

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences & Technologie

Département d'Architecture

Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

المرجع:

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

Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement et Patrimoine

Etude de l'impact des procédés de rafraîchissement passif de type « Cool Roof » sur la performance énergétique des bâtiments dans les régions chaudes et arides

Présentée par :

ATHMANI Wafa

Soutenue publiquement le :

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------------|------------|--------------|-----------------------|
| Dr. MEZERDI Toufik | MCA | Président | Université de Biskra |
| Dr. SRITI Leila | Professeur | Rapporteur | Université de Biskra |
| Dr. HAMOUDA Abida | Professeur | Examinatrice | Université de Batna 1 |
| Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine | MCA | Examineur | Université de Bejaïa |

Année Universitaire : 2022 /2023

Dédicace

Je dédie humblement ce travail

À mes très chers parents, mes premiers soutiens et encouragements tout au long de ce parcours. Que Dieu leur accorde une bonne santé et une longue vie prospère.

*À mon frère **Ahmed-Wassim Athmani**, courage mon héros, tu y arriveras insh'Allah.*

À mon frère et ma sœur, qui ont toujours été présents pour moi.

*À mon mari et à mon fils **Aous**, que Dieu veille sur toi pour moi.*

À ma belle-famille, pour leur soutien et leur présence.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail modeste,

*Je vous adresse à tous un sincère "**Merci**".*

Athmani Wafa

Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, le courage, la patience et la volonté nécessaires pour entreprendre ce travail.

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma directrice de thèse **Pr. SRITI Leila** pour son aide précieuse, ses conseils éclairés, son soutien continu et sa confiance tout au long de mon parcours.*

*Je suis également reconnaissant envers le **Pr. DABAIEH Marwa** pour son assistance et ses orientations qui ont enrichi ma recherche, et je lui exprime mes vifs remerciements*

*Mes remerciements sincères vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail avec bienveillance : **DR. MEZERDI Toufik, Pr. HAMOUDA Abida et Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine***

Ma gratitude la plus vive à tous mes enseignants du département d'architecture.

Je tiens à remercier chaleureusement mes amis et toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'élaboration de cette recherche.

Résumé

A l'instar des pays émergents, l'amélioration de la performance énergétique tout en assurant la qualité thermique et environnementale des bâtiments en Algérie constitue une thématique incontournable dans la conjoncture présente du développement durable. Actuellement, le fort taux d'accroissement des aires urbaines et l'inadaptation des techniques de construction résultent un parc immobilier parfaitement indifférent à son contexte, inconfortable et énergivore, qui continue de croître sans cesse.

A ce titre, le secteur du bâtiment résidentiels est particulièrement énergivore et émetteur de gaz à effet de serre, surtout dans le sud de l'Algérie où les conditions désertiques prédominent. De plus, sous un climat chaud et sec, l'exposition permanente de la toiture aux radiations solaires intenses contribue principalement une surchauffe interne importante et un inconfort thermique extrême faisant du refroidissement de l'espace une exigence de base des occupants pendant la majeure partie de l'année. Cette dépendance totale envers les systèmes de climatisation entraîne une consommation d'énergie excessive. Cependant, les toits des bâtiments offrent des opportunités significatives pour anticiper le changement climatique et relever les défis énergétiques contemporains ; cela passe par l'amélioration du comportement thermique des toits en incorporant des procédés de rafraîchissement passif. A cet égard, l'objectif visé par cette étude est d'évaluer la capacité du « Cool Roof » à réaliser des économies d'énergie et à assurer un niveau de confort thermique acceptable dans les habitations contemporaines à Biskra.

Dans le cadre de notre contribution à cette problématique, une méthodologie rigoureuse fondée sur trois approches complémentaires est adoptée. Pour commencer, une étude empirique a été réalisée sur un échantillon de 12 maisons représentant les types de toitures les plus couramment utilisées dans la ville de Biskra. Ensuite, des mesures in situ et une enquête par questionnaire ont permis de déterminer l'impact réel des toitures plates, en béton armé sur les conditions de confort thermique intérieur. Pour sa part, l'étude expérimentale a été menée en réalisant quatre cellules de test à modèle réduit, où six techniques de refroidissement passif ont été évaluées sur deux périodes consécutives, sous des conditions estivales réelles. L'objectif était de comparer la faisabilité thermique, l'accessibilité économique et l'acceptation sociale des

différentes solutions, afin de déterminer les procédés les plus adaptés au contexte de l'étude. Enfin, une simulation numérique à l'aide du logiciel TRNSYS a été réalisée pour étudier l'influence des trois meilleures solutions passives issues de l'étude expérimentale sur l'efficacité énergétique, thermique et environnementale des bâtiments. L'objectif principal était de proposer une toiture adaptée au contexte local, simple, rentable et facile à mettre en œuvre sur des surfaces existantes ou en cours de construction, tout en répondant aux exigences de la vie moderne.

À l'issue de cette étude, les résultats ont clairement démontré qu'en assurant une protection adéquate de la toiture et en agissant sur les propriétés thermiques de sa surface ainsi que sur le choix de la couverture, il est possible d'améliorer significativement **la performance** thermique des bâtiments tout en garantissant un niveau favorable de confort thermique et en réduisant l'empreinte carbone.

Mots clés :

Rafraîchissement passif – toit réfléchissant (Cool Roof) – Performances climatiques – Confort thermique- Efficacité énergétique - Milieux chauds et arides – Bâtiments résidentiels.

Abstract

Algeria, like many emerging countries, improving energy performance, while ensuring the thermal and environmental quality of buildings has become an essential theme in the current situation of sustainable development. Currently, the high rate of growth of urban areas and the unsuitability of construction techniques result in a building stock that is perfectly indifferent to its context, uncomfortable and energy-consuming, which continues to grow unceasingly.

As such, the residential building sector is particularly is not only a substantial energy consumer but also a contributor to greenhouse gas emissions, particularly in the in southern regions of Algeria where desert conditions prevail. Moreover, in a hot and dry climate, the continuous exposure of the roof to intense solar radiation mainly contributes to significant internal overheating and extreme thermal discomfort; making space cooling a basic requirement of occupants for most of the year. This total dependence on air conditioning systems leads to considerable energy consumption. However, the roofs of buildings offer significant opportunities to anticipate climate change and meet contemporary energy challenges. This requires improving the thermal behaviour of roofs by incorporating passive cooling processes. In this regard, the objective of this study is to assess the ability of "Cool Roof" to achieve energy savings and to ensure an acceptable level of thermal comfort in contemporary homes in Biskra.

As part of our contribution to this problem, a rigorous methodology based on three complementary approaches has been adopted. As a start, an empirical study was carried out on a sample of 12 houses representing the most commonly used roofing types in the city of Biskra. Subsequently, through in-situ measurements and a questionnaire survey, the real impact of flat, reinforced concrete roofs on the conditions of indoor thermal comfort was assessed. Additionally, an experimental study was carried out by constructing four small-scale models, where six passive cooling techniques were evaluated over two consecutive periods, under real summer conditions. This experiment aimed to compare the thermal feasibility, economic accessibility and social acceptance of the different solutions, thereby identifying the

most suitable options for the local context. Finally, a numerical simulation using the “TRNSYS” software was carried out to study the influence of the most promising passive alternatives identified in the experimental study on the energy, thermal, and environmental efficiency of buildings. The overarching goal was to offer a roof adapted to the local context, simple, cost-effective and easy to implement on existing surfaces or under construction, while meeting modern lifestyle requirements.

The study's findings clearly demonstrated that by ensuring adequate protection of roofs, particularly by optimizing its thermal properties and selecting appropriate roofing materials, it is possible to improve significantly energy performance of buildings while ensuring a favourable level of thermal comfort at the same time, reducing carbon footprint.

Keywords: Passive cooling – Cool Roof – Climatic performance – Thermal comfort – Energy efficiency – Hot and arid environments – Residential buildings.

ملخص

على غرار البلدان الناشئة، يُعدُّ تحسين أداء الطاقة في الجزائر مع تأكيد ضمان الجودة الحرارية والبيئية للمباني موضوعًا أساسيًا في الوقت الراهن خاصة في إطار التنمية المستدامة. يعتبر ارتفاع معدل النمو في المناطق الحضرية في عصرنا الحالي، وعدم ملاءمة تقنيات البناء، سببًا رئيسيًا في قيام مخزون عقاري غير متناغم تمامًا، غير مريح، ومستهلك للطاقة بشكل كبير، وهذا الوضع يزداد تفاقمًا دون توقف.

وعلى هذا النحو، يُعدُّ قطاع البناء السكني بشكل خاص، هادر للطاقة، ومصدرًا لانبعاث غازات الاحتباس الحراري، لاسيما في الجنوب الجزائري حيث تسود الظروف الصحراوية. بالإضافة إلى ذلك، في المناطق ذات المناخ الحار والجاف، يساهم تعرض السقف المستمر للإشعاع الشمسي الشديد بشكل أساسي في ارتفاع درجات الحرارة داخل المباني، مسببا عدم الراحة والازعاج لسكانها، مما يجعل من تبريد المكان مطلبًا لا غنى عنه لشاغلي هذه المباني على مدار السنة، حيث يؤدي الاعتماد الكلي على أنظمة تكييف الهواء هذا إلى استهلاك مفرط للطاقة.

ومع ذلك، فإن أسطح المباني توفر فرصًا كبيرة لاستباق تغير المناخ ومواجهة تحديات الطاقة المعاصرة، وهذا يتطلب تحسين الاداء الحراري للأسطح من خلال دمج نُظم التبريد السلبي. وفي هذا الصدد، فإن هذه الدراسة تهدف إلى تقييم قدرة "السطح البارد" على تحقيق وفورات في الطاقة وضمان مستوى مقبول من الراحة الحرارية في المنازل المعاصرة في بسكرة.

وفي سياق إسهامنا في التعاطي مع هذه الإشكالية، تم اعتماد منهجية صارمة تستند على ثلاثة مناهج تكاملية. أولاً، تم إجراء دراسة ميدانية على عينة مؤلفة من 12 سكناً، تمثل أنواع الأسقف الأكثر استخداماً في مدينة بسكرة. بعدها، مكنت القياسات الميدانية والاستبيانات من تحديد الأثر الحقيقي للأسطح الخرسانية المسطحة على ظروف الراحة الحرارية الداخلية. كما أجريت الدراسة التجريبية من خلال التطرق لأربع نماذج اختبار ذات مقياس مصغر، حيث عُمد إلى تقييم ست تقنيات تبريد سلبي على مدى فترتين متتاليتين في ظل ظروف الصيف الحقيقية. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو مقارنة الكفاءة الحرارية للحلول المختلفة وتقييم جوانبها الاقتصادية والاجتماعية من أجل تحديد الأنظمة الأنسب لسياق الدراسة. وأخيراً فقد أجريت محاكاة رقمية باستخدام برنامج "TRNSYS" لدراسة تأثير أفضل الحلول الناتجة عن الدراسة التجريبية

على كفاءة استهلاك الطاقة وجودة البيئة الحرارية داخل وخارج للمباني. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقديم سقف متكيف مع النمط المحلي، بسيط، وغير مكلف وسهل الإنجاز على الأسطح القائمة أو التي هي قيد الإنشاء، متناسب مع متطلبات الحياة الحديثة.

في ختام هذه الدراسة، أظهرت النتائج جلياً أنه من خلال ضمان الحماية الكافية للأسطح، وتحديدًا من خلال تحسين الخصائص الحرارية، واختيار التغطية المناسبة، فإنه من الممكن تحسين أداء العزل الحراري للمباني بشكل كبير، مع ضمان مستوى مناسب من الراحة الحرارية للمستخدمين وتقليل الأثر الكربوني بشكل ملموس على البيئة.

الكلمات المفتاحية

التبريد السلبي - السقف العاكس (السقف البارد) - الأداء المناخي - الراحة الحرارية - كفاءة الطاقة - المناطق الحارة الجافة - المباني السكنية.

Tables des matières

| | |
|--------------------------------|-------|
| Résumés..... | I |
| Table des matières..... | VI |
| Liste des figures..... | XII |
| Liste des tableaux..... | XVII |
| Nomenclature..... | XVIII |
| Productions scientifiques..... | XIX |
| . | |

CHAPITRE INTRODUCTIF

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Problématique..... | 4 |
| 3. Hypothèses..... | 7 |
| 4. Objectifs de la recherche | 8 |
| 5. Analyse conceptuelle | 9 |
| 6. Méthodologie de la recherche | 10 |
| 7. Structure de la thèse | 11 |

Partie Théorique

« Notions théorique, Concept clés et rétrospective historique »

Chapitre I : Adaptabilité climatique et performance énergétique des bâtiments dans les climats chauds et arides

| | |
|--|----|
| Introduction | 15 |
| 1.1. Interaction climat et architecture | 16 |
| 1.1.1. Aperçu sur le climat | 17 |
| 1.1.2. Classifications du climat mondial | 19 |
| 1.1.2.1. Les climats désertiques..... | 21 |
| 1.1.2.1.1. Les zones avec un climat chaud et sec en Algérie..... | 23 |
| 1.1.3. Analyse de site..... | 24 |

| | |
|---|----|
| 1.1.4. Stratégies d'adaptation des bâtiments au climat des zones chaudes et aride..... | 26 |
| 1.1.4.1. La toiture..... | 28 |
| 1.1.4.1.1. La morphologie des toitures | 29 |
| 1.1.4.1.2. Les matériaux de construction..... | 31 |
| 1.1.4.2. Les ouvertures | 32 |
| 1.1.4.3. Le rapport au sol..... | 34 |
| 1.2. Interaction homme et climat : effet du climat sur l'homme dans son espace. | 35 |
| 1.2.1. Le confort thermique dans le bâtiment | 36 |
| 1.2.1.1. Les approches d'évaluation de la zone de confort thermique..... | 39 |
| 1.2.1.1.1. La méthode analytique (Statique) | 39 |
| 1.2.1.1.2. La méthode adaptive | 41 |
| 1.2.2. Les chartes bioclimatiques : Outils d'intégration des bâtiments au climat | 43 |
| 1.3. Performance énergétique des bâtiments..... | 44 |
| 1.3.1. Impact de la performance thermique de l'enveloppe sur la consommation d'énergie..... | 45 |
| 1.3.2. Consommation énergétique des bâtiments..... | 47 |
| 1.3.2.1. Aperçue au niveau du mondiale..... | 47 |
| 1.3.2.2. Aperçue au niveau d'Algérie..... | 49 |
| 1.3.3. Efficacité énergétique..... | 52 |
| 1.3.3.1. L'efficacité énergétique en Algérie..... | 53 |
| Conclusion | 54 |

Chapitre II : Procédés de rafraîchissement passif « Cool Roof »

| | |
|---|----|
| Introduction | 56 |
| 2.1. Qu'est-ce qu'un Toit ?..... | 57 |
| 2.1.1. Pourquoi on s'intéresse aux toits ?..... | 57 |
| 2.2. Les fonctions des toits | 58 |
| 2.2.2.1. Fonctions physiques | 58 |
| 2.2.2.2. Fonction de protection thermique..... | 59 |
| 2.2.2.3. Fonction environnementale | 60 |
| 2.2.2.4. Fonction psychologique | 61 |
| 2.2.3. Les types de toitures..... | 61 |
| 2.2.4. Pratique de construction des toitures en Algérie | 62 |
| 2.2.4.1. Toiture traditionnelle | 62 |
| 2.2.4.2. La toiture contemporaine | 62 |
| 2.2.5. Comportement thermique des parois opaques d'un bâtiment | 64 |
| 2.2. La conception passive..... | 66 |
| 2.2.1. Le rafraîchissement passif | 67 |
| 2.2.2. Les techniques de rafraîchissement passif par la toiture | 68 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2.1. Aperçu sur la technique du « Cool roof »..... | 71 |
| 2.2.2.1.1. Qu'est-ce qu'un cool roof ou « Toit frais » ? | 71 |
| 2.2.2.1.2. Le mécanisme des toits frais. | 73 |
| 2.2.2.1.3. Équilibre énergétique des toits frais..... | 76 |
| 2.2.2.1.4. Les matériaux de Cool Roof..... | 77 |
| 2.2.2.1.5. Impact du cool roof sur les performances des bâtiments | 79 |
| 2.2.2.2. Aperçu sur Roof Pond (bassin de toit) | 81 |
| 2.2.2.3. Aperçu sur les toitures ventilées | 85 |
| 2.2.2.4. Aperçu sur les toitures végétalisées | 88 |
| 2.2.2.5. Coûts d'installation des toitures passives..... | 90 |
| Conclusion | 92 |

Chapitre III : État de l'art : « Optimisation des Performances Thermiques et Énergétiques des Bâtiments par la Toiture »

| | |
|---|-----|
| Introduction..... | 94 |
| 3.1. Les méthodes de recherche utilisées pour l'étude des toitures..... | 95 |
| 3.1.1. La méthode empirique..... | 97 |
| 3.1.2. La méthode analytique..... | 98 |
| 3.1.3. La méthode expérimentale | 99 |
| 3.1.3.1. Expérimentation par des bâtiments réels..... | 99 |
| 3.1.3.2. Expérimentation par des modèles réduits..... | 100 |
| 3.1.4. La méthode numérique..... | 105 |
| 3.2. Synthèse des études analysées..... | 109 |
| 3.3. Le positionnement épistémologique..... | 112 |
| Conclusion..... | 114 |

Partie Pratique

« Etude de l'impact des toitures passive sur la performance thermique et énergétique des bâtiments résidentiels dans un climat chaud et aride »

