le bilan thermique du bâtiment. Le gain de chaleur par la fenêtre extérieure représente 25-28% du gain de chaleur total, en plus de l'infiltration. Il peut atteindre 40 % dans les zones chaudes d'été et froides d'hiver. Le matériau du vitrage, son orientation et son rapport avec le mur contribuent à provoquer des effets de refroidissement et à éviter l'augmentation de la température de l'air intérieur (Al-Tamimi et al., 2010). Le taux de transfert de chaleur à travers le vitrage du bâtiment est égal au produit de la surface du vitrage et du coefficient de transmission thermique du vitrage. Ce taux de transfert de chaleur est divisé par la surface de plancher, ce qui donne \hat{U} vitrage.

1.7.1.4. Taux de transfert de chaleur à travers le sol

Le processus de transfert de chaleur des bâtiments à travers le sol se produit le long du périmètre du bâtiment. Le taux de transfert de chaleur du bâtiment à travers le sol vers l'environnement est égal au produit du périmètre du bâtiment en contact avec le sol,

Périmètre, et du taux de flux de chaleur à travers le sol par pied de périmètre pour un type de construction de bâtiment donné. En divisant ce taux par la surface du sol, on obtient \hat{U} sol.

1.7.2. Taux de transfert de chaleur par ventilation ou infiltration

La ventilation naturelle peut être définie comme le flux d'air extérieur vers l'intérieur à travers des ouvertures sous l'influence du vent et des pressions thermiques. Elle a la capacité de contrôler la température pour fournir un refroidissement, en particulier dans les climats chauds et humides, et ainsi améliorer la performance thermique du bâtiment. La ventilation naturelle peut améliorer le confort thermique dans une fourchette de 9% à 41% dans un climat tropical et de 8% à 56% dans un climat tempéré (Al-Tamimi et al., 2010).

L'infiltration d'air par les fissures des murs peut provoquer une perte de chaleur. L'étanchéité des bâtiments est importante pour maintenir les températures intérieures. Elle est mesurée par le nombre de changements d'air par heure. Il est important d'éviter les problèmes d'augmentation de l'étanchéité du bâtiment qui peuvent affecter la qualité de l'air intérieur et l'accumulation d'humidité. Une bonne maison, confortable et économe en énergie, aura environ 0,35 à 0,50 renouvellement d'air par heure dans des conditions hivernales normales.

1.7.3. Gains de chaleur solaire des bâtiments

Les gains de chaleur solaire des bâtiments sont responsables d'une grande partie de la charge de refroidissement et sont considérés comme le paramètre qui affecte beaucoup la valeur globale du transfert thermique (Nikpour et al., 2011). Lorsque le rayonnement solaire tombe sur le verre et d'autres matériaux partiellement transparents, une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, une autre est absorbée par le matériau, et le reste est transmis à l'intérieur du bâtiment. Pour les fenêtres ordinaires, l'absorption ne représente qu'une petite fraction et la transmission la plus grande partie.

La transmission solaire est donnée sous forme de coefficient de gain de chaleur solaire. Il s'agit du rapport entre le gain de chaleur solaire entrant dans un espace à travers une fenêtre et le rayonnement solaire incident total tombant sur la surface extérieure de cette fenêtre. Cela comprend à la fois la chaleur solaire directement transmise et le rayonnement solaire réellement absorbé par le verre, qui est ensuite réémis, conduit ou transmis dans l'espace (Dunn, 2006).

1.7.4. Gains de chaleur internes au bâtiment

Ce terme représente toutes les sources de chaleur à l'intérieur du bâtiment, à savoir les occupants, les lumières, les appareils et autres équipements (LEARN, 2004). Les trois voies pour les gains de chaleur internes sont données en Btu de chaleur ajoutée au bâtiment par heure et par pied carré de surface de plancher. Blum et al., (1989) ont mentionné que les gains de chaleur internes peuvent être additionnés à la chaleur auxiliaire utilisée, puis divisés par le nombre réel de degrés-jours et la superficie de la maison pour obtenir l'indice de performance du bâtiment (IPB), en $\text{kJ/m}^2\text{-}^\circ\text{C-jour}$. Cet indice est considéré comme le facteur de performance qui caractérise l'efficacité énergétique globale du bâtiment en matière de chauffage et qui est normalisé pour tenir compte des effets du climat, de l'occupation et de la taille.

1.7.5. Perte de chaleur par évaporation

L'évaporation est le processus d'élimination de l'eau par vaporisation qui s'accompagne d'une perte de chaleur qui conduit à un effet de refroidissement. De nombreux facteurs affectent le taux d'évaporation l'évaporation, à savoir la température, le vent, la surface exposée et la pression. Le taux d'évaporation augmente avec la température, la vitesse du vent et la surface exposée alors qu'il diminue avec une pression élevée (Nayak et Prajapati, 2006).

1.8. Le confort thermique dans les bâtiments

La norme ASHRAE 55P (2003) définit le confort thermique comme "l'état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique et qui est évalué de manière subjective". De nombreux facteurs affectent le confort thermique tels que la température de l'air, la température radiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air, l'activité et les vêtements (Darby et al. 2005). La température et l'humidité de l'air sont les facteurs les plus couramment abordés fréquemment dans le processus de conception conventionnel. Cependant, elles n'affectent que 6 % et 18 % du confort thermique, respectivement.

D'autres facteurs tels que la température des surfaces environnantes et la vitesse de l'air comptent respectivement pour 50 % et 26 % de la perception du confort thermique (Mikler et al., 2008). Le confort thermique est un paramètre essentiel dans les bâtiments solaires passifs dans lesquels l'énergie solaire est collectée, stockée et distribuée. Il n'est pas possible pour un groupe de personnes exposées aux mêmes conditions climatiques dans la même pièce, de

ressentir le confort au même moment en raison de la variance physique (Çakir, 2006). Cette section traitera de la zone de confort, des cartes bioclimatiques et des modèles de confort thermique.

1.8.1. La zone de confort

Selon Çakir (2006), la zone de confort peut être définie comme "une condition thermique dans laquelle peu ou pas d'effort est requis par les occupants pour ajuster leur corps aux conditions environnementales environnantes". Un certain nombre d'échelles a été développé pour la zone de confort, chaque échelle détermine une série de facteurs de confort mentionnés précédemment. L'indice DISC de Gagge exprime les degrés d'inconfort plutôt que de confort. Si 80 % des personnes se sentent bien, cela signifie que la zone de confort est DISC $\pm 0,5$. La température effective standard est un autre indice qui décrit un environnement de confort avec une humidité relative de 50 %, une vitesse de l'air de 0,125 m/s, un niveau d'activité de 1 mètre (assis) et des vêtements de 0,6 clo ("vêtements d'intérieur") (Rosenlund, 2000).

Une autre échelle de zone de confort est celle de l'ASHRAE qui a défini une zone de confort pour les saisons d'hiver et d'été (fig.I.2). Cette définition dépend uniquement de l'humidité relative et de la température (Sensirion, 2010). Evans (2007) montre qu'il existe différentes zones de confort définies dans cinq normes ASHRAE successives. Elles montrent la difficulté de définir une zone de confort souhaitable, avec des variations significatives proposées sur une période de trente ans.

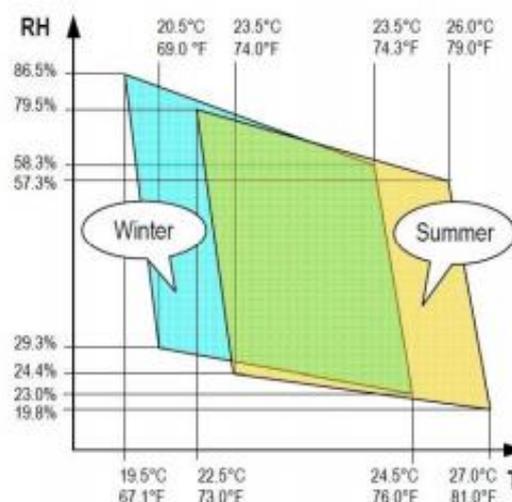


Figure I.2 : Relation humidité (RH) / température (T) diagramme basé sur la zone de confort selon les normes ASHRAE 55-1992 (Source : Sensirion, 2010)

L'effort de Fanger dans le développement de l'indice de confort se traduit par le vote moyen prédit 'PMV' qui indique le vote de confort moyen d'une population typique sur une échelle de -3, Froid, à +3, Chaud, avec 0 comme neutralité thermique (Evans, 2007). Charles (2003) a constaté que le modèle PMV n'est pas toujours un bon prédictateur de la sensation thermique réelle, en particulier dans le cadre d'études sur le terrain en raison des difficultés inhérentes à l'obtention de mesures précises de l'isolation des vêtements et du taux métabolique. Son étude suggère également que le biais dans les prédictions PMV est plus précis dans les bâtiments climatisés que dans les bâtiments ventilés naturellement, en partie à cause de l'influence de la température extérieure, et des possibilités d'adaptation.

1.8.2. Les diagrammes bioclimatiques

Les diagrammes bioclimatiques utilisés fréquemment sont le diagramme d'Olgay et le diagramme bioclimatique de Givoni. Olgay exprime la zone de confort sous forme graphique en tenant compte de deux variables climatiques qui sont la température sèche DBT sur l'axe vertical et l'humidité relative RH sur l'axe horizontal. La zone de confort se situe dans la zone en forme d'aile d'avion au centre de ce graphique. Les lignes supérieures au-dessus de cette zone de confort indiquent l'effet du mouvement de l'air sur l'extension de la limite supérieure de la zone de confort. Les lignes inférieures de la zone de confort indiquent les différents niveaux de rayonnement qui compenseraient les températures plus basses que confortables. La figure I.3 illustre le graphique bioclimatique d'Olgay.

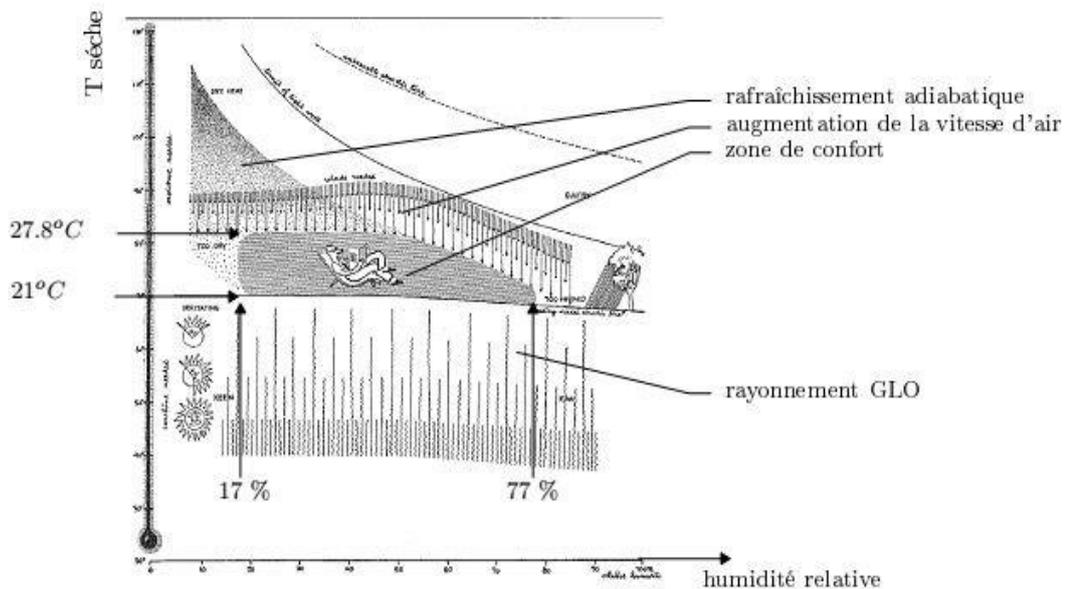


Figure I.3 : Diagramme bioclimatique d'Olgay (Source : Madi, 2015)

Un autre graphique est présenté par Givoni qui a utilisé un diagramme, avec la température du bulbe sec sur l'échelle horizontale et l'humidité absolue sur l'échelle verticale (Fig.I.4). Ce diagramme peut contenir un certain nombre de zones pour indiquer les conditions qui nécessitent différentes ressources de conception bioclimatique (Evans, 2007).

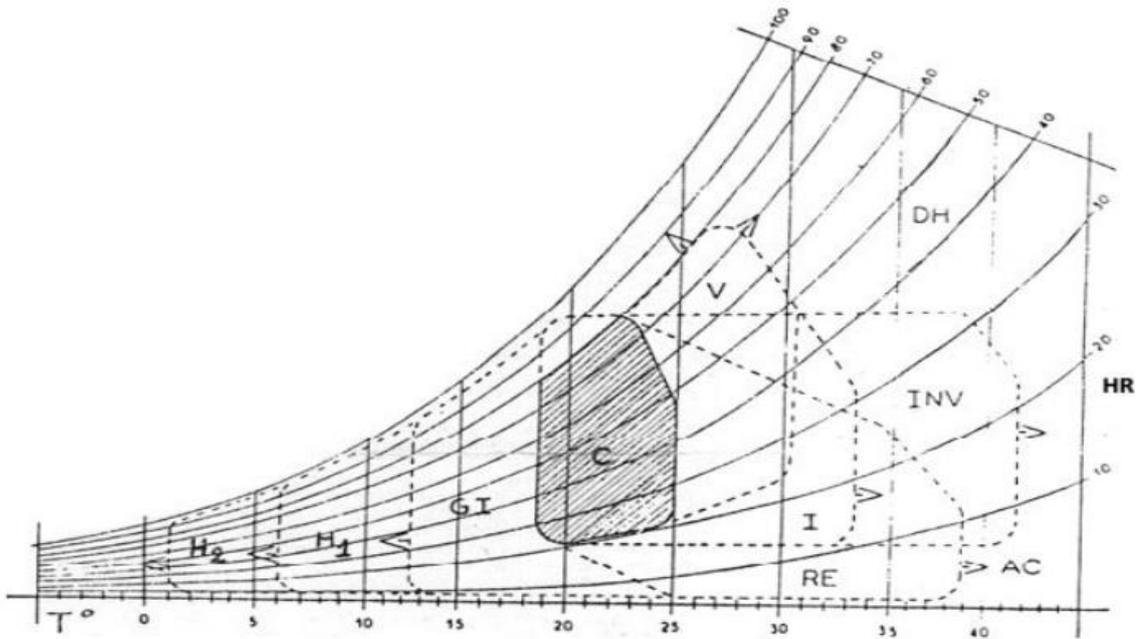


Figure I.4 : Diagramme bioclimatique de Givoni (Source : Madi, 2015)

1.8.3. Modèles de confort thermique

Malgré les difficultés à définir des conditions de confort acceptables, il existe plusieurs modèles pour mesurer le confort thermique. Les modèles généralement utilisés sont l'approche du bilan thermique (le modèle de Fanger) et les modèles adaptatifs (Mikler et al., 2008).

1.8.3.1. L'approche du bilan thermique (le modèle de Fanger)

Cette approche combine la théorie du transfert de chaleur avec la physiologie de la thermorégulation pour déterminer une gamme étroite de températures de confort que les occupants des bâtiments trouveront confortables. La plage est déterminée par un " PMV " (vote moyen prédit) qui définit le confort en termes de température et d'humidité de l'air car ces paramètres sont faciles à mesurer et à contrôler (Mikler et al., 2008).

1.8.3.2. L'approche adaptative

L'approche adaptative du confort thermique part de l'observation que l'homme peut prendre une série de mesures afin de maintenir sa température dans des limites proches et ainsi atteindre le confort thermique. Le modèle adaptatif est l'approche la plus adaptée aux bâtiments solaires passifs car il définit le confort avec une gamme plus large de paramètres thermiques et met en corrélation les conditions extérieures variables avec les conditions intérieures (Mikler et al., 2008). De Dear (1997) suggère que l'adaptation thermique humaine est composée de trois processus interdépendants : comportemental, physiologique et psychologique. L'adaptation comportementale comprend des actions telles que l'ajustement des vêtements, l'activité et la modification de l'environnement lui-même, comme l'ouverture/la fermeture des fenêtres. L'adaptation physiologique se décompose en adaptation génétique et acclimatation, tandis que l'adaptation psychologique décrit la mesure dans laquelle l'accoutumance et les attentes modifient les perceptions thermiques.

1.9. Amélioration de la performance thermique de l'enveloppe

L'amélioration des conditions thermiques et énergétiques demande une réflexion globale sur le bâtiment, sur les plans technique, architectural et financier. Différentes techniques sont possibles, notamment par l'intervention sur l'enveloppe (isolation du bâtiment par l'intérieur ou par l'extérieur), la protection solaire pour le confort d'été, la mise en place d'équipements plus performants reposant éventuellement sur les énergies renouvelables. À ce titre, l'intervention sur l'enveloppe ne doit pas seulement considérer les parois et les baies, mais également les défaillances techniques liées à la perméabilité à l'air des parois et aux ponts thermiques. L'isolation par l'intérieur présente souvent une plus faible efficacité vis-à-vis des ponts thermiques. Les solutions idéales n'existant pas, on opère au mieux selon les contraintes de terrain. Les réflexions sur les isolations thermiques et acoustiques doivent se faire de manière conjointe. En effet, certains isolants peuvent n'être efficaces que par rapport à un seul aspect, acoustique ou thermique.

On peut également améliorer la performance énergétique d'un bâtiment en installant différents dispositifs solaires sur l'enveloppe existante à savoir les vérandas comme pièces indépendantes ou en extension des cuisines et des séjours dans les espaces résidentiels (en veillant à une orientation et une disposition architecturale évitant les surchauffes estivales), les protections solaires des baies pour le confort d'été (la réglementation thermique invite à considérer les protections solaires plus spécifiquement pour les baies exposées au bruit, dans

la mesure où celui-ci influence l'ouverture de la fenêtre, élément important pour la ventilation), les dispositifs solaires de production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage (capteurs solaires thermiques en façade ou en toiture), et les dispositifs actifs de production d'électricité (panneaux photovoltaïques).

Conclusion

Les enveloppes des bâtiments comprennent des façades et les toits, qui ont le plus d'interactions et d'échanges avec l'environnement extérieur et naturel. Elles sont donc les parties des bâtiments les plus propices aux innovations. Répondre aux différents besoins complexes des bâtiments avec les nouvelles avancées technologiques nécessite un changement et une évolution dans la manière de concevoir l'enveloppe. De plus, en examinant ses fonctions, il est apparu que l'enveloppe joue plusieurs rôles importants et qu'elle ne peut pas être assimilée à une simple séparation entre l'intérieur et l'extérieur. À ce titre, le contrôle de la consommation d'énergie des bâtiments passe principalement par le contrôle de sa performance énergétique. Celle-ci est principalement influencée par des facteurs environnementaux qui sont plus souvent dynamiques que statiques. Compte tenu de leur échange d'énergie et de matériaux avec l'environnement extérieur, l'enveloppe est la partie la plus cruciale du bâtiment pour réguler l'échange et réduire la consommation d'énergie tout en fournissant des conditions de confort satisfaisantes pour l'occupant. De ce point de vue, il est important de limiter le taux de transfert thermique entre l'enveloppe du bâtiment et le milieu environnant par conduction, convection et rayonnement afin de maintenir l'équilibre thermique. Cela nécessite le contrôle des éléments architecturaux et des propriétés des matériaux du bâtiment en fonction des facteurs climatiques. Il est également nécessaire d'utiliser des stratégies de conception adaptées de ces facteurs.

CHAPITRE II :

L'ARCHITECTURE NÉO-VERNACULAIRE ET SON RAPPORT A L'ADAPTABILITÉ CLIMATIQUE DU BÂTIMENT

CHAPITRE III :

CONCEPTION CLIMATIQUE DES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS EN ALGÉRIE

CHAPITRE IV :

REVUE DE LITTÉRATURE ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Introduction

Il est nécessaire que le chercheur établisse un lien entre la théorie (ce qui a déjà été étudié sur le sujet) et le travail d'investigation qui sera réalisé (comment le problème étudié sera traité). La méthodologie de recherche donne au chercheur l'opportunité de positionner son problème de recherche dans une philosophie appropriée, de développer une approche adéquate pour aborder ce problème, de sélectionner une stratégie qui utilise les méthodes appropriées permettant d'analyser l'objet de l'étude en question, tous en garantissant la fiabilité et la validité des résultats.

L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une description détaillée du cadre méthodologique élaboré pour traiter le sujet investi dans la présente recherche. À ce titre un état de l'art sur les études précédentes permettra d'acquérir des connaissances solides sur les travaux de recherche réalisés ainsi que sur les techniques et outils ayant été exploités pour l'investigation. Les études à consulter seront celles ayant portées sur le thème de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe architecturale relativement à un climat chaud et sec ; avec en filigrane un intérêt pour les recherches focalisées sur l'exploration de l'impact des stratégies de refroidissement passif inspirées du vernaculaire, sur l'amélioration de la performance thermique du bâtiment résidentiel. Ce premier volet du chapitre permettra d'examiner les principaux aspects et facteurs influençant la performance de l'enveloppe. De plus, il mettra en évidence l'impact du système constructif, la matérialité et la forme des composants de l'enveloppe sur sa performance thermique et énergétique. Enfin, le deuxième volet du chapitre présentera la méthodologie de recherche adoptée et ses limites.

4.1. Exploration des démarches évaluatives ayant traité la question de l'adaptabilité climatique en architecture

La méthodologie de recherche est le choix des meilleures procédures, stratégies et moyens pour mener une recherche afin d'atteindre certains types de résultats et répondre à la problématique de recherche (Hyland, 2016). La recherche scientifique est un processus dynamique ou une démarche rationnelle qui permet d'examiner des phénomènes, des problèmes à résoudre, et d'obtenir des réponses précises à partir d'investigations. Ce processus se caractérise par le fait qu'il est systématique et rigoureux et conduit à l'acquisition de nouvelles connaissances. Les fonctions de la recherche sont de décrire, d'expliquer, de comprendre, de contrôler, de prédire des faits, des phénomènes et des

conduites. La rigueur scientifique est guidée par la notion d'objectivité, c'est-à-dire que le chercheur ne traite que des faits, à l'intérieur d'un canevas défini par la communauté scientifique. De plus les progrès des connaissances, les sauts significatifs du savoir, sont liés à des changements dans l'utilisation des instruments, de nouvelles définitions de critères pour l'identification des phénomènes et des techniques utilisées dans l'analyse des données, etc.

4.1.1. L'utilisation de la méthode comparative

La méthodologie de l'analyse comparative a été utilisée pour trois types d'objectifs : la construction d'histoires déductives, le développement de typologies et l'explication de processus généralisés. Les unités de comparaison distinguent les méthodologies comparatives et les éléments ou caractéristiques particuliers utilisés pour comparer les unités. La comparaison illustrative est la forme la plus courante d'analyse comparative et a été largement employée par des théoriciens de divers horizons. Les éléments sont utilisés comme exemples pour expliquer ou exemplifier des phénomènes présents dans différentes unités. Ils sont choisis pour leur valeur illustrative et non pas systématiquement sélectionnés pour être statistiquement représentatifs.

La deuxième stratégie est la comparaison complète ou universelle, dans laquelle tous les éléments du domaine étudié et définis géographiquement ou de manière topique, constituent les unités de comparaison. Les enquêtes régionales ethnographiques exhaustives et les analyses de sujets particuliers utilisent cette approche. Enfin, la comparaison par échantillonnage délimite stratégiquement une partie de l'ensemble, dans le but de sélectionner des données qui sont statistiquement représentatives des variations au sein de l'ensemble et qui sont destinées à servir de base à des généralisations statistiques.

Pour la présente recherche et afin d'atteindre les objectifs de l'étude empirique, une enquête approfondie sera menée en utilisant une analyse comparative pour deux bâtiments résidentiels sélectionnés dans la ville d'El Oued. Les raisons du choix de l'analyse comparative comme méthodologie de recherche pour cette étude découlent du fait que cette approche a, depuis longtemps, fait ses preuves pour identifier, analyser et expliquer les similitudes et les différences. De fait, l'application de cette approche, dans le cadre de la présente recherche, est basée sur la définition de R. Murray Thomas. Ainsi, en se conformant au processus de comparaison tel que défini par cet auteur, les cinq étapes de l'analyse sont les suivantes: 1 : la sélection de la catégorie d'objets à comparer (dans cette recherche, le choix se porte sur les bâtiments résidentiels), 2 : l'identification de deux ou plusieurs types d'objets au sein de cette

catégorie (dans cette recherche, les types sont les appartements néo-vernaculaires et contemporains), 3 : la sélection des caractéristiques des objets à comparer (cette recherche se concentrera sur les questions des éléments conceptuels de l'enveloppe architecturale tels que la matérialité et la forme), 4 : la collecte et la présentation d'informations descriptives sur l'état de chaque objet (les données sont obtenues à partir des enquêtes sur le terrain), et 5 : la présentation de conclusions sur la façon dont les objets sont similaires et/ou différents. Dans cette recherche, les conclusions concernent les critères de comportement environnemental pour les 2 bâtiments -néo-vernaculaire et contemporain- pris comme cas d'étude.