Chapitre IV : Evaluation thermique in situ d'un corpus restreint d'habitations

| | |
|--|-----|
| Introduction..... | 115 |
| 4.1. Présentation du contexte d'étude | 116 |
| 4.1.1. Analyse des conditions climatiques de la ville de Biskra..... | 116 |
| 4.2. Corpus d'étude | 120 |
| 4.2.1. Aperçu sur le cadre bâti à Biskra..... | 120 |
| 4.2.1.1. Caractéristique de l'enveloppe de l'habitat individuel contemporain | 121 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.1.1.1. Analyse des caractéristiques des toitures | 122 |
| 4.3. Etude empirique : l'approche d'Evaluation Post- Occupationnelle (EPO) | 126 |
| 4.3.1. Présentation de l'échantillon d'étude..... | 126 |
| 4.3.2. L'approche d'évaluation post-occupationnelle (EPO) | 126 |
| 4.3.2.1. Evaluation objective : Les mesures physiques..... | 128 |
| 3.2.1.1. Protocole de la campagne de mesure in-situ | 129 |
| 3.2.1.2. Condition de déroulement de la campagne de mesures..... | 130 |
| 4.3.2.2. Evaluation subjective : enquête par questionnaire | 131 |
| 4.4. Résultat et discussion | 133 |
| 4.4.1 Résultats de l'étude quantitative : mesure sur terrain..... | 133 |
| 4.4.1.1. Analyse des températures surfaciques..... | 133 |
| 4.4.1.2. Analyse de la température de l'air ambiant..... | 134 |
| 4.4.2 Résultats de l'étude qualitative : le questionnaire. | 135 |
| Conclusion | 144 |

Chapitre V : Évaluation expérimentale des systèmes de rafraîchissement passif par la toiture via des modèles réduits

| | |
|--|-----|
| Introduction..... | 146 |
| 5.1. Protocole de l'étude expérimentale | 147 |
| 5.1.1. Présentation des cellules tests | 150 |
| 5.1.2. Description des techniques de rafraîchissement passif..... | 152 |
| 5.1.2.1. Toit de référence (REF) | 152 |
| 5.1.2.2. Toits réfléchissants « Cool Reflective Roofs » (TR)..... | 153 |
| 5.1.2.2.1. Toit avec Peinture Réfléchissante (PR) « Cool Paint »..... | 154 |
| 5.1.2.2.2. Toit avec Carreaux de Céramique Blanc (CB)- finition brillante.. | 155 |
| 5.1.2.3. Toitures ombragées..... | 156 |
| 5.1.2.3.1 Toiture Ventilée-Réfléchissante (TV-R) « Cool-Ventilated Roof »..... | 156 |
| 5.1.2.3.2. Toit couvert de Pots en Terre Inversée (PTI) « Inverted Earthen Pots »..... | 156 |
| 5.1.2.4. Roof Pond. | 157 |
| 5.1.2.4.1. Toit de type Roof Pond avec des sacs en tissu remplie d'eau (PR) « Roof Pond Wet Gunny Bags | 157 |
| 5.1.2.4.2. Toit couvert de sacs en toile de jute mouillés (SM) « Wet Fabric » | 158 |
| 5.1.3. Instrumentation et périodes de mesure..... | 161 |
| 5.2. Résultats et discussion | 163 |
| 5.2.1. Faisabilité thermique des systèmes de rafraîchissement passif par la toiture... | 163 |
| 5.2.1.1 Analyse comparative du comportement thermique des cellules test..... | 163 |
| 5.2.1.2. Analyse des flux de chaleur à travers la dalle des cellules test..... | 173 |
| 5.2.2. Accessibilité financière | 176 |
| 5.2.3. Acceptabilité sociale..... | 179 |
| Conclusion | 182 |

Chapitre VI : Étude par simulation numérique des procédés de rafraîchissement passif de type « Cool Roof »

| | |
|---|-----|
| Introduction..... | 185 |
| 6.1 La simulation numérique des bâtiments | 186 |
| 6.2. Le processus de la simulation numérique sous TRNSYS. | 188 |
| 6.2.1. Présentation du logiciel de simulation « TRNSYS » | 188 |
| 6.2.2. Protocole et déroulement de la simulation du bâtiments « Cas d'étude » | 192 |
| 6.2.2.1. La première étape..... | 194 |
| 6.2.2.2. La deuxième étape | 194 |
| 6.2.2.3. La troisième étape. | 197 |
| 6.3. Validation du modèle numérique | 199 |
| 6.4. Résultats et discussion | 203 |
| 6.4.1. Evaluation du comportement thermique des différentes toitures passives | 203 |
| 6.4.2. Evaluation du confort thermique des différentes toitures passives | 207 |
| 6.4.3. Analyse de la consommation énergétique et les émissions de CO ₂ | 210 |
| Conclusion..... | 215 |
| | |
| Conclusion générale | 216 |
| 1. Introduction | 216 |
| 2. Synthèse de l'étude et principaux résultats..... | 217 |
| 3. Recommandations | 220 |
| 4. Les limites de la recherche | 221 |
| 5. Perspectives de recherche..... | 222 |
| Bibliographie | 224 |
| Annexe A..... | 244 |
| Annexe B..... | 249 |
| Annexe C..... | 251 |
| Annexe D..... | 255 |
| Annexe E..... | 259 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|---------------|---|----|
| Figure 1 | Schéma de l'analyse conceptuelle..... | 9 |
| Figure 2 | Schéma illustrant les approches de la recherche..... | 10 |
| Figure 1.1 : | Analyse climatique de site d'un projet architecturale..... | 17 |
| Figure 1.2 : | Les principaux climats de la Terre..... | 19 |
| Figure 1.3 : | La carte mondiale de la classification climatique de Köppen-Geiger..... | 21 |
| Figure 1.4 : | Classification des climats arides selon la méthode Köppen..... | 22 |
| Figure 1.5 : | Répartition du climat chaud et sec en Algérie..... | 24 |
| Figure 1.6 : | Classification de Köppen-Geiger pour l'Afrique présentant les température moyenne, l'humidité relative, l'insolation et les précipitations moyenne annuelle de 1983 – 2005..... | 25 |
| Figure 1.7 : | Imbrication entre les divers domaines du bilan climatique..... | 26 |
| Figure 1.8 : | La typologie des toitures selon les différents zones climatiques | 29 |
| Figure 1.9: | a) La forme des toitures de M'Zab en Algérie. | |
| | b) La disposition des toitures-terrasses à Ouled Rached (Timimoun)..... | 29 |
| Figure 1.10 : | Le concept de protection solaire des toitures terrasse par ombrage projeté des murs et des volumes compacts | 30 |
| Figure 1.11 : | L'utilisation des toitures terrasses dans les régions de climat chaud et sec.... | 30 |
| Figure 1.12 : | Les matériaux de construction des toitures traditionnelle ; a) vallée du M'zab ; b) Djemoura, wilaya de Biskra..... | 32 |
| Figure 1.13 : | a) Les toitures réfléchissantes de la ville du vallée de M'Zab de Shibam au Yemen. b) technique de protection solaire en Inde..... | 32 |
| Figure 1.14 : | La taille des ouvertures utilisées dans les maisons traditionnelles des climats chauds en Algérie avec le type d'occultation utilisé au M'Zab | 33 |
| Figure 1.15 : | Vue aérienne présentant la compacité de la ville de Gardaria et l'ombre procurée pour les façades..... | 34 |
| Figure 1.16 : | Les Rues ombragées dans les ksour Algériens..... | 35 |
| Figure 1.17 : | Les stratégies d'adaptation climatique des bâtiments dans les climats chauds et secs..... | 36 |
| Figure 1.18 : | Les échanges thermiques entre le corps et son environnement..... | 38 |
| Figure 1.19 : | Les paramètres influant sur le confort thermique..... | 38 |
| Figure 1.20 : | Répartition du PPD en fonction du PMV, ainsi que les échelles d'évaluation de sensation thermique..... | 40 |
| Figure 1.21 : | Diagramme de modèle adaptative selon la Norme ASHRAE 55-2017..... | 42 |
| Figure 1.22 : | Les différents études, normes et standards liés au confort thermique développées au fil du temps..... | 42 |
| Figure 1.23 : | Le diagramme bioclimatique de Givoni, présenté sur une charte psychrométrique..... | 43 |
| Figure 1.24 : | Diagramme de Sankey reprenant les différents apports et pertes d'énergie dans le bâtiment..... | 46 |
| Figure 1.25 : | Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2015..... | 48 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure 1.26 : | Consommation finale totale (CFT) mondiale par source « électricité » et par secteur..... | 48 |
| Figure 1.27 : | La consommation énergétique de l'Algérie entre 1990-2021..... | 49 |
| Figure 1.28 : | Répartition de la consommation énergétique du secteur résidentiel par type de logement..... | 50 |
| Figure 1.29 : | Emissions de CO ₂ (Mt CO ₂) par secteur en Algérie entre 2005-2018..... | 51 |
| Figure 1.30 : | La consommation énergétique annuelle par habitant kWh/cap/an et par wilaya GWh/an..... | 51 |
| Figure 1.31 : | Démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments..... | 53 |
| Figure 1.32 : | Méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment..... | 53 |
| Figure 2.1: | La quantité du rayonnement solaire reçue par m ² des parois opaques des bâtiments..... | 58 |
| Figure 2.2 : | Les types de toiture existant dans l'architecture moderne..... | 61 |
| Figure 2.3: | Détails de construction de quelques types de toitures traditionnelles employées au M'Zab..... | 62 |
| Figure 2.4 : | La typologie la plus répandue des habitations privées (autoproduites) à Biskra..... | 63 |
| Figure 2.5 : | Détails de construction de toiture en Algérie, en haut, une toiture d'habitat collectif et en bas une toiture d'habitation privée..... | 63 |
| Figure 2.6 : | Les modes de transfert de chaleur..... | 64 |
| Figure 2.7 : | La conductivité thermique et la résistance d'un matériau..... | 65 |
| Figure 2.8 : | Stratégies d'une conception passive..... | 66 |
| Figure 2.9 : | Classification des approches de refroidissement passif pour les différents types de bâtiments..... | 69 |
| Figure 2.10 : | Techniques de rafraîchissement passif par la toiture les plus adaptés aux bâtiments résidentiels dans les climats chauds..... | 70 |
| Figure 2.11 : | Le principe de protection d'un « Cool Roof »..... | 72 |
| Figure 2.12 : | La différence entre un toit frais et un toit conventionnel..... | 73 |
| Figure 2.13 : | La réflectivité solaire des matériaux mesurée selon ASTM E 903..... | 74 |
| Figure 2.14 : | Bilan énergétique d'un système de toiture..... | 76 |
| Figure 2.15 : | Exemple des matériaux utilisés pour les toits froids ; de gauche à droite ; membranes monocouches ; bitume modifié et des peintures..... | 78 |
| Figure 2.16 : | La réflectance spectrale du couleur marron réfléchissant et standard..... | 78 |
| Figure 2.17 : | Catégories et types de produits pour toits froids..... | 79 |
| Figure 2.18 : | Les besoins de chauffage et de climatisation des bâtiments dans 27 villes après l'application de revêtements de toiture réfléchissants..... | 80 |
| Figure 2.19 : | Mécanisme de transfert de chaleur Roof Pond ouvert. | 82 |
| Figure 2.20 : | Schémas de différents types de capteurs de vent par la toiture au Moyen-Orient..... | 85 |
| Figure 2.21 : | Le fonctionnement d'un système de toiture double peau ventilée en béton dans un bâtiment du sud de la Chine..... | 86 |
| Figure 2.22 : | Une coupe de toiture ventilée indiquant l'emplacement de la cheminée installée..... | 86 |
| Figure 2.23 : | Mécanisme de transfert de chaleur dans une toiture double peau naturellement ventilée..... | 87 |
| Figure 2.24 : | Bilan énergétique d'une toiture végétalisée..... | 88 |
| Figure 3.1 : | Nombre de recherches menées dans le domaine du rafraîchissement passif par la toiture dans les climats chauds selon la base de données Scopus..... | 96 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figure 3.2 : | Exemple d'instrumentation utilisées dans les études sur terrain..... | 97 |
| Figure 3.3 : | Equations utilisées pour le calcul de la performance thermique des toitures.... | 98 |
| Figure 3.4 : | Exemples d'études expérimentales utilisant des bâtiments réels existants..... | 100 |
| Figure 3.5 : | Les différentes cellules testes construit à Jodhpur, Inde..... | 102 |
| Figure 3.6 : | Les cellules-test utilisées dans l'étude des techniques passives..... | 103 |
| Figure 3.7 : | Cellules test avec une toiture évapo-réfléchissante..... | 107 |
| Figure 3.8: | Les chambres d'essais utilisées dans l'étude expérimentale..... | 105 |
| Figure 3.9 : | Nombre d'heures d'inconfort pour les différents types de toits simulés..... | 107 |
| Figure 3.10: | Représentation schématique des différentes configurations de toiture expérimentées..... | 109 |
| Figure 3.11 : | Nuage de mots-clés "cloud words" illustrant la fréquence des termes dans le domaine du rafraîchissement passif par la toiture..... | 113 |
| | | |
| Figure 4.1 : | Classifications des zones climatiques en Algérie..... | 117 |
| Figure 4.2 : | Localisation géographique de la ville de Biskra en Algérie..... | 118 |
| Figure 4.3 : | Le diagramme psychométrique présentant les différents stratégies passive convenable pour le climat de Biskra..... | 119 |
| Figure 4.4 : | Répartition de différent type d'habitats à Biskra..... | 121 |
| Figure 4.5 : | Les 12 habitats contemporains auto-produits étudiés dans ce travail..... | 127 |
| Figure 4.6 : | Positionnement des points de mesure au niveau de la pièce et l'environnement extérieure..... | 131 |
| Figure 4.7 : | La sensation thermique des usagers dans des habitats de conditions naturelles durant le mois de Juillet..... | 138 |
| Figure 4.8: | Régression linéaire des PMV mesurés et votés en fonction des températures mesurées..... | 139 |
| Figure 4.9 : | Votes de sensation relatifs à l'humidité relative intérieur..... | 140 |
| Figure 4.10: | L'utilisation es fenêtres durant le mois de Juillet..... | 141 |
| Figure 4.11 : | La fréquence d'utilisation de la climatisation dans les habitats contemporains pendant le mois du juillet..... | 142 |
| Figure 4.12 : | La satisfaction thermique des usagers vis-à-vis la condition thermique du bâtiment crée par les climatiseurs..... | 142 |
| Figure 4.13 : | La moyenne journalière de l'utilisation de la climatisation durant la période estivale..... | 143 |
| Figure 4.14 : | Evaluation de la quantité d'énergie consommée par les climatiseurs..... | 144 |
| | | |
| Figure 5.1 : | La disposition des cellules test dans la plateforme expérimentale..... | 150 |
| Figure 5.2 : | Les quatre cellules tests construites à l'échelle de "1/50"..... | 152 |
| Figure 5.3 : | Configuration expérimentale des cellules de test montrant toutes les techniques passives étudiées. A savoir de gauche à droite : SM (Toit couvert de sacs en toile de jute mouillés « Wet Fabric »), RP (Toit de type Roof Pond sous forme de sacs en tissu remplis d'eau « Roof Pond Wet Gunny Bags »), REF (Toit de référence), PTI (Toit couvert de Pots en Terre Inversés « Inverted Earthen Pots »), PR (Toit avec Peinture Réfléchissante-Cool Paint), TV-R (Toiture Ventilée-Réfléchissante / Cool-Ventilated Roof) et CB (Toit avec Carreaux de Céramique Blanc - finition brillante)..... | 153 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Figure 5.4 : | Coupe 3D de cellules test illustrant les matériaux de construction de différentes techniques passives ainsi que le mécanisme de flux de chaleur pour chaque dispositif : (a) REF (Toit de référence) ; (b) PR (Toit avec Peinture Réfléchissante-Cool Paint); (c) CB (Toit avec Carreaux de Céramique Blanc - finition brillante); (d) TV-R (Toiture Ventilée-Réfléchissante / Cool-Ventilated Roof) ;..... | 159 |
| | (e) PTI (Toit couvert de Pots en Terre Inversés « Inverted Earthen Pots ») ; (f) SM (Toit couvert de sacs en toile de jute mouillés « Wet Fabric ») ; (g). RP (Toit de type Roof Pond sous forme de sacs en tissu remplis d'eau « Roof Pond Wet Gunny Bags »)..... | 160 |
| Figure 5.5 : | Réduction de la température de l'air intérieure d'une maison avec PLANET SUPRA..... | 155 |
| Figure 5.6 : | Les instruments de mesures utilisés pour réaliser dans le travail expérimental..... | 161 |
| Figure 5.7 : | a) Les points de mesures des températures surfacique interne et externe ; b) Plans des cellules présentant l'emplacement du capteur MISOL..... | 162 |
| Figure 5.8 : | Variations diurnes des températures surfaciques externes mesurées du 5 au 9 Juillet 2021..... | 163 |
| Figure 5.9 : | Variations diurnes des températures surfaciques internes mesurées du 5 au 9 Juillet 2021..... | 166 |
| Figure 5.10 : | Profils des températures ambiantes de toutes les cellules d'essai mesurées du 5 au 9 juillet 2021..... | 167 |
| Figure 5.11 : | Variations diurnes des températures surfaciques externes mesurées du 12 au 16 Juillet 2021..... | 169 |
| Figure 5.12 : | Variations diurnes des températures surfaciques internes mesurées du 12 au 16 Juillet 2021..... | 170 |
| Figure 5.13 : | Profils des températures ambiantes de toutes les cellules d'essai mesurées du 5 au 9 juillet 2021..... | 172 |
| Figure 5.14 : | Un exemple des réponses recueillis auprès des occupants lors de l'entretien... | 180 |
| Figure 5.15 : | Le degré d'acceptabilité sociale envers chaque système passive..... | 181 |
| Figure 6.1: | Les différents développeurs de logiciel de simulation TRNSYS 17..... | 189 |
| Figure 6.2: | L'interface graphique « STUDIO » avec les types et les connexions utilisées dans la simulation numérique..... | 189 |
| Figure 6.3: | Interface TRNBuild correspond au module « Multizone Building »..... | 190 |
| Figure 6.4: | Les facteurs thermiques influençant sur le nœud d'air (Air Node) et l'équation des échanges thermiques convectifs dans un nœud donné..... | 191 |
| Figure 6.5: | Le processus de simulation numérique sur TRNSYS..... | 192 |
| Figure 6.6 : | a) la situation urbaine du cas d'étude ; b) Vue de la maison individuelle prise comme cas de référence ; c) vue sur la terrasse de la maison et d) Plan du 2ème étage montrant la salle de séjour..... | 193 |
| Figure 6.7 : | a) la géométrie du modèle de simulation en 3D ; b) les zones thermiques du l'étage en question..... | 195 |
| Figure 6.8 : | Le processus général de la simulation numérique sous TRNSYS..... | 199 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Figure 6.9 : | Variation des températures ambiantes et de l'air extérieur simulées et mesurées pendant trois jours les plus chauds du mois de Juillet..... | 200 |
| Figure 6.10 : | Régression linéaire des valeurs de températures ; a) de l'air extérieur et b) de l'air intérieur simulées et mesurées..... | 202 |
| Figure 6.11 : | Impact des revêtements « cool roof » sur la température moyenne de la surface externe de la toiture conventionnelle pendant le mois du juillet..... | 203 |
| Figure 6.12 : | L'absorption solaire de la surface extérieure des différents revêtements du toiture pendant le mois de Juillet..... | 205 |
| Figure 6.13 : | Impact des revêtements « cool roof » sur la température moyennes de la surface interne de la toiture conventionnelle pendant le mois du juillet..... | 206 |
| Figure 6.14 : | Le pourcentage de potentiel de confort assuré pendant le mois le plus chaud et le pourcentage d'heures d'inconfort pour les trois solutions de toiture..... | 208 |
| Figure 6.15 : | L'indice « PMV » et « PPD » calculés pour l'ensemble des systèmes de rafraîchissement passif investigués pendant la saison estivale..... | 209 |
| Figure 6.16 : | Variations des températures ambiantes pendant la saison estivale pour les différents solutions passives investigués..... | 212 |

Liste des tableaux

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tableau 1.1 : | Les principales caractéristiques des climats chauds et secs..... | 22 |
| Tableau 1.2 : | La relation des sensations thermiques aux différents valeurs de « SET »..... | 40 |
| Tableau 2.1 : | Différentes configurations de bassins de toiture résultant de différentes combinaisons..... | 84 |
| Tableau 3.1 : | Exemples de cellules de test construites pour étudier les toitures passives dans les climats chauds..... | 110 |
| Tableau 4.1 : | Les caractéristiques prédominants des toitures dans les habitats individuels autoproduits à Biskra..... | 123 |
| Tableau 4.2: | Caractéristiques techniques des appareils de mesure utilisées dans le travail empirique..... | 130 |
| Tableau 4.3 | Variations des températures surfaciques des toitures mesurées dans douze maisons lors des journées chaudes de juillet..... | 136 |
| Tableau 4.4 : | La moyenne des mesures enregistrées dans douze maisons au cours des journées chaudes du mois de juillet..... | 137 |
| Tableau 5.1 : | Les propriétés thermo-physique de l'enveloppe des cellules d'essai | 151 |
| Tableau 5.2: | Le flux de chaleur transmise par les dalles des toits calculées durant la première période d'expérimentation..... | 175 |
| Tableau 5.3: | Le flux de chaleur transmise par les dalles des toits calculées durant la deuxième période d'expérimentation..... | 175 |
| Tableau 5.4 : | Calcul du coût total des différentes solutions passives par mètre carré, y compris le coût initial, le coût supplémentaire d'entretien et le coût de fonctionnement des appareils installés..... | 178 |
| Tableau 6.1 : | Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés pour la simulation..... | 196 |
| Tableau 6.2 : | Gain de chaleur interne pour le bâtiment modèle..... | 197 |
| Tableau 6.3 : | Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés pour les techniques de « Cool roof »..... | 198 |
| Tableau 6.4 : | Critères de validation des valeurs du bâtiment de simulation..... | 202 |
| Tableau 6.5 : | Consommation mensuelle d'énergie de refroidissement et émissions de CO ₂ relatives aux systèmes de toiture étudiés..... | 214 |

Nomenclature

Indices

| | |
|--------|--|
| SR | Facteur de réflexion solaire ou albédo. |
| TE | Emittance thermique. |
| QSK | Flux de chaleur échangé à la surface de la peau (W/m^2). |
| ERES | Flux de chaleur échangé par la respiration (W/m^2). |
| Qso | Le gain de chaleur dû au rayonnement solaire (W). |
| Qout | Le flux de chaleur vers l'extérieur (W). |
| Qin | Le flux de chaleur vers l'intérieur (W). |
| Ts/Tso | Température de surface de la surface donnée [K]. |
| Ti | Température de l'air à l'intérieur (K). |
| Ta | Température de l'air extérieur [K]. |
| Tsky | Température conventionnelle du ciel [K]. |
| hc | Coefficient de convection [$W/m^2 K$]. |
| Ri-se | Résistance thermique globale de la toiture [W/mK]. |
| M | Activité métabolique (W/m^2). |
| W | Puissance fournie à l'extérieur (W/m^2). |
| S | Chaleur stockée (W/m^2). |

Symboles

| | |
|---------------|--|
| I | Irradiation solaire [W/m^2] |
| r | Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6685 \cdot 10^8 [W/m^2 K^4]$). |
| λ | Conductivité thermique de la même surface [W/mK]. |
| σ | Réfectance solaire, compris entre 0 et 1. |
| ε | Emittance thermique, compris entre 0 et 1. |
| I | Irradiance solaire [W/m^2]. |

Productions Scientifiques

Publications nationales

W. Athmani, L. Sriti, Impact of passive cooling techniques on the thermal behavior of residential buildings in hot and arid regions -An experimental study-, J. Build. Mater. Struct. 5 (2018) 74–85. <http://journals.oasis-pubs.com/index.php/jbms/article/view/53/0>.

Publications internationales

W. Athmani, L. Sriti, M. Dabaieh, Z. Younsi, The Potential of Using Passive Cooling Roof Techniques to Improve Thermal Performance and Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Arid Regions, Buildings. 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13010021>.

W. Athmani, L. Sriti, M. Dabaieh, M.A. Khadraoui, An Investigation on Using Passive Cooling Roofs Techniques for Improving Climatic Performance of Residential Buildings in Hot Arid Regions based on Post-Occupancy Evaluation of Inhabitants' Thermal Comfort, Tech. Soc. Sci. J. 36 (2022). www.techniumscience.com.

Communications internationales

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2018), "Revue de la littérature : Impact du cool roof sur le confort thermique des bâtiments résidentiels dans les climats humides et les climats arides", 13 février, Workshop International « Zones Humides et Villes Durables », Biskra, Algérie.

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2017), "The impact of passive cooling techniques on the thermal behavior of residential buildings in hot and arid regions -An experimental study-", 08 November, 3rd International Symposium on Materials and Sustainable Development "ISMSD", Boumerdes, Algérie.

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2017), "Etude de l'impact des techniques de rafraichissement passif de type « cool roof » sur la performance thermique et énergétique des bâtiments résidentiels en milieux chauds et arides ", 27 Octobre, 18 èmes Journées Internationales de Thermique « JITH 2017 », Monastir, Tunisie.

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2017), "Etude de l'impact des toitures réfléchissantes « cool roof » sur le comportement énergétique des bâtiments des régions chaudes et arides", 24 Mai, Workshop Algéro - Portugais patrimoines et cultures historiques de l'eau dans les milieux arides et semi arides, Biskra, Algérie.

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2019), "Study of the impact of cool roof on urban thermal comfort in hot aride climate ", 5 Mai 2019, the 2nd International Conference on Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (ICCAUA-2019), Alanya, Turkey.

Communications nationales

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2017), "Etude de l'impact de cool roof sur l'ambiance thermique des espaces publics ", 08 Mai, La 6 ème journée d'étude « Espaces Publics urbains, composition urbaine et ambiances entre Théorie & Pratique, Oum El Bouagi, Algérie.*

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2018), "Évaluation de la technique « cool roof » sur la performance énergétique des bâtiments résidentiels et l'atténuation de l'ilot de chaleur urbain dans un climat chaud et aride", 10 Mai, La Protection de l'Environnement et les Energies Renouvelables CNPER 1-18, Batna, Algérie.

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2018), "Photos Prise de la lumière en Architecture", Journée Internationale de Lumière sur Lumière, 6 Mai, Biskra, Algérie.

Wafa ATHMANI, Leila SRITI (2018), " Study of the impact of passive cooling techniques “Cool Roof“ on the energy consumption of residential buildings in hot and arid regions", 1er Colloque Doctoral sur La Méthodologie d'Elaboration d'une Thèse et d'une Publication en Doctorat, 07 Mars, EL-Oued, Algérie.

« Men, places, programs are diverse, so why architecture should be all the same? »

Renzo Piano, 1997

CHAPITRE INTRODUCTIF

Introduction Générale

« *Les bâtiments sont notre troisième peau* »

Roaf et al. (2005).

1. Introduction

Les bâtiments, ces structures érigées par l'ingéniosité humaine, vont bien au-delà de leur simple fonction utilitaire. Ils deviennent notre troisième peau, une extension de notre être, une enveloppe qui nous abrite et nous protège du monde extérieur. En effet, ces constructions façonnent notre environnement bâti, influençant ainsi notre manière de vivre, de travailler et d'interagir avec notre entourage. Leur conception architecturale, minutieusement pensée dans tous ses aspects hyper-interconnectés, transcende la simple fonctionnalité pour devenir une expression de bien-être physique, d'efficacité énergétique et d'harmonie environnementale. Pour parvenir à la réalisation de ces impératifs, la conception architecturale se doit d'incarner une harmonie intrinsèque au climat environnant, en particulier à travers son enveloppe, qui se développe comme une réponse aux influences climatiques locales afin de créer les conditions de confort intérieur, indépendamment des conditions extérieures. Tout choix ou décision de construction pris pour chaque composant de l'enveloppe (mur, toiture et ouverture) du bâtiment doit être rigoureusement évalué, car les surfaces extérieures et intérieures peuvent interagir, influencer et échanger mutuellement le niveau de confort thermique offert aux occupants, et par conséquent, la quantité d'énergie à consommer.

De manière paradoxale, l'architecture contemporaine a adopté une approche singulière pour faire face aux aléas climatiques. Plutôt que de s'adapter au climat, elle choisit de séparer l'architecture de son environnement et de créer des ambiances

artificielles à l'intérieur. La notion originelle de "l'art de bâtir" a évolué, se transformant en une véritable "exploration plastique". Cette transformation, résultat des forces combinées de l'essor technologique, de l'évolution sociétale, de l'avènement de nouveaux matériaux et techniques de construction tels que l'architecture de fer et de verre, a conduit à des typologies architecturales totalement inadaptées (Kabore, 2015). La mondialisation des idées et concepts architecturaux a entraîné une uniformisation des villes à travers le monde. De plus, les enseignements précieux des méthodes de construction vernaculaire sont ignorés et oubliés, laissant place à une industrie de production de masse ; ce que Le Corbusier appelait "des machines à habiter" (Duval, 2020).

La naissance de ce cadre bâti, souvent qualifié d'énergivore, a entraîné une dépendance des utilisateurs vis-à-vis des installations techniques qui se basent sur des sources d'énergie épuisables et polluantes, reléguant ainsi leur bien-être physiologique à ces systèmes. La consommation mondiale d'énergie primaire a connu une croissance exponentielle au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, mettant en évidence le risque d'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables dans un contexte de ressources limitées, ainsi que les conséquences désastreuses de cette consommation, notamment, le réchauffement climatique global. Toutefois, cette course à l'épuisement des ressources a servi à dissimuler de nombreux défauts conceptuels liés au confort thermique des occupants, alors que la solution est bien plus simple que cela.

La crise due aux "chocs pétroliers" en 1971 et 1973 a suscité une prise de conscience mondiale profonde en matière d'énergie (Till Schaap Editions, 2020). Cet événement a entraîné l'émergence de nouvelles orientations dans le domaine de la construction, axées sur la protection de l'environnement et le développement durable. Le Sommet de la Terre à Rio ont été le théâtre de mesures concrètes, telles que l'établissement de normes, de labels et de réglementations...etc., qui ont marqué une évolution de la pensée et de l'action dans le domaine de l'architecture. Aujourd'hui, ces avancées se traduisent par des "bâtiments bioclimatiques", des "bâtiments à haute qualité énergétique" et des "constructions vertes". Le principe du développement durable est devenu une exigence primordiale pour réduire l'impact écologique des constructions, créés des espaces de vie agréables tout en favorisant une utilisation responsable des ressources et l'adoption d'énergies renouvelables. Il reste que, malgré

les mesures politiques mondiales significatives de lutte contre le gaspillage énergétique, la réalité demeure différente notamment pour les pays émergents et en voie de développement.

En Algérie, l'enthousiasme pour la modernité et la demande croissante de logements ont entraîné la construction de bâtiments standardisés, caractérisés par des blocs en béton monotones, qui manquent de réflexion contextuelle, de confort minimal en plus d'être extrêmement énergivores. Au cours de la dernière décennie, la demande énergétique a connu une augmentation colossale, avec une hausse annuelle moyenne de 5,6 %¹ entre 2000 et 2017. Cependant, le secteur du bâtiment est largement reconnu comme l'un des principaux consommateurs d'énergie au niveau mondial, étant responsable de 40% de la consommation énergétique finale et contribuant à environ un tiers (1/3) des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale (Djedjig et al., 2012; Kabore, 2015). En Algérie, les bâtiments résidentiels et tertiaires représentent environ 43% de la consommation d'énergie finale (APRUE, 2019).

Dans les régions à climat chaud qui représentent 85% de la superficie de ce pays, outre l'utilisation de matériaux à base de ciment, la climatisation est l'une des technologies ayant eu le plus d'impact dans le domaine de la construction et de l'écologie environnementale (Duval, 2020). Stan Cox (2010) souligne que la climatisation des bâtiments est passée rapidement d'un luxe à une nécessité (Garcia, 2018). En effet, le secteur résidentiel représente 43% de la consommation totale d'électricité, et les logements individuels auto-produits en Algérie représentent 65% de cette consommation (APRUE, 2019). Selon le rapport de l'IEA² de 2018, la demande croissante d'électricité à l'échelle mondiale pour le fonctionnement des climatiseurs devrait représenter 37% de la consommation énergétique totale des bâtiments d'ici 2050. Dans ce contexte, ce type d'habitations offre une opportunité majeure de réaliser des économies d'énergie immédiates. Toutefois, avec les technologies actuellement disponibles, le secteur du bâtiment est suffisamment mature pour engager rapidement une transition énergétique.

¹ World energy and climate statistics - yearbook, 2022. <https://yearbook.enerdata.net/>.

² International Energy Agency. <https://www.iea.org/>

Ces derniers temps, l'idée de réduire la dépendance vis-à-vis hydrocarbures en favorisant le refroidissement naturel plutôt que la climatisation artificielle a suscité un vif intérêt pour le développement de techniques et de stratégies de refroidissement passif. Parmi les éléments des bâtiments, le toit se révèle être le plus propice à l'intégration de dispositifs passifs, en raison de sa position par rapport au ciel et de son exposition intense au soleil, qui est à l'origine de plus de 70 % des gains de chaleur internes (Al-Obaidi et al., 2014). Malheureusement, la conception des toitures est souvent négligée, et les pratiques de construction sont généralement influencées par des considérations économiques plutôt que par des paramètres thermiques, énergétiques et climatiques, en particulier dans les régions chaudes où le rayonnement solaire direct est la principale source de chaleur. Cependant, l'utilisation de techniques de contrôle solaire sur les toits représente une stratégie très efficace pour réduire l'impact des gains solaires sur la consommation d'énergie nécessaire pour maintenir un niveau de confort thermique optimal. Selon Thierry et al., (2019), il est essentiel, voire primordial, d'assurer une protection solaire efficace sur les toitures afin d'obtenir des bâtiments thermiquement conformes et énergétiquement efficaces.

Dans ce contexte, plusieurs recherches se sont inscrites dans une démarche visant à optimiser le fonctionnement thermique des toitures par l'application des approches de dissipation de la chaleur ou par le contrôle de l'absorption solaire des surfaces (Yannas et al., 2006). Ces recherches se sont penchées sur les caractéristiques matérielles des toitures, notamment les propriétés optiques des surfaces extérieures (Hernández-Pérez et al., 2017), ainsi que l'intégration des dispositifs d'ombrages dans le but d'atteindre des environnements intérieurs thermiquement confortables, tout en minimisant les dépenses d'énergie et son effet sur la concentration des émissions de gaz à effet de serre.

Cette thèse s'inscrit dans une démarche d'efficacité énergétique des bâtiments en optimisant passivement la performance thermique des toitures, tout en améliorant leur confort thermique dans des conditions climatiques chaudes et arides. Sans une action immédiate, de nombreux bâtiments existants continueront de gaspiller de l'énergie inutilement d'ici 2050. Agir dès maintenant implique l'intégration des techniques de refroidissement passif par les toitures en tant que démarche pour une architecture respectueuse de l'environnement.