4.1.2. Choix du corpus et études de cas

La méthodologie fondée sur les études de cas est d'une forte importance dans la recherche architecturale. Cette approche se caractérise par une sélection délibérée du cas à étudier, qui s'effectue normalement par une collecte de données multi-méthodes. Des généralisations sont faites à partir d'un cas particulier en faveur de la théorie ou d'autres cas. Dans le domaine de l'architecture, le cas peut être un article. La compréhension d'un article nécessite souvent la connaissance non seulement de son environnement contemporain, mais aussi du contexte historique de sa conception. La généralisation est légitime si elle est abordée et rendue explicite, comme le souligne Malcolm Williams (2002). Une étude de cas est censée saisir la complexité d'un cas unique. Les études de cas d'architecture fournissent des normes cohérentes pour la documentation des spécifications d'architecture pour la planification, la gestion, la communication et l'exécution des activités de développement de systèmes.

Pour la présente recherche, le choix de l'approche du cas d'étude est dicté par trois objectifs à atteindre relativement au travail de terrain. En effet, le premier objectif de l'étude empirique, et implicitement du choix des cas d'étude, est d'examiner et d'analyser le potentiel de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe dans l'architecture étudiée (bâtiment résidentiel). Les principes de l'adaptabilité climatique peuvent être reconnus dans les cas des 2 bâtiments étudiés à travers certains critères prédéfinis utilisés pour identifier cet aspect. Les deux bâtiments (cas études) choisis sont les plus appropriées pour examiner et analyser l'adaptabilité climatique de l'enveloppe car ils sont représentatifs du type d'architecture résidentielle dans la région selon l'analyse thématique et empirique menées en amont.

En outre, le deuxième objectif de l'étude empirique étant d'évaluer les indicateurs de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe ; cet objectif ne pouvait être atteint qu'en étudiant des exemples de bâtiments existants. Enfin, le troisième objectif de l'étude empirique consistait de

tester le cadre conceptuel élaboré concernant l'évaluation de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe, selon une analyse systématique des méthodes d'évaluation de l'adaptabilité climatique reconnues et modifiée en fonction du contexte et des conditions locales. De ce point de vue, l'application de la méthode d'évaluation devait porter sur certaines données et statistiques pour obtenir des résultats qui ne pouvaient être obtenus à partir de croquis ou de photos ; le recours à deux bâtiments pris comme cas d'étude, était plus approprié. En outre, certains critères de la méthode d'évaluation de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe (comme la consommation d'énergie, la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment et l'émission de CO₂) nécessitaient des données détaillées (entrées ou *inputs*) pour obtenir des résultats précis (sortie ou *outputs*). Ainsi, il était essentiel d'obtenir des dessins architecturaux (plans, sections, élévations) relatifs aux bâtiments pris comme cas d'étude. Il est crucial d'indiquer que les cas étude choisis ne sont pas représentatifs dans l'absolu de l'architecture étudiée, et que les résultats obtenus à partir de l'analyse comparative sont utilisés comme indicateurs plus que comme une évaluation réelle de l'objet d'étude.

4.1.3. Méthodes d'analyse des données

L'analyse des données est l'action de transformer les données dans le but d'en extraire des informations utiles et de faciliter les conclusions. Selon le type de données et la problématique étudiée, cela peut inclure, l'application de méthodes statistiques (données chiffrées), la sélection ou l'élimination de certains sous-ensembles en fonction de critères spécifiques, ou d'autres techniques. Bien que la recherche en architecture fournisse un ensemble de techniques pour permettre la collecte d'informations, en revanche, leur traitement peut se faire aussi bien par l'analyse quantitative que l'analyse qualitative.

Pour rapprocher les propositions théoriques de la réalité, ou pour confronter les hypothèses à l'observation, il faut opérationnaliser les concepts, c'est-à-dire établir une relation systématique entre les concepts et la réalité observable, au moyen d'indicateurs. On peut définir les indicateurs comme des signes, comportements ou réactions directement observables par lesquels on repère au niveau de la réalité les dimensions d'un concept. Opérationnaliser un concept, c'est donc lui associer un ou plusieurs indicateurs qui permettront de distinguer avec exactitude les variations observées dans la réalité par rapport au concept. Distinguer les variations, cela veut dire mesurer : l'opérationnalisation d'un concept conduit donc à la mesure.

4.1.3.1. L'évaluation quantitative

Cette approche consiste à décrire, à expliquer, à contrôler et à prédire objectivement des faits et événements positifs observés par le chercheur. Elle vise à recueillir des données observables et quantifiables. Cette méthode s'appuie sur des instruments ou techniques de recherche quantitatives de collecte de données dont, en principe, la fidélité et la validité sont assurées. Elle aboutit à des données chiffrées qui permettent de faire des analyses descriptives, des tableaux et graphiques, des analyses statistiques de recherche de liens entre les variables ou facteurs, des analyses de corrélation ou d'association, etc (Huang et Zhai, 2020).

4.1.3.2. L'évaluation qualitative

Dans l'approche qualitative, le chercheur part d'une situation concrète comportant un phénomène particulier qu'il s'agit de comprendre et non de démontrer, de prouver ou de contrôler. Il veut donner sens au phénomène à travers ou au-delà de l'observation, de la description de l'interprétation et de l'appréciation du contexte et du phénomène tel qu'il se présente. Cette méthode recourt à des techniques de recherche qualitatives pour étudier des faits particuliers (études de cas, observation, entretiens semi-structurés ou non-structurés, etc.). Le mode qualitatif fournit des données de contenu, et non des données chiffrées.

La recherche qualitative est basée sur plusieurs méthodes et implique une approche interprétative naturaliste de son sujet. Elle implique des études de la collecte d'une variété de matériaux empiriques - cas d'étude et l'expérience personnelle. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser des échantillons plus petits mais ciblés plutôt que de grands échantillons aléatoires. La recherche qualitative catégorise les données en modèles comme base principale pour l'organisation et la présentation des résultats. L'analyse qualitative fait référence à l'analyse de contenu, que nous utiliserons pour analyser les documents et les données d'archives d'une part, et l'analyse du chercheur d'autre part.

4.1.3.3. L'approche mixte

Cette approche est une combinaison des deux précédentes. Elle permet au chercheur de mobiliser aussi bien les avantages du mode quantitatif que ceux du mode qualitatif. Cette conduite aide à maîtriser le phénomène dans toutes ses dimensions. Les deux approches ne s'opposent donc pas. Elles se complètent : l'approche qualitative, par observation, par entretien et par protocoles, etc.... permet de récolter énormément d'informations. Certaines

d'entre elles n'étaient pas attendues. Elles font progresser la recherche. Cependant la durée d'une enquête qualitative limite son recours à des sujets de recherche pour lesquelles on dispose de peu d'informations. L'enquête qualitative sera choisie dans une phase exploratoire d'un nouveau sujet de recherche. Elle permet de développer une théorie et relève donc d'un processus inductif. L'approche quantitative repose sur un corpus théorique qui permet de poser des hypothèses.

Pour la présente recherche, les données nécessaires pour l'analyse comparative des cas d'étude choisis, seront collectées grâce à des techniques bien précises ; cependant, les 2 méthodes d'analyse seront employées pour traiter les données collectées. Ainsi, une analyse qualitative sera utilisée pour l'évaluation architecturale de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe relativement aux 2 bâtiments choisis comme cas d'études ; les données collectées seront fournies à partir des documents, relevés photos, etc. En revanche, une analyse quantitative sera utilisée pour traiter les données collectées à travers les mesures in situ, la simulation, etc.

4.1.4. La simulation

La Simulation Thermique Dynamique (STD), consiste à représenter numériquement (à modéliser) un ou plusieurs bâtiments via un logiciel. L'objectif est de simuler, à l'aide d'un modèle numérique, le comportement thermique du ou des bâtiment(s), et ce selon de nombreux paramètres et caractéristiques. Ainsi, pour effectuer une étude par simulation portant sur le comportement de l'enveloppe thermique du bâtiment (parois, toiture, vitrages...); les paramètres suivants doivent être pris en considération : -Apports internes (scénarios d'occupation, pertes de chaleur des équipements électriques...); -Implantation géographique, exposition et ensoleillement ; -Inertie thermique du bâtiment ; -Données météo locales. Cette méthode d'évaluation a été mise au point pour remplacer les calculs simples (analyse numérique) utilisés auparavant dans le domaine du bâtiment.

Pour répondre aux exigences environnementales et aux attentes en termes d'efficacité énergétique lors de la conception d'un bâtiment, il est nécessaire de prendre en considération des critères physiques complexes et de permettre un paramétrage précis. En effet, lorsque la conception tend vers une consommation énergétique très faible et un contrôle très précis d'un bâtiment, certains effets physiques ne peuvent être négligés. De nouveaux outils de modélisation ont vu le jour permettant de prédire et d'évaluer les impacts des conditions climatiques sur le confort et la consommation énergétique du bâtiment analysé de façon

précise dans le temps et dans l'espace (Fig. IV.1). Ces logiciels se basent sur la programmation (modélisation) des futurs composants du bâtiment (matériaux, vitrage, revêtements...) et d'en esquisser un plan en 3D, prenant en compte les données du contexte (climat, orientation, etc.) (Berghout, 2019).

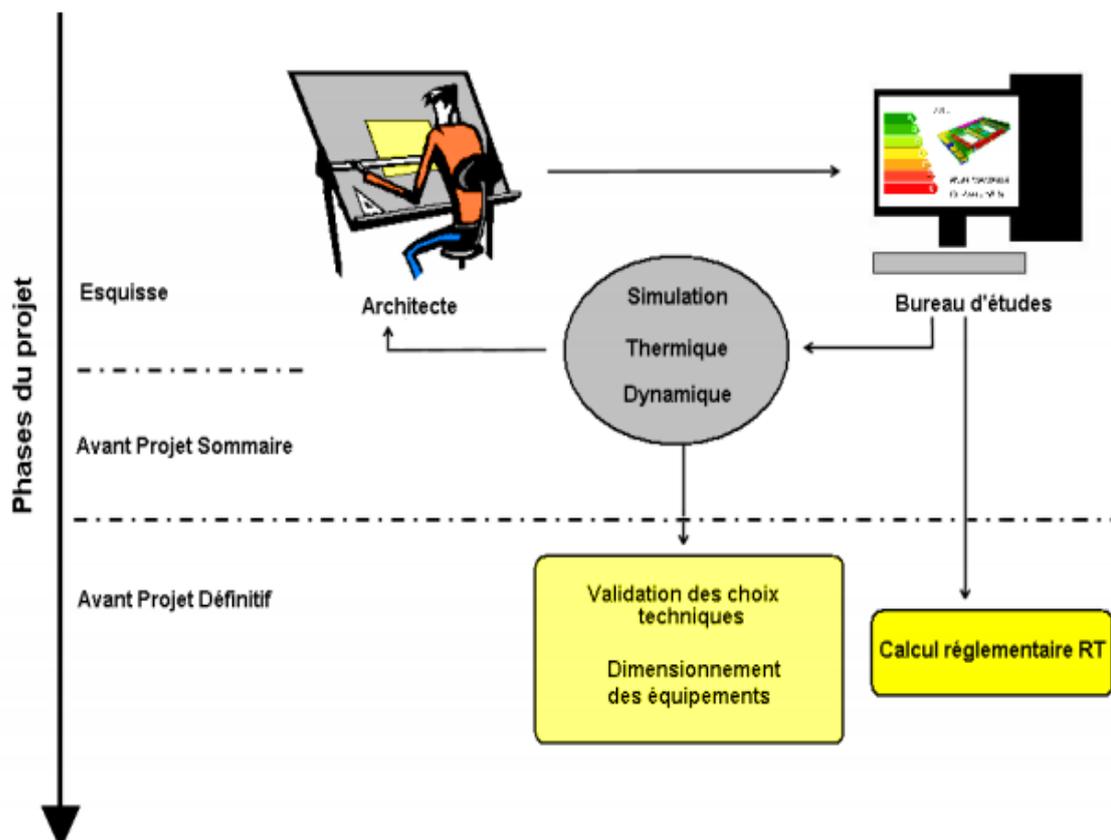


Figure IV.1 : Schéma qui présente l'intégration de la simulation thermique au cours du processus conceptuel
(Source : Berghout, 2019)

4.1.4.1. Quelques outils de simulation thermique

- **Design Builder** : ce programme repose depuis sa création sur le concept de BIM et les meilleurs moteurs de calcul afin d'offrir de nombreuses possibilités de simulation en conservant une ergonomie aisée. Son interface est pensée pour améliorer la productivité des bureaux d'études, réduire la redondance des saisies et permettre une évolution fluide du modèle à chaque phase du projet (Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique, 2015). Le logiciel est basé sur le moteur de calcul Energy+, qui est un moteur de calcul développé par le DOE (département de l'énergie des US), et qui permet d'effectuer une simulation couplée du bâtiment et des systèmes CVC et d'éclairage naturel et artificiel (Fig. IV.2).

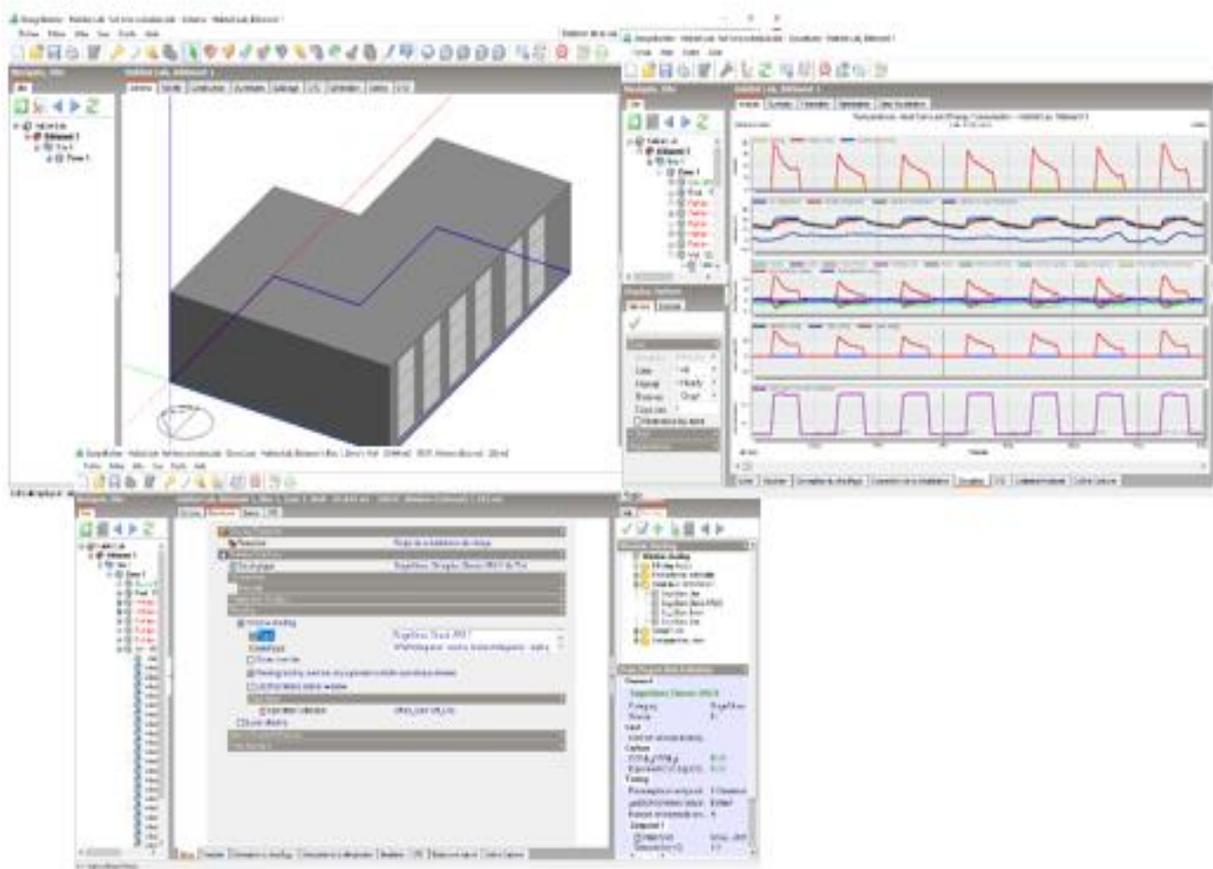


Figure IV.2 : L'interface du logiciel Design Builder (Source : sageglass, 2019)

- Grasshopper** : Selon le site internet mediatheque-numerique.loire, Grasshopper est une extension du célèbre logiciel de CAO Rhinoceros 3D, développé par Robert McNeel & Associates. Ce plug-in permet de créer des modèles paramétriques grâce à une programmation visuelle sur Rhinoceros 3D. L'atout de Grasshopper est son très haut niveau de programmation, c'est à dire très accessible au plus grand nombre, sans avoir besoin de compétences spécifiques en matière de développement. GrassHopper est donc un outil de programmation visuelle, dédié à des utilisateurs de Rhinoceros 3D qui ne sont pas programmeurs. Il propose d'assembler visuellement des éléments, qui correspondent à des fonctions ou à des sous-programmes, dans le but de faciliter considérablement la génération de codes, sans aucun risque d'erreur de syntaxe (Fig. IV.3).

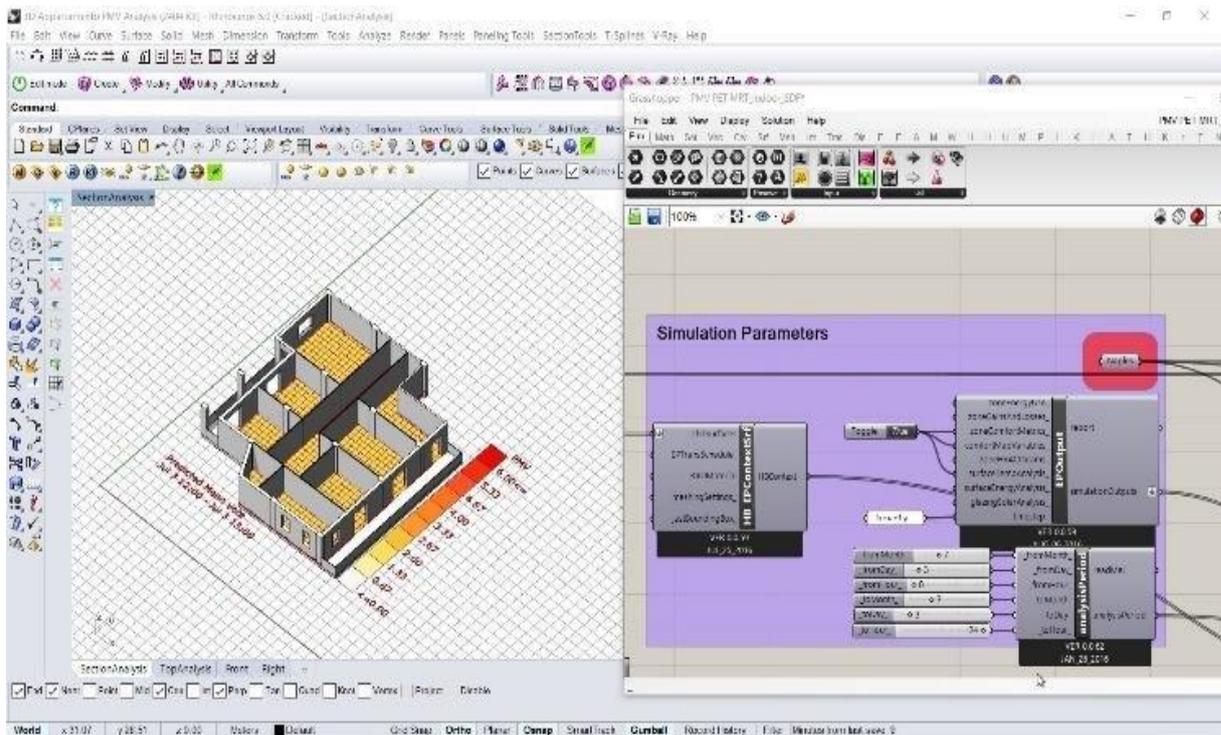


Figure IV.3 : L'interface du logiciel Grasshopper (Source : Bassolino et Scarpati, 2017)

4.1.4.2. Aperçu sur l'utilisation de la simulation comme outil d'évaluation thermique

Selon Yang et al., (2019) considèrent que le logiciel EnergyPlus est l'un des outils les plus performants quand il s'agit d'effectuer des simulations thermiques dynamiques à des fins d'évaluation de la performance thermique du bâtiment. Une autre étude réalisée par Kaihoul et al., (2021) a porté sur l'évaluation d'un bâtiment à usage d'habitation réalisé par El-Miniawy à Ouled Djellal et où des stratégies passives de conception ont été appliquées. L'évaluation du bâtiment a été réalisée à l'aide d'une simulation dynamique avec EnergyPlus. Elle a permis de comprendre le comportement thermique du bâtiment étudié et sa demande énergétique selon sept scénarios différents où l'impact des stratégies passives et de certains paramètres conceptuels ont été explorés.

De leur côté, Benchekroun et al., (2019) ont mené une étude portant sur l'évaluation des conditions hygrothermique dans les bâtiments résidentiels ottomans de la vieille ville d'Alger. La recherche visait à identifier la nature des transformations architecturales et à analyser leur impact sur le confort hygrothermique et le microclimat intérieur des vieilles demeures de la Casbah, afin de suggérer des moyens pour améliorer le niveau de confort actuel dans les maisons traditionnelles. Pour atteindre cet objectif, et obtenir des résultats convaincants, plusieurs méthodes ont été adoptées, notamment, la simulation dynamique thermique. Les

tests de simulation ont été réalisées à l'aide du logiciel DesignBuilder v.4.8 qui a permis d'évaluer les performances des deux maisons étudiées en termes d'efficacité énergétique et de confort.

4.2. Aperçu sur les recherches précédentes relatives au traitement de l'enveloppe architecturale dans les zones chaudes et arides

Dans sa recherche doctorale, Sodagar (1991) s'est intéressée à l'identification et l'utilisation de solutions de conception pour améliorer l'environnement thermique des bâtiments résidentiels dans les climats chauds et secs en général et dans la zone aride chaude de l'Iran en particulier. L'influence de diverses options de conservation de l'énergie relativement à une maison prototype a été analysée à l'aide du programme de simulation informatique dynamique ESP. Cette recherche avait pour but de fournir une série de directives de conception à utiliser dans le processus de conception des bâtiments par les constructeurs, les architectes et les ingénieurs. Les solutions de conception recommandées sont parmi celles qui peuvent être obtenues économiquement par l'application architecturale de matériaux de construction et de compétences communément disponibles, tout en étant appropriées au contexte socio-économique local. L'effet de paramètres tels que la masse thermique et l'isolation, les caractéristiques de surface, l'orientation, la conception des fenêtres, l'ombrage et les stratégies de contrôle de l'environnement sur la performance thermique de la maison prototype ont été étudiés. Cette recherche a fini par démontrer que la conception passive de l'enveloppe du bâtiment est l'une des méthodes les plus efficaces pour minimiser l'impact des conditions extérieures difficiles, réduire le gain de chaleur et améliorer les conditions thermiques intérieures dans le climat chaud et sec du Yémen. D'autant plus que les architectes locaux accordent moins d'attention à la conception de l'enveloppe du bâtiment pour réduire la température de l'air intérieur.

Une autre recherche réalisée par Bakhlah (2015) dans le cadre d'un travail doctoral s'est intéressée aux moyens de réduire la température de l'air intérieur en appliquant des modifications à la conception de l'enveloppe du bâtiment à travers une étude expérimentale et par simulation. L'investigation a été réalisée en deux phases : dans la première phase, des mesures intérieures et extérieures ont été faites in situ par rapport à quatre bâtiments choisis dans la zone urbaine ancienne et nouvelle de la ville de Tarim, au Yémen. Plusieurs modifications ont été testées sur l'enveloppe du bâtiment, notamment, l'ajout de dispositifs d'ombrage et la peinture du toit à la chaux. La deuxième phase a porté sur la simulation

informatique à l'aide du logiciel IES (VE) afin d'étudier les effets des différentes modifications de l'enveloppe. Les modifications ont été effectuées sur le toit, les murs, l'orientation, le rapport fenêtre/mur et les dispositifs d'ombrage externes. L'étude a été menée sur chaque paramètre dans la dernière étape, puis la combinaison de toutes les solutions les plus performantes a été faite. Les résultats ont montré qu'en appliquant une combinaison des meilleures modifications, la température intérieure a pu être réduite par rapport aux mesures sur le terrain.