2. Problématique

L'urbanisation effrénée des dernières décennies en Algérie se traduit par une uniformisation indéniable de nos cités et un paysage marqué par des édifices stéréotypés en béton. Les nouveaux modèles architecturaux semblent émerger en dépit des conditions climatiques et des besoins spécifiques de la population. Dans les régions chaudes et arides, qui représentent les deux tiers du territoire national, où l'irradiation solaire est intense, les étés longs, chauds et arides, et l'humidité extrêmement basse, la réflexion sur le confort thermique et le bien-être intérieur reste malheureusement insuffisante lors de la conception des habitations.

L'enveloppe architecturale, par ses caractéristiques conceptuelles et matérielles, s'écarte des spécificités du site et se trouve souvent en opposition avec les exigences de l'environnement naturel, engendrant ainsi un inconfort et un déséquilibre entre les constructions érigées et leur contexte environnant. Face à cette problématique, les résidents se voient contraints de recourir à une utilisation excessive de la climatisation mécanique. Les rapports récents révèlent qu'entre 70 et 80 % de la consommation totale d'énergie est consacrée au fonctionnement de ces systèmes de climatisation mécanique, ce qui fait de ces constructions extravagantes les principaux protagonistes de l'épuisement énergétique grandissant dans ces conditions particulières (Dabaieh *et al.*, 2015). L'enveloppe, véritable interface thermique, revêt une importance primordiale dans la performance thermique et le bilan énergétique des constructions, notamment en période estivale (Yu *et al.*, 2015). En effet, elle est responsable de 75 % des pertes énergétiques par le biais de ses différentes surfaces et composants (Sierra, 2012).

La toiture, en particulier, occupe une position centrale en tant qu'élément critique d'interaction et d'échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, jouant un rôle décisif dans la consommation énergétique, le confort des occupants et la durabilité de la structure. Les toits plats en béton, par exemple, captent environ 36,7 % du rayonnement solaire direct total, transmettant ainsi près de 50 % de la chaleur accumulée à l'intérieur des bâtiments dans les climats chauds (Nahar *et al.*, 2003). Necib *et al.* (2016) ont démontré que la toiture représente 70,62 % des gains thermiques globaux du bâtiment. Par sa position, sa forme et ses matériaux, la toiture constitue une problématique majeure qui détermine l'efficacité énergétique d'un bâtiment. En effet, Ascione *et al.* (2018) ont rapporté que plus de 40 % des économies d'énergie de

refroidissement attendues sont directement attribuables à l'amélioration du comportement thermique des toitures. Face à cette réalité, il s'avère impératif de trouver des solutions permettant d'assurer à la fois le bien-être et la sobriété énergétique des bâtiments en intégrant des concepts architecturaux bioclimatiques dans la conception des toitures, s'inspirant des stratégies d'adaptation des bâtiments traditionnelles des climats chauds, notamment en Algérie.

Afin d'optimiser le comportement thermique de la toiture et son impact sur la performance globale du bâtiment, les techniques de rafraîchissement passif se concentrent sur la protection solaire et la prévention de l'accumulation de chaleur. En effet, les gains thermiques reçus par la toiture sont principalement influencés par les rayonnements solaires et les températures extérieures. La réduction de cette source de chaleur par transmission dépend de trois facteurs clés : le facteur d'absorption (vs réflexion) du rayonnement solaire, les propriétés isolantes de la surface et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

En effet, il est de fait établi que la performance thermique des matériaux est déterminée par les propriétés radiatives et thermiques de leur surface. Les propriétés radiatives propres aux rayonnements solaires sont déterminées par la réflectance solaire et l'émissivité thermique ; les propriétés thermiques sont mesurées par la conductivité thermique et la capacité calorifique et sont importantes pour le stockage de la chaleur. Les matériaux ayant une grande capacité de stockage de la chaleur peuvent stocker davantage de chaleur lorsque la température du matériau augmente. Les propriétés radiatives vis-à-vis du soleil affectent la température d'une surface. La présence d'une surface froide (cool) sur un bâtiment diminue la pénétration de la chaleur dans le bâtiment. En particulier, dans le cas de toits avec des matériaux froids, moins d'énergie radiative pénétrera dans le bâtiment, réduisant ainsi la charge de refroidissement et la consommation d'énergie. Notre contribution se concentre particulièrement sur le premier facteur, en explorant l'application de matériaux de toiture "Cool Roof". Cette approche modernisée permet d'améliorer l'adaptabilité climatique de l'enveloppe et son efficacité énergétique.

De plus, selon la littérature scientifique, de nombreux dispositifs d'ombrage passifs appliqués aux toits méritent d'être étudiés en termes d'efficacité, notamment en comparaison avec les matériaux radiatif. Ces solutions se distinguent par leur coût

réduit et leur facilité d'installation sur des surfaces existantes, offrant ainsi la possibilité d'améliorer l'environnement bâti actuel et d'encourager leur intégration dès le début des travaux de construction pour garantir la durabilité de cette composante et le confort des occupants dans les habitations contemporaines existantes à Biskra.

Tout cela nous amène à formuler la question suivante :

Dans quelle mesure l'application de procédé de rafraîchissement passif au niveau du toit par le biais des revêtements réfléchissants radiatifs «cool coatings», permet-elle d'améliorer l'efficacité énergétique tout en assurant le confort thermique dans les bâtiments résidentiels sous les conditions d'un climat chaud et aride ? Le cool-roof est-il la meilleure solution à appliquer à Biskra ?

3. Hypothèses

Cette recherche se concentre sur la ville de Biskra, située dans un environnement saharien hostile caractérisé par des températures extérieures caniculaires, un ensoleillement intense, des précipitations limitées et un taux d'humidité annuel relativement faible. Le cadre bâti résidentiel de Biskra présente des problèmes de confort thermique à l'intérieur des bâtiments, ainsi qu'une forte dépendance par rapport à l'énergie électrique pour le refroidissement des espaces. Or, tant que la toiture joue un rôle majeur dans la transmission de chaleur vers l'intérieur (à savoir que l'exposition des façades contiguës est moins significative), l'intégration de stratégies de rafraîchissement passif appropriées aux toits des bâtiments résidentiels individuels pourrait considérablement améliorer la performance thermique, accroître l'efficacité énergétique et réduire l'impact environnemental en minimisant les émissions de gaz à effet de serre résultant du fonctionnement excessive de la climatisation. Partant de cette assertion, nous émettons les hypothèses suivantes :

1. L'optimisation du comportement thermique de la toiture peut être réalisée en agissant sur l'albédo de la surface, autrement dit, les propriétés optiques du revêtement extérieures.
2. L'intégration des revêtements réfléchissants ou « cool coatings » sur la surface exposée des toits sont capables de les protéger contre les radiations solaires intenses, améliorant ainsi le confort hygrothermique à l'intérieur et l'efficacité énergétique ainsi que la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

3. Les systèmes de rafraîchissement passif par ventilation, par évaporation et par ombrage inspirés de l'architecture traditionnelle des climats désertiques sont considérés comme des solutions efficaces pour réduire la chaleur acquise à travers l'enveloppe, contribuant ainsi à atténuer la consommation excessive d'énergie et à promouvoir la sobriété énergétique.

Ces hypothèses guideront notre recherche visant à évaluer l'impact des stratégies de rafraîchissement passif sur les toits des bâtiments résidentiels individuels de Biskra, en mettant l'accent sur l'amélioration de la performance thermique, l'efficacité énergétique et la réduction de l'impact environnemental.

4. Objectifs de la recherche

L'approche du rafraîchissement passif à travers le toit suscite un vif intérêt parmi de nombreux chercheurs. Ainsi, notre recherche s'inscrit dans la problématique spécifique de l'amélioration des conditions de confort thermique et de l'efficacité énergétique des constructions sous un climat chaud et aride en agissant sur les toitures des habitations contemporaines de Biskra. Notre objectif principal est de proposer un toit adapté au contexte local, à la fois performant sur le plan thermique et énergétique, en exploitant des procédés passifs simples, rentables et faciles à mettre en œuvre, tout en répondant aux exigences de la vie moderne.

Cette recherche s'articule autour des objectifs suivants :

- Étudier et optimiser le comportement thermique des toitures par une technique de refroidissement passif efficace sous les conditions climatiques de Biskra.
- Sensibiliser la société, en particulier les instances publiques, à l'importance de la problématique des toitures en tant qu'élément constructif essentiel pour l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment.
- Valoriser les solutions de refroidissement passif inspirées de l'architecture vernaculaire des régions à climat chaud et aride, et les intégrer dans le processus de conception architecturale.
- Contribuer à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain en réduisant la température des surfaces des toitures et en optimisant l'utilisation des énergies fossiles.

- Déterminer le niveau d'efficacité de la technique de cool roof, à l'instar des autres techniques passives par la toiture les plus appropriées au contexte étudié.

Enfin, en fournissant aux concepteurs des solutions et des recommandations adaptées au climat désertique, la présente recherche vise à faciliter la création de constructions futures confortables et à haute performance énergétique.

5. Analyse conceptuelle

L'analyse conceptuelle revêt une importance capitale pour toute recherche, en ce qu'elle permet de concrétiser les concepts évoqués dans les hypothèses, de sorte à les rendre mesurables. Chaque variable est étroitement liée à ses dimensions, qui à leur tour sont associées à des indicateurs spécifiques. Pour la présente recherche, les variables sont classées en deux catégories distinctes, à savoir des variables indépendantes (toiture et procédés de rafraîchissement passif) et des variables dépendantes (confort thermique, efficacité énergétique, coût d'investissement et acceptabilité sociale) (**Figure 1**).

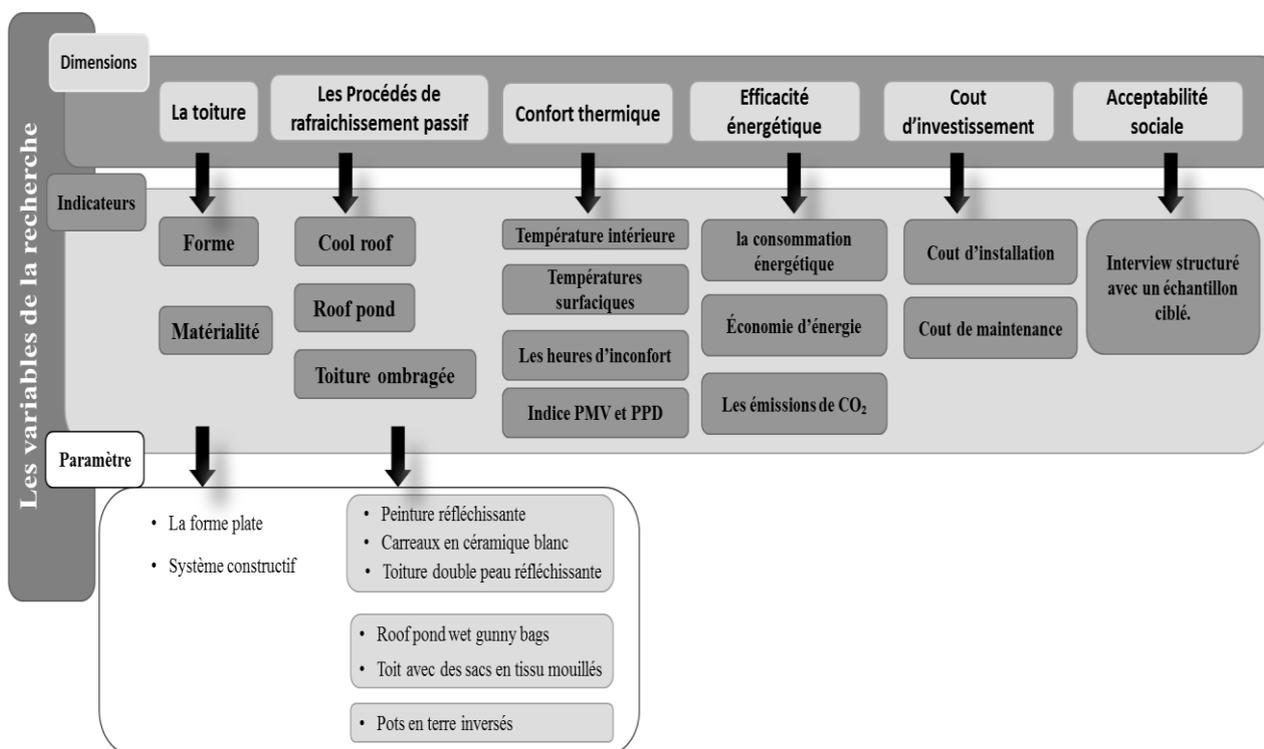


Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle établie par l'Auteur.

6. Méthodologie

Afin de répondre aux objectifs précédemment énoncés, cette recherche suit une démarche à la fois inductive et déductive. Le cadre méthodologique développé repose sur quatre approches fondamentales : conceptuelle, empirique, expérimentale et numérique (voir Figure 2).

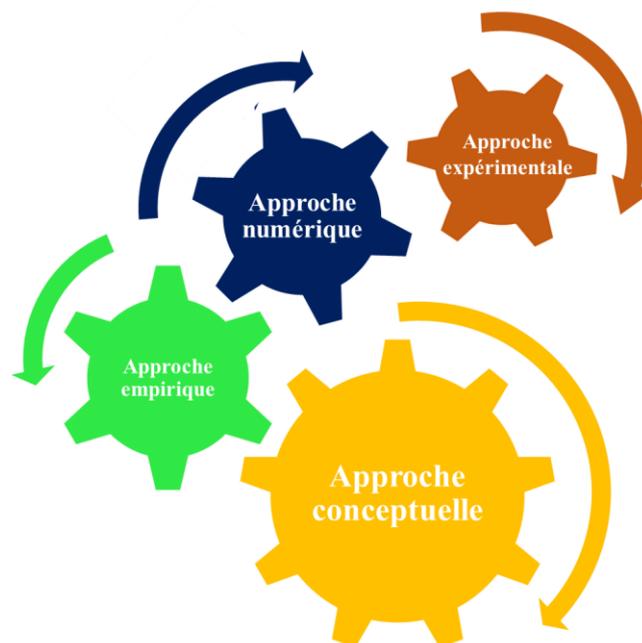


Figure 2 : Schéma illustrant les approches de la recherche.

- **L'approche conceptuelle** consiste à établir un soubassement théorique en se basant sur les connaissances existantes liées à la thématique étudiée. Cela est réalisé par le biais d'une revue de littérature ciblée, en consultant différentes sources bibliographiques telles que des ouvrages, des thèses, des articles, etc. Cette étape vise à approfondir notre compréhension des notions fondamentales relatives au sujet traité et à établir l'état de l'art. Elle joue également un rôle crucial en orientant les grandes étapes de la recherche.
- **L'approche empirique** repose sur un travail de collecte de données in situ. Dans un premier temps, une analyse typologique des différents systèmes constructifs des toitures (choix des matériaux et des revêtements de protection extérieure) des habitations contemporaines auto-construites situées dans la ville de Biskra a été réalisée. Cette étude préliminaire a permis de sélectionner un ensemble de bâtiments

représentatifs construits selon la typologie de toiture la plus courante, ce qui a permis de définir un corpus d'étude. L'objectif de cette phase est d'utiliser ce corpus pour évaluer concrètement l'impact de la toiture sur les conditions de confort thermique à l'intérieur de ces constructions. Cette évaluation s'appuie sur la prise de mesures de différents paramètres physiques, accompagnée d'une étude qualitative basée sur une enquête utilisant un questionnaire auto-administré durant la période estivale. Cette approche permet d'étudier les sensations et la satisfaction des occupants vis-à-vis des conditions thermiques internes. En combinant ces mesures objectives et les réponses des utilisateurs, il devient possible de mieux comprendre l'effet de la toiture sur le confort thermique réellement ressenti en été.

- **L'approche expérimentale** consiste à utiliser des cellules réduites construites selon la typologie de toiture préalablement définie. L'objectif de cette phase est d'évaluer la faisabilité thermique des procédés de rafraîchissement passif de type «cool roof», en les comparant à d'autres systèmes de toiture passive. De plus, afin de déterminer les solutions les plus efficaces sur le plan thermique, une analyse de l'accessibilité financière de ces procédés et de leur acceptabilité sociale est également réalisée.
- **L'approche numérique** est effectuée sous forme de séries de tests à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS. Cette partie est consacrée à l'étude de l'aspect énergétique et environnementale des meilleures solutions passives issues du travail d'évaluation effectué sur les modèles réduits. L'objectif principale est de déterminer le procédé de rafraîchissement passif par le toit le plus approprié au contexte de l'étude.

7. Structure de la thèse

La présente thèse est organisée selon deux parties complémentaires. La première partie se consacre à l'aspect théorique et conceptuel, et se compose de trois chapitres dédiés à une analyse bibliographique approfondie visant à une meilleure compréhension des concepts et notions fondamentales propres au sujet traité. Le troisième chapitre constitue une étape cruciale, offrant un panorama exhaustif des recherches existantes sur le sujet, tout en examinant les différentes approches méthodologiques utilisées et en situant cette recherche dans le contexte épistémologique du domaine étudié. Ainsi, ce chapitre joue un rôle clé dans la transition

entre la partie théorique et la partie pratique de l'étude. La seconde partie de la thèse se compose des chapitres 4, 5 et 6, qui mettent principalement l'accent sur la vérification pratique et analytique des relations entre les variables, en suivant un cadre méthodologique préalablement élaboré.

La structure de ce mémoire se présente de la manière suivante :

- **Le chapitre introductif** de cette thèse débute par une introduction générale, exposant le domaine d'étude. Il met ensuite en évidence la problématique de recherche, formule les hypothèses qui seront explorées et définit les objectifs de la recherche. Ensuite, une analyse conceptuelle est présentée, permettant de concrétiser les concepts clés et de les rendre mesurables. Le cadre méthodologique adopté pour la recherche est expliqué en détail et enfin, la structure de la thèse est exposée.
- **Le premier chapitre** de cette thèse se divise en deux volets complémentaires. Le premier volet aborde la question de l'adaptabilité climatique des enveloppes des bâtiments dans un environnement chaud et aride. Il débute en identifiant les caractéristiques du climat, en mettant particulièrement l'accent sur les régions désertiques en Algérie. Ensuite, il examine la relation entre l'architecture et son contexte climatique en analysant différentes pratiques d'adaptabilité climatique. Enfin, il explore les exigences humaines dans ce type de climat, en se penchant sur la notion de confort thermique selon différentes approches. Le deuxième volet du chapitre traite de la problématique énergétique dans le secteur du bâtiment. Il examine la relation entre les ambiances thermiques et la performance énergétique des constructions, ainsi que les mesures d'efficacité énergétique. Il met en lumière l'importance de l'optimisation énergétique dans les bâtiments, en soulignant les défis et les enjeux liés à la consommation énergétique dans le secteur de la construction.
- **Le deuxième chapitre** de cette thèse établit, en premier lieu, un aperçu approfondi des toitures des bâtiments, en abordant leurs différentes typologies, caractéristiques et modes de fonctionnement. Il examine également les connaissances relatives aux échanges thermiques qui se produisent à leur surface, ainsi que les phénomènes radiatifs associés. Dans la seconde, il se concentre sur une analyse détaillée des différents procédés de rafraîchissement passif par la toiture adaptés aux climats

chauds et arides. Une définition précise de chaque procédé est fournie, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs bilans thermiques, leurs avantages et contraintes.

- **Le troisième chapitre** est dédié à une analyse bibliographique approfondie des études et recherches existantes portant sur le sujet traité. Ainsi, ce chapitre se penche sur l'analyse de la contribution thermique et énergétique des différents procédés de rafraîchissement passif par les toits étudiés dans les climats chauds, en examinant également les méthodes utilisées. Enfin, il met en évidence la position épistémologique de cette étude, permettant de situer sa contribution parmi les travaux déjà réalisés.
- **Le quatrième chapitre** décrit en détail le corpus d'étude et le protocole de l'étude empirique. Celle-ci porte sur l'analyse du comportement thermique des toitures couramment utilisées dans les habitations privées, en adoptant une approche post-occupationnelle. Un échantillon représentatif des habitations ciblées par l'étude a été soigneusement sélectionné pour étudier l'impact du type et des caractéristiques matérielles de la toiture sur la performance thermique du bâtiment pendant l'été. Des mesures ont été effectuées in-situ pour obtenir des données objectives sur le comportement thermique des habitations et ainsi cerner les paramètres à étudier. Parallèlement, une enquête par questionnaire auprès des occupants a été menée pour obtenir leur évaluation subjective de la sensation thermique, offrant des informations complémentaires sur leur confort et leur perception des conditions environnementales à l'intérieur des habitations.
- **Le cinquième chapitre** se concentre sur l'étude expérimentale réalisée à l'aide de modèles réduits, comprenant la construction de quatre cellules tests représentant fidèlement les bâtiments étudiés. Ce chapitre présente en détail le protocole expérimental mis en place pour les exigences de l'étude ainsi que la méthodologie du monitoring. Par la suite, il analyse les résultats obtenus en comparant le comportement thermique (température interne et surfacique, ainsi que le flux de chaleur) des six procédés de rafraîchissement passif appliqués au toit étudié, sur deux périodes estivales consécutives et dans des conditions réelles à Biskra. De plus, l'analyse des résultats est réalisée en termes d'accessibilité économique (différents calculs de coût d'investissement) et l'acceptation sociale (interview avec un groupe ciblé d'habitants), dans le but de déterminer les solutions les plus efficaces répondant à ces aspects.

- **Le sixième chapitre** se concentre sur la simulation numérique. Il présente le programme de simulation thermique dynamique utilisé (TRNSYS) et décrit le modèle d'investigation développé pour l'étude, ainsi que le protocole et les scénarios de simulation. Le processus de validation du modèle numérique par rapport aux données in-situ est également expliqué. Enfin, les résultats de l'étude par simulation concernant l'impact de trois procédés de rafraîchissement passif de type "cool roof" sur la consommation énergétique liée au refroidissement électrique, le niveau de confort à l'intérieur des habitations, et les émissions de gaz à effet de serre, sont présentés.
- Finalement, cette thèse est parachevée par **une conclusion générale** qui résume toutes les étapes de la recherche et présente une synthèse des principaux résultats obtenus ; les limites de la recherche et des recommandations propices pour optimiser passivement l'efficacité énergétique de l'enveloppe architecturale dans les régions chaudes et arides, à travers la toiture.

PARTIE THÉORIQUE

« Notions théorique, Concept clés et Rétrospective historique »

Chapitre I

Adaptabilité climatique et Performance énergétique des bâtiments dans les climats chauds et arides

« Un doute s'installe face à la toute-puissance de la technologie et d'une manière plus générale face à la technologie et, d'une manière plus générale, face à la modernité, l'on n'a pas pris en compte l'importance de la relation à la nature. Il faut retrouver ce rapport avec le monde naturel. »

Tadao Ando, 1999

“Ensure your home design responds to your climate to maintain a comfortable temperature in the home.”

Talina Edwards, 2017

Introduction

« ...j'appelle l'architecture parachutée ; un architecte artiste crée une "œuvre" sans tenir compte de l'environnement, du contexte ou des paramètres humains. »

Jean Nouvel, 2007

À la genèse de toute composition architecturale se trouve un besoin fondamental de protection contre les intempéries, les rayons brûlants du soleil et les vents agressifs, afin d'assurer le confort et le bien-être intérieur. Pour tout concepteur, il est essentiel de comprendre en profondeur les particularités climatiques propres au contexte de son projet. Cette étude permet d'exploiter les potentiels disponibles et de surmonter les contraintes, garantissant ainsi une réponse architecturale réussie en termes de confort thermique et sobriété énergétique. Dans les climats chauds et secs, l'architecture traditionnelle a naturellement développé des pratiques d'adaptation des enveloppes pour échapper à la rigueur de ces conditions climatiques. Ces pratiques s'étendent du niveau urbain (compacité, le rapport au sol et l'orientation. etc) jusqu'au niveau de la composition architecturale du bâtiment (murs, toitures, ouvertures, matériaux...etc).

Actuellement, la seule stratégie d'adaptation pour les nouveaux modèles architecturaux standardisés, qui sont dépourvus des conditions minimales de confort thermique, est la climatisation mécanique. Toutefois, compte tenu de l'épuisement des ressources énergétiques déjà limitées et de son impact sur le changement climatique, l'architecture vernaculaire représente une source précieuse à redécouvrir. Elle permet d'aborder les principes d'une architecture bioclimatique par excellence et de faire face à la situation alarmante actuelle. Dans cette optique, le présent travail vise à mettre en lumière les stratégies d'adaptation climatique dans le but d'améliorer les cadres bâtis contemporains et de relever le défi de l'efficacité énergétique, tout en atteignant un bon niveau de confort thermique,

Ce chapitre aborde en premier lieu la relation entre le climat, homme et bâtiment. Pour ce faire, il commence par identifier les éléments constitutifs du climat, ses classifications et plus particulièrement les caractéristiques du climat chaud et aride. Enfin, cette section analyse la relation entre l'architecture et le climat à travers l'étude des différentes stratégies vernaculaires d'adaptation climatique utilisées pour assurer le bien-être des occupants et rétablir l'équilibre avec l'environnement. En second lieu, ce

chapitre met en évidence les principales connaissances existantes sur le confort thermique intérieur selon différentes approches, afin de comprendre le mécanisme humain, ses réactions et ses exigences dans son espace en fonction des conditions climatiques. Enfin, la dernière partie aborde la dimension énergétique dans le bâtiment et les facteurs qui l'influencent, puis en offrant un aperçu sur la consommation énergétique mondiale. Par la suite, l'accent est mis sur la consommation énergétique en Algérie dans le secteur résidentiel. Enfin, les mesures d'efficacité énergétique des constructions sont abordées.

1.1. Interaction climat et architecture

“If the best offense is a good defense, the best passive cooling strategy pays as much attention to the microclimate surrounding a building as to the building itself”.

AIA Research Corporation, (1979)

Le climat constitue indéniablement le fondement de la construction. Il revêt une importance primordiale dans la conception architecturale d'un projet, garantissant le bien-être et la satisfaction des occupants. En tant que force influente, le climat façonne l'individu tant dans son environnement naturel que dans son environnement bâti, et joue un rôle déterminant dans la conception des espaces intérieurs et extérieurs. Afin d'assurer une réponse architecturale réussie face au climat, il est essentiel que le concepteur possède une compréhension approfondie des caractéristiques climatiques spécifiques du lieu (Givoni, 1978).

Selon Claire et Michel Duplay dans leur livre « *Méthode illustrée de création architecturale (Architecture)* », le climat est la principale donnée de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains (Claire and Duplay, 1982). De même, Mandoul, (2012) considère le climat comme « *un élément de causalité et de condition déterminant de l'architecture* ».

Le climat est un élément crucial dans la prise de décisions lors de la conception architecturale, nécessitant une analyse approfondie afin de comprendre son impact sur l'architecture. Il est courant que les architectes consacrent souvent la première phase du projet à l'étude du climat, afin d'identifier les contraintes à surmonter et les opportunités à exploiter dans le cadre d'une conception bioclimatique (figure 1.1). C'est pourquoi

nous commençons ce travail de recherche en analysant de manière approfondie le climat et son impact sur l'architecture.

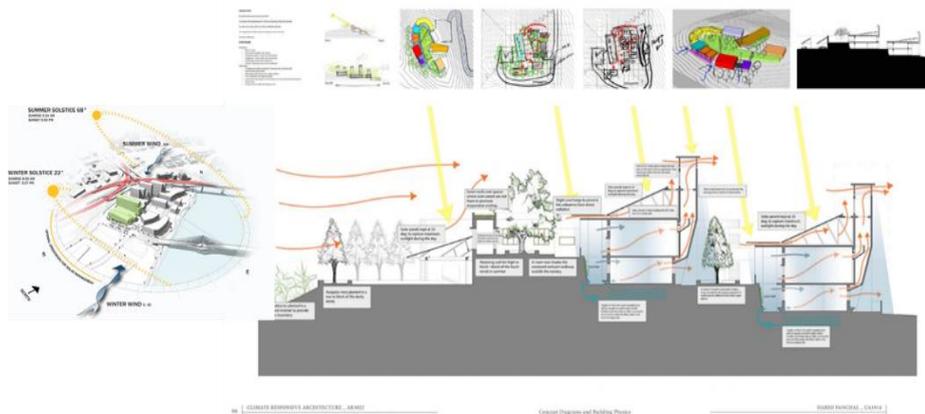


Figure 1.1 : Analyse climatique de site d'un projet architecturale. (Source : Forest Research Institute, Bhuj)

1.1.1. Aperçu sur le climat

Le climat d'un lieu est défini par une multitude de paramètres et de phénomènes météorologiques, tels que la température, l'humidité de l'air, les précipitations, l'ensoleillement, la pression atmosphérique et les vents. Ces caractéristiques climatiques sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la latitude, le relief, l'altitude, ainsi que la proximité des plans d'eau et la présence de végétation environnante. Il existe différentes définitions du climat dans la littérature, parmi lesquelles ;

Le dictionnaire de Larousse définit le climat en tant qu'un « *ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné* ». Pour sa part, Givoni (1978) a souligné que le climat est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction entre différents éléments climatiques qui fournissent une description statistique de l'état du système terrestre.

Dans le guide « *le climat et vous* » établie par l'OMM¹ (2011), « *Le système climatique est un système complexe et interactif comprenant l'atmosphère, la surface terrestre, les neiges et les glaces, et les océans et autres masses d'eau* ». Par ailleurs, dans son livre « *archi de soleil* », Bardou (1978) a défini le climat comme la succession des circonstances atmosphériques et météorologiques, propre à une région du globe. De

¹ Organisation météorologique mondiale, 2011.

plus, ce sont les phénomènes thermodynamiques qui découlent de l'alternance des jours et des nuits, ainsi que du cycle atmosphérique annuel. Ces processus engendrent un certain nombre de modifications au sein de l'atmosphère, tels que les mouvements, les variations de température, la condensation, les transformations énergétiques, et bien d'autres (cité par Gaillard, 2021).

D'après Sriti, (2013), le climat est un facteur physique étroitement lié aux caractéristiques de l'environnement géographique. L'architecture joue un rôle essentiel dans la régulation de l'environnement en prenant en compte des facteurs climatiques tels que la température, le rayonnement solaire, les précipitations, l'humidité, le vent, et bien d'autres.

Selon KOCH-NIELSEN, (2002) dans son livre « *Stay cool* », Généralement, le climat d'une région spécifique pendant une période donnée est déterminé par l'interaction de plusieurs éléments météorologiques comprenant principalement :

- Le rayonnement solaire (l'insolation)
- La température de l'air
- L'humidité
- Le vent (les mouvements atmosphériques)
- Les précipitations

En outre, il est important d'examiner la topographie, la couverture du sol, la végétation, la source d'eau et la densité des bâtiments, car ces caractéristiques influencent également le climat du site spécifique.

Également, il a ajouté que la collecte et l'analyse de données climatiques sont essentielles pour comprendre les conditions climatiques d'une zone spécifique. Ces données doivent être examinées sur plusieurs années pour établir les conditions climatiques de conception. Ces informations constituent la base des réponses de conception courantes requises pour les différentes zones

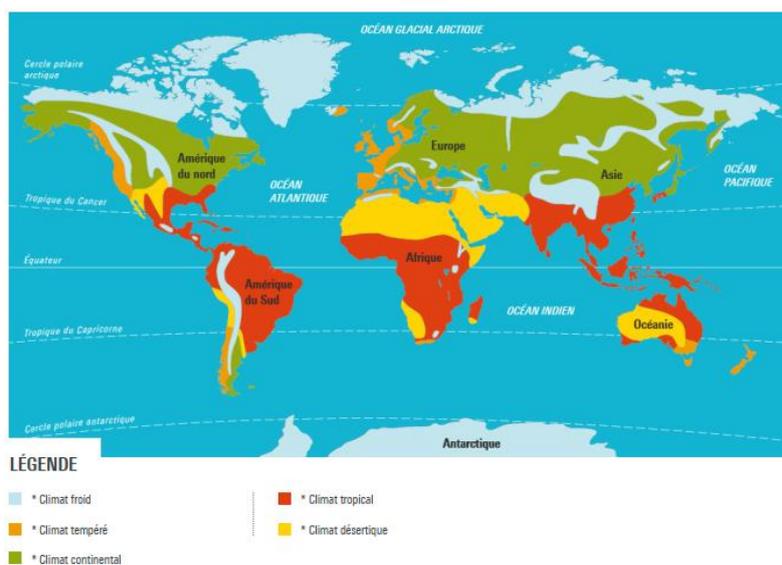
En résumé, parmi les éléments climatiques ayant un impact significatif sur la conception, la performance et le confort des bâtiments, Olgyay, (1963) a identifié trois éléments : la température de l'air, le rayonnement solaire et le vent. Givoni (1978) a ensuite ajouté deux autres éléments : l'humidité et les précipitations.

1.1.2. Classifications du climat mondial

La classification des climats répond au besoin de caractériser le climat d'une région spécifique et de synthétiser les connaissances des différents paramètres observés, dans le but de s'adapter au mieux à l'environnement local. Ainsi, de nombreuses classifications mondiales ont été élaborées en se basant principalement sur l'analyse de la température et des précipitations. La figure 1.2 présente les principaux climats de la Terre.

Il existe plusieurs méthodes de classifications pour mieux comprendre et représenter la variabilité climatique à travers le monde et qui sont les suivants :

- La classification en fonction de **l'indice d'aridité**.
- **Le système de Martonne** : utilisent les données hydrométriques et thermiques.
- **La classification de Thornthwaite** : utilise la végétation, et plus particulièrement le concept d'évapotranspiration.
- **Le système de Köppen** : souvent le plus couramment utilisé. Il base uniquement sur les précipitations et les températures.
- **La classification de Trewartha** : une adaptation de la classification de Köppen selon biomes de végétaux.
- **La classification des masses d'air de Bergeron** : utilise l'humidité, la masse d'air et sa stabilité.



La figure 1.2 : Les principaux climats de la Terre. (Source : (Pagney, 1976)

Pour ce faire, en se basant sur les variations de température, Alain and André, (2005) distinguent quatre catégories climatiques distinctes :

- **Le climat froid** : Ce climat se trouve autour des pôles ou en haute altitude, et il se caractérise par des températures très basses tout au long de l'année.
- **Le climat tempéré ou modéré** : Ce climat est généralement présent sur les côtes et se situe entre les tropiques et les cercles polaires. Les températures sont modérées tout au long de l'année, avec des variations saisonnières.
- **Le climat chaud et sec** : Ce climat se trouve principalement dans les régions désertiques et semi-désertiques. Il est caractérisé par des températures élevées et des précipitations limitées. Il existe un risque de surchauffe, avec de fortes variations de température entre le jour et la nuit, et l'air est sec.
- **Le climat chaud et humide** : Ce climat se trouve près de l'équateur. Les températures sont élevées tout au long de l'année, accompagnées d'une humidité élevée. Il existe un risque de surchauffe, aggravé par le taux élevé d'humidité dans l'air.

Pour le deuxième élément climatique, on peut distinguer deux catégories :

- **Climat sec** : L'humidité relative est généralement faible ($HR < 55\%$) (climats tropical sec, désertique, chaud d'altitude)
- **Climat humide** : L'humidité atmosphérique élevée ($HR > 55\%$) (climats équatorial, tropical de mousson, tropical humide, méditerranéen).