Sghiouri et al., (2019) ont exploré différentes approches pour réaliser une réduction de la consommation d'énergie et une amélioration des conditions de confort thermique dans les bâtiments résidentiels à New Minia, en Égypte. Différentes stratégies passives ont été examinées. Les différents scénarios proposés concernaient l'isolation thermique, l'ombrage fixe, la ventilation, le vitrage ; ces paramètres ont été simulés par le logiciel IDA ICE 4.7. Les résultats ont montré que les stratégies passives les plus efficaces étaient l'isolation thermique et le vitrage. D'autre part, la ventilation représentait la stratégie passive la moins efficace, elle n'est donc pas recommandée pour les bâtiments à climat chaud et aride.

L'architecture traditionnelle prouve que le choix de valeurs appropriées pour les paramètres de conception en tenant compte des conditions climatiques permet d'obtenir des environnements intérieurs confortables sans utiliser d'énergie excessive. Une étude élaborée par Kocagil et Oral (2015) vise à examiner l'effet de la forme du bâtiment et de la texture de l'habitat sur les charges de chauffage et de refroidissement en analysant les paramètres de conception des maisons traditionnelles de Diyarbakır, ville représentative de la zone climatique chaude et sèche de Turquie, par le biais de simulations effectuées par Design Builder. La performance thermique des formes de bâtiment, qui sont générées à partir de l'architecture traditionnelle, est évaluée dans les textures de règlement définies et les résultats présentent l'interaction entre la forme du bâtiment, la texture du règlement et les charges énergétiques. Les résultats de l'étude montrent que la forme et la texture du bâtiment ont une influence sur les charges de chauffage et de refroidissement dans les zones climatiques chaudes et sèches, afin de fournir des conditions optimales. La systématique simplifiée développée pour comparer les effets des variables choisies prouve que les valeurs appropriées pour les paramètres de conception conduisent le bâtiment vers une conception économe en énergie. En accord avec ces résultats, il apparaît clairement que le processus de conception doit commencer par l'analyse des conditions environnementales et que la forme du bâtiment

doit être conçu en fonction des données climatiques. L'intégration des techniques d'efficacité énergétique des maisons traditionnelles dans les méthodes de construction avancées peut être considérée comme une étape innovante vers la conception de futurs habitats contemporains efficaces sur le plan énergétique.

Dans le cadre de leurs travaux, Rais et al., (2020) ont mis en relief la question de la surconsommation d'énergie dans le secteur résidentiel en Algérie et ils estiment que cette situation est due aux techniques de conception et de construction, qui ne tiennent pas compte des conditions climatiques locales. Pour évaluer cette situation, une étude axée sur l'analyse des bâtiments résidentiels existants en Algérie, en termes de performance énergétique, performance thermique, éclairage naturel et qualité de l'air intérieur, en utilisant un logiciel de simulation dynamique a été élaborée. Une conception de bâtiment typique dans un climat chaud et sec a été choisie. Les résultats ont révélé que les bâtiments résidentiels existants ne sont pas conformes aux normes de conception en matière d'efficacité énergétique. Il a été conclu que d'autres stratégies devraient être appliquées dans ce secteur, en termes de conception des bâtiments, de matériaux et de configuration des façades.

L'article de Yassine et al., (2018) traite les conditions climatiques dans lesquelles les habitations du climat saharien ont été construites et ainsi que stratégies importantes et des techniques de climatisation passive de la conception des habitations il présente une revue des différentes techniques développées. Ces différentes méthodes et stratégies passives confèrent aux habitations sahariennes, adaptation, efficacité et durabilité dans ces conditions chaudes et arides du désert et peuvent être une grande source d'inspiration architecturale pour de nouveaux projets. Les auteurs ont confirmé que Le bâtiment de conception passive est une technique environnementale alternative, en comparaison avec les systèmes mécaniques utilisés dans la conception et la construction. Dans la région du Sahara, la forme urbaine compacte et l'orientation des bâtiments en fonction du soleil et du vent, l'emplacement des espaces d'été et d'hiver, l'utilisation de matériaux naturels et d'énergie propre en tant que potentiels environnementaux, les passages étroits et fermés, les espaces souterrains, les patios profonds, les murs épais, l'utilisation de l'eau et des plantes, ainsi que la composition morphologique qui respecte le site, sont les principales caractéristiques de l'architecture traditionnelle qui donne à l'habitation saharienne l'adaptation, l'efficacité et la durabilité dans les conditions extrêmement difficiles du désert. Le travail a permis de proposer quelques recommandations pour une conception passive adaptée, à savoir l'utilisation de dômes comme solution pour réduire la température interne, la maximisation de l'utilisation de la lumière

naturelle pour réduire la consommation d'énergie, l'utilisation du modèle de maison à patio, l'utilisation de matériaux naturels (adobe) dans la construction et enfin l'utilisation de moucharabiehs pour les fenêtres extérieures.

Une recherche de Gedouh et al., (2019) tente d'évaluer l'environnement thermique intérieur d'un bâtiment à patio en introduisant la technique de la façade double peau. Une campagne de mesure a été menée dans deux bâtiments sur cour utilisant différentes façades double peau pendant la saison estivale, via une instrumentation de mesure numérique, pour collecter les données de température de l'air et d'humidité relative. Les données climatiques ont ensuite été utilisées pour évaluer l'impact des indicateurs morpho-climatiques sur l'environnement thermique intérieur. L'analyse des résultats a montré que l'utilisation de la façade double peau diffère et dépend des objectifs d'amélioration de l'environnement thermique ; de plus, l'utilisation de la façade double peau pour la ventilation et l'ombrage des surfaces vitrées a un impact efficace améliorant les qualités de l'environnement thermique intérieur, en particulier pour les espaces avec des orientations sud et ouest.

À travers leur étude menée à Morelia (Mexique), Lawrence et Becerra-Santacruz (2016) démontrent que la mauvaise performance thermique des logements au Mexique est dû aux propriétés de l'enveloppe du bâtiment et de l'impact du rayonnement solaire ainsi que du nombre d'occupants et leurs comportements. L'étude de cas qu'ils ont réalisée sous les conditions d'un climat chaud et tempéré, se concentre sur les logements à loyer modéré qui utilisent un système de construction en béton coffré. La recherche remet en question l'opportunité d'utiliser des prototypes de logements identiques dans différentes régions climatiques. L'étude a porté sur deux saisons, déterminées par une analyse climatique identifiant les mois qui présentaient les conditions les plus extrêmes au cours de l'année. Les conditions thermiques intérieures ont été surveillées et sont comparées à la température de confort adaptative et à la zone de confort dérivées des normes existantes. Une enquête de terrain sur le confort thermique a également été menée, comprenant la distribution de questionnaires au cours des deux saisons. Les résultats sont comparés aux données contrôlées pour évaluer la performance thermique globale de la typologie de logement. Les résultats ont révélé une mauvaise performance thermique dans les maisons, pour lesquelles les conditions de confort thermique se situaient nettement en dehors des limites requises et ce au cours des deux périodes. Les facteurs impliqués étaient, notamment les propriétés de l'enveloppe du bâtiment, l'impact du rayonnement solaire, le nombre d'occupants et leur comportement. Les résultats indiquent, également, qu'il est plus facile pour les sujets de s'adapter à des conditions

plus fraîches qu'à des conditions plus chaudes. Ces résultats élargissent les connaissances existantes sur les performances de ce système de coffrage en béton au Mexique ainsi que d'autres systèmes de construction industrialisés dans des climats similaires. Ils démontrent l'urgence de concevoir des solutions viables en fonction du climat local et remettent en question l'utilisation de prototypes de logements identiques dans différentes régions climatiques (Fig. IV.4).

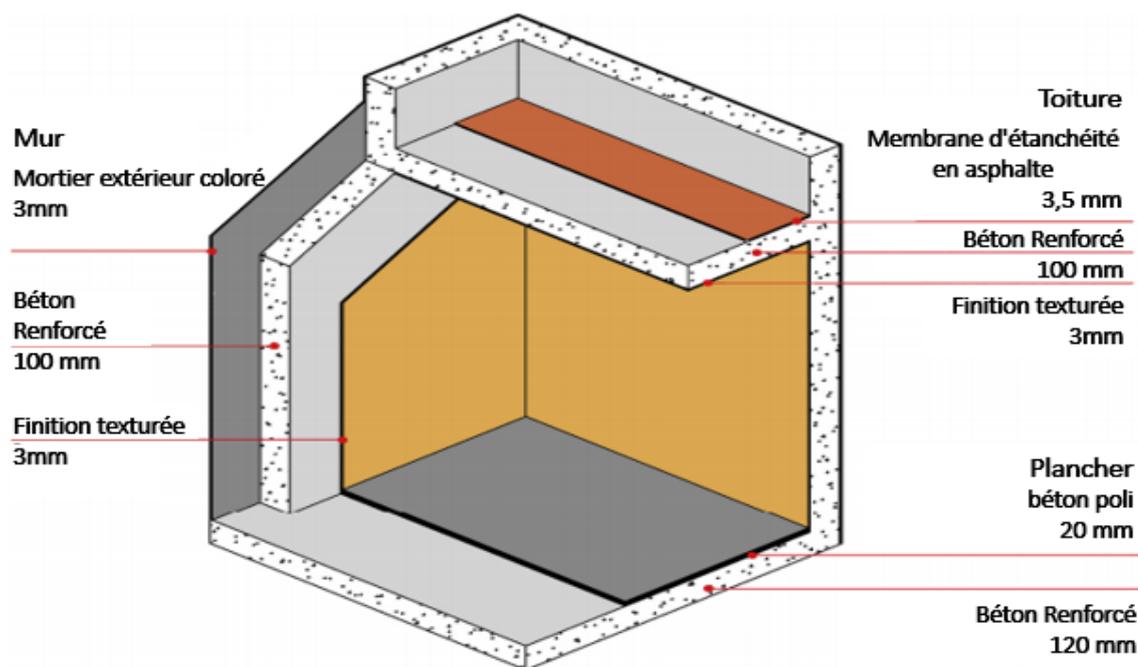


Figure IV.4 : Éléments et matériaux de construction (Source : Lawrence et Becerra-Santacruz, 2016)

Les résultats de l'évaluation thermique ont indiqué que l'utilisation de systèmes de construction industrialisés pour les logements à loyer modéré au Mexique a été un succès en termes de capacité à fournir des quantités massives de logements pour répondre à une forte demande. Cependant, d'un point de vue environnemental, le système de construction industrialisé examiné se situe nettement en dehors des limites du confort thermique dans les deux périodes étudiées. Les résultats de l'évaluation approfondie après occupation ont démontré que, même en utilisant la norme de confort adaptative avec une large bande de confort (7 K pour une acceptation de 80 %), le système de coffrage en béton exige l'utilisation d'un chauffage et d'un refroidissement supplémentaires environ 50 % du temps (à la fois en saison chaude et en saison froide) afin de fournir des conditions de confort thermique intérieur appropriées. En outre, les avis des occupants ont indiqué un niveau élevé d'insatisfaction des conditions thermiques intérieures dans la typologie analysée.

De nombreux développements similaires de logements de masse peuvent être observés dans tout le Mexique. L'auteur a enquêté dans les cinq régions climatiques du Mexique pour constater que le même système de construction par coffrage en béton est systématiquement appliqué dans toutes les régions. Dans les cinq régions, les maisons ne se différencient que par la couleur de la finition extérieure. Cette recherche fournit une vision claire du comportement thermique du système de construction industrialisé étudié et indique les faiblesses de tels systèmes.

De leur côté, Shahrhan et al., (2017) ont analysé les aspects du confort thermique dans les maisons individuelles traditionnelles dans les régions montagneuses et désertiques de la Libye, dans le but d'étudier les avantages des concepts vernaculaires dans la conception contemporaine. L'étude permet d'établir des critères de valorisation en investiguant les structures, les matériaux, la disposition interne, le toit, les ouvertures et d'autres aspects qui influencent la durabilité. Les résultats de cette recherche montrent que la maison traditionnelle libyenne dans la région désertique s'appuie sur la conception verticale ; elle s'appuie également sur les matériaux de construction locaux qui ont pour fonction de rendre la maison plus adaptée au climat. La température élevée conduit à la considération de la "conception fermée", où le style dominant est le système compact, afin de créer un abri contre le climat extrême à travers des rues profondes, tordues et étroites, ce qui signifie que la construction est ombragée par les murs et les plafonds afin d'être fraîche et confortable, même pendant la période la plus chaude de la journée. Cette conception architecturale des maisons traditionnelles montre à quel point la vie sociale est valorisée, notamment au niveau de l'intimité, où les ouvertures donnant sur l'extérieur sont rares. Les murs extérieurs ont une apparence générale de couleurs claires en raison des murs brunâtres et jaunes pâles faits de briques d'argile séchées au soleil, le couronnement des murs et les épis de faîtage aux coins sont blanchis à la chaux, ce qui donne un trait caractéristique à l'apparence extérieure des maisons. Ces couleurs pâles et claires sont d'une impression efficace ; de même, elles améliorent la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment aux conditions climatiques extrêmes, les couleurs claires sont les surfaces les plus réfléchissantes, car leur réflectivité est d'environ 75÷85%, elles reflètent donc la plupart du rayonnement solaire qui frappe la surface, minimisant les charges thermiques sur les surfaces extérieures et améliorant le microclimat à l'intérieur de la maison. Les résultats montrent que les maisons vernaculaires optimales sont plus adaptées au climat et à la réalisation des aspects de confort thermique et d'adaptabilité dans celui-ci. La stratégie de construction de maisons traditionnelles dans deux

régions de Libye suppose l'utilisation de matériaux naturels, des briques faites d'argile et séchées au soleil sont utilisées pour construire les murs de la maison individuelle dans la région désertique de la Libye. Les souches des palmiers sont utilisées pour le plafond, et sur celles-ci, de petites pierres calcaires et de l'argile sont posées. Les souches sont également utilisées pour les fermes et les poutres au-dessus des fenêtres et des portes. Tous les matériaux sont naturels et trouvés dans les environs de la ville. Le système structurel s'appuie sur des murs porteurs interconnectés entre les maisons. Ce type de structure permet de relier fermement les maisons entre elles afin d'augmenter le soutien et d'assurer l'isolation de l'environnement extérieur. Les murs extérieurs et intérieurs sont larges à la base et l'épaisseur diminue tandis que la hauteur augmente. Leur largeur varie de 40 à 70 cm, ce qui est adéquat pour le confort thermique à l'intérieur de la maison (Fig. IV.5). La hauteur du plafond atteint jusqu'à 2,50 m dans les pièces, tandis que la hauteur dans les unités de stockage est de 1,60 m.

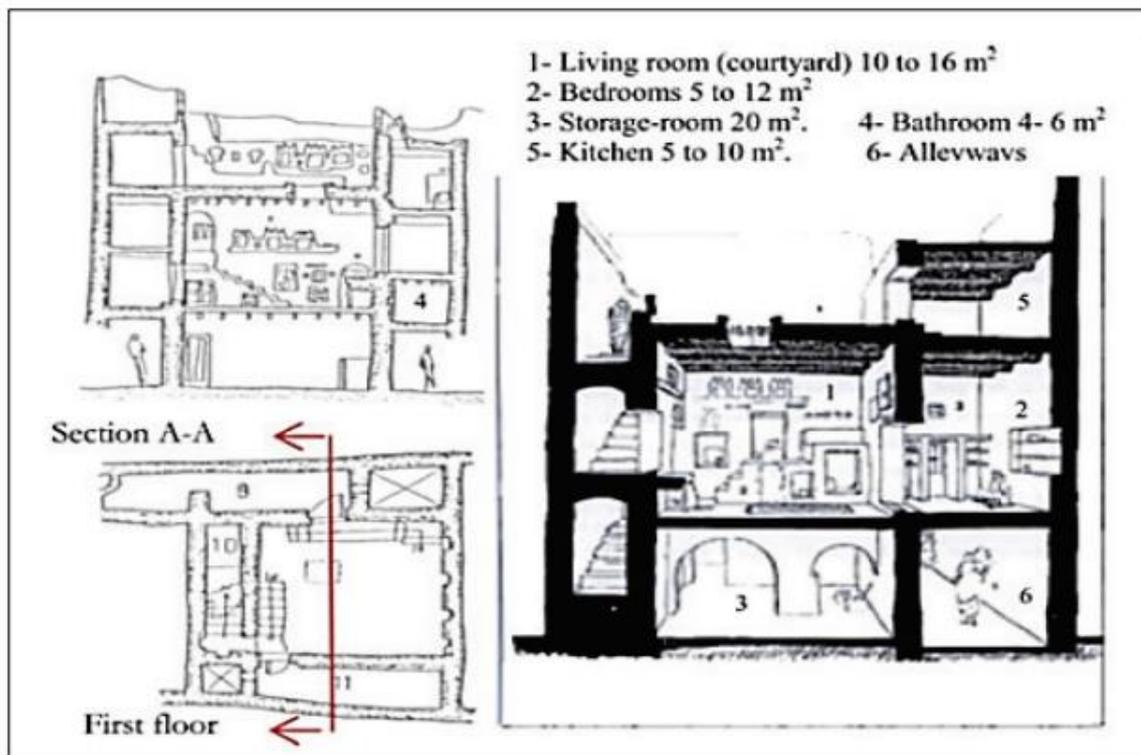


Figure IV.5 : Plan et coupes de l'ancienne maison de Ghadamès (Source : Ealiwa,2000)

Le toit terrasse est un élément significatif dans la maison vernaculaire de Ghadamès, il joue un rôle important dans la vie d'une famille puisqu'il est le seul espace extérieur de la maison. Il est utilisé comme un endroit pour les activités quotidiennes des femmes. Le toit terrasse peut être utilisé pour passer les soirées d'été. Les hauts murs extérieurs assurent

l'intimité et la protection contre les vents chauds et la poussière (Fig. IV.6). La maison n'a aucune fenêtre sur les murs extérieurs, ce qui constitue un exemple intéressant dans l'analyse des maisons traditionnelles en Libye (Fig. IV.7).

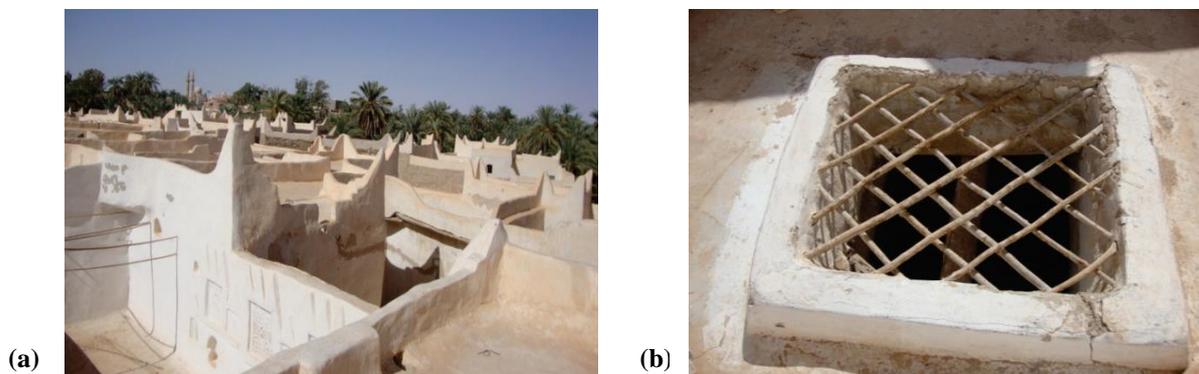


Figure IV.6 : (a) Toit pour s'asseoir et dormir la nuit en été. (b) Ouverture au niveau du toit.

(Source : Shahrhan et al., 2017)

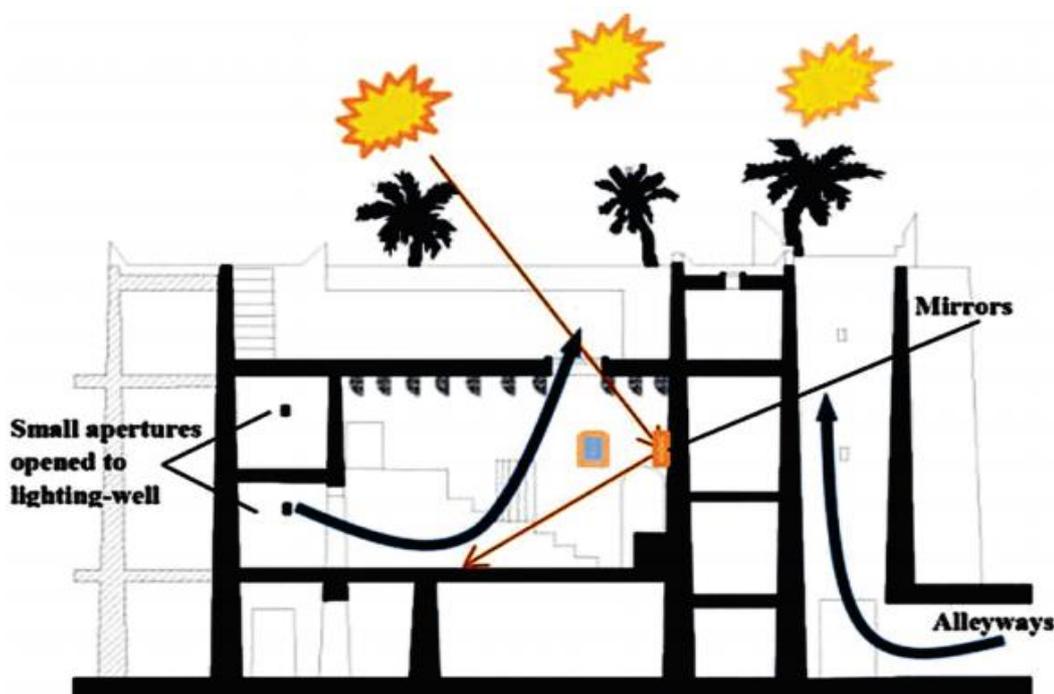


Figure IV.7 : Stratégies de ventilation et d'éclairage naturels dans une ancienne maison

(Source : Alabid et Taki, 2014)

Il y a une ouverture dans le plafond du salon qui est utilisée pour fournir de la lumière naturelle, à l'aide de miroirs placés sur les murs de la même pièce, jusqu'au salon des hommes. Ces ouvertures sont petites et de forme rectangulaire, elles peuvent également être utilisées pour la circulation d'air frais, qui remplacera l'air de l'intérieur qui n'est pas adéquat pour l'usage quotidien. En outre, ils sont utilisés pendant la nuit pour éliminer la chaleur

accumulée pendant la journée, jusqu'au coucher du soleil, à l'intérieur. C'est de cette manière que les locaux et les murs intérieurs se refroidissent afin d'être agréables le jour suivant. Le trou susmentionné dans le toit est normalement fermé en hiver.

Un travail de recherche réalisé par Berkouk et Mazouz (2017) consistait à évaluer l'impact des dispositifs d'ombrage horizontal sur la performance thermique des logements collectifs promotionnels dans la ville de Biskra. Dans leur étude, les auteurs ont proposé plusieurs dimensions pour les auvents afin de choisir la proposition la plus adéquate pour garantir un meilleur niveau de confort thermique pour ce type de logement. Des simulations utilisant le logiciel TRNSYS ont été réalisées afin d'évaluer objectivement le confort thermique intérieur des logements étudiés. L'analyse comparative entre les résultats obtenus et les scénarios d'ombrage montre que les logements promotionnels semblent inadaptés au climat désertique, en revanche, l'analyse confirme l'efficacité des dispositifs d'ombrage horizontaux sur la performance thermique de l'espace en diminuant la température de l'air intérieur pendant la période estivale.

Muharam et al., (2016) ont confirmé que la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement à l'intérieur des bâtiments résidentiels et commerciaux atteint 70% dans les climats chauds et secs tels que la ville de Riyad où la température atteint 50°C. Leur étude sur les toits verts (green roofs) dans les régions à climat chaud et sec, avait pour objectif d'examiner l'efficacité d'un système de toiture verte extensive pour réduire la consommation d'énergie pour le refroidissement des bâtiments dans les régions chaudes et sèches, en comparant ses performances à celles d'un système de toiture en béton. Les validations expérimentales ont été appliquées sur un bâtiment résidentiel dans la ville de Riyadh pendant la saison estivale de 2014. L'étude a utilisé deux pièces pour tester la performance thermique - la première pièce avec un système de toit vert étendu et la seconde pièce avec un système de toit en béton. Les résultats ont démontré que l'utilisation d'une isolation respectueuse de l'environnement (système de toiture verte extensive) pouvait réduire de 12 à 33 % la consommation d'énergie due à la climatisation des intérieurs dans les villes à climats chauds et secs.

Al-sudais (2010) a mené une étude sur l'effet du rapport fenêtre/mur (20%, 50%, 75% et 100%), de la fenêtre à vitres multiples (simple, double et triple) et de l'orientation vers le sud et l'ouest sur la performance de la condition thermique intérieure de la pièce testée. En comparant ces paramètres, l'étude a formulé des recommandations concernant la performance

du rapport fenêtre/mur sur la condition thermique. La principale conclusion est que dans le cas d'un bâtiment orienté vers le sud avec un rapport fenêtre/mur de 25%, il est préférable d'utiliser une fenêtre avec un seul vitrage, car les résultats de la comparaison ne montrent pas de différence significative entre les trois types (simple, double et triple).

Des tests ont été effectués par Khalil et al., (2010) dans le climat chaud et sec de l'Égypte pour évaluer la performance thermique de différents matériaux de construction (béton isolé et non isolé, revêtement en béton double, végétal et actif). Les résultats de cette étude ont indiqué que le transfert de chaleur à travers le matériau (valeur U) joue un rôle primordial. L'étude a également mis l'accent sur l'utilisation de l'isolation qui amortit le stress thermique et maintient les conditions intérieures proches de la zone de confort. La ventilation naturelle nocturne a été recommandée pour améliorer les conditions intérieures. La température de l'air intérieur a enregistré un amortissement thermique de 96%, 90%, 89% et 76% pour le béton isolé, le béton double, le béton planté et le béton non isolé respectivement.

Les effets des propriétés de surface des matériaux sur la performance thermique ont été observés par Kokogiannakis et al., (2012). Ils ont analysé l'impact énergétique de différents revêtements de surface externes et internes. L'étude a conclu que les revêtements de toiture peuvent avoir une influence significative sur la performance énergétique des bâtiments avec de faibles niveaux d'isolation dans le toit. En effet, les éléments de l'enveloppe du bâtiment, à savoir les murs et le toit, sont exposés au soleil de différentes manières. Le toit reçoit une grande quantité de rayonnement solaire, qui est la principale cause de surchauffe estivale dans différentes régions climatiques, et notamment celles à climats chauds et arides. Les toits traditionnels en forme de dôme, de voûte ou de courbe ont été utilisés pendant longtemps dans différentes parties du monde pour des raisons historiques, culturelles et structurelles, sans que l'on ait une connaissance approfondie de leur comportement environnemental (Elseragy et Elnokaly, 2007). Dans le même contexte, l'étude de Faghih et Bahadori (2011) avait pour objectif d'examiner les performances thermiques des toits en dôme afin de déterminer comment ils pourraient être utiles pour réduire la température maximale de l'air à l'intérieur des bâtiments pendant la saison chaude en tenant compte de tous les paramètres, tels que le flux d'air à l'échelle urbaine, le rayonnement solaire, le transfert de chaleur par rayonnement avec le ciel et le sol ainsi que certaines ouvertures sur le bâtiment. Les résultats de l'étude ont montré que la performance thermique du toit en dôme étudié est meilleure que celle du bâtiment à toit plat, en particulier lorsque le dôme est recouvert de tuiles vernissées. En plus de leurs valeurs esthétiques, les dômes couverts de tuiles vitrées ont des avantages thermiques

en gardant l'air intérieur de ces bâtiments relativement frais pendant l'été. Par ailleurs, les ouvertures provoquent un flux d'air passif à l'intérieur du bâtiment, ce qui est favorable pour l'amélioration du confort humain.

4.3. Le choix de la méthodologie

Le choix approprié d'une méthode d'évaluation de la performance thermique d'un bâtiment dépend de certains facteurs tels que la nature du problème investi, les phénomènes physiques impliqués, l'étendue des résultats requis, etc. Le choix d'une méthode est également affecté par certaines contraintes notamment la faisabilité des mesures en termes de temps et de moyens (matériels, financier). Ces contraintes peuvent être plus déterminantes dans les projets de conception réalisés dans des bureaux professionnels. En revanche, dans une recherche académique, les objectifs sont plus larges et peuvent se conclure par des recommandations et une généralisation à des cas similaires.

Afin de mieux comprendre l'impact des stratégies de conception passive sur l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe architecturale dans des conditions climatiques chaudes et arides, la présente étude a été effectuée selon deux étapes principales. Dans la première étape, un socle théorique est développé en se concentrant sur les aspects les plus pertinents pour l'analyse de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment dans un climat désertique. Sur la base de ce fondement théorique, la deuxième étape –analytique- a été conçue puis mise à exécution. Le cadre d'analyse est axé sur deux approches : une enquête qualitative et une évaluation quantitative (approche mixte).

L'approche qualitative vise à identifier et, ensuite, à évaluer les stratégies de refroidissement passif utilisées dans l'enveloppe du bâtiment en réponse aux conditions climatiques difficiles. 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 et des études architecturales. Après avoir effectué ce travail préliminaire, il a été possible de sélectionner deux types de bâtiments résidentiels comme cas d'étude. Ces deux bâtiments illustrent respectivement une unité résidentielle typique et un bâtiment vernaculaire (néo-vernaculaire) contemporain. Ce dernier est conçu en fonction du contexte culturel, social et physique local ; en tant que tel, il incarne diverses stratégies de conception climatique passive inspirées de l'architecture vernaculaire. Les types de logements sélectionnés ont fait l'objet d'une étude approfondie en ce qui concerne leur conception et leur construction afin de déterminer les

performances thermiques de leur enveloppe ; les stratégies de conception climatique employées et leur efficacité à assurer le confort humain ont également été mises en évidence.

De son côté, l'approche quantitative a été consacrée à l'expérimentation. Elle concerne une campagne de mesures in-situ (température, humidité, etc.) ayant été réalisée sur les deux unités de construction résidentielle sélectionnées. La collecte des données hygrothermiques a eu lieu pendant la saison estivale. Une simulation paramétrique a été ensuite réalisée à l'aide des logiciels DesignBuilder/EnergyPlus qui a porté sur une évaluation du comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment pendant toute la période estivale. Cette dernière partie de la recherche a exploité la variabilité des conditions de mesure et la possibilité de réaliser des études paramétriques ciblées, pour effectuer une étude de sensibilité visant à déterminer l'influence de chaque élément de l'enveloppe isolément.

Conclusion

L'étude de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe architecturale de même que l'évaluation de l'impact des stratégies de refroidissement passif sur l'amélioration de la performance thermique du bâtiment, ou encore, l'utilisation de solutions de conception inspirées du vernaculaire pour améliorer l'environnement thermique des bâtiments résidentiels dans les climats chauds et secs, relèvent d'un champ de recherche très vaste.

Les études réalisées relativement à ce sujet sont basées sur des méthodes analytiques, empiriques sur terrain, numériques, expérimentales et par simulation selon l'objet de l'étude et ses objectifs. Néanmoins, la variété des contextes et les conditions climatiques nécessitent d'effectuer des études approfondies sur la performance de l'enveloppe du bâtiment pour différentes formes conventionnelles et alternatives, y compris les formes les plus adaptées afin de trouver des solutions appropriées pour chaque région.

La présente recherche vise à comprendre l'impact des stratégies passives de conception sur l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe architecturale dans des conditions climatiques chaudes et arides, considérant que l'adaptabilité climatique peut être considérablement améliorer voire même optimiser si des choix appropriés en termes de matériaux et de formes qui jouent un rôle clé dans la régulation du confort thermique intérieur sont intégrés de manière appropriée à l'enveloppe du bâtiment.

Sur la base de la revue de littérature effectuée, un cadre méthodologique a été élaboré. Par choix de méthodes et selon le positionnement épistémologique de cette étude par rapport

au champ des recherches existantes, le travail d'investigation va s'appuyer sur une combinaison de techniques relevant à la fois de méthodes quantitatives et qualitatives. Ainsi, le travail de terrain consacré à l'évaluation thermique de bâtiments existants a nécessité une approche qualitative qui vise à identifier et, ensuite, à évaluer les stratégies de refroidissement passif utilisées dans l'enveloppe du bâtiment en réponse aux conditions climatiques difficiles. Cette approche est essentiellement basée sur un travail de terrain qui a été entrepris dans la ville d'El-Oued et entrepris in situ sur des cas réels. Elle a donné lieu à des observations et à des notes de terrain, utilisées conjointement avec une documentation photographique et des études architecturales.

De son côté, l'approche quantitative a été consacrée à l'expérimentation. Elle concerne une campagne de mesures in-situ (température, humidité, etc.) ayant été réalisée sur les deux unités résidentielle sélectionnées. La collecte des données hygrothermiques a eu lieu pendant la saison estivale. Une simulation paramétrique a été ensuite réalisée à l'aide des logiciels DesignBuilder/EnergyPlus qui a porté sur une évaluation du comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment pendant toute la période estivale.

CHAPITRE V :

IDENTIFICATION DU CONTEXTE ET PRÉSENTATION DES CAS D'ÉTUDE

CHAPITRE VI :

ÉVALUATION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES STRATÉGIE PASSIVES APPLIQUÉES

Introduction

La satisfaction et le bien-être de l'homme sont directement influencés par l'environnement bâti, il est donc important que les bâtiments répondent aux besoins physiques et psychologiques des résidents. En même temps, la satisfaction physique ne peut être atteinte que lorsque le corps humain est dans un niveau de confort qui dépend de la compatibilité de la conception du bâtiment avec le climat extérieur.

L'analyse du contexte de l'étude effectuée précédemment a conduit à la sélection de deux types de bâtiments résidentiels ; le premier illustre la pratique architecturale courante négligeant les facteurs climatiques, et le second représente une conception soucieuse de son contexte. Le présent chapitre aborde l'analyse effectuée sur ces deux bâtiments résidentiels, choisis comme cas d'étude. Il est, notamment, question d'évaluer l'impact des stratégies bioclimatiques passives utilisées au niveau de l'enveloppe architecturale, en termes, d'adaptabilité climatique et de confort thermique. Ainsi, les 2 cas d'étude feront, d'abord, l'objet d'une étude qualitative approfondie en ce qui concerne leur conception et leur construction afin d'évaluer la performance thermique de leurs enveloppes respectives ; les stratégies de conception climatique employées et leur efficacité à assurer les conditions de confort seront, également, mises en évidence. Pour sa part, l'approche quantitative est consacrée à l'expérimentation. Il s'agit d'une campagne de mesures in-situ (température de l'air, température surfacique, humidité, etc.) réalisée sur les deux logements sélectionnés. La collecte des données hygro-thermiques a eu lieu pendant les journées les plus chaudes de la saison estivale. Le présent chapitre décrit les étapes, les conditions de prises de mesures (protocole) et les principaux résultats obtenus. Le but de ce deuxième volet de l'analyse est d'estimer le comportement thermique de l'enveloppe tel qu'il se fait dans la réalité sous les conditions d'un climat chaud et aride (El-Oued) et, en même temps, avoir une idée précise sur les conditions de confort hygrothermique réelles réalisées dans l'habitat étudié.

6.1. Adaptabilité climatique des 02 bâtiments de référence

Le confort thermique dans un bâtiment dépend principalement du comportement thermique de son enveloppe 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). Un traitement judicieux des

parois de l'enveloppe en fonction des conditions climatiques chaudes et arides permet de garantir un confort optimal à l'intérieur du bâtiment, même si les conditions extérieures sont défavorables.

Compte tenu de ces caractéristiques climatiques, le cadre bâti produit à El-Oued, pose des problèmes liés aux conditions de confort thermique générées à l'intérieur des espaces. Or, en intégrant des stratégies passives appropriées dans la conception de l'enveloppe des bâtiments résidentiels, il est possible d'améliorer sensiblement leur performance climatique. Dans ce contexte, la présente section est consacrée à l'identification des caractéristiques morphologiques et matérielles propres aux deux bâtiments de référence selon des critères liés à la nature de l'enveloppe (toiture et murs) du point de vue forme et matériaux. Les critères sélectionnés devaient en outre avoir un impact sur le comportement thermique de l'enveloppe et les conditions de confort généré à l'intérieur des espaces. L'analyse permettra, ainsi, de relever les caractéristiques architecturales et matérielles les plus influentes du point de vue de l'adaptabilité climatique de l'enveloppe du bâtiment.

6.1.1. Propriétés matérielles et système constructif des unités d'habitation du « Quartier 19 Mars 1962 » : Cas d'étude -1-

La consultation des documents fournis dans le dossier du permis de construire du projet d'habitat "Quartier le 19 Mars 1962" ainsi que les fiches techniques et devis qui l'accompagnent, le système constructif du bâtiment et ses caractéristiques matérielles ont pu être définies. Ainsi, et les murs extérieurs sont réalisés en doubles parois de 30 cm de briques creuses séparées par une lame d'air (brique de 15 cm du côté extérieur + lame d'air de 5 cm + brique de 10 cm vers l'intérieur) avec un revêtement extérieur en mortier de ciment et en plâtre de l'intérieur ; les murs intérieurs sont de simples murs en briques creuses de 10 cm d'épaisseur, enduits de plâtre de 0,35 cm de chaque côté ; le toit est composé d'une dalle à corps creux et d'une dalle de compression en béton (16+4) cm; les fenêtres extérieures sont dotées d'un simple vitrage avec une absence totale de protection solaire. À noter, l'utilisation de la lame d'air comme technique d'isolation thermique pour les murs, par contre la terrasse est pourvue d'une isolation. Il faut préciser, également, que la coupole ne constitue pas le système de couverture comme pour les habitations traditionnelles ; elle est seulement utilisée pour une pièce au dernier étage, de plus, elle se superpose au toit plat (Fig. VI.1 et Fig. VI.3). Dans ce cas, les coupoles sont utilisées à des fins esthétiques (comme signe à l'identité et au

cachet architectural de la ville d'El-Oued), ce qui ne veut pas dire qu'elle ne joue pas du tout son rôle de protection contre l'ensoleillement intense.

6.1.2. Performance climatique du Cas d'étude -1-

Dans le but de comprendre l'impact des décisions conceptuelles et formelles de l'architecte sur la performance thermique de l'enveloppe, certaines considérations sont nécessaires.

6.1.2.1. Le choix de la forme et volumétrie

L'attention portée aux conditions climatiques dans le processus de conception architecturale est essentielle dans le choix de la forme du bâtiment (Liébard et De Herde, 2006). Pour l'exemple étudié, il semble que le choix d'une forme parallélépipédique simple avec quelques décrochements au niveau des balcons, est quelque peu discutable. En effet, la forme compacte est souhaitable pour réduire le besoin de climatisation, mais un bâtiment hyper-compact n'est pas souhaitable en termes d'exposition à l'ensoleillement pendant la période estivale, surtout quand il ne bénéficie pas d'assez d'ombre. De ce point de vue, la masse de l'enveloppe va s'échauffer à l'extrême ; en contrepartie, du fait de la compacité elle ne pourra pas se refroidir par effet de rayonnement nocturne des surfaces (Mingfang, 2002). Afin de déterminer le taux d'exposition du volume de ce bâtiment et, plus précisément, de la façade sud car elle est la plus exposée aux intensités solaires, une simulation par le logiciel Archiwizard a été réalisée (Fig. VI.2). Les résultats de l'analyse montrent qu'une grande partie de la façade principale du bâtiment (façade sud) est exposée à un rayonnement solaire intense provoquant une forte accumulation de chaleur et une infiltration conséquente par conduction d'où une surchauffe inévitable à l'intérieur du logement.



Figure VI.1 : La volumétrie du premier cas
(Source : Auteur, 2020)

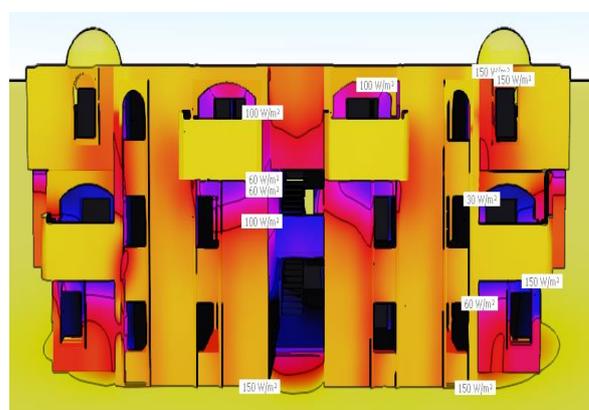


Figure VI.2 : Imagerie solaire de la façade principale
(Source : Auteur, 2020)

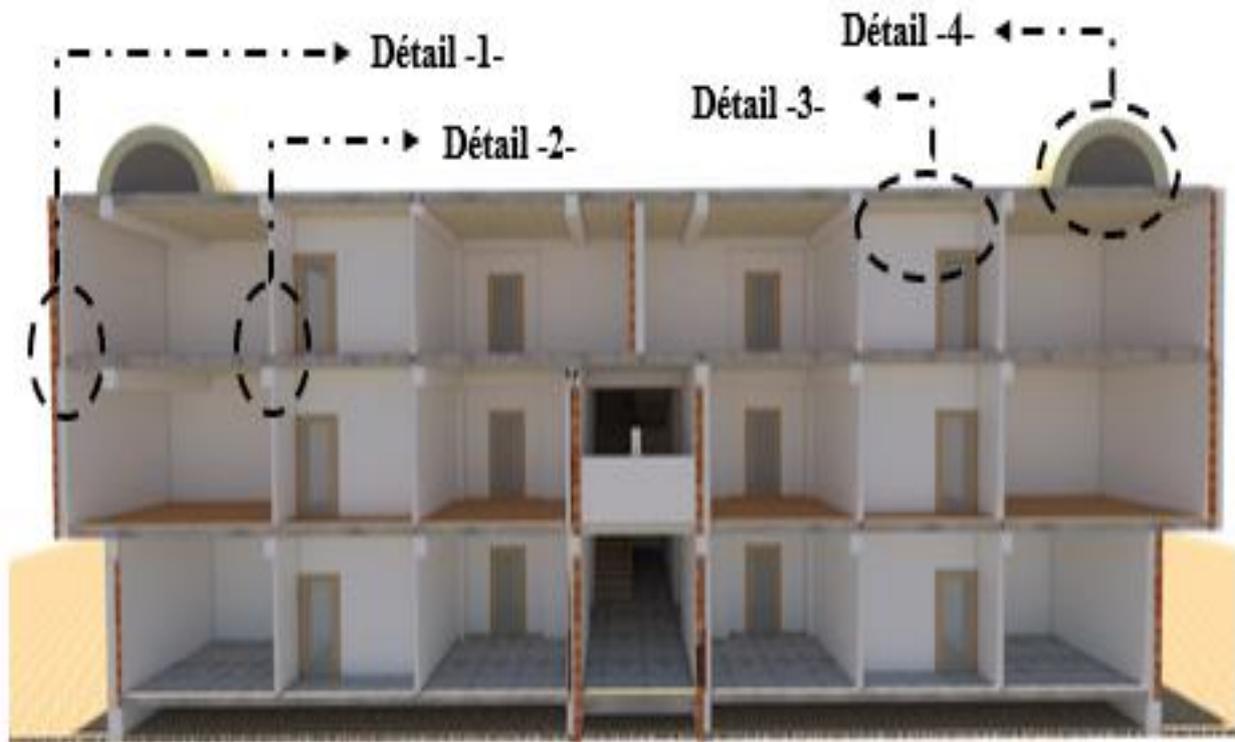


Figure VI.3 : Coupe détaillée du premier cas d'étude (Source : Auteur, 2020)

6.1.2.2. Le choix des matériaux

Afin de concevoir des bâtiments adaptés au climat, le choix de matériaux appropriés est un élément indispensable (Utama et Gheewala 2009). En été, chaque bâtiment transmet une grande quantité de chaleur par conduction ; cette quantité est proportionnelle au gradient thermique et au coefficient de transmission de la chaleur, qui est relatif aux matériaux de construction et à leurs caractéristiques thermo-physiques. En outre, la chaleur transmise est relative à l'orientation, à la surface et la localisation de l'enveloppe qui déterminent également la résistance des surfaces.

Pour le bâtiment pris comme cas d'étude, les matériaux choisis ne sont pas adaptés à un climat chaud et aride en raison de leurs propriétés thermo-physiques inappropriées. D'ailleurs, ce sont des matériaux similaires à ceux utilisés dans la construction de bâtiments dans le nord du pays avec des conditions climatiques totalement différente. De plus, l'isolation des murs par une lame d'air qui est devenue une exigence réglementaire, permet de réduire la charge de refroidissement par rapport à une maison sans isolation, mais ce n'est pas la solution la plus optimale. À noter que l'emploi de lame d'air commence à se généraliser dans la plupart des maisons construites ces vingt dernières années en Algérie.

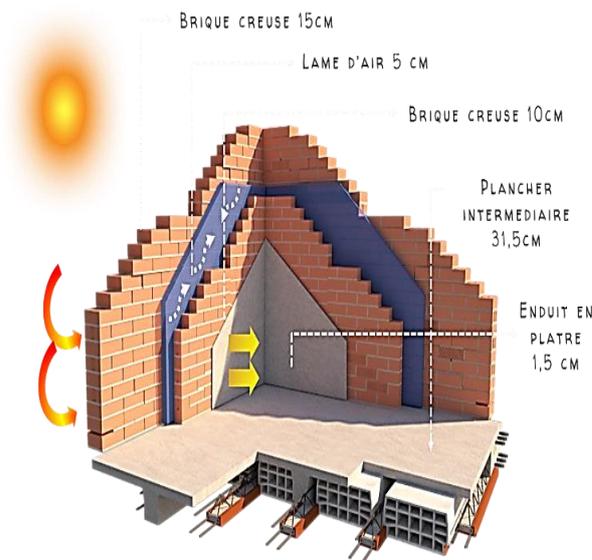


Figure VI.4 : Coupe détaillée du mur extérieur
(Source : Auteur, 2020)

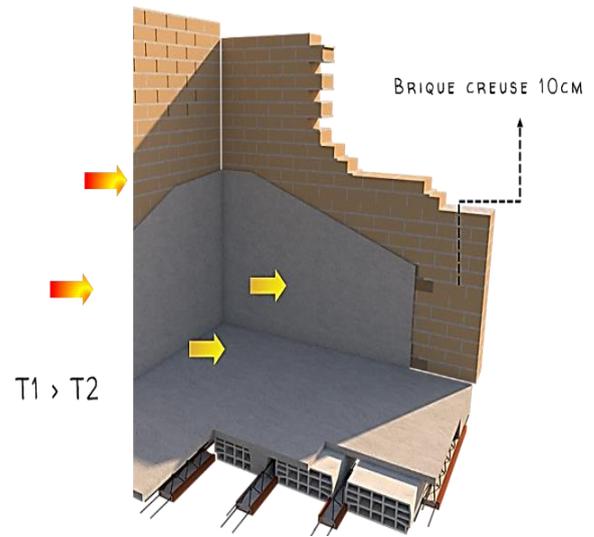


Figure VI.5 : Détail de la paroi interne et de plancher
(Source : Auteur, 2020)

Tableau VI.1 : Matériaux constituant l'enveloppe du cas d'étude -1- (Source : Berkouk, 2017)

Élément Constructif	Matériaux	Conductivité thermique λ - W/m.°C -	Epaisseur -m-
Parois extérieures	Enduit en ciment	1.4	0.015
	Brique creuse	0.5	0.15
	Lame d'air	0.31	0.05
	Brique creuse	0.5	0.1
	Enduit en plâtre	0.35	0.015
Cloison intérieure	Enduit en plâtre	0.35	0.015
	Brique creuse	0.5	0.1
	Enduit en plâtre	0.35	0.015
Plancher bas et Intermédiaire	Enduit en plâtre	0.35	0.015
	Corps creux + Dalle de compression	1.45	0.2
	Mortier	1.4	0.04
	Revêtement de sol	2.1	0.06
Plancher Terrasse	Enduit en plâtre	0.35	0.015
	Corps creux + Dalle de compression	1.45	0.2
	Isolation	0.1	0.04
	Forme en pente	1.15	0.04
	Étanchéité	0.04	0.03

6.1.2.3. Le traitement de la toiture

Le toit plat est le type de toiture le plus utilisé dans les régions chaudes et arides en raison de la rareté de la pluie et du besoin d'un espace ouvert par les habitants car la terrasse est pratique pour passer les nuits à la belle étoile en été ou pour d'autres tâches ménagères. Cependant, ce type de toiture pourrait être défavorable dans ces régions car la plupart des apports solaires pendant la journée sont le résultat du rayonnement solaire direct, de sorte que lorsque le soleil se lève, l'angle d'incidence est proche de la verticale et toute la surface est soumise à un rayonnement solaire intense (Hadavand et al., 2008 ; Konya, 1980).

L'ajout de coupoles (dômes) aux bâtiments a un double rôle à savoir un rôle de protection solaire, en plus, de la dimension symbolique de cet élément qui a été utilisée dans l'architecture traditionnelle de la région et qui contribue à préserver l'image identitaire de la ville. Les formes convexes et, plus généralement, courbes tels que les dômes, présentent une grande capacité de réflexion du rayonnement solaire. Pour leur qualité thermique, ces éléments peuvent être utilisés et développés par les concepteurs (Faghiha et Bahadori, 2011).