La classification de Köppen-Geiger permet de diviser le monde en cinq grandes zones climatiques (tropicales, sèches, tempérées, continentales et polaires) à l'aide d'un code de deux ou trois lettres. Cette classification englobe plus de trente sous-zones climatiques dans le monde, offrant une représentation détaillée des différents climats.

Concernant les climats chauds, la classification de Köppen-Geiger identifie cinq principales catégories : le climat équatorial (Af), le climat tropical de mousson (Am), le climat tropical de savane (Aw), le climat désertique (BWh, BWk) et le climat méditerranéen (Csa, Csb). Chacune de ces catégories représente des caractéristiques spécifiques en termes de températures, de précipitations et de variations saisonnières.

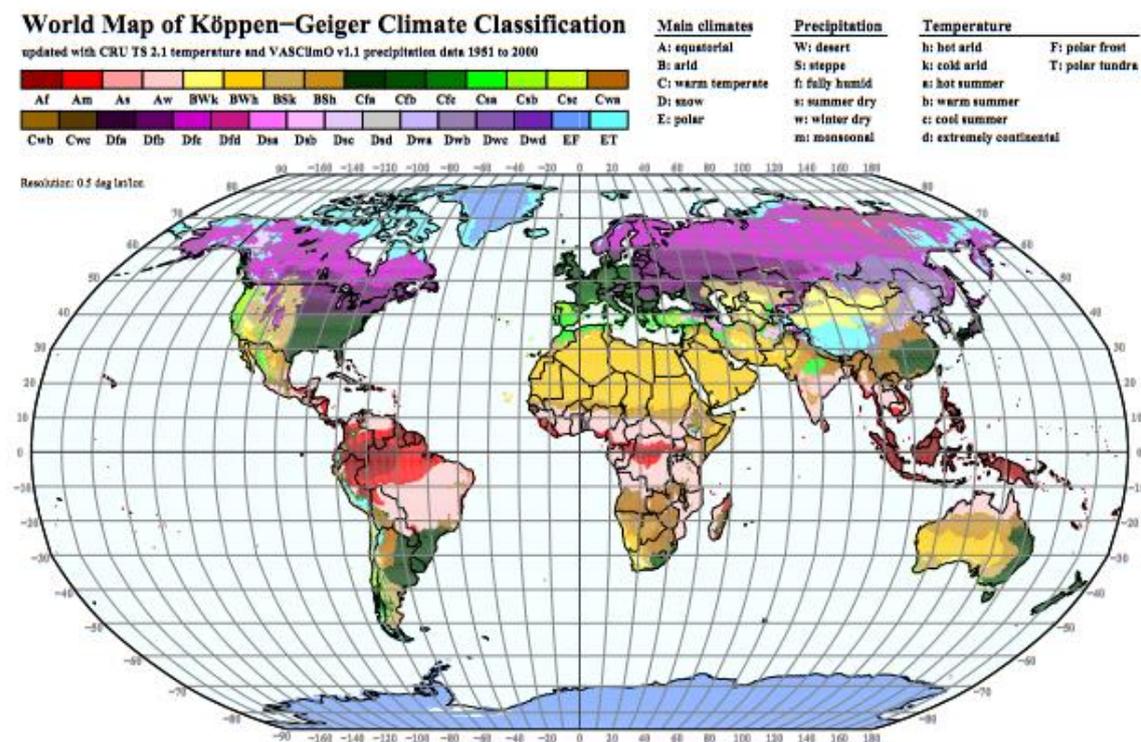


Figure 1.3 : La carte mondiale de la classification climatique de Köppen-Geiger.

(Source : (Kottek *et al.*, 2006))

La carte de Köppen-Geiger reste une référence importante grâce à ses mises à jour régulières, assurant ainsi sa pertinence actuelle. La figure 1.3 illustre la carte de classification climatique de Köppen-Geiger mise à jour par Kottek et al., (2006).

1.1.2.1. Les climats désertiques

Le climat désertique, également connu sous le nom de climat aride, est caractérisé par une sécheresse et une aridité permanente tout au long de l'année. Les précipitations y sont rares (inférieure à 250 millimètres par an) et les températures élevées, ce qui représente une contrainte majeure pour les êtres vivants, tant animaux que végétaux, ainsi que pour les activités humaines (l'agriculture, l'élevage...etc.).

Selon la classification de Köppen, le climat aride se décline en quatre sous-types : le climat désertique froid (BWk), le climat désertique chaud (BWh), le climat semi-aride froid (BSk) et le climat semi-aride chaud (BSh) (voir Figure 1.4).

Le climat chaud et sec constitue le cadre climatique de la présente recherche, et il se trouve dans de nombreuses régions du monde. Les zones caractérisées par ce type

de climat représentent 15 % de la population mondiale, 1/3 de la surface terrestre mondiale soit près de 6,45 milliards d’hectares, réparties dans 100 pays et touchant une population estimée à 900 millions de personnes soit, 20 % de la population mondiale (M.Hassan et al., 2016)

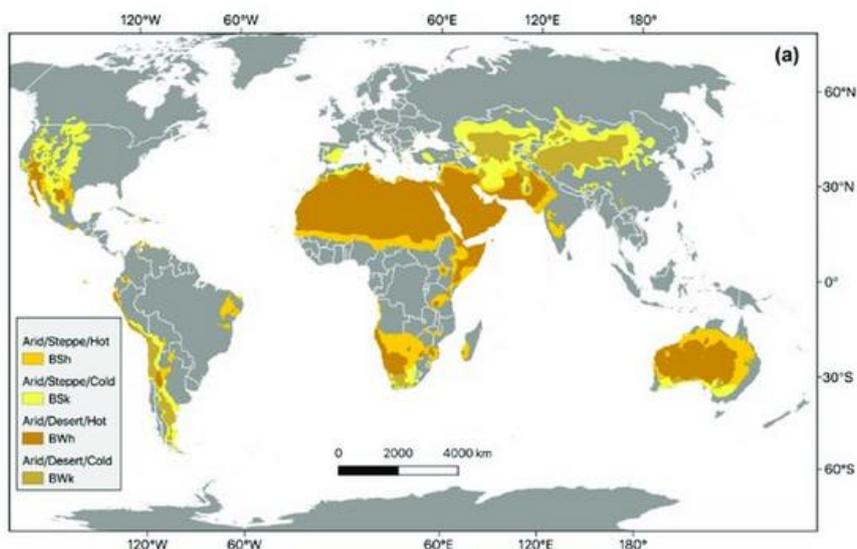


Figure 1.4 : Classification des climats arides selon la méthode Köppen. (Source : Li et al., (2020))

. Ce climat se caractérise par des étés chauds et des hivers frais, avec des variations de température importantes entre le jour et la nuit, une faible humidité et des précipitations limitées. Les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Les principales caractéristiques des climats chauds et secs. (Source : (Gut and Ackerknecht, 1993)

| Eléments de climat | Caractéristique |
|---|---|
| Latitude : 15°-30° Nord et Sud de l'équateur. | |
| Température | <p>En été,</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les températures peuvent atteindre des niveaux élevés de 40 à 50 °C, avec des variations importantes entre le jour (atteignant parfois un maximum record de 58 °C) et la nuit (chute d'environ de 15 à 25 °C). <p>En hiver</p> |

| | |
|----------------------------|---|
| | - La température moyenne se varie entre 20- 30 °C, avec des températures nocturnes généralement comprises entre 10 et 20 °C, ou plus en fonction de l'altitude. |
| L'humidité relative | Elle est extrêmement faible, se situant entre 10 % et 55 %. |
| Précipitations | Sont peu fréquentes, irrégulières et peu fiables, atteignant 200 mm/an. |
| Rayonnement solaire | Le ciel est généralement dégagé, avec un rayonnement solaire intense (plus de 800 ou 900 W/m ² sur une surface horizontale) et une longue durée d'ensoleillement, notamment en été. La température de surface peut atteindre 70°C à cause de rayonnement solaire intense. |
| Les vents | Les vents dans ces climats sont souvent puissants et violents, pouvant se transformer facilement en tempêtes. En hiver, les vents froids prédominent, accompagnés de tempêtes de poussière ou de sable. |

1.1.2.2. Les zones avec un climat chaud et sec en Algérie

L'Algérie (28° 2' 1.99" N 1° 39' 34.654" E) se distingue en tant que plus grand pays d'Afrique. En raison de son étendue considérable, elle est caractérisée par quatre zones climatiques distinctes. La première est la zone côtière, une étroite bande côtière humide où se concentrent les grandes villes. La deuxième est le Tell Atlas, une chaîne de montagnes qui s'étend entre la côte et le désert. Ensemble, ces deux zones représentent environ 20% du territoire algérien. La troisième zone est l'Atlas saharien, une région semi-aride située à la frontière du Sahara. Enfin, le Sahara forme la quatrième zone, une région aride qui couvre à elle seule 2 000 000 km², soit environ 80% de la superficie totale du pays. Malheureusement, en raison du processus de désertification en cours, la zone aride devrait s'étendre à 85-88% d'ici l'année 2080 (Daoudi et al., 2019).

La classification de Köppen déclarent qu'alors la majorité du pays possède un climat désertique (BWh et BWk). D'après la figure 1.6, parmi les pays Africains, l'Algérie a enregistré des températures moyennes les plus élever durant le mois du Juillet qui varient de 27-31°C à 32-36.9°C pour la période de 1983-2005.

Selon Mokhtari et al., (2008), plus de 85 % de sa surface totale est caractérisée par un climat chaud et sec, divisé en trois zones climatiques estivales (E3, E4 et E5) et une zone climatique d'hiver (divisée à son tour en trois sous zones H3a, H3b et H3c). Toutes ces régions subissent l'influence de l'altitude (voir Figure 1.5).

Selon la figure 1.5, la ville de Biskra, où se déroule cette recherche, est située dans la zone H3a pendant l'hiver et la zone E3 pendant la saison estivale. D'après la figure 1.6, Biskra se caractérise par des étés très chauds, avec un fort ensoleillement (5.1-5.5 kWh/m²/jour), une humidité relative relativement faible, variant entre 31% et 42%, ainsi qu'un faible taux de précipitations, allant de 0 à 350 mm, ce qui témoigne de son caractère aride.

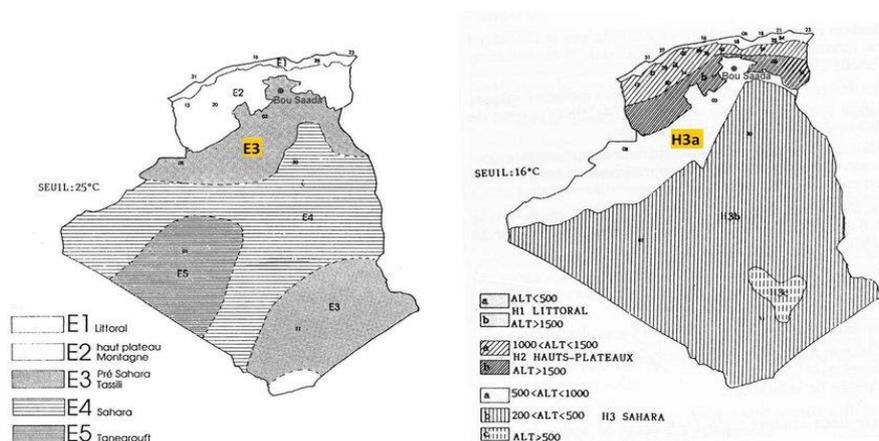


Figure 1.5: Répartition des climats chauds et secs en Algérie. (Source : (Hadbaoui, 2018))

1.1.3. Analyse de site

L'analyse du site revêt une importance cruciale dans la quête d'un équilibre climatique optimal. Chaque site étant unique, la méthode d'analyse du site développée par Victor Olgyay dans son livre « *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism* » couvre tous les aspects nécessaires à une compréhension complète du site et à son influence sur la conception (voir Figure 1.7). Cette approche se divise en trois étapes majeures : l'étude climatologique, l'évaluation biologique et la sélection des solutions technologiques. Enfin, l'expression architecturale ne peut être envisagée qu'après avoir accomplie ces étapes (Olgyay, 1963).

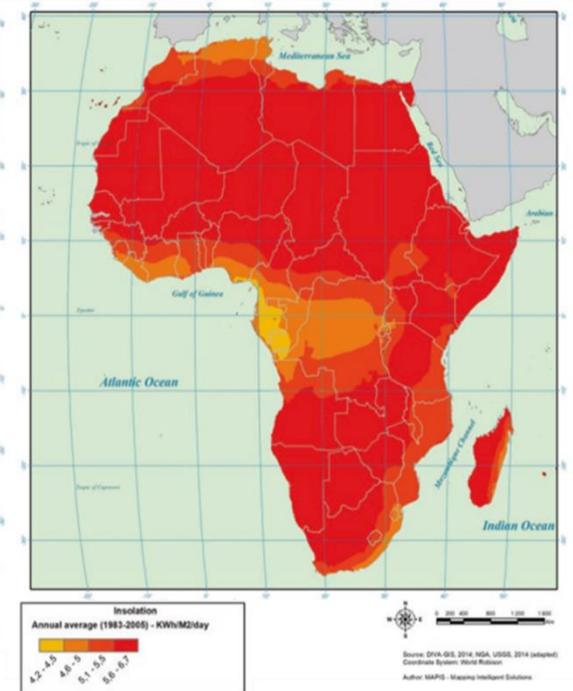
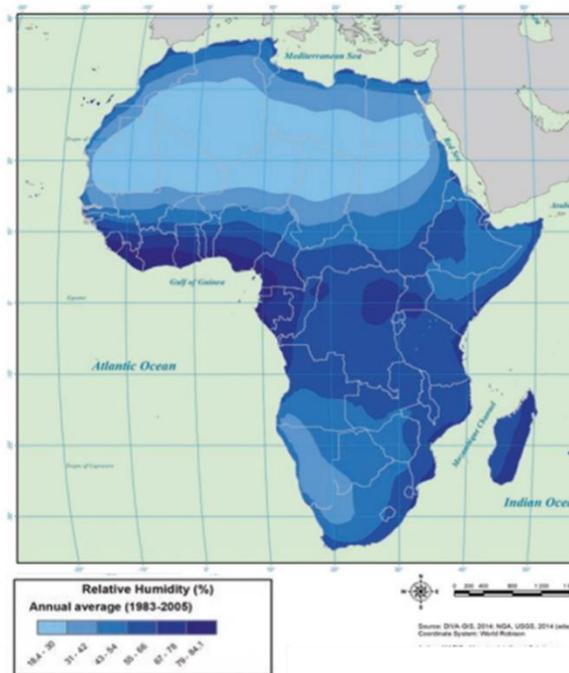
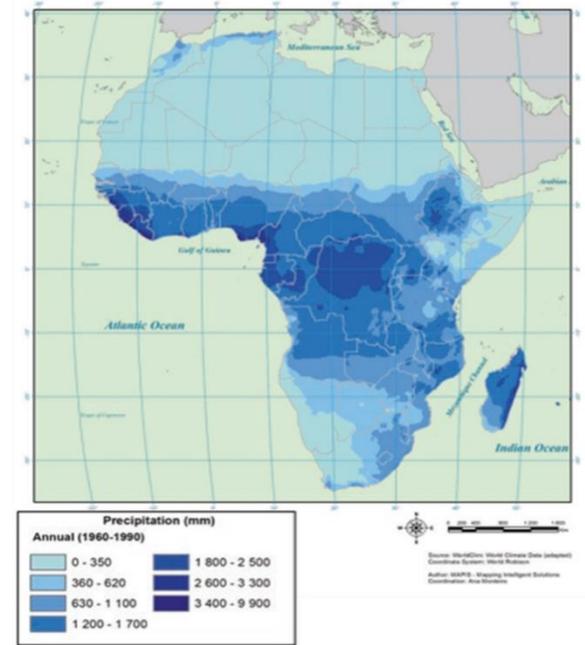
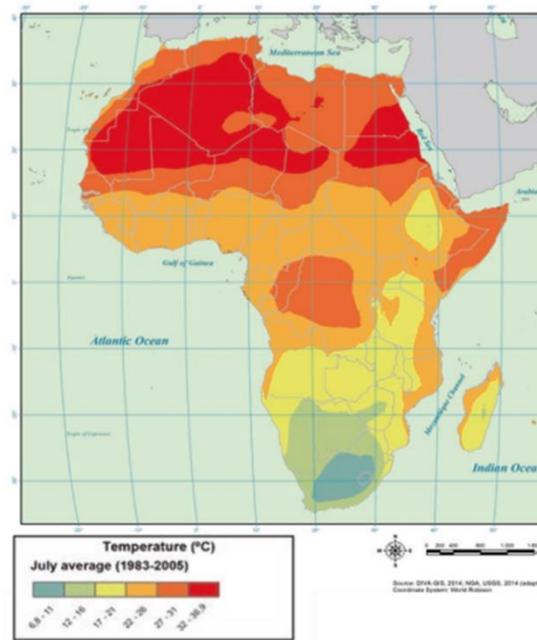
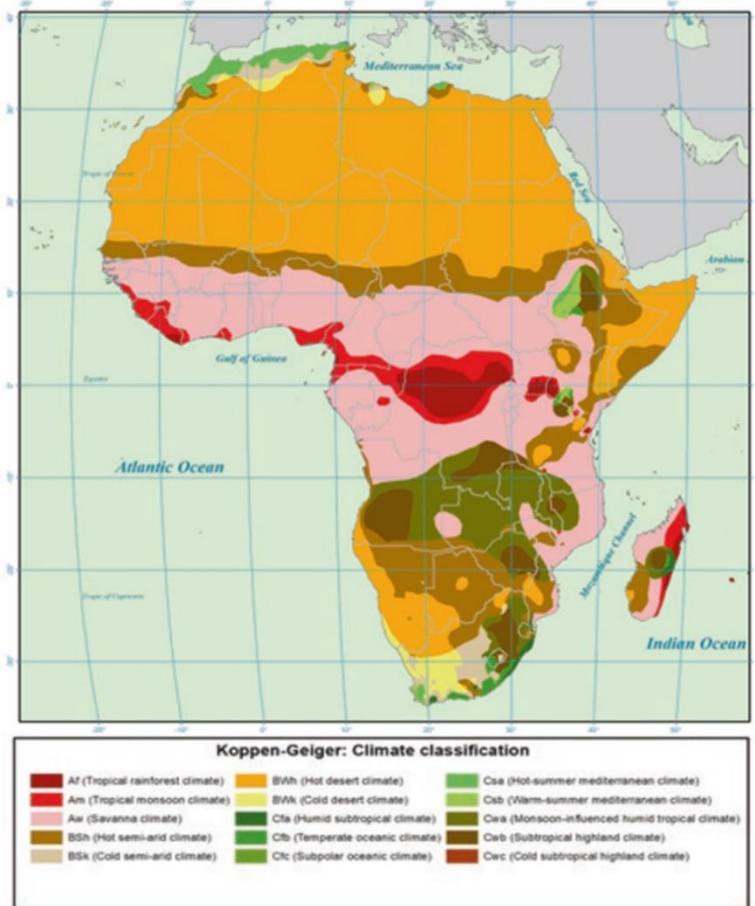


Figure 1.6 : Classification de Köppen-Geiger pour l'Afrique présentant les température moyenne, l'humidité relative, l'insolation et les précipitations moyenne annuelle de 1983 – 2005. (Source : (Correia *et al.*, 2019))

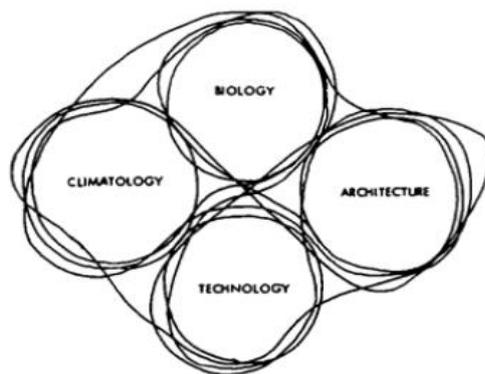


Figure 1.7 : Imbrication entre les divers domaines du bilan climatique. (Source :
(Olgyay, 1963)

- 1- **L'étude climatologique :** consiste la collecte de données sur les différents paramètres climatique telle que les températures, l'humidité, le rayonnement solaire, le vent et les microclimats du site sur une période prolongée (une année ou plus). Ces informations permettent d'ajuster les conditions de vie dans l'habitat.
- 2- **L'évaluation biologique :** Basée sur la perception humaine, elle utilise les données recueillies précédemment pour diagnostiquer les caractéristiques climatiques essentielles. Cela facilite la planification des interventions nécessaires à des moments spécifiques pour assurer le confort.
- 3- **Les solutions technologiques :** Elles répondent aux problèmes de confort identifiés, en neutralisant les impacts négatifs et en tirant parti des avantages de manière opportune et appropriée. L'analyse de cette fonction cruciale d'un abri équilibré est réalisée à l'aide de méthodes de calcul. Olgyay identifie six domaines de calcul spécifiques, notamment le choix du site, l'orientation, le calcul de l'ombrage, la forme des bâtiments, la circulation de l'air et l'équilibre thermique intérieur.

1.1.4. Stratégies d'adaptation des bâtiments au climat des zones chaudes et aride.

« L'homme a lutté avec les matériaux, les contingences, avec sa culture. C'est un duel avec la matière et lorsqu'il a résolu son problème, il avait créé la beauté ».

Hassan Fathy. (1981)

La mondialisation et l'évolution technologique ont grandement complexifié les identités locales et rendu ambiguës les relations entre l'homme, l'architecture et le climat. Dans les climats chauds, les constructions modernes ont souvent négligé la sagesse de l'architecture vernaculaire, privilégiant une dépendance aveugle envers la technologie et la climatisation. Ces solutions sont censées compenser les extrêmes climatiques, mais elles ignorent l'environnement naturel par les émissions des gaz à effet de serres, consomment excessivement les énergies fossiles, qui sont désormais limitées.

Face au réchauffement climatique et à l'épuisement des ressources énergétiques, il est essentiel de redécouvrir les principes de l'architecture vernaculaire dite bioclimatique. Les connaissances transmises de génération en génération par les populations locales sont souvent plus précieuses que les calculs scientifiques, car elles sont basées sur l'expérience pratique et l'adaptation aux conditions spécifiques du lieu (Duval, 2020). Ces connaissances, stratégies et dispositifs traditionnelles peuvent être réintégrés dans l'architecture contemporaine afin de créer des bâtiments durables et écoénergétiques, capables de faire face à la situation alarmante actuelle. La discipline bioclimatique considère le climat, l'habitat et le confort thermique de l'occupant comme des axes principaux de la conception architecturale (Olgyay, 1963).

- **Pourquoi recourir à l'architecture bioclimatique ?**

Les sociétés traditionnelles ont su vivre pendant des milliers d'années dans un confort adapté, que ce soit dans des bâtiments ou des villages, en s'adaptant à une multitude de climats, sans avoir recours à la climatisation mécanique ou à une consommation énergétique excessive (Roaf et al., 2005). Selon Alain and André, (2005) l'architecture bioclimatique place le confort de l'utilisateur au centre de ses préoccupations. En outre, elle vise à trouver un équilibre entre la conception des bâtiments, le climat environnant et les modes de vie des habitants, tout en respectant l'environnement (Nessma and BENBOUAZIZ, 2021).

A ce fait c'est ce que notre architecture contemporaine a besoin, tirant parti des connaissances ancestrales et les combinant avec les avancées technologiques modernes, pour construire un avenir durable, créer des espaces habitables qui répondent aux besoins des individus tout en préservant notre planète L'intégration de techniques

passives de l'architecture vernaculaire dans l'architecture moderne s'est avérée efficace pour assurer le confort thermique et réduire la consommation d'énergie.

Dans les régions chaudes, les archétypes traditionnels utilisent des stratégies de refroidissement passif simples et peu coûteuses pour assurer un confort thermique. Ces techniques varient selon le lieu, la culture et le climat, mais ont en commun l'objectif de répondre aux besoins des habitants sans nécessiter l'intervention d'architectes professionnels. Victor Olgyay, dans ses travaux, analyse la morphologie des maisons vernaculaires en se basant sur des données objectives sur le climat local. Son approche bioclimatique consiste à étudier les réponses architecturales spécifiques à chaque zone climatique, en mettant notamment l'accent sur trois caractéristiques clés de l'habitat vernaculaire : la toiture, les ouvertures et le rapport au sol (Rodriguez and Mod, 2015). A ce fait, cette partie vise à tracer un aperçu synthétique des stratégies liant l'architecture au climat dans les archétypes vernaculaires.

1.1.4.1. La toiture

L'habitation primaire est dotée d'un toit unique afin de se prémunir contre les intempéries. Parmi les différents éléments architecturaux, le toit joue un rôle essentiel dans la protection des habitants contre les conditions météorologiques (Lopez-Besora et al., 2019). En tant qu'élément fondamental de l'architecture, le toit est largement influencé par les conditions climatiques, ce qui détermine principalement sa forme et les matériaux utilisés dans chaque région. D'après la figure 1.8, les toitures à travers le monde présentent une grande diversité :

- Dans les régions situées à la latitude 0° ou proches de l'équateur, les toits en pente sont couramment utilisés pour évacuer l'eau de pluie et favoriser les pertes de chaleur par convection.
- Dans les latitudes moyennes près des tropiques, les toits en pente avec des avant-toits protègent les fenêtres du rayonnement solaire dans les zones humides. Dans les zones sèches, des toits plats et lourds sont préférés pour résister au fort rayonnement solaire et aux variations de température quotidiennes. Les dômes et les voûtes sont également utilisés dans ces régions.
- Dans les hautes latitudes où la neige est fréquente, les toits en pente avec une forte inclinaison (supérieure à 60%) sont privilégiés pour supporter le poids de la neige.

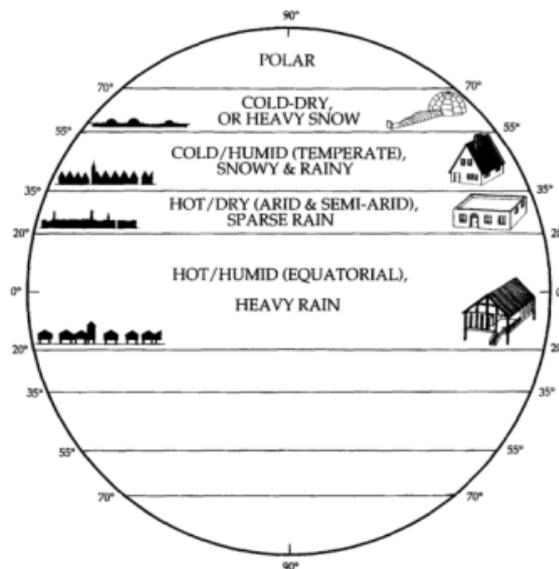


Figure 1.8 : La typologie des toitures selon les différents zones climatiques (Source : Golany, (1996))

La toiture joue un rôle crucial dans la performance thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments. La diversité des conceptions de toitures souligne son importance dans le contrôle des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. Les caractéristiques clés de la toiture comprennent sa forme, son épaisseur et les propriétés thermo physiques des matériaux qui la composent.

1.1.4.1.1. La morphologie des toitures

Les toits plats ou les toitures-terrasses sont couramment utilisés dans les climats désertiques pour réduire la surface exposée au rayonnement solaire et limiter l'accumulation de chaleur dans les bâtiments (Figure 1.9).

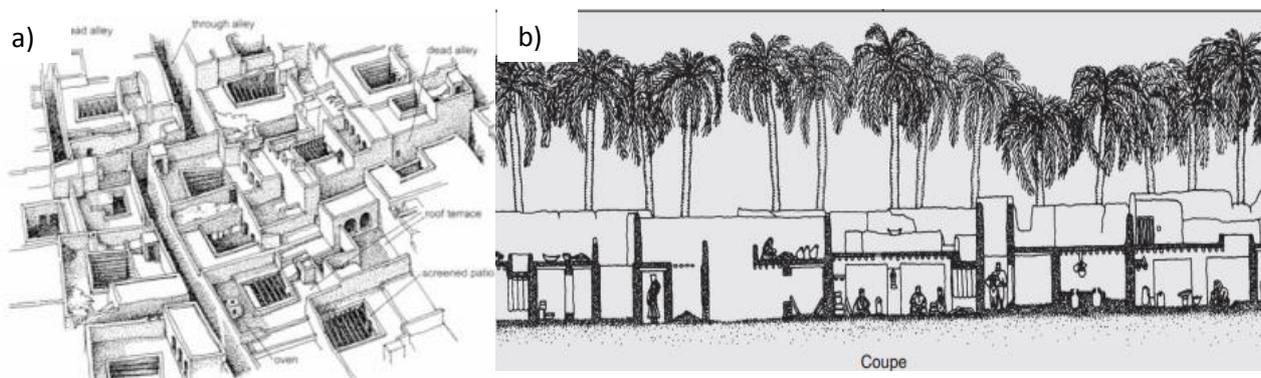


Figure 1.9 : a) La forme des toitures de M'Zab en Algérie (Source : (Trombadore and Visone, 2019). b) La disposition des toitures-terrasses à Ouled Rached (Timimoun). (Source : (Bencherif and Chaouche, 2013).

Les terrasses, ombragées par des murets (hauteur de 1,8 à 2,2 mètres) et par l'agencement des volumes adjacents, jouent un rôle essentiel dans la régulation de la température (voir la Figure 1.10). Ces types d'ombrage sont particulièrement importants dans les villes chaudes et secs, où la conception architecturale met l'accent sur l'utilisation de l'ombre comme moyen de protection contre les températures élevées. En outre, les toits plats sont souvent utilisés comme extension de l'espace de vie dans ce type de région, offrant un lieu de repos et de sommeil en plein air pendant l'été (figure 1.11).

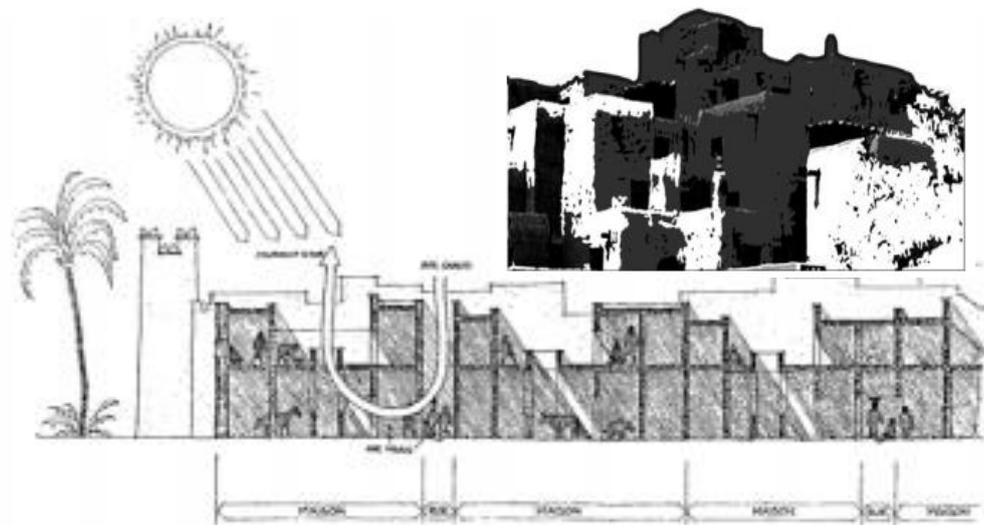


Figure 1.10 : Le concept de protection solaire des toitures terrasse par ombrage projeté des murs et des volumes compacts. (Source : (Almusaed, 2011; Rodriguez and Mod, 2015))

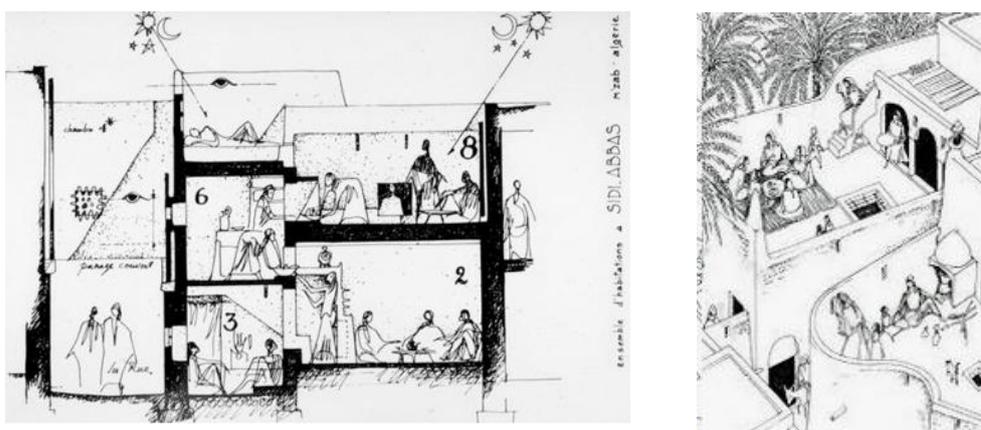


Figure 1.11 : L'utilisation des toitures terrasses dans les régions de climat chaud et sec. (Source : André Ravéreau, 1998. <https://www.darchitectures.com/andre-ravereau-lecons-un-homme-assis-a3898.html>)

Dans les régions désertique, la ventilation naturelle des habitations consiste principalement le seul moyens pour rafraichir la température en évacuant la chaleur accumulée (Supic, 2010). A ce fait, les toits courbés tels que les voûtes ou les dômes sont également utilisés pour favoriser la ventilation des habitations et évacuer la chaleur accumulée. Ces toits ventilés exploitent l'effet de cheminée en permettant à l'air chaud de s'échapper par des orifices d'aération situés au sommet, améliorant ainsi la circulation de l'air (Al-Sallal and Rahmani, 2019).

1.1.4.1.2. Les matériaux de construction

Dans les régions chaudes avec une exposition solaire intense et des variations de température diurne importantes, l'utilisation de toitures épaisses et lourdes est essentielle (Figure 1.12). Les matériaux locaux tels que la brique de boue, l'adobe, la pierre et la terre crue, qui possèdent une forte inertie thermique, sont couramment utilisés pour ces toitures. Ils ralentissent le transfert de chaleur et retardent le pic de chaleur (déphasage thermique), contribuant ainsi à réduire les besoins de refroidissement.

Le choix des matériaux de construction pour la toiture doit tenir compte de plusieurs propriétés. La conductivité thermique, la résistance, le coefficient de convection de surface, la capacité calorifique et les caractéristiques optiques telles que la réflexion, la transmission et l'absorption de chaleur, influencent les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Ces propriétés conditionnent l'ambiance thermique intérieure et le confort des occupants (Givoni, 1978; Gut and Ackerknecht, 1993).

La couleur ou l'albédo des surfaces joue également un rôle important dans le comportement thermique des matériaux. Dans les climats chauds, les toitures de couleur claire et réfléchissante sont généralement adoptées pour réduire les gains de chaleur. Des exemples d'établissements traditionnels dans des climats chauds, tels que les maisons de Shibam au Yémen et les toitures-terrasses du Beni M'Zab en Algérie, illustrent l'utilisation de toitures de couleur claire afin de minimiser les gains solaires.

En Inde, il est courant de recouvrir les toitures de céramique blanche pendant l'été pour maintenir les terrasses plus fraîches (voir Figure 1.13).