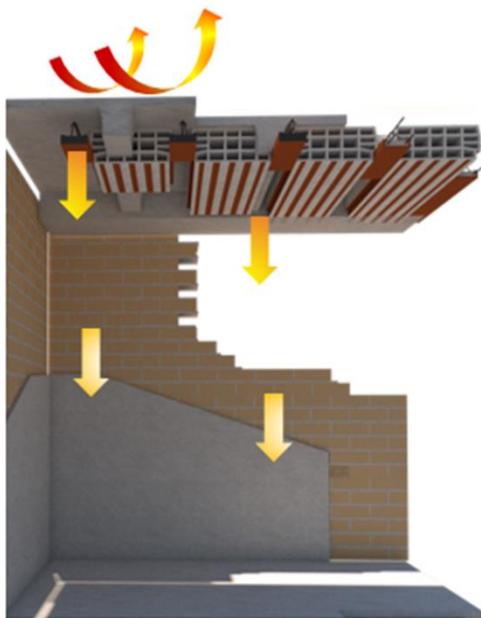


Figure VI.6 : Détail de la toiture
(Source : Auteur, 2020)



Figure VI.7 : Vue extérieure du dôme et section détaillée
(Source : Auteur, 2020)

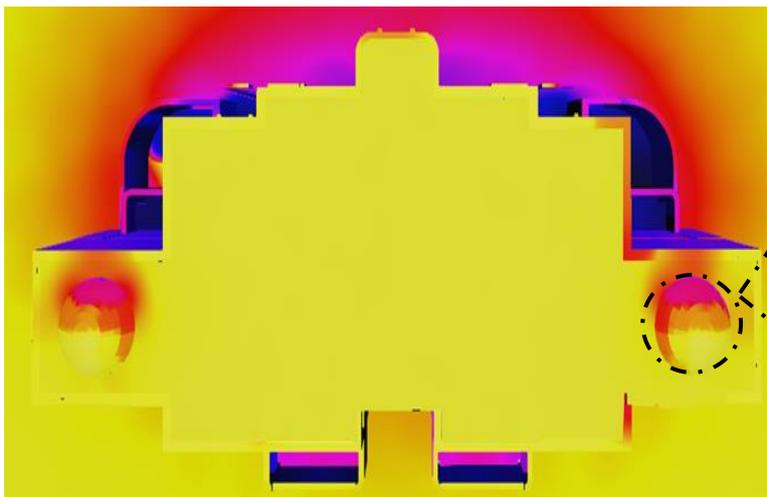


Figure VI.8 : Imagerie solaire de la toiture
(Source : Auteur, 2020)

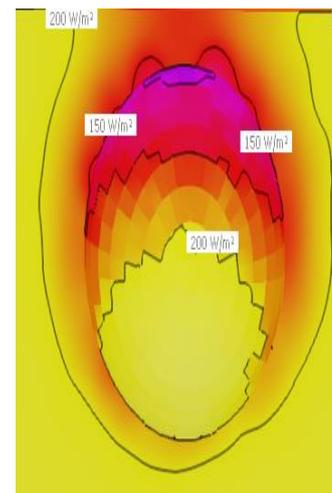


Figure VI.9 : Zoom d'imagerie solaire
du dôme (Source : Auteur, 2020)

6.1.3. Propriétés matérielles et système constructif des unités d'habitation du « Quartier 400 logements El-Miniawy » : Cas d'étude-2-

Ce projet d'habitat attribué aux frères architectes El-Miniawy, a déjà été présenté (voir chapitre 5). Cependant, certaines de ses caractéristiques méritent d'être rappelées pour les besoins de la présente analyse. Ainsi, dans un rapport technique consacré au projet, Ashraf M. Salama (2001) a indiqué que la conception finale du projet était le résultat d'une enquête sociale menée par les architectes pour mieux comprendre les traditions culturelles, les modes de vie et les besoins spatiaux des habitants de la région. Toutefois, selon cet auteur, le climat a été le facteur le plus influent dans la conception (Salama, 2001). De ce point de vue, un certain nombre de caractéristiques de conception peuvent être identifiées :

- L'utilisation de la brique locale à base de *tufla* dans la construction des bâtiments du complexe est commune à l'architecture de la région ;
- Les caves du sous-sol ont été construites avec des ouvertures sur les côtés pour permettre une ventilation transversale efficace du plancher bas ;
- L'effet d'étagement des volumes (l'imbrication des volumes et son impact sur l'ombre et la lumière) ;
- L'articulation minimale des façades, et réduction des surfaces exposées par rapport au volume totale habitable (effet de la compacité) ;

- L'utilisation d'ouvertures étroites et l'introduction des patios (plans introvertis) ;
- L'utilisation d'escaliers extérieurs pour assurer la jonction entre les unités, et création d'espaces semi-publics ;
- À l'échelle du plan de masse, l'adaptation du projet au climat désertique par le biais de passerelles ombragées et d'espaces extérieurs couverts ;
- L'utilisation des arcades pour assurer de l'ombre sur les façades ;
- La conception du projet combine entre l'architecture traditionnelle et les techniques modernes en utilisant une ossature en béton et en introduisant des dômes et des voûtes inspirées du registre de l'architecture vernaculaire locale.

6.1.4. Performance climatique du cas d'étude -2-

Dans l'ensemble, le projet répond aux besoins socio-spatiaux des habitants, en même temps, bien que le complexe résidentiel soit une masse échelonnée de volumes cubiques, les hauteurs, volumes et couleurs d'origine des murs extérieurs ont permis aux différentes entités résidentielles, bien que volumineuse, de se fondre dans le paysage naturel de la région. Ainsi, il semblerait que le maître d'œuvre voulait assurer l'intégration du projet à son contexte, de telle sorte que les formes architecturales ne devaient pas entrer en concurrence avec l'environnement naturel mais plutôt le compléter.

6.1.4.1. Le choix de forme et de la volumétrie

Une étude de Dubois (2001) indique que le fait de savoir exactement comment le soleil se propage sur un bâtiment permet de calculer avec précision l'ombre portée par les bâtiments voisins ou l'environnement, et d'utiliser la forme physique d'un bâtiment pour contrôler l'énergie solaire. De plus, il est confirmé que l'ombrage peut réduire les besoins de refroidissement des bâtiments de 23% à 89%, ce qui suppose une amélioration conséquente des conditions de confort thermique intérieures. Considérant que la forme cubique carrée et simple n'est pas la forme optimale pour atteindre l'objectif des architectes (Sami et al. 2019), ils ont donc remédié à cette situation en assemblant les masses des unités d'habitation et en projetant les pièces aux étages supérieurs afin de maximiser l'ombrage (Salama, 2001). Le résultat était un jeu de volumes simples mais qui a permis de fournir un maximum d'ombre sur les façades.

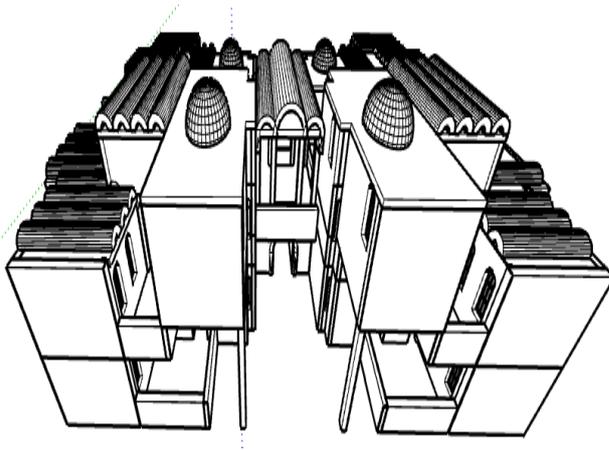


Figure VI.10 : La volumétrie du 2^{ème} cas d'étude
(Source : Auteur, 2020)

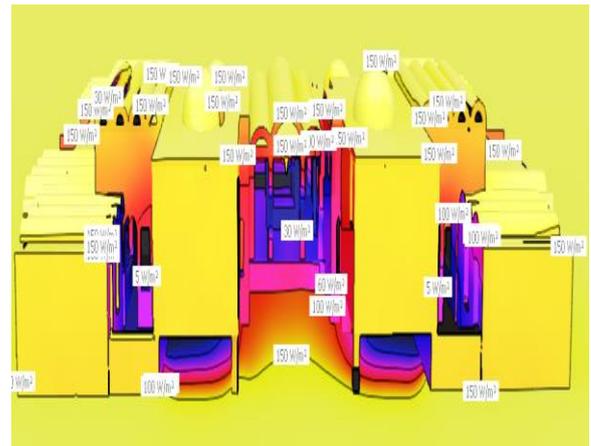


Figure VI.11 : Image solaire de la façade principale
(Source : Auteur, 2020)

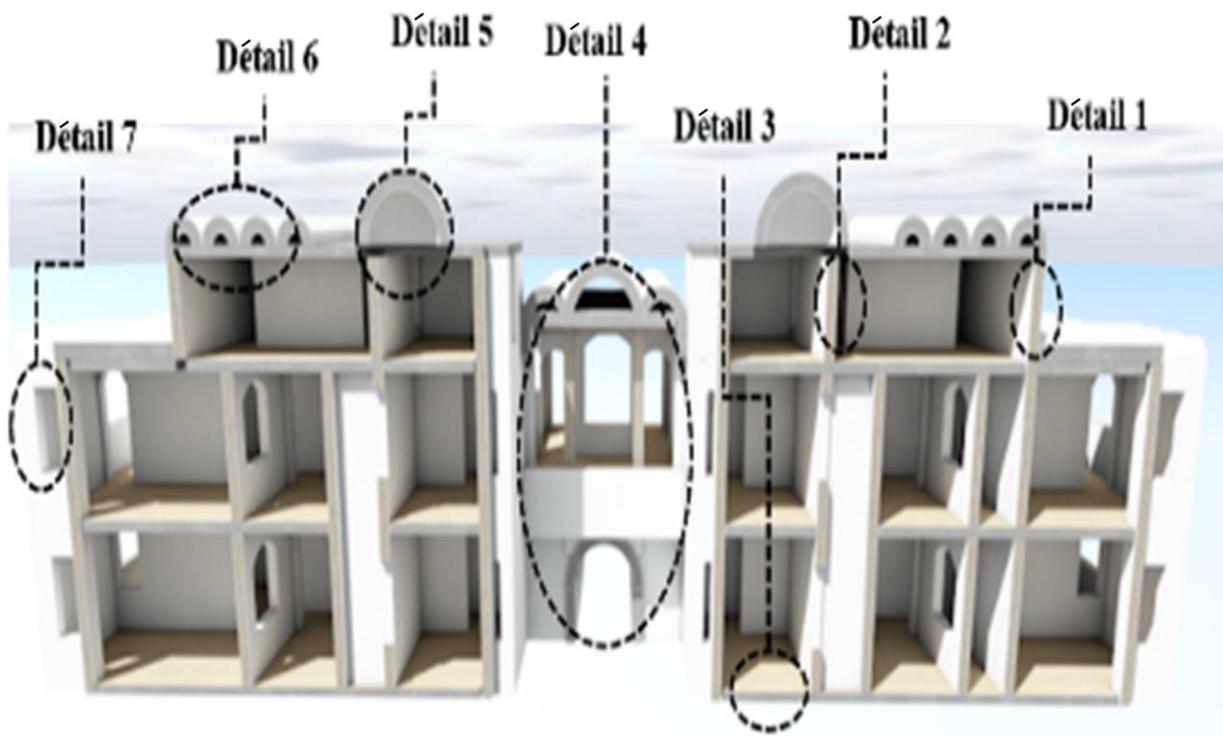


Figure VI.12 : Coupe détaillée du deuxième cas d'étude (Source : Auteur, 2020)

6.1.4.2. Le choix des matériaux

Une des particularités du projet des El Miniawy était ses fondements socioculturels et sa relation au contexte local, notamment, par la prise en compte des matériaux faisant partie intégrante du système constructif traditionnel. C'est ainsi qu'il faut comprendre la préférence des architectes pour les matériaux locaux tels que le *tuf* et le *tafza*. Cette intégration donne une impression d'appartenance à la tradition tout en reflétant la technologie de l'époque.

Globalement, le choix des matériaux et la technologie utilisée sont les éléments fondamentaux du projet et peuvent être considérés comme les éléments d'un processus exploratoire menant à l'affirmation d'une identité locale. Et bien que leur utilisation corresponde à la nature sociale du projet "logements de moyen standing" leur bon niveau d'exécution et la maîtrise de leur mise en œuvre, ont fait que ce choix de matériaux compte parmi les aspects les plus réussis du projet. Quant à leur utilisation par les bâtisseurs locaux, il semblerait qu'elle relève essentiellement de leur disponibilité locale. En effet, la nature du sol et du sous-sol de la région du Souf exclut l'utilisation du bois, de la pierre de taille et de l'argile, en revanche, elle n'offre que le *tafza* (*louss*) et le *tufla* comme matériaux à part entière. Le premier est une matière gypseuse très dure qui en forme libre se transforme grossièrement en rose d'où l'appellation « rose des sables ». Du fait de la sédimentation, le *tafza* constitue une dalle très résistante et solide. Le deuxième matériau « *tufla* » est un encroutement plus léger mais très friable qui une fois cuit forme un bon plâtre. Dès qu'il est séché, il devient un liant très puissant.

Tableau VI.2 : Matériaux constituant l'enveloppe du deuxième cas d'étude (Source : Auteur, 2020)

Élément Constructif	Matériaux	Conductivité thermique λ [W / m . °C]	Épaisseur [m]
Mur extérieur	Gypse + sable	0.22	0.02
	Bloc de terre compressé (BTC)	0.762	0.40
	Enduit en plâtre	0.35	0.015
Mur intérieur	Enduit en plâtre	0.35	0.015
	Bloc de terre compressé (BTC)	0.762	0.25
	Enduit en plâtre	0.35	0.015
Planchers bas et intermédiaires	Gypse de Tafza	0.35	0.015
	Corps creux + dalle de compression	1.45	0.2
	Mortier	1.4	0.04
	Revêtement du sol	2.1	0.06
Voûte	Gypse de Tafza	0.44	0.025
	Block de Lous	0.9	0.2
	Gypse de Tafza	0.44	0.025
	Lame d'air	0.16	0.1
Coupole	Tafza gypse	0.44	0.025
	Block de Lous	0.9	0.2
	Gypse de Tafza	0.4	0.025

Tout en étant conçus avec des matériaux lourds, les murs ont un potentiel de stockage de chaleur (capacité thermique) qui peut être utilisé pour améliorer le confort d'un bâtiment tout en diminuant sa consommation d'énergie (Kossecka et Kosny 2002 ; Givoni 1979). La possibilité de décaler la phase de transfert de chaleur à travers un mur en maçonnerie, par exemple, peut retarder jusqu'au soir l'effet des températures maximales de la journée. C'est une technique particulièrement précieuse dans les climats chauds et secs, où il existe de grandes variations de température entre le jour et la nuit. Finalement, on peut dire que cette intégration au projet de matériaux tels que le *tuf* et le *tafza*, assure pour les futurs habitants un sentiment d'appartenance au lieu et à la culture locale tout en reflétant l'époque contemporaine. De plus, le mode constructif et les matériaux utilisés correspondent aux conditions climatiques de la région, et donc contribuent à l'adaptabilité climatique du projet (Bekkouche et al., 2014).

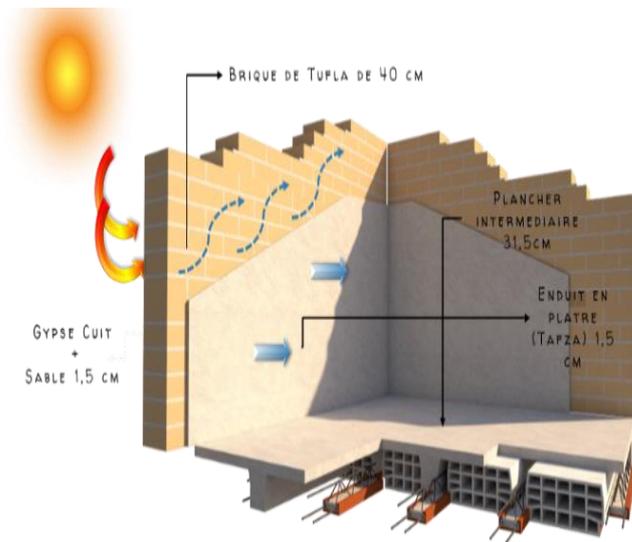


Figure VI.13 : Coupe détaillée d'un mur extérieur
(Source : Auteur, 2020)

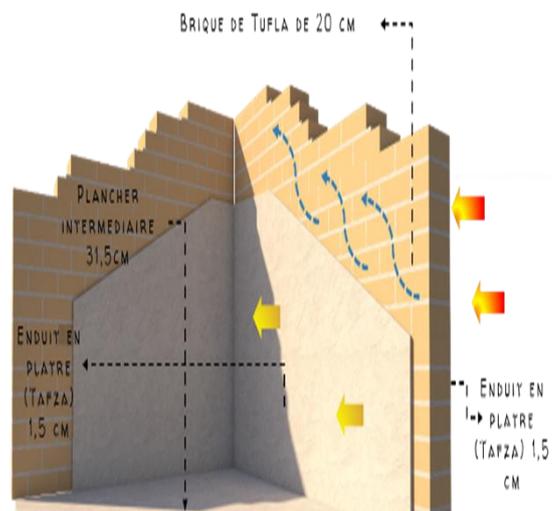


Figure VI.14 : Détail d'une paroi intérieure
(Source : Auteur, 2020)



Figure VI.15 : Tuf (rose de sable)
(Source : Auteur, 2020)



Figure VI.16 : Gypse du Tafza
(Source : Auteur, 2020)

6.1.4.3. Le traitement du soubassement

En surélevant partiellement le projet, le but était d'étancher et d'isoler le plancher bas et de protéger les logements d'éventuels risques de remontée des eaux et/ou infiltration d'humidité. Dans ce cas de figure, le plancher bas n'est pas en contact avec le sol, et la partie semi-enterrée permet de bénéficier d'une ventilation naturelle transversale en ayant des ouvertures orientées vers les vents dominants. De plus, ce traitement judicieux a permis de créer un véritable niveau qu'il est possible d'exploiter. D'ailleurs, ce fut effectivement le cas puisque le sous-bassement a été fréquemment aménagé en espaces commerciaux.

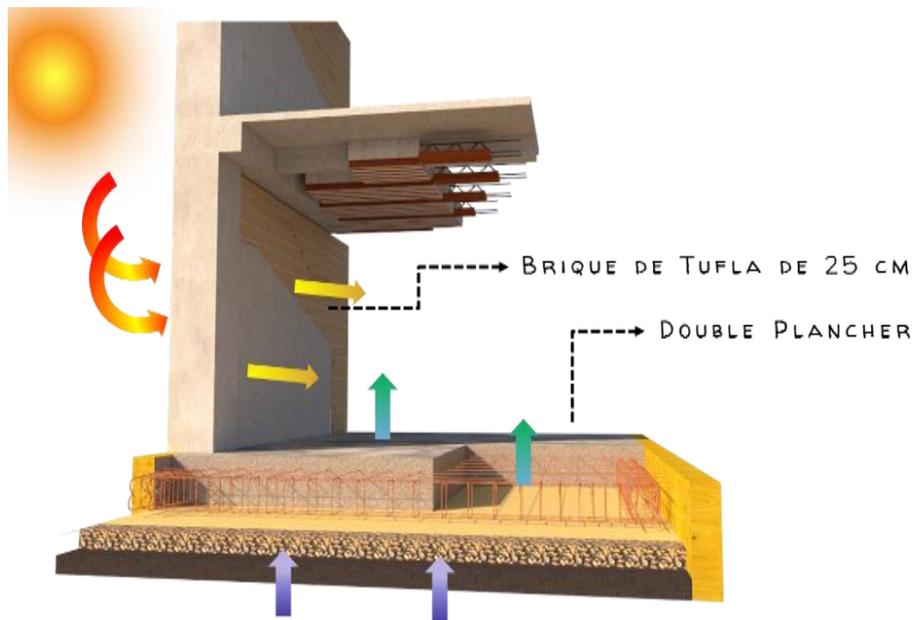


Figure VI.17 : Détail de la ventilation du sous-sol (Source : Auteur,2020)

6.1.4.4. L'utilisation du patio

Dans le cadre de l'élaboration de leur projet d'habitat à El Oued, les architectes ont tenté de développer un tissu urbain adapté à son contexte social et environnemental en agissant à deux niveaux : le premier concerne la composante sociale qui a été prise en charge grâce à l'intégration d'une diversité d'espaces publics, y compris les patios, les sentiers piétonniers, les aires de jeu couvertes et ouvertes pour les enfants et les espaces pour les activités des femmes. Le second niveau se rapporte aux conditions climatiques désertiques ; à ce titre, l'organisation du plan de masse reflète l'intérêt porté aux facteurs climatiques propres au site d'intervention. Ainsi, des zones densément ombragées ont été prévues tout en favorisant la ventilation qui permet d'évacuer la chaleur.

Le même principe de conception –social et climatique– a guidé l’organisation de l’espace domestique. Ainsi, la hiérarchisation dans le passage du public au privé a été maintenue, grâce à un enchaînement d’espaces, tels que les galeries, les passages couverts, les escaliers extérieurs, les dessertes verticales, etc., autant d’espaces qui régulent la transition de l’extérieur vers l’intérieur. De même, au niveau du logement, la séparation entre l’espace familial et l’espace des invités est respectée. La transition de l’extérieur vers le cœur de la maison se fait selon une succession d’espaces ; c’est également dans cette même préoccupation vis-à-vis des coutumes et pratiques sociales qu’un accès réservé aux invités a été aménagé dans la cour et que cet accès est séparé du reste de la maison par un niveau différent donnant sur le patio central.



Figure VI.18 : Vue du patio central
(Source : Auteur, 2020)

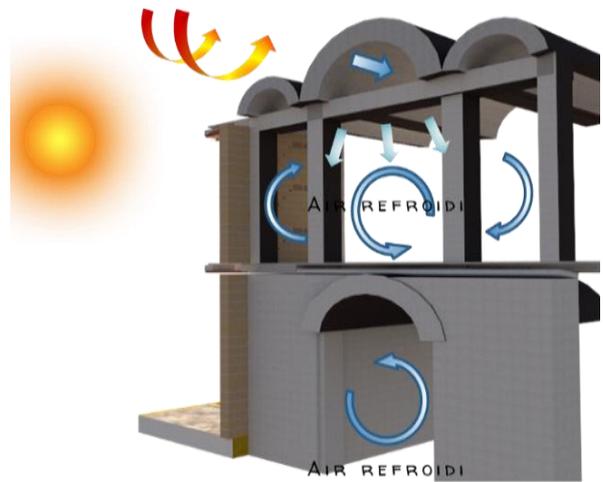


Figure VI.19 : Schéma de ventilation du patio central
(Source : Auteur, 2020)

L'espace du patio joue également un rôle de régulateur climatique. De ce point de vue, l'un de ses avantages majeurs est la ventilation naturelle pendant la saison chaude. Pendant la journée, l'air du patio se réchauffe, monte et s'échappe vers le ciel, entraînant un appel d'air provenant des pièces environnantes. Il se produit donc une bonne circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment. Pendant la nuit, le processus est inversé, l'air ambiant frais provenant de l'extérieur circule dans le patio et pénètre dans les espaces intérieurs par les ouvertures. Cela provoque un flux d'air frais qui s'échauffe progressivement, puis il remonte et s'évacue à travers les ouvertures à l'étage. En plus de son effet rafraichissant, cette ventilation favorise le maintien de la qualité de l'air intérieur, elle remplace l'air vicié par de l'air neuf (renouvellement d'air) ;

6.1.4.5. Le traitement de la toiture

Les architectes El-Miniawy ont essayé de s'inspirer des techniques de construction utilisées dans l'architecture vernaculaire de Souf et de les appliquer de façon moderne et avec une touche spécifique personnalisée. Ceci est réalisé par l'utilisation d'une ossature en béton et une couverture de dômes (gouba) et des voûtes (demsas) inspirés de l'architecture vernaculaire. Il ressort de ce fait que l'utilisation des coupôles et des voutes au niveau de la toiture dans les régions à climat chaud et aride est une solution très efficace pour lutter contre l'impact des gains de chaleur dus principalement à la radiation solaire. En effet ces éléments architectoniques composés de plans courbés ou arrondis fonctionnent passivement (Tang et al., 2006 ; Sadineni et al., 2006).

Les formes concaves (coupôles et voutes) offrent des surfaces minimales avec des volumes importants, comme elles présentent une grande capacité de réflexion de la radiation solaire. Ces éléments peuvent être utilisés et développés par les concepteurs, grâce à leur qualité thermique (Fathy, 1973 ; Mainstone, 1983 ; Bowen, 1981). Pendant la journée, les rayons solaires sont diffusés et réfléchis vers la voûte céleste. L'air chaud est accumulé à l'intérieur sous le vide créé par le dôme, puis libéré vers l'extérieur par une ouverture située au sommet ou sur les côtés du toit concave. Pendant la nuit, ces surfaces se refroidissent par rayonnement nocturne plus rapidement que les surfaces horizontales. En utilisant des voûtes, le premier plafond est protégé par la lumière directe du soleil et refroidi par l'air en mouvement à l'intérieur de la voûte (de petites voûtes ouvertes des deux côtés permettent un refroidissement naturel du plafond par ventilation naturelle traversant). La différence de pression entre deux façades, dû au vent ou à la lumière solaire différenciée, est le principal moteur du flux d'air intérieur. De toutes les forces motrices de la ventilation naturelle, l'effet du vent sur un local traversant est le plus efficace (Najafi et Yaghoubi, 2015).

L'analyse thermique des coupôles et des voutes à l'aide du logiciel Archiwizard montre que la puissance solaire ou la densité surfacique du flux arrivant sur la coupole et la voute n'est pas homogène et il y'a une face protégée présentée par la couleur bleu et mauve et une surface exposée présentée par la couleur jaune. Seulement une petite partie de sa superficie reçoit un rayonnement solaire direct, le reste il est protégé par l'élément lui-même où il reçoit un rayon diffus. Les zones exposées aux radiations changent tout au long de la journée selon l'orientation du soleil mais on peut clairement remarquer que les surfaces Est-Ouest de la coupole et la surface haute de la voute sont les plus exposés pendant la journée.

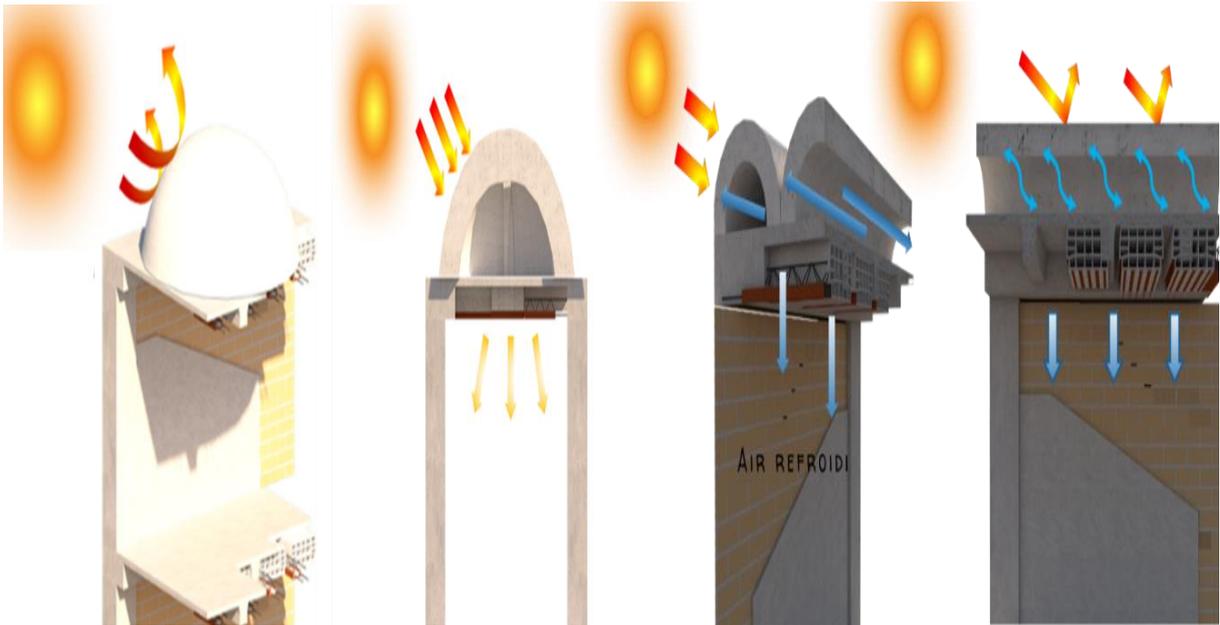


Figure VI.20 : Section détaillée du dôme.
(Source : Auteur, 2020)

Figure VI.21 : Section transversale détaillée de la voûte (Source : Auteur, 2020)

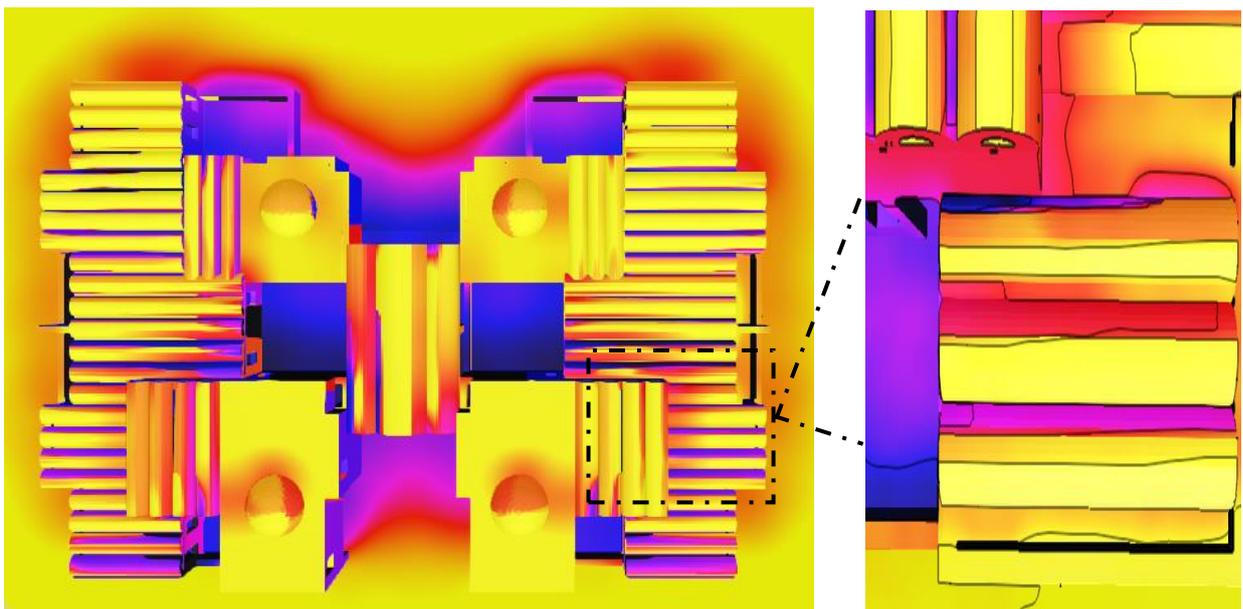


Figure VI.22 : Imagerie solaire du toit du 2ème cas
(Source : Auteur, 2020)

Figure VI.23 : Zoom d'imagerie solaire de la voûte (Source : Auteur, 2020)

6.1.4.6. La protection des ouvertures

Des protections solaires sous forme de moucharabieh ont été prévues au niveau des fenêtres ; ces dispositifs servent à intercepter les rayons solaires, mais également, ils permettent de réguler la lumière incidente et de réduire le flux de chaleur pénétrant à

l'intérieur. Ce dispositif est constitué d'une maçonnerie ajourée, ménageant des petits trous qui permettent de filtrer les rayonnements solaires tout en évitant l'éblouissement, en outre, il est souvent en saillie pour mieux capter les vents qui garantissent une ventilation efficace.



Figure VI.24 : Vue de Moucharabieh
(Source : Auteur, 2020)

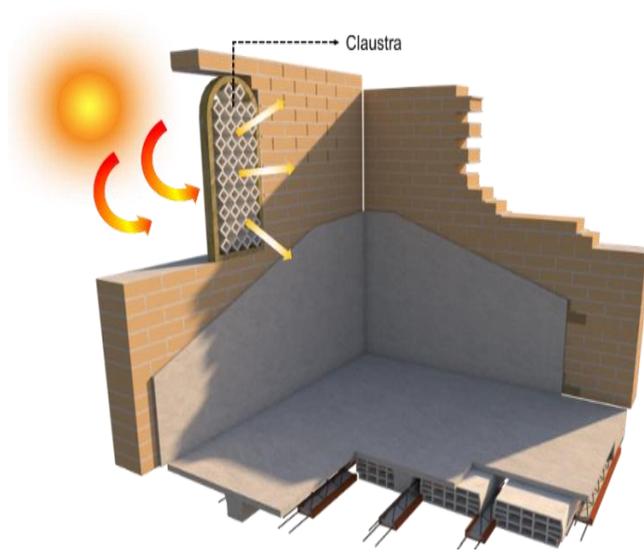


Figure VI.25 : Détail de Moucharabieh
(Source : Auteur, 2020)

6.2. La campagne de mesures in Situ

L'analyse architecturale effectuée, en amont, a conduit à l'identification des caractéristiques morphologiques et matérielles propres à l'enveloppe pour les deux bâtiments pris comme cas d'étude. En outre, une appréciation qualitative de l'adaptabilité climatique de ces 2 bâtiments et des conditions de confort générées à l'intérieur des espaces, a pu être faite grâce à l'identification des dispositifs architecturaux ayant un impact favorable sur le comportement thermique de leur enveloppe respective. Simultanément, l'analyse a fourni les données indispensables devant permettre l'évaluation quantitative de la performance thermique de l'enveloppe. Cette section présente le déroulement du premier volet de l'analyse effectuée sous forme de prises de mesures in situ relativement aux deux bâtiments étudiés.

En effet, la meilleure manière pour étudier le comportement thermique des bâtiments reste l'étude dans des conditions réelles. Cette dernière approche est la plus indiquée pour comprendre la réponse physique du bâtiment (son fonctionnement) tout en se rapprochant le plus possible de la sensation et la satisfaction des occupants ; ce qui permet de déterminer les problèmes et de les corriger.

6.2.1. Protocole de la prise des mesures

Cette partie, décrit les conditions du déroulement de la campagne de mesure réalisée in situ et destinée à évaluer l'influence des paramètres formels et constructifs de l'enveloppe sur le confort thermique. À ce titre, rappelons que pour évaluer les conditions d'ambiance hygro-thermique dans un local, il faut mesurer les principales grandeurs physiques qui caractérisent l'environnement et influencent le confort thermique, à savoir : température de l'air, température surfacique, vitesse de l'air et humidité relative. Dans un logement, l'effet conjugué de ces paramètres est déterminant pour la réalisation des conditions de confort thermique ressenti par les habitants.

6.2.1.1. Périodes des prises de mesures

Avant de commencer la prise de mesure, il fallait établir le protocole de l'expérimentation où devront être précisés, les jours (périodes) et les heures (fréquences) des prises de mesures. Sur la base des données météorologiques fournies par la station météorologique de l'aéroport de Guemar pour une période de 15 ans entre 2000 et 2015, il a été possible de déterminer la période (semaine type) de la saison estivale durant laquelle se feront les prises de mesures. La méthode utilisée dite du "design week", se base sur le calcul de la température moyenne journalière pendant la période considérée (Hong et al. 1999). En appliquant cette méthode, la température moyenne journalière de chaque jour pour la saison chaude (Juin, Juillet, Aout) a été calculée en prenant en considération la période de calcul de 10 ans (2006-2015).

L'analyse des données climatiques utilisées, a permis de déterminer la semaine la plus chaude s'étalait du 31 Juillet au 6 Aout. Sachant qu'on ne dispose que d'un seul appareil pour l'enregistrement des mesures, la prise de mesures s'est effectuée avec un protocole bi-horaire à partir de 8h00 et tout au long de la journée. Les mesures de températures et de l'humidité ont eu lieu à l'intérieur des deux logements et à l'extérieur, sachant que la vitesse du vent était négligeable et presque égale à zéro la plupart du temps.

6.2.1.2. Le lieu de prise de mesures

Par souci de rester le plus proche possible de la réalité et donner une idée précise sur les conditions de confort thermique générées par les deux systèmes d'enveloppe considérés, les mesures ont été effectuées à l'extérieur à l'ombre et à l'intérieur dans des conditions similaires pour les deux bâtiments. Ainsi, les mesures ont été prises dans le salon situé au dernier étage et orienté vers le Sud-Ouest à une hauteur de 1.20m du sol. Ce choix a été effectué pour garantir

d'avoir non seulement l'effet des murs et des planchers mais aussi celui de la toiture, et de ce fait, on aurait étudié les conditions thermiques dans la pièce avec l'emplacement et l'orientation la plus défavorable pour les deux cas d'étude.

6.2.1.3. Conditions de la prise des mesures

Les mesures de températures dans les bâtiments ont été effectuée sous des conditions naturelles autrement dite sans utilisation de la climatisation mécanique tout en ouvrant les fenêtres et les stores (conditions de vie habituelles). Tout en prenant en considération plusieurs paramètres, notamment, le nombre de personnes présentes et l'extinction de tous les appareils électriques pour éliminer l'influence des gains internes sur les paramètres mesurés.

6.2.1.4. Instruments de mesures

Un anémomètre "Testo 480" avec ses différentes sondes, a été utilisé pour mesurer les trois paramètres hygrothermiques suivants : température de l'air, le taux d'humidité relative et la vitesse du vent (Figure VI.26).

Le Testo 480 est un appareil qui convient particulièrement pour les mesures de données climatiques en vue de l'évaluation et de l'optimisation du confort. Cet instrument est équipé par des sondes digitales intelligentes avec une mémoire intégrée.



Figure VI.26 : Présentation des instruments de mesure - Testo 480-
(Source : Auteur, 2020)

6.2.2. Résultats des mesures et discussion

Une campagne de prise de mesures in situ des variations des températures intérieures extérieures, et celle de l'humidité, a été élaborée dans le but d'étudier le comportement thermique des enveloppes respectives des deux bâtiments. Les mesures prises à l'intérieur et à l'extérieur des logements ont été reportées sous forme de courbes, ce qui permettra de comparer les résultats obtenus en considérant les deux cas en même temps.

La figure VI.27 montre que les températures de l'air enregistrées à l'intérieur du salon du 1^{ère} cas d'étude –enveloppe standard-, sont très élevées ; elles sont semblables à celles de l'extérieur et sont parfois plus élevées pendant la nuit et tôt le matin. La température intérieure maximale atteint une moyenne de 38,80 °C à 16h00 et la valeur minimale est de 30,75 °C à 06h00 avec une différence moyenne de 8 °C. En même temps, la température extérieure atteint son maximum de 40,30 °C à 16 h 00 et un minimum de 27,70° C à 6 h 00 avec une différence de 12,60 °C. Le même phénomène est constaté en examinant la courbe d'humidité relative (Fig.VI.28). Celle-ci suit l'évolution de la courbe de l'humidité externe. Les courbes sont presque parallèles avec le taux d'humidité intérieur qui varie entre 17% et 47%.

Dans un climat aussi inhospitalier, le deuxième cas d'étude semble être plus performant. En effet, il a réussi à maintenir des températures intérieures inférieures à celles du premier cas avec une température maximale moyenne de 34,70°C à 18h00 et une température minimale de 27,90°C à 8h00 tout en assurant un déphasage de 2 heures par rapport aux pics de la température extérieure. Bien que les conditions de confort thermique ne soient pas réalisées, le bâtiment conçu par les frères El-Miniawy selon la réinterprétation des principes du vernaculaire enregistre ainsi, une amélioration approximative de 5,6°C par rapport à la température externe et de 4°C par rapport au 1^{er} cas d'étude.

Le taux d'humidité intérieure pour le 2^{ème} cas d'étude varie entre 23% et 49% avec un pic de 52% dans une journée où nous avons enregistré de faibles valeurs d'humidité moyenne. Ce pic est justifié par la préparation du couscous (repas traditionnel algérien que les habitants de la maison ont l'habitude de préparer le Vendredi de chaque semaine), ceci a provoqué un taux de vapeur remarquable.

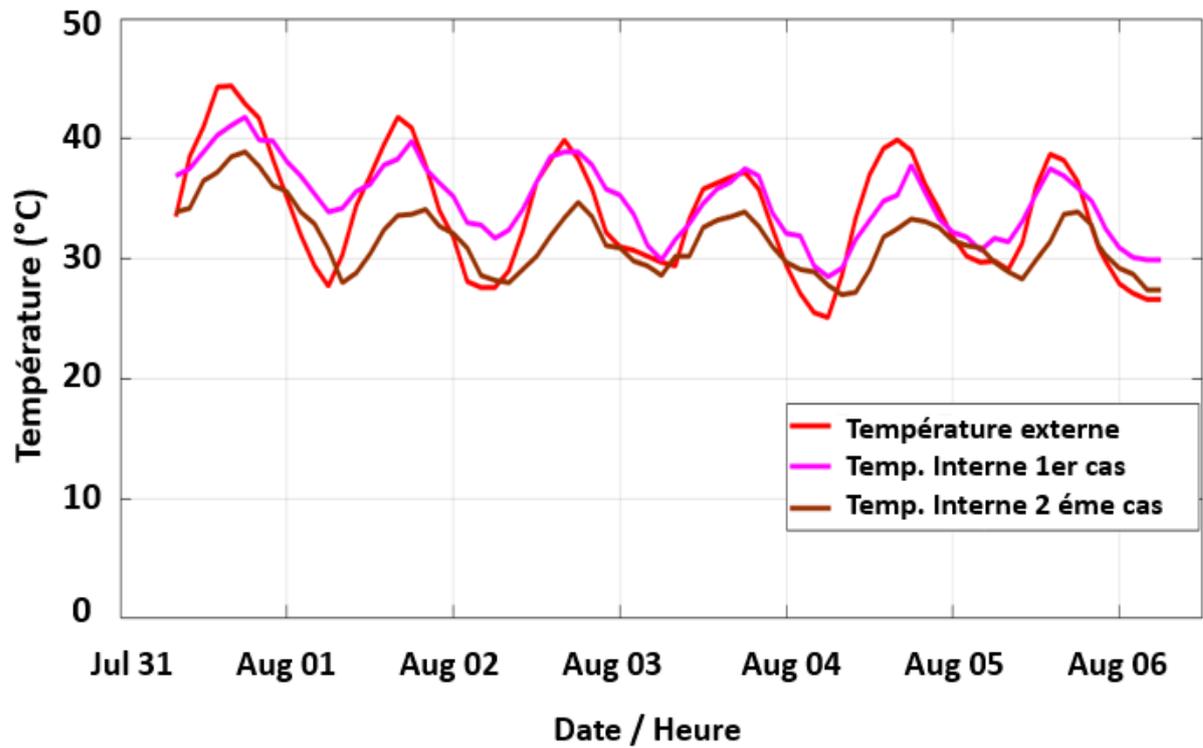


Figure VI.27 : Températures externes et internes mesurées pour les 2 bâtiments pris comme cas d'étude (Source : Auteur, 2020)

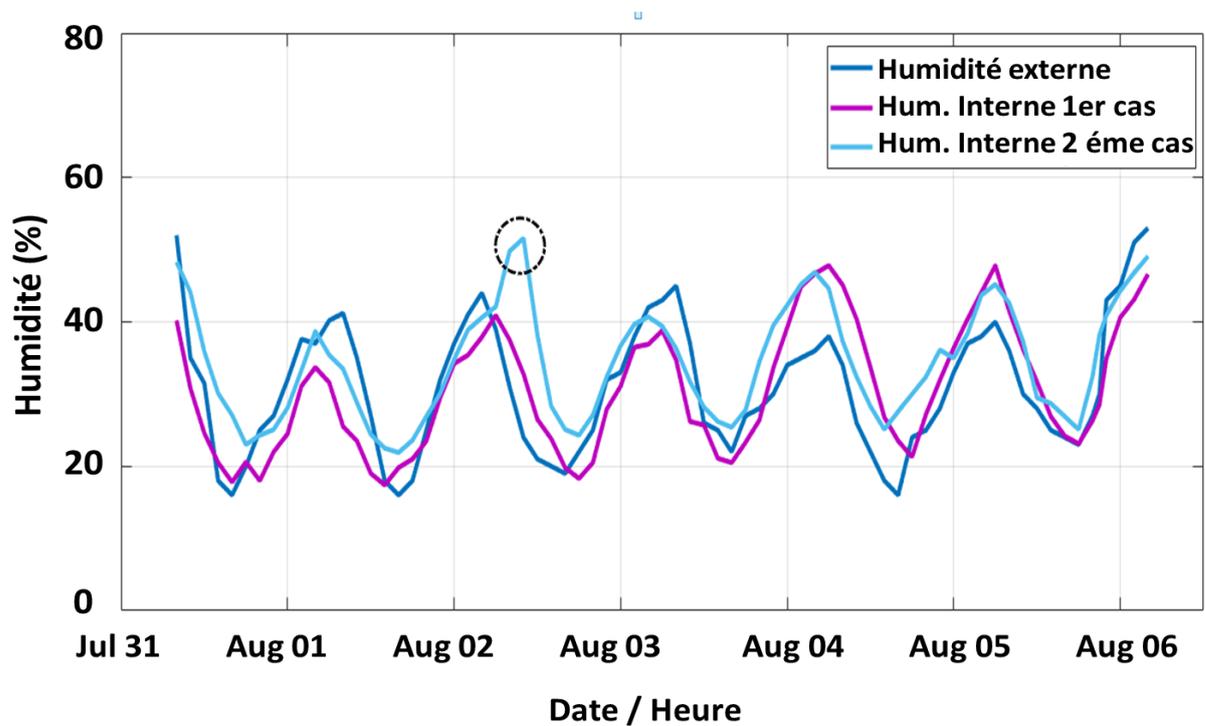


Figure VI.28 : Humidités externes et internes mesurées pour les 2 bâtiments pris comme cas d'étude (Source : Auteur, 2020)

Conclusion

Le chapitre a présenté le déroulement et les résultats de l'analyse ayant porté sur les deux bâtiments choisis comme cas d'étude, afin d'évaluer l'impact des stratégies bioclimatiques passives utilisées au niveau de l'enveloppe, en termes, d'adaptabilité climatique et de confort thermique. Les deux types de bâtiments illustrent respectivement, la pratique architecturale courante négligeant les facteurs climatiques (cas d'étude-1-), et une conception soucieuse de son contexte (cas d'étude-2-). D'abord, les 2 bâtiments choisis ont fait l'objet d'une étude qualitative approfondie en ce qui concerne leur conception et leur construction afin d'évaluer la performance thermique de leurs enveloppes respectives ; les stratégies de conception climatique employées et leur efficacité à assurer les conditions de confort ont également été mises en évidence.

Pour sa part, l'approche quantitative a été consacrée à des mesures in situ afin d'évaluer l'influence des paramètres formels et constructifs de l'enveloppe sur le confort thermique. À ce titre, l'évaluation des conditions d'ambiance hygro-thermique pour les deux cas d'étude, s'est fondée sur les principales grandeurs physiques qui caractérisent l'environnement et influencent le confort thermique, à savoir : température de l'air, température surfacique, vitesse de l'air et humidité relative. La campagne de mesures in-situ a eu lieu pendant les journées les plus chaudes de la saison estivale (du 31 Juillet au 06 Aout). Une analyse exhaustive du comportement thermique de l'enveloppe pendant ces journées représentatives a été réalisée, à travers l'analyse de l'évolution des conditions thermiques dans la pièce sélectionnée à cet effet. Les mesures se sont faites selon le même protocole et dans des conditions parfaitement identiques pour les deux bâtiments. Les résultats obtenus ont révélé que le bâtiment (cas d'étude-2-) conçu par les frères El-Miniawy selon la réinterprétation des principes du vernaculaire est plus performant que le bâtiment standard (cas d'étude-1-). Bien que les conditions de confort thermique ne soient pas réalisées, le cas d'étude-2- a enregistré une amélioration approximative de 5,6°C par rapport à la température externe et de 4°C par rapport au 1^{er} cas d'étude.

CHAPITRE VII :

SIMULATION ET ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Synthèse des principaux résultats

Les considérations climatiques sont des éléments essentiels pour assurer la performance thermique et le confort intérieur des bâtiments résidentiels. Cela semble relever du bon sens, mais dans la pratique, surtout dans les pays émergents comme l'Algérie où les normes et réglementations en matière d'économie et d'énergie font encore cruellement défaut, la performance thermique du bâtiment n'est pas prise en compte dans la phase de conception et de construction. Il en résulte des bâtiments fortement dépendants des systèmes de conditionnement d'air mécaniques pour contrôler le climat intérieur.

Paradoxalement, l'architecture vernaculaire, en particulier dans les régions chaudes et arides, est considérée comme un modèle de durabilité et de conception respectueuse du climat. En effet, elle intègre une série de principes, de caractéristiques et de techniques de conception qui sont aujourd'hui considérés comme des stratégies écologiques. La pertinence de ces caractéristiques vernaculaires est toujours d'actualité et constitue désormais la base de la conception de bâtiments durables. L'intérêt croissant pour les stratégies bioclimatiques ayant pour but de réduire les dépenses énergétiques et minimiser la dépendance vis-à-vis des ressources non renouvelables, rend ce sujet plus que jamais d'actualité. Les principes inspirés du vernaculaire peuvent être appliqués dans n'importe quelle région du monde, en supposant que la même stratégie peut fonctionner dans une autre région avec des conditions environnementales similaires. De ce fait, la présente recherche a mis en exergue le grand potentiel de solutions offertes par l'architecture vernaculaire pour traiter le problème de l'adaptabilité climatique du bâtiment et représente une base de données pour atteindre les stratégies à appliquer ; en analysant les différentes stratégies sensibles au climat développées dans l'architecture vernaculaire et réutilisées dans des projets résidentiels néo-vernaculaires contemporains, l'étude a également démontré la capacité d'une telle approche à assurer des conditions de confort thermique dans une région désertique d'Algérie.

Cette thèse examine la contribution de différentes stratégies sensibles au climat développées dans l'architecture vernaculaire et réutilisées dans des projets résidentiels néo-vernaculaires pour assurer des conditions de confort thermique dans une région désertique d'Algérie. L'objectif est de réaliser le confort physiologique de l'habitant et de permettre simultanément une performance énergétique notamment en période d'été. De ce point de vue, la présente recherche vise principalement à évaluer et mesurer l'impact des variations

typologiques (formelles et matérielles) sur le rendement thermique et énergétique des bâtiments résidentiels. Il s'agit d'analyser les potentialités offertes par différentes typologies de bâtiments dans un contexte climatique chaud et aride. Pour renoncer à des pratiques erronées longuement adoptées par les acteurs du bâtiment. A cet égard, les résultats obtenus soutiennent l'hypothèse que les stratégies passives peuvent être appliquées pour les bâtiments contemporains et qu'elles pourraient contribuer grandement à améliorer le confort thermique intérieur tout en réduisant la demande énergétique des bâtiments.

La ville d'El-Oued qui se caractérise par un climat très chaud et aride illustre l'ampleur des problèmes environnementaux résultant des pratiques et dysfonctionnements caractérisant la production architecturale contemporaine en Algérie. Cette ville saharienne a vu depuis l'indépendance la production d'un cadre bâti résidentiel parfaitement indifférent aux conditions climatiques, ce qui pousse les habitants à se tourner vers des moyens mécaniques pour assurer un certain niveau de confort dont le coût est chaque année plus élevé. En même temps, la ville d'El-Oued présente l'avantage d'avoir servi d'assiette pour la réalisation de l'un des rares projets d'habitat conçu selon les principes de l'approche néo-vernaculaire. Il s'agit d'un ensemble d'habitations de type semi-collectif attribué aux architectes égyptiens El-Miniawy. Cette ville offre ainsi l'opportunité de pouvoir évaluer quantitativement des stratégies de refroidissement passif inspirées de l'architecture vernaculaire locale.

La présente recherche dont l'objectif est d'améliorer l'adaptabilité climatique des habitations en optimisant la performance thermique de l'enveloppe, a pris la ville d'El-Oued comme contexte d'étude. Les stratégies bioclimatiques passives employées dans un complexe d'habitation existant ont été investies. Ensuite, l'impact en termes de confort thermique et de consommation énergétique résultant de l'application de ces stratégies au niveau de l'enveloppe de bâtiments résidentiels contemporains, a été évalué.

Afin d'examiner l'efficacité de ces stratégies et leur potentiel environnemental, une étude a été menée dans. L'effet de certaines stratégies de refroidissement passif sélectionnées sur l'amélioration de la performance climatique de l'enveloppe du bâtiment a été examiné. Ces stratégies s'inspirent de l'architecture vernaculaire locale et, à ce titre, elles devraient assurer un confort thermique intérieur satisfaisant pour les utilisateurs et, implicitement, réduire la demande de refroidissement énergétique des bâtiments résidentiels. L'approche utilisée dans cette recherche est basée sur l'évaluation et la comparaison des performances thermiques de deux bâtiments résidentiels contemporains existants, en tenant compte de la conception de

l'enveloppe et des caractéristiques des matériaux. Les exemples sélectionnés représentent respectivement une unité résidentielle typique (bâtiment standard) et un complexe d'habitations attribué aux architectes égyptiens El-Miniawy (bâtiment néo-vernaculaire). Ce dernier a été conçu en se référant à des stratégies sensibles au climat inspirées de l'architecture vernaculaire locale. Une comparaison basée sur des mesures intérieures in situ a été effectuée sur les deux bâtiments sélectionnés qui diffèrent par les propriétés de conception de l'enveloppe et les composants.

En se référant à la région du Souf, ce travail de recherche met en évidence le lien étroit entre l'approche néo-vernaculaire et l'architecture bioclimatique. Même s'il est ancien ou contemporain (néo), l'environnement bâti vernaculaire a été produit selon des principes bioclimatiques inhérents tels que la limitation des ressources imposée par des facteurs économiques ou naturels, mais a réussi à offrir des solutions rationnelles aux climats rigoureux et aux besoins humains. L'approche néo-vernaculaire a permis de réinterpréter avec succès les caractéristiques durables de l'architecture traditionnelle ancestrale, notamment les stratégies de conception passive. En tant que telle, cette approche 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 de l'homme.

La nécessité des stratégies bioclimatiques pour minimiser les dépenses énergétiques et la dépendance des économies d'énergie réalisées en fonction de la sévérité du climat dans lequel le bâtiment est situé ont été observés. Ces principes peuvent être appliqués dans n'importe quelle partie du monde, en supposant que la même stratégie peut fonctionner dans une autre région avec un climat extérieur similaire. En outre, cette étude a démontré comment l'architecture vernaculaire représente une base de connaissances pour les stratégies à appliquer, à ce titre, le thème exploré dans la présente recherche devrait être davantage mis en avant.

Toute recherche dans ce domaine devrait prendre en compte tous les agents qui jouent un rôle dans le processus de construction architecturale et les installations associées. Ainsi, les projets architecturaux réels devraient tenter de réduire autant que possible la demande énergétique en fonction du climat associé à l'emplacement du bâtiment. Cependant, il est nécessaire d'accorder une plus grande importance au confort climatique en tant qu'objectif architectural fondamental et d'atteindre cet objectif sans l'aide de dispositifs qui consomment

de l'électricité et ont une grande empreinte écologique. La connaissance de l'architecture bioclimatique devrait imprégner toutes les sociétés, car les principaux utilisateurs des bâtiments qui doivent fournir une zone de confort appropriée, conduisant ainsi à la minimisation de l'utilisation des appareils de chauffage et de refroidissement. À cette fin, les sociétés doivent devenir plus conscientes des impacts environnementaux de la consommation d'énergie et des répercussions sur le changement climatique.

En outre, les sociétés doivent donc continuer à mettre en place des politiques de réduction de la consommation d'énergie telles que celles qui sont en cours d'élaboration et comme celles qui sont déjà mises en œuvre dans de nombreux pays, afin d'établir les futures politiques énergétiques. Nous pouvons donc conclure que l'architecture bioclimatique devrait jouer un rôle de plus en plus important vis-à-vis de la préoccupation mondiale pour la durabilité.

En utilisant des mesures in situ et des simulations numériques, la recherche a démontré que le bâtiment néo-vernaculaire répond mieux aux contraintes climatiques locales et, par conséquent, il offre de meilleures conditions de confort thermique. Le potentiel d'amélioration de la performance thermique par l'amélioration des performances de l'enveloppe du bâtiment est considérable : la température maximale de l'air pendant les journées les plus chaudes de l'été, a été abaissée de 45,50 °C (extérieur) à 36,10 °C (intérieur).

Les résultats présentés dans cette recherche soutiennent l'argument selon lequel l'intégration de stratégies sensibles au climat développées dans les habitations vernaculaires est non seulement réalisable pour les constructions contemporaines, mais aussi efficace. En outre, les résultats suggèrent que la prise en compte des traditions dans l'architecture vernaculaire ancienne comme une approche pour améliorer les performances climatiques peut conduire à une adaptation optimale des bâtiments contemporains au climat et à l'environnement et fournir des solutions alternatives pour réduire la consommation d'énergie sans sacrifier la qualité du confort des occupants. Cette thèse a montré que le bâtiment résidentiel au sud Algérie peut atteindre une grande performance en termes de qualité environnementale et d'économie d'énergie en appliquant simplement des stratégies de conception appropriées.

Recommandations

Cette recherche a exploré certains concepts, modèles et techniques utilisés dans l'architecture vernaculaire en tant que stratégies et solutions potentielles à appliquer dans l'architecture contemporaine afin d'atteindre autant que possible l'adaptabilité climatique du bâtiment vis-à-vis de son contexte. 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. En examinant les caractéristiques de l'enveloppe, la présente recherche a mis en évidence les principes fondamentaux pouvant améliorer la performance climatique des bâtiments résidentiels et assurer un niveau de confort thermique acceptable pour les habitants. Ces principes sont énumérés ci-dessous :

- De toute évidence, les propriétés thermiques et le choix des matériaux sont des éléments importants pour évaluer la performance thermique d'un bâtiment résidentiel en termes de contrôle des gains de chaleur dans un climat chaud. Par conséquent, les matériaux qui sont très résistants au flux de chaleur (valeur R élevée et faible valeur U) peuvent être plus efficaces notamment pendant la saison chaude ;

- L'utilisation d'un type approprié des matériaux et d'isolation thermique pour l'enveloppe du bâtiment afin de minimiser les pertes d'énergie (toit, sols et murs) ;

- L'utilisation de matériaux locaux à faible coefficient de transfert de chaleur et de bonne inertie pour réduire le flux des échanges thermiques de l'environnement extérieur vers l'intérieur du bâtiment tout en favorisant l'amortissement de l'onde de chaleur et son déphasage ;

- L'utilisation de matériaux à surface clair et/ou réfléchissante et à faible conductivité thermique pour minimiser l'absorption de la chaleur ;

- La masse thermique des murs permet de réduire et retarder le transfert de la chaleur vers l'intérieur et l'échauffement de la température interne des murs, tandis que pendant la nuit, la chaleur stockée entraîne augmentation de la température des murs et une surchauffe à l'intérieur des espaces de vie. Par conséquent, l'amélioration de la ventilation nocturne et la diminution de la conductivité thermique du toit en béton ont un effet positif sur le confort de l'occupant ;

- L'organisation spatiale introvertie avec l'utilisation des cours et des patios, réduit la demande de systèmes de climatisation énergivores ;
- En général, les toits en dôme ou sous forme de voûtes peuvent contribuer à améliorer la capacité thermique d'un bâtiment en été ;
- Une attention particulière doit être accordée à l'aménagement de la cour pour améliorer la circulation de l'air et offrir un endroit agréable en été;
- Une conception optimale des ouvertures et des protections dans chaque direction du bâtiment pour laisser entrer un maximum de lumière dans le bâtiment et empêcher les rayons du soleil chauds de pénétrer afin de réduire la demande d'énergie de refroidissement.

Les limites de la recherche et ses perspectives futures

Bien que la présente étude ait généré des résultats utiles, il convient de mentionner un certain nombre de limites, à savoir :

- L'étude paramétrique n'a porté que sur les murs et les toits (l'enveloppe). Il est donc nécessaire d'étudier d'autres aspects tels que la taille des fenêtres, le vitrage, l'orientation des fenêtres et les dispositifs d'ombrage afin d'inclure les effets du transfert de chaleur induits par ces éléments.
- L'étude actuelle se concentre sur un logement standard et un autre néo-vernaculaire et se limite donc à un cas d'étude pour chaque type. Le nombre d'exemples à investir et d'autres types de bâtiments résidentiels à examiner pourraient également être envisagés dans des recherches futures.
- L'étude n'a examiné que le comportement thermique de l'orientation nord-sud des logements pris comme cas d'étude, cependant, il est nécessaire de prendre en considération toutes les orientations pour disposer d'un grand panorama du comportement thermique de l'enveloppe.
- L'étude n'a porté que sur l'impact des stratégies passives sur la performance thermique des bâtiments en saison chaude, mais il est important d'élargir l'analyse également à la saison froide pour parvenir à une meilleure exploration du sujet.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Abd El-Monteleb, A., Ahmed, M. A. (2012). Using simulation for studying the influence of vertical shading devices on the thermal performance of residential buildings (Case study: New Assiut City). *Ain Shams Engineering Journal*, 3(2), pp.163-174.

Alabid, J., Taki, A. (2014). Bioclimatic housing design to desert architecture: A case study of Ghadames, Libya. *Hvac & R Research*. 20, 7(2014), pp. 760-769.

AlAnzi, A., Seo, D., Krarti, M. (2009). Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 822–828.

Alexandroff, G., Alexandroff, J. M. (1982). Architectures et climats ; Soleil et énergies naturelles dans l'habitat, édition Berger-Levrault, Paris. 1982.

Alrashed, F., Asif, M., Burek, S. (2017). The Role of Vernacular Construction Techniques and Materials for Developing Zero-Energy Homes in Various Desert Climates. *Buildings*, 7(4), 17.

Al-Sallal, K. A., Rahmani, M. (2019). Vernacular architecture in the MENA region: Review of bioclimatic strategies and analysis of case studies. In: Sayigh A (ed), *Sustainable Vernacular Architecture*. Cham, Switzerland: Springer.

Al Surf, M., Susilawati, C., Trigunarsyah, B. (2012). Analyzing the Literature for the Link between the Conservative Islamic Culture of Saudi Arabia and the Design of Sustainable Housing. *Conference: 2nd International Conference Socio-Political and Technological Dimensions of Climate Change* At: Kuala Lumpur, Malaysia.

Al-Tamimi, N. A. M., Syed Fadzil, S. F. (2011). Thermal Performance Analysis for Ventilated and Unventilated Glazed Rooms in Malaysia (Comparing Simulated and Field Data). *Indoor and Built Environment*, 20(5), 534–542.

Alwetaishi, M., Elamary, A. S. (2016). Impact of Building Shape on Indoor Building Performance Combined with Cost of Structure. *International Journal of Applied Engineering Research*. ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 15 (2016).

Ameur, M., Kharbouch, Y., Mimet, A. (2020). Optimization of passive design features for a naturally ventilated residential building according to the bioclimatic architecture concept and considering the northern Morocco climate. *Building Simulation*, 13: 677–689.

Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., Kaihou, A. (2021). Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria. *Building Simulation*, 14(5), 1567–1584.

Amri, K., Alkama, D. (2018). Knowledge of the vernacular heritage of souf. *International Journal of Human Settlements*, Vol. 2 . Nr.2 . 2018.

Aniref (n.d.). EL Oued's Monograph. National Agency for Land Intermediation and Regulation. ANSI/ASHRAE (2014). ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Avellan, K. C., Belopotocanova, E. (2019). New perspective on historic materials and technologies for sustainable future innovations in building standards. *Proceedings of the 7th Structural Engineers World Congress 2019 Architecture and Structure: From Past to Future* April 24-26 2019, Istanbul, Turkey.

Azil, C., Djebri, B., Rovero, L. (2018). Desert rose: building material of cupolas in the Souf in Algeria. Sustainable Buildings and Cities. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 353 (2018) 012009.

Bassolino, E., Scarpati, F. (2017). An integrated methodology for the simulation of buildings and open spaces interaction to define climate adaptive strategies: the case study of the Duchesca district in Naples, Italy. *URBANSEQ-2017 International Conference on Urban Comfort and Environmental Quality* 28-29 September 2017, Genova, Italy.

Bachar, K. (2015). L'intégration des dimensions environnementales et sociales dans les pratiques urbaines en Algérie : enjeux et perspective. Architecture, aménagement de l'espace. Thèse de doctorat, Université du Maine, France.

Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Cherier, M. K., Hamdani, M., Benamrane, N., Yaiche, M. R. (2014). Thermal resistances of local building materials and their effect upon

the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region. *Construction and Building Materials*, 52, 59–70.

Bellal, T. (2009). Housing supply in Algeria: affordability matters rather than availability. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*. Number 3 (12) / August 2009.

Bellal, T. (2010). Housing as an expression of self-identity in contemporary Algeria: the work of el-miniawy brothers. *Journal of Islamic Architecture*. Volume 1 Issue 2 December 2010.

Benckroun, M., Chergui, S., Ruggiero, F., Di Turi, S. (2019). Indoor Microclimate Conditions and the Impact of Transformations on Hygrothermal Comfort in the Old Ottoman Houses in Algiers. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–24.

Bensa, A., Wittersheim, E. (1996). *Jean-Marie Tjibaou. La présence Kanak*. Edition Odile Jacob, 1996.

Bera, T. (2019). An Overview Of Vernacular Architecture In India. *Conference Paper*. Vol-22- Issue-14-December-2019.

Berghout, B. (2019). *Intégration des aspects énergétiques et du confort ambiant Passif dans la conception de l'habitat en milieu aride*. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure. Université de Québec. Canada.

Berkouk, D., Mazouz, S. (2017). Étude numérique de l'effet des dispositifs d'ombrage horizontaux sur la performance thermique des logements promotionnels : cas d'ElAlia-Biskra. *Journal of Applied Engineering Science and Technology*, 3(1): 21-27.

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*. Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie.

Bienvenido-Huertas, D., Sánchez-García, D., Pérez-Fargallo, A., Rubio-Bellido, C. (2020). Optimization of energy saving with adaptive setpoint temperatures by calculating the prevailing mean outdoor air temperature. *Building and Environment*, 170, 106612.

Biket, A. P. (2006). Architectural design based on climatic data. In *Proceedings of the 1st Int CIB Endorsed METU Postgrad Conf Built Environ Inf Technol Ankara*, Ankara, Turkey, 17–18 March 2006; pp. 261–267

Born, F. J., Clarke, J. A., Johnstone, C. M. (2001). Development and demonstration of a renewable energy based energy demand/supply decision support tool for the building design profession. In: *Proceedings of the 7th International IBPSA Building Simulation Conference*, Rio de Janeiro, Brazil.

Bouchair, A., Tebbouche, H., Hammouni, A., Lehtihet, M. C., & Blibli, M. (2013). Compact Cities as a Response to the Challenging Local Environmental Constraints in Hot Arid Lands of Algeria. *Energy Procedia*, 42, 493–502.

Capeluto G., Ochoa C.E. (2017) What Is a Real Intelligent Envelope?. In: *Intelligent Envelopes for High-Performance Buildings. Green Energy and Technology*. Springer, Cham.

Causevic, A., Salihbegovic, A., Rustempasic, N. (2019). Integrating New Structures with Historical Constructions - A Transparent Roof Structure above the Centrally Designed Atrium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471, 112102.

Chabbouh Akšamija, L. (2015). *Tradition between Authenticity and Counterfeits*, Faculty of Architecture, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015.

Chahanjiri, J. G., Golabchi, M., Bemanian, M. R., Pourmand, H. (2014). Developing Neo-Vernacular Building Technologies to Integrate Natural and. *Research Journal of Recent Sciences*, 3(12), 78-86.

Chairuniza, C., Hartanti, N. B., Topan, M. A. (2020). Net-Zero Energy Building Application in Neo-Vernacular Architecture Concept. *International Journal of Scientific & Technology Research*, Volume 9, Issue 03, March 2020.

Chen W. H., Ja'faruddin (2021). Traditional Houses and Projective Geometry: Building Numbers and Projective Coordinates, *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2021.

Choay, F. (2006). *Le concept d'authenticité en question, in Pour une anthropologie de l'espace*, Seuil, Paris

Coch, H. (1998). Energy and architecture: Bioclimatism in vernacular architecture, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2 (1998) 67–87.

Cuerda, E., Pérez, M., Neila, J. (2014). Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock. *Energy and Buildings*, 76, 119–129.

Dabaieh, M. (2011). *A Future for the Past of Desert Vernacular Architecture Testing a novel conservation model and applied methodology in the town of Balat in Egypt*. Thèse de doctorat. Univesité de Lund, Suède.

De Dear, R. J., Arens, E., Hui, Z., Oguro, M. (1997). Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. *International Journal of Biometeorology*, 40(3), 141–156.

Del Grosso, A. E., Basso, P. (2010). Adaptive building skin structures. *Smart Materials and Structures*, 19(12), 124011.

Diouf, F. (2013). *Les Differentes Typologies de Facades Et Verrieres* . Arcora.

Domínguez-Muñoz, F., Cejudo-López, J. M., Carrillo-Andrés, A. (2010). Uncertainty in peak cooling load calculations. *Energy and Buildings*, 42(7), 1010–1018.

Dubois, M. C. (2001). *Impact of shading devices on daylight quality in offices*. PhD thesis, Lund University, Sweden.

Dunn, G. N., Bleil de Souza, C., Marsh, A. J., Knight, I.P. (2006). Measured building and air conditioning energy performance: an empirical evaluation of the energy performance of air conditioned office buildings in the UK. In: *International conference on electricity efficiency in commercial buildings 2006*. Frankfurt, Germany.

Ealiwa, A. (2000). *Designing for thermal comfort in naturally ventilated and air conditioned buildings in the summer season of Ghadames, Libya*. PhD Thesis. Leicester School of Architecture, De Montfort University, Leicester, UK, 2000.

Eddy, F., Wijaya, D. A. (2020). Tongging Hotel Resort With Neo Vernacular Approach. *International Journal of Architecture and Urbanism*, Vol. 04, No. 01, 2020 | 16 – 22.

El Jaouhari, K., Amhamdi, L., Bouayad, L., Hamadou, I. Y. A., Harati, M. (2019). De la fenêtre traditionnelle à la facade intelligente: Transcription du Moucharabieh en architecture contemporaine. *African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism*, 1: 67–79.

Elseragy, A., Elnokaly, A. (2007) Assessment criteria for form environmental performance of building envelope in hot arid climates. In: *Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 22-24 November 2007, National University of Singapore, Singapore.

EN ISO 7726. (2001). Ergonomics of the Thermal Environment Instruments for Measuring Physical Quantities. *Geneva: International Standardisation Organisation*.

Faghieh, A. K., Bahadori, M. N. (2011). Thermal performance evaluation of domed roofs. *Energy and Buildings*, 43: 1254–1263.

Forouzandeh, A. (2019). Parametric analysis of influence of courtyard microclimate on diminution of convective heat transfer through building's envelope. *Building Simulation*.

Faghieh, A. K., Bahadori, M. N. (2011). Thermal performance evaluation of domed roofs. *Energy and Buildings*, 43(6), 1254–1263.

Fathy, H. (1973). *Architecture for the Poor: An Experiment in Rural Egypt*. Chicago: University of Chicago Press.

Fathy, H. (1986). *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to hot arid climates*. The University of Chicago Press, Ltd.

Florentino, R., Correia, M., Sousa, G., Carlos, G. (2020). Vernacular architecture and traditional urbanism in the world heritage cultural landscape property of Pico, in Azores (Portugal). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

Guedouh, M. S., Zemmouri, N., Hanafi, A., Qaoud, R. (2019). Passive Strategy Based on Courtyard Building Morphology Impact on Thermal and Luminous Environments in Hot and Arid Region. *Energy Procedia*, 157, 435–442.

Giorgi, E., Cattaneo, T., Ni, M., Enríquez Alatríste, R. (2020). Sustainability and Effectiveness of Chinese Outline for National Tourism and Leisure. *Sustainability*, 12(3), 1161.

Ghisi, E., Felipe Massignani, R. (2007). Thermal performance of bedrooms in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(2), 730–742.

Givoni, B. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris: Editions du moniteur.

Goubaa, A. (2018). *Genèse des transformations de l'habitat dans les quartiers planifiés cas de 500 logements participatifs à Chetma*. Master thesis, Mohamed khider University

Hadavand, M., Yaghoubi, M., Emdad, H. (2008). Thermal analysis of vaulted roofs. *Energy and Buildings*, 40(3), 265–275

Haoui, S., Chergui, S. (2016). Terre, pierre et bois dans l'architecture vernaculaire des Aurès et des Ziban: des matériaux à usage complémentaire. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (10) (2016) 3522-3531.

Harvey, L. D. D. (2009). Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, 2(2), 139–163.

Hashemi, F. (2018). *Adapting vernacular strategies for the design of an energy efficient residential building in a hot and arid climate: City of Yazd, Iran*. Master thesis, Université Iowa State - Iowa.

Hashemi, N., Mazaherian, H., Emami, F. (2021). A museum for the future heritage: house of Tehran's auction with the neo-vernacular approach. *HBRC JOURNAL*.

Hong, T., Langevin, J., Sun, K. (2018). Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation*, 11: 871–898.

Huang, L., Zhai, Z.J. (2020). Critical review and quantitative evaluation of indoor thermal comfort indices and models incorporating solar radiation effects. *Energy and Buildings*, 110204.

Huerto-Cardenas, H. E., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo, V., Lucchi, E. (2020). Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical

buildings: State of the art, research challenges and recommendations. *Building and Environment*, 180, 107081.

Humphreys, M. A., Fergus Nicol, J. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667–684.

Hussain, S., Oosthuizen, P. H. (2012). Validation of numerical modeling of conditions in an atrium space with a hybrid ventilation system. *Building and Environment*, 52, 152–161.

Hwaish, A. N. A. (2018). Sustainable design for building envelope in hot climate; a case study for the role of the dome as a component of the roof in heat exchange. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 4(2): 126-134.

Ibrahim, I. (2018). Eco-traditional courtyard houses in UAE, Sharjah museums case. *Conference: Eco-Architecture*, 2018.

Ingarden, K. (2021). Between Critical Regionalism, Neo-vernacularism and Localised Modernism, Computing for a better tomorrow – *Proceedings of the 36th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, Łódź, Poland, 19th-21st September 2018, Volume 1.

Izadpanahi, P., Farahani, L. M., Nikpey, R. (2021). Lessons from Sustainable and Vernacular Passive Cooling Strategies Used in Traditional Iranian Houses. *J Sustain Res.* 2021; 3(3):e210014.

Janetius, S. T. (2020). *Architectural Psychology: Space, Psyche, Enigma & Symbol*, Mishil & Js Publishers, Thrissur, ISBN: 9781974307715. PP. 53 - 59.

Ji, F., Zhou, S. (2021). Dwelling Is a Key Idea in Traditional Residential Architecture's Sustainability: A Case Study at Yangwan Village in Suzhou, China. *Sustainability* 2021, 13, 6492.

Jung, D. K., Lee, D. H., Shin, J. H., Song, B. H., Park, S. H. (2013). Optimization of energy consumption using BIM-based building energy performance analysis. *J. Appl. Mech. Materials*, 281: 649-652.

Kadri, S. R., Chaouche, S. (2018). La remontée des eaux dans la région du Souf : une menace sur un écosystème oasien, *Les Cahiers d'EMAM* [En ligne], 30 | 2018.

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.

Kamir, T., Aknine Suidi, R. (2010). La politique sociale de l'habitat en Algérie: impacts sur le développement économique et social. Conference Internationale en Economie-Gestion & Commerce International (EGCI-2017). *International Journal of Economics & Strategic Management of Business*. Process-ESMB Vol.9 pp.119-127.

Kawathekar, V. (2020). Vernacular Architecture in India: Architecture of Masses. *The National Conference on Traditional Knowledge Systems in India held at Department of Humanities and Social Sciences*, Indian Institute of Technology, Kharagpur from 9th to 11th January 2004.

Kersenna, S., Chaouche, S. (2018). When the neo-vernacular architecture inspires the contemporary conception. In: *Proceedings of SosTierra 2017*, Valencia, Spain.

Kersenna, S., Chaouche, S., Bencherif, M. (2021). Evaluation environmental strategies in a semi-arid region: case of the 50 duplex dwellings of the El Miniawy brothers in M'Sila. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2021, 13(1), 107-136.

Khalil, A. A., Fikry, M., Abdeal, W. (2018). High technology or low technology for buildings envelopes in residential buildings in Egypt. *Alexandria Engineering Journal* (2018) 57, 3779–3792.

Knaack, U. (2014). Potential for innovative massive building envelope systems – Scenario development towards integrated active systems. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2 (2014) 255–268

Koch-Nielsen, H. (2013). *Stay Cool: A Design Guide for the Built Environment in Hot Climates*. New York: Routledge.

Kokogiannakis, G., Tuohy, P., Darkwa, J. (2012). Impact of material surface properties on building performance across a variety of climates, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 7, Issue 3, September 2012, Pages 181–186.

Konya, A. (1980). *Design Primer for Hot Climate*. London: Architectural Press.

Kossecka, E., Kosny, J. (2002). Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. *Energy and Buildings*, 34(4), 321–331.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263.

Kumar, R., Garg, S. N., Kaushik, S. C. (2005). Performance evaluation of multi-passive solar applications of a non air-conditioned building. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2005; 1(5): 60-75.

Latreche, S. (2019). *Etude et amelioration des performances climatiques de l'enveloppe architecturale en milieux chauds et arides. Cas de l'architecture domestique autoproduite à Biskra*. Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie.

Lavafpour, Y., Surat, M. (2011). Passive Low Energy Architecture in Hot and Dry Climate. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(8): 757-765, 2011

Lavafpour, Y., Surat, M. (2011). Towards new approaches for converting principles of vernacular architecture into energy efficient buildings in hot and dry climates. *Journal of Building Performance*. ISSN: 2180-2106 Volume 2. Issue 1 2011.

Lawrence, R., Becerra-Santacruz, H. (2016). Evaluation of the thermal performance of an industrialised housing construction system in a warm-temperate climate: Morelia, Mexico. *Building and Environment*. ISSN 0360-1323.

Leo Samuel, D. G., Dharmasastha, K., Shiva Nagendra, S. M., Maiya, M. P. (2017). Thermal comfort in traditional buildings composed of local and modern construction materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 463–475.

Leylian, M. R., Amirkhani, A., Bemanian, M. R., Abedi, M. (2010). Design principles in the hot and arid climate of iran, the case of kashan. *International journal of academic research*, Vol. 2. No. 5. September 2010.

Liébard, A., De Herde, A. (2005). *Traité D'architecture et D'urbanisme Bioclimatiques: Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Observ'ER (Observatoire des énergies renouvelables)*.

Ling, C. S., Ahmad, M. H., Ossen, D. R. (2007). The effect of geometric shape and building orientation on minimising solar insolation on high-rise buildings in hot humid climate. *J Constr Dev Count* 2007;12:27–38.

Lodson, J., Ogbeba, J. E., Elinwa, U. K. (2018). A Lesson from Vernacular Architecture in Nigeria. *Contemporary Urban Affairs*, 2018, Volume 2, Number 1, pages 84² 95

Lopez, M., Rubio, R., Martín, S. (2013). Architectural envelopes that interact with their environment. *Conference Paper*. December 2013.

López, F. P., Jensen, R. L., Heiselberg, P., Ruiz de Adana Santiago, M. (2012). Experimental analysis and model validation of an opaque ventilated facade. *Building and Environment*, 56, 265–275.

Madi, H. (2015). *Investigating the development of traditional and modern housing design in Libyan architecture*. Doctoral thesis, School of Architecture and Built Environment, Deakin University.

Mahlia, T. M. I., Taufiq, B. N., Ismail, Masjuki, H. H. (2007). Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall. *Energy and Buildings*, 39(2), 182–187.

Maile, T., Bazjanac, V., Fischer, M. (2012). A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance. *Building and Environment*, 56, 241–251.

Manghnani, N., Bajaj, K. (2014). Masdar City: A Model of Urban Environmental Sustainability. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. ISSN: 2248-9622, Vol. 4, Issue 10(Part - 4), October 2014, pp.38-42

Maria, V. (2009). Evaluation of a sustainable Greek Vernacular settlement and its landscape: architectural typology and building physic. *Building and Environment*, pp. 1095-106.

Mariani, S., Rosso, F., Ferrero, M. (2018). Building in Historical Areas: Identity Values and Energy Performance of Innovative Massive Stone Envelopes with Reference to Traditional Building Solutions. *Buildings*, 8(2), 17.

Matrosov, Y. A., Chao, M., Majersik, C. (2007). Increasing thermal performance and energy efficiency of buildings in Russia: Problems and solutions. In Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings X international conference.

Mehibel, M., Adrian, P. (2017) Analysis of sustainable collective housing in Jijel, Algeria: evaluation of resident satisfaction. In: *PLEA 2017*, 3rd5th July, 2017, Edinburgh, UK.

Meirianta, G. D., Paramadhyaksa, N. W., Mudra, K. (2018). Application of the Neo Vernacular Theme in the Redesign of Banjar Nyuh Port in Nusa Penida, Bali. *Journal of A Sustainable Global South*, Vol. 2 No. 2, August 2018.²²²

Mendoza, L. (2020). *The Evolution of Building Envelope*. Master chapter thesis. Holy Angel University.

Milardi, M., Musarella, C.C. (2019). Smart envelope and climate context. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 296 (2019) 012040.

Mikler, V., A. Bicol, B. Breisnes, M. Labrie. (2008). Passive Design Toolkit: Best Practices. *City of Vancouver*.

Mohamed, E., Riffat, S., Omer, S. (2017). Low-temperature solar - plateassisted heat pump: a developed design for domestic applications in cold climate. *International Journal of Refrigeration*, 81: 134–150.

Mohammad, A. K. (2013). Le Corbusier's Solar Shading Strategy for Tropical Environment: A Sustainable Approach, in: *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*, Vol 10/No 1, 2013.

Mokhtari, A., Brahim, K., Benziada, R. (2008). Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°2 (2008) 307 – 315.

Morin, G., Le Roux, R., Sturman, A., Quénot, H. (2019). Évaluation de la relation entre températures de l'air et températures de surface issues du satellite modis : application aux vignobles de la vallée de Waipara (Nouvelle-Zélande). *Climatologie*, vol. 15 (2018) 62-83.

Mwasha, A., Williams, R. G., Iwaro, J. (2011). Modeling the performance of residential building envelope: The role of sustainable energy performance indicators. *Energy and Buildings*, 43(9), 2108–2117.

Nadji, M. A. (2015). *La réalisation d'un éco-quartier*. Mémoire de magistère. Université d'Oran.

Najafi, E., Faizi, M. (2017). Evolution of Building Envelopes through Creating Living Characteristics. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11 (2017) 1186-1102.

Najafi, S. M. A., Yaghoubi, M. (2015). Thermal study of a cistern's dome (the case of Motamed cistern in Lar, Iran). *Energy and Buildings*, 102, 453–466.

Nasution, F. R., Loebis, M. N. (2020). Designing Port Passenger Terminal in the Meat Village as Ecotourism Area with Neo Vernacular Architecture Approach. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 4(2), 198-209.

Nayak J. K., Prajapati J. A. (2006). *Handbook on energy conscious buildings, Project Report*, IIT Mumbai, 2006.

Necib, H., Necib, B. (2020). Improve the calculation accuracy of the optimal insulation thickness in building walls as determined by a dynamic heat transfer model. *Asian J Civ Eng* 21, 903–913 (2020).

Nia, E. M., Rahman, N. A., Yunus, M. Y. M. (2014). Roofs Functions in Vernacular Residential Buildings: Case Study in Kashan, Iran. *Int J Archit Res*. 2014; 8(3):251-65.

Nikpour, M., Ghomeshi, M., Mojtabaei, H., Moeinzadeh, S. N. (2011). Investigating sustainability in hot and dry climate of Iranian cities, through central courtyard houses. *The 5th International Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU) 2011* National University of Singapore, Department of Architecture.

Olayiwola, L. M., Adeleye, A., Jiboye, A. D. (2006). Effect of Socio-cultural factors on Housing quality in Osogbo, Nigeria. *In International Symposium on Construction in developing Economies: New Issues and Challenges*.

Oral, G. K., Yener, A. K., Bayazit, N. T. (2004). Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Building and Environment*, 39(3), 281–287.

Östersund. (2016). *Energy performance of residential buildings - projecting, monitoring and evaluating*. Thesis for the degree of Doctoral of Philosophy in the subject of Eco-technology and environmental science.

Ouadah Rebrab, S. (2016). *La politique de l'habitat en Algérie entre monopole de l'Etat et son des engagements*. Tiré de: <https://www.enssea.net/enssea/moultakayat/2012/polpub/-32.pdf>

Oueld-Henia, A. (2003). *Choix climatique et construction, zones arides et semi-arides: la maison à cour de Boussaâda*. Thèse de doctorat, école polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2003.

Panin, T., Mokka-smita, T. (2021). Adaptive Vernacular: A Search for Future Houses in Eastern Region of Thailand. Nakhara: *Journal of Environmental Design and Planning*, Volume 20(2), Article 113.

Paunović Žarić, S., Salihbegović, A., Rosemann, A. (2016). Towards a contemporary vernacular building envelope. *Proceedings of the 3rd International Conference with Exhibition S.ARCH "Next ARCHITECTURE" 25–27 May 2016*, Hotel Splendid Conference & SPA Resort, Budva, Montenegro.

Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, 2007.

Pelmoine, T., Mayor, A. (2020). Vernacular architecture in eastern Senegal: Chaînes opératoires and technical choices. *Journal of Material Culture*, 135918352090792.

Phillipson, M. C., Emmanuel, R., Baker, P. H. (2016). The durability of building materials under a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(4), 590–599.

Piesse, L. (1887). *Algérie Et Tunisie*. Edition Hachette et Cie, France.

Rahman, N. V., Kaban, D. (2019). Hotel Resort Tongging with Approachment of Neo Vernacular Architecture. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 3(2), 148-159.

Rais, M., Boumerzoug, A., Halada, M., Baranyai, B. (2019). Optimizing the cooling energy consumption by the passive traditional facade strategies in hot dry climate. *Pollack Periodica*, 14: 177–188.

Rais, M., Boumerzoug, A., Baranyai, B. (2020). Energy performance diagnosis for the residential building façade in Algeria. *Pollack Periodica*.

Rajpu, Y., Tiwari, S. (2020). Neo- Vernacular Architecture: A Paradigm shift-- *Palarch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology* 17(9).

Ravéreau, A. (1981). *Le M'zab, Une Leçon D'architecture*. Éditeur: Actes Sud (3 juin 1999).

Rosenlund H. (2000). Climatic design of buildings using passive techniques. *Building, Issues 1*, vol. 10. Sweden: Department of Housing Development and Management, Lund University.

Sankaran, V., Chopra, A. (2020). Creating Global Sustainable Smart Cities (A Case Study of Masdar City). First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials. *Journal of Physics: Conference Series*.1706 (2020) 012141.

Svoboda, Z. (2000). The convective-diffusion equation and its use in building physics. *International Journal on Architectural Science* 2000;1(2): 68–79.

Rapoport, A. (1972). *Vivienda y Cultura*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili. 1^a ed., 1969. EnglewoodCliffs, NJ: Prentice Hall.

Rashid, M., Ara, D. R. (2015). Modernity in tradition: Reflections on building design and technology in the Asian vernacular. *Frontiers of Architectural Research*, 4(1), 46–55.

Roos, A., Woxblom, L., McCluskey, D.R. (2008). Architects', and Building Engineers', and Stakeholders' Perceptions to Wood in Construction – Results from a Qualitative study. *Proceedings of the Biennial Meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics*, Norway April, 2008.

Sadineni, S. B., Madala, S., Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631.

Sahebzadeh, S., Heidari, A., Kamelnia, H., Baghbani, A. (2017). Sustainability Features of Iran's Vernacular Architecture: A Comparative Study between the Architecture of Hot-Arid and Hot-Arid-Windy Regions. *Sustainability*, 9(5), 749.

Salama, A. (2001). On-site Technical Review Report: 400 Units Housing Project El Oued, Algeria. *Technical Review Summary*.

Salman, M. (2018). Sustainability and Vernacular Architecture: Rethinking What Identity Is. Chapter In book: Urban and Architectural Heritage Conservation within Sustainability.

Sbia, Y., Kherchi Medjden, H. (2017). Le secteur de l'habitat en algerie : etat des lieux. Revue des sciences commerciales. *La Revue des Sciences Commerciales*. Volume 16, Numéro 4, Pages 110-118.

Sebayang, A., Siagian, M. (2019). BERASTAGI HOTEL RESORT DESIGN (NEO-VERNACULAR ARCHITECTURE DESIGN APPROACH). *Jurnal Koridor*, 10(1), 6-11.

Sedreddine, M., Kharmich, H. (2020). Le milieu en architecture, entre réinterprétation du concepteur et perception de l'utilisateur » cas du village de Gourna au Louxor (Egypte) et des immeubles sémiramis à Casablanca (Maroc). *African and Mediterranean journal of Architecture and Urbanism*.

Semahi, S., Zemmouri, N., Singh, M. K., Attia, S. (2019). Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment*, 161, 106271.

Sghiouri, H., Charai, M., Mezrhab, A., Karkri, M. (2019). Comparison of passive cooling techniques in reducing overheating of clay-straw building in semi-arid climate. *Building Simulation*, 13(1), 65–88.

Shahran, A., Reba, D., & Krklješ, M. (2017). Thermal comfort, adaptability and sustainability of vernacular single-family houses in libya. *Technical Gazette*. 24, 6(2017), 1959-1968

Sharp, H., Lotz, N., Mbayi-Kwelagobe, L., Woodroffe, M., Rajah, D., Turugare, R (2019). Socio-cultural factors and capacity building in Interaction Design: results of a video diary study in Botswana. *International Journal of Human-Computer Studies*, 102375.

Shehab, A. M. A. (2018). *Influences of socio-cultural values to community housing design in the gaza strip palestine*. Doctoral thesis in Philosophy (Architecture). Universiti Teknologi Malaysia.

Sriti, L. (1996). *Potentialité architecturales et bioclimatiques de l'habitat autoconstruit. Cas d'une ville de Sud : Biskra*. Thèse de magistère (non publiée). Université de Biskra. Algérie.

Stazi, F., Tomassoni, E., Bonfigli, C., Di Perna, C. (2014). Energy, comfort and environmental assessment of different building envelope techniques in a Mediterranean climate with a hot dry summer. *Applied Energy*, 134, 176–196.

Stefanizzi, P., Fato, I., Di Turi, S. (2016). Energy and environmental performance of Trullo stone building. An experimental and numerical survey. *International Journal of Heat and Technology*, 34: S396–S402.

Suha, O. (1986). Regionalism with Modernism- Regionalism in Architecture, *Seminar Exploring Architecture in Islamic Cultures II*, Dhaka, Bangladesh.

Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*. 1st ed. Steven V, editor. Amsterdam (The Netherland): Architectural Press.

Tang, R., Meir, I. A., Wu, T. (2006). Thermal performance of non air-conditioned buildings with vaulted roofs in comparison with flat roofs. *Building and Environment*, 41(3), 268–276.

Tarigan, A. N., Andrea, M. S. (2020). Ulos Weaving Center (Neo Vernacular Architecture). *International Journal of Architecture and Urbanism*, 4(3), 281-290.

Tayeb, K. (2011). *Forme architecturale et performence energetique. Vers un modele conceptuel*. Master thesis, Université Mohamed Khider - Biskra.

Tindale, A. (2015). *Design Builder and EnergyPlus*. Design Builder Software Ltd, Building Simulation User News 25.

Trisno, R., Lianto, F. (2020). Function-Form Relation of Neo Vernacular Architecture of Salib Suci Church, Jakarta, Indonesia. *ISVS e-journal*, Vol. 7, no.1.

Turkušić, E. (2011). Neo-Vernacular Architecture – Contribution to the Research. In: Architecture in context. *4th International Conference on Hazards and Modern Heritage*, Sarajevo; 2011; 509-511.

UNEP – SBCI Sustainable Buildings & Climate Initiative (2009). Buildings and Climate Change. Summary for Decision Makers. UNEP DTIE Sustainable Consumption & Production Branch. ISBN: 978-92-807-0000-0.

Usta, P., Zengin, B. (2021). The Energy Impact of Building Materials in Residential Buildings in Turkey. *Materials*, 2021, 14, 2793.

Utama, A., Gheewala, S. H. (2009). Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. *Energy and Buildings*, 41(11), 1263–1268.

Utari, U., Utami, W. (2020). Hotel Resort Paropo With Neo Vernacular Approach. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 4(1), 23-29.

Utzinger, M., Wasley, J. H. (1997). *Building Balance Point. Vital Signs Curriculum Materials Projects*. University of California – Berkeley, and University of Wisconsin-Milwaukee, August,1997.

Van Hoof, J., van Dijken, F. (2008). The historical turf farms of Iceland: Architecture, building technology and the indoor environment. *Building and Environment*, 43(6), 1023–1030.

Verma,T., Brar, T. S., Kama, M. A. (2017). Passive Techniques for Achieving Thermal Comfort in the Vernacular Dwellings of Bikaner. *International Journal on Emerging Technologies* 8(1): 01-06(2017).

Wald, L. (2020). Introduction au Rayonnement Solaire. *Presses des Mines*, Paris, France. ISBN: 978-2-35671-612-5.

Wang, Y., Lia, X., Gan, Y. (2016). Study on the Green Design Strategies of “Neo-Vernacular Architecture”. *Procedia Engineering*, 169 (2016) 367 – 374.

Wang, Z. (2006). A field study of thermal comfort in residential buildings in Harbin. *Journal of Built and Environment*. 42, 1594-1603.

Wasilowski, H. A., Reinhart, C. F. (2009). Modelling an existing building in DesignBuilder/EnergyPlus: Custom versus default inputs. In: *Proceedings of the 11th International IBPSA Building Simulation Conference*, Glasgow, UK.

Williamson, T. Y. (1995). A confirmation technique for thermal performance simulation models. In: *Proceedings of the 4th International IBPSA Building Simulation Conference*, Madison, WI, USA.

Wu, Y. C., Yang, A. S., Tseng, L. Y., Liu, C. L. (2011). Myth of ecological architecture designs: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia. *Energy and Buildings*, 43(10), 2788–2797.

Yassine, M., Benyoucef, A., Razin, D. (2018). Consideration of climatic conditions in the design of dwellings in the Sahara desert. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018. Vol. 19 No. 4.

Yu, L. F., Yeung, S. K., Tang, C. K., Terzopoulos, D., Chan, T. F., Osher, S. (2011). Make it home: Automatic optimization of furniture arrangement. *ACM Trans. Graph.* 30, 4, 86:1–86:11.

Zahrah, W., Rahmadani, M. Y. (2019). The Design Karo Cultural Centre with Neo-Vernacular Architecture Approach. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 3(3), 252-261.

Zeinelabdein, R., Siddig, O., Mohamed, E. (2017). Free cooling based phase change material for domestic buildings in hot arid climate. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Bologna, Italy.

Zeinelabdein, R., Omer, S., Gan, G. (2019). Experimental performance of latent thermal energy storage for sustainable cooling of buildings in hot-arid regions. *Energy and Buildings*, 186: 169–185.

Zerrouki, M. A., Tabet Aoul, W. (2015). La nouvelle politique du logement en Algérie: Quelles Perspectives pour Réduire la Crise de Logement? Les Publications de la Recherche Gouvernance & Economie Sociale. *Gouvernance & Economie Sociale*, Volume 1, Numéro 1.

Zhai, Z., Previtali, J. M. (2010). Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. *Energy and Buildings*, 42(3), 357–365.

Zhang, A., Bokel, R., van den Dobbelsteen, A., Sun, Y., Huang, Q., Zhang, Q. (2017). The Effect of Geometry Parameters on Energy and Thermal Performance of School Buildings in Cold Climates of China. *Sustainability*, 9(10), 1708.doi:10.3390/su9101708.

Zhang, J., Liu, N., Wang, S. (2020). A parametric approach for performance optimization of residential building design in Beijing. *Building Simulation*, 13: 223–235.

Zhang, L. (2014). Simulation analysis of built environment based on design builder software. *Applied Mechanics and Materials*, 580-583: 3134–3137.

Zhao, M., Gao, W. (2012). Design Languages of Contemporary Neo-Vernacular Architecture in China. *Applied Mechanics and Materials*, 253-255, 75–80.

Zhao, X., Greenop, K. (2019). From “neo-vernacular” to “semi-vernacular”: a case study of vernacular architecture representation and adaptation in rural Chinese village revitalization. *International Journal of Heritage Studies*, 25(11), 1128–1147.

Zhilei, L., D. H. C, C., Jian, Y., Xiao, Z., Wei, Z. (2019). The Effectiveness of Adding Horizontal Greening and Vertical Greening to Courtyard Areas of Existing Buildings in the Hot Summer Cold Winter Region of China: A Case Study for Ningbo. *Energy and Buildings*, 196: 227–239.

Znouda, E., Ghrab-Morcos, N., Hadj-Alouane, A. (2007). Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 39(2), 148–153.

Web. Site:

<https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/habitat/57164>

<https://morphee-mdr.com/quels-sont-les-differents-types-dhabitats-selon-les-climats/>

<https://www.sageglass.com/fr/article/decouvrez-comment-modeliser-sageglass-avec-designbuilder>

<https://mediatheque-numerique.loire.fr/Default/doc/TOUTAPPRENDRE/7639/grasshopper-pour-rhino-3d>

<https://www.wallpaper.com/architecture/architects-directory-2020-tropical-space-vietnam>

http://lespacedelentredeux.blogspot.com/2009/03/introduction_17.htm

<https://www.dezeen.com/2013/10/29/jianamani-visitor-centre-by-atelier-teamminus>

http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/Revue_pratique_des_logiciels_SED-_2015-0708_revu.pdf