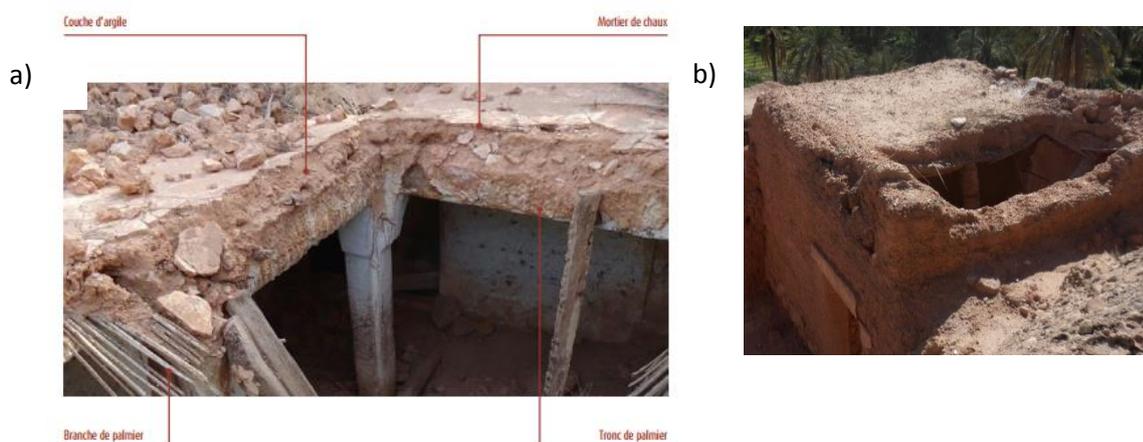


Figure 1.12 : Les matériaux de construction des toitures traditionnelle ; a) vallée du M'zab (Source : (OPVM, 2013), b) Djemoura, wilaya de Biskra (Source : Auteur ,2014)



Figure 1.13 : a) Les toitures réfléchissantes de la ville du vallée de M'Zab de Shibam au Yemen (Source : photographe Kamel Mohamed ; <https://www.nationalgeographic.com/>); b) technique de protection solaire en Inde. (Source Mili Majumdar, 2002)

1.1.4.2. Les ouvertures

La conception des ouvertures dans les bâtiments est essentielle pour une conception bioclimatique efficace. Les fenêtres ont des fonctions contradictoires, nécessitant une étude approfondie pour assurer un environnement confortable. Leur taille, leur orientation et leur emplacement sont des facteurs importants à considérer. Le ratio d'ouverture détermine à la fois la quantité d'énergie solaire entrante (les gains

thermiques), la quantité de lumière naturelle (l'éclairage) et le débit d'air pour la ventilation naturelle.

Dans les climats chauds et secs, les fenêtres doivent être de petite taille (de 20 à 30 % de la façade), orientées au nord et au sud, et bien ombragées pour réduire les transferts thermiques (par conduction, rayonnement et infiltration d'air) (Almusaed, 2011; Sayigh, 2019). Dans l'architecture traditionnelle, l'emplacement des fenêtres était influencé par les exigences socioculturelles et la protection de la vie privée. Différentes alternatives, telles que des claustras et des petits percements en haut des murs, ont été utilisées pour favoriser la ventilation croisée tout en limitant l'impact du rayonnement solaire. Par exemple, En Algérie, de petites ouvertures hautes étaient créées au rez-de-chaussée, tandis qu'au premier étage, de grandes fenêtres ombragées par des "moucharabiehs" favorisaient la ventilation croisée. Dans d'autres endroits, des claustras, des petits percements et trous en hauts des murs. Généralement, ces derniers sont peints en blanc pour réfléchir les rayons solaires intenses et limiter le flux de chaleur (voir la Figure 1.14).

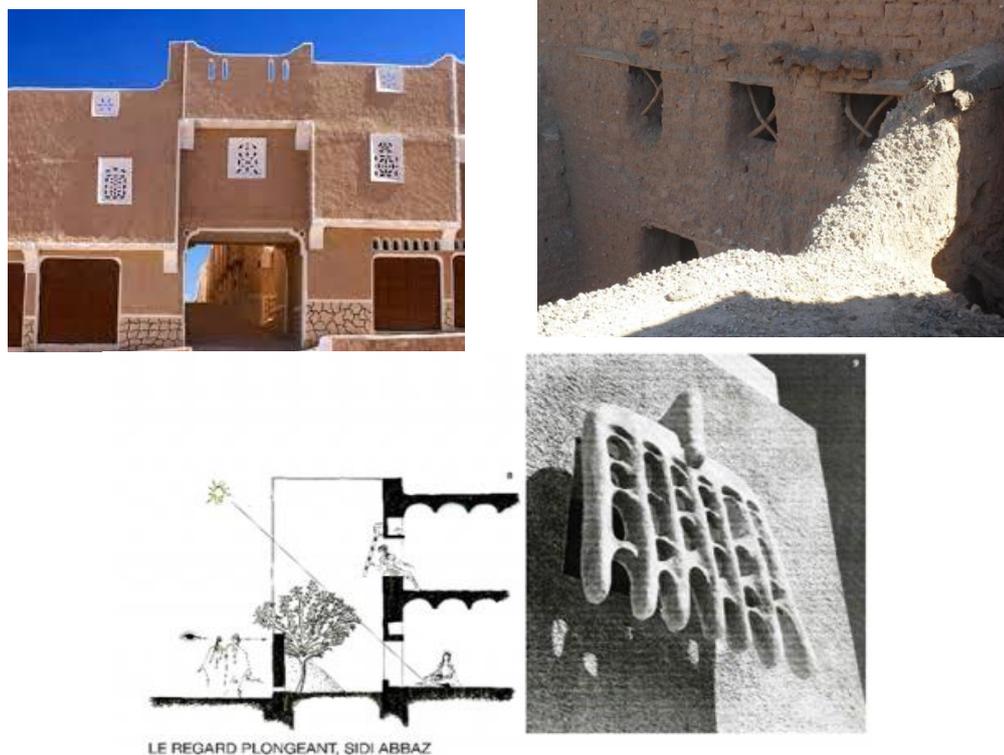


Figure 1.14 : La taille des ouvertures utilisées dans les maisons traditionnelles des climats chauds en Algérie avec le type d'occultation utilisé au M'Zab (Sources : <https://radioalgerie.dz/news/fr/article/20161124/95093.html>, Auteur, 2014 et André Ravéreau, 1976).

Pour un fonctionnement optimal, il est important de prendre en compte différents aspects de la construction. Les dispositifs d'occultation sont utiles pour prévenir les différents types de rayonnement solaire, tandis que la manipulation des propriétés optiques des surfaces vitrées permet de réduire la transmission des gains de chaleur. La ventilation nocturne adéquate est également importante pour dissiper la chaleur émise par les murs et le toit (Al-Sallal and Rahmani, 2019).

1.1.4.3. Le rapport au sol

Le rapport au sol est un concept clé qui détermine la relation entre un bâtiment et son environnement. Cette relation, influencée par des facteurs tels que le climat, les matériaux de construction disponibles, les techniques de construction locales et les besoins culturels, est établie en comparant la surface de plancher du bâtiment à la surface de sol qu'il occupe.

Dans les climats chauds, les bâtiments traditionnels ont tendance à avoir des rapports au sol plus faibles, ce qui signifie une empreinte au sol réduite par rapport à la surface totale occupée. Cela offre des avantages tels qu'une plus grande zone d'ombre et une meilleure ventilation naturelle, contribuant à maintenir une température intérieure confortable. La forme compacte du bâtiment permet de contrôler les pertes et les gains de chaleur, en réduisant la surface exposée par rapport au volume. Les habitats troglodytes, intégrés dans le paysage naturel, sont un exemple remarquable de cette approche, offrant un confort thermique constant grâce à l'inertie thermique de la terre (Supic, 1994).

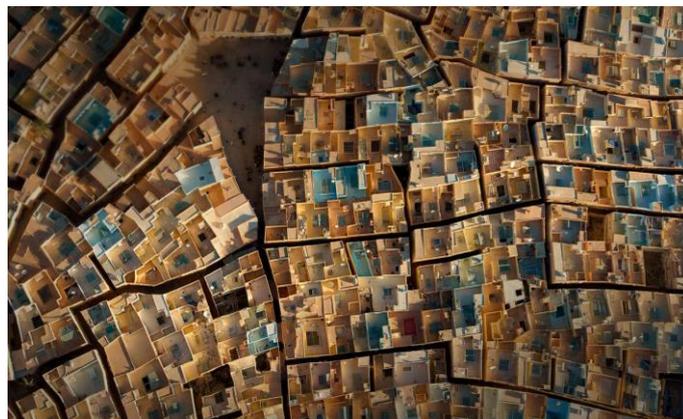


Figure 1.15: Vue aérienne présentant la compacité de la ville de Gardaria et l'ombre procurée pour les façades. (Source : <https://peapix.com/bing/11284>)

Par ailleurs, dans les villes traditionnelles des climats chauds, la compacité élevée avec des bâtiments contigus et des ruelles étroites et ombragées joue un rôle crucial (Al-Sallal and Rahmani, 2019) (Figure 1.15). Cela permet de contrôler l'exposition solaire, de réduire les échanges thermiques avec l'extérieur grâce aux murs épais, de limiter les vents chargés de poussière et de créer un effet rafraîchissant. Dans les climats chauds, un bâtiment ombragé peut être entre 4 et 12 °C plus frais qu'un bâtiment exposé directement au soleil (Correia et al., 2019).

La sélection de l'emplacement, de la forme et de l'orientation du bâtiment ainsi que des rues est importante pour assurer une protection solaire optimale et une exposition adéquate aux vents dominants. Le faible rapport hauteur/largeur des rues a un impact significatif sur le confort urbain et l'absorption, la réflexion et l'émission du rayonnement solaire (Figure 1.16).



Figure 1.16: Les Rues ombragées dans les ksour Algériens. (Source : (Bencherif and Chaouche, 2013)

En résumé, Supic, (2010) a réalisé un tableau exhaustif répertoriant les différentes stratégies de conception adaptées à chaque élément du climat dans les zones chaudes et arides (voir Figure 1.17) .

1.2. Interaction homme et climat : effet du climat sur l'homme dans son espace.

L'homme est au cœur de la mesure de la qualité de l'architecture (Olgyay, 1963). La satisfaction de l'être humain envers son environnement intérieur repose sur trois exigences fondamentales : un bâtiment sain, thermiquement confortable et énergétiquement efficace. Le confort thermique joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la qualité de l'espace créé. Bien que cette notion soit subjective et dépende de la

morphologie de chaque individu, certaines composantes sont constantes. Dans cette partie, nous présenterons un aperçu du confort thermique dans les bâtiments et les outils d'évaluation nécessaires pour concevoir des espaces intérieurs répondant aux besoins humains tout en optimisant la consommation énergétique.

| Facteurs climatiques Champ d'application | Ensoleillement | Température de l'air | Humidité relative | Mouvements d'air | Précipitations |
|--|--|---|---|---|----------------|
| Implantation Groupement | <ul style="list-style-type: none"> - Orientation N/S - Groupement compact - Recherche de l'ombre - Troglodytisme et semi-troglodytisme - Nomadisme | <ul style="list-style-type: none"> - Orientation N/S - Groupement compact - Recherche de l'ombre - Troglodytisme et semi-troglodytisme - Nomadisme | <ul style="list-style-type: none"> - Recherche de sources naturelles ou artificielles - Oasis | <ul style="list-style-type: none"> - Masques antipoussière | |
| Forme | <ul style="list-style-type: none"> - Forme compacte - Voûtes et coupoles - Toit plat | <ul style="list-style-type: none"> - Forme compacte - Voûtes et coupoles - Toit plat | | | |
| Partition spatiale | <ul style="list-style-type: none"> - Puits de lumière, patio - Intérieur spacieux et haut - Nomadisme journalier - Espaces de transition, galeries, iwan | <ul style="list-style-type: none"> - Puits de lumière, patio - Intérieur spacieux et haut - Nomadisme journalier - Espaces de transition, galeries, iwan | <ul style="list-style-type: none"> - Patio et cour intérieur avec végétation - Citernes | | |
| Enveloppe horizontale Matérialisation | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité d'accumuler la chaleur - Couleur claire - Elimination air chaud - Matériaux massifs | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité d'accumuler la chaleur - Couleur claire - Elimination air chaud - Matériaux massifs | | <ul style="list-style-type: none"> - Orifices d'aspiration d'air chaud | |
| Enveloppe verticale Matérialisation | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité d'accumuler la chaleur - Petites ouvertures - Ouvertures occultées (brise-soleil) - Auvents - Matériaux massifs | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité d'accumuler la chaleur - Petites ouvertures - Ouvertures occultées (brise-soleil) - Matériaux massifs | | <ul style="list-style-type: none"> - Recherche des brises nocturnes - Orifices de ventilation | |
| Dispositifs particuliers | <ul style="list-style-type: none"> - Moucharabieh, claustra | | <ul style="list-style-type: none"> - Humidificateurs (salsabil, chadar, chadouf) | <ul style="list-style-type: none"> - Cheminée de ventilation (badgir), malakaf | |

Figure 1.17 : Les stratégies d'adaptation climatique des bâtiments dans les climats chauds et secs. (Source : (Supic, 2010)).

1.2.1. Le confort thermique dans le bâtiment

Le confort thermique est simplement une sensation de bien-être liée à l'environnement intérieur. Il résulte d'un équilibre thermique physique entre le corps humain et les conditions ambiantes qui l'entourent.

Dans le domaine de la construction, Moujalled, (2007) souligne que le confort thermique constitue une exigence fondamentale à laquelle les concepteurs doivent apporter des réponses adéquates. Sa définition au sein des bâtiments permet d'atteindre les objectifs de fonctionnalité tout en justifiant, de manière appropriée ou non, l'installation d'équipements de confort tels que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation.

Pour créer le confort thermique, il faut maintenir l'équilibre thermique du corps humain. Notre sensation de confort thermique dépend des échanges de chaleur entre

notre corps avec son environnement (Moujalled, 2007). D'après la figure 1.18 établie par Cécile Batier, (2018) dans son travail de doctorat, l'interaction entre le corps humain et l'environnement intérieur est bien illustrée. À travers les activités métaboliques, notre corps génère en permanence de la chaleur, dont une partie est utilisée comme énergie et le reste est dissipé dans l'environnement pour maintenir notre température corporelle. Cette chaleur est échangée avec l'environnement par le biais de processus de convection, rayonnement, évaporation et par conduction ainsi que par la respiration (par convection et évaporation). Lorsque nous perdons ou gagnons de la chaleur, notre sensation de confort peut varier entre la neutralité thermique, la chaleur, la fraîcheur, voire l'inconfort en cas d'exposition extrême.

Selon Moujalled (2007), l'ensemble des mécanismes physiologiques constituent le bilan thermique d'un individu sont exprimée par l'équation suivante :

$$M - W = QSK + ERES + S \quad (1)$$

Où :

- M : Activité métabolique (W/m^2) ;
- W : Puissance fournie à l'extérieur (W/m^2) ;
- QSK : Flux de chaleur échangé à la surface de la peau (W/m^2) ;
- $ERES$: Flux de chaleur échangé par la respiration (W/m^2) ;
- S : Chaleur stockée (W/m^2).

En somme, la relation entre l'occupant et l'environnement intérieure du bâtiment détermine le niveau de confort thermique et la performance énergétique du bâtiment. A ce fait, Le confort thermique de l'être humain dépend principalement de six paramètres de nature physiologiques, comportementaux et environnementaux liés à l'individu et à l'environnement (voir figure 1.19).

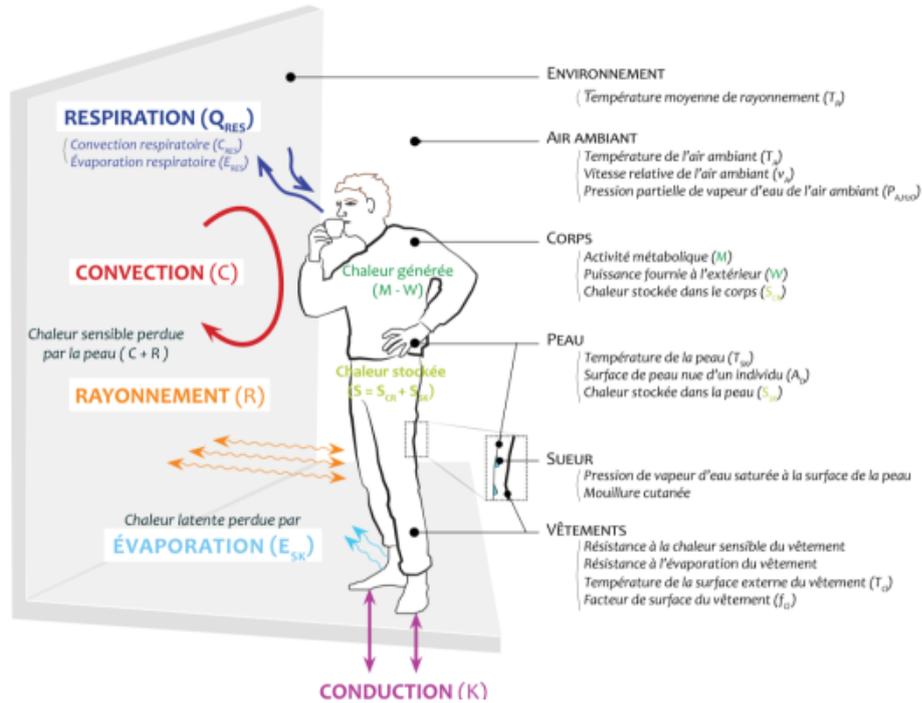


Figure 1.18 : Les échanges thermiques entre le corps et son environnement.

(Source : (Cécile Batier, 2018)).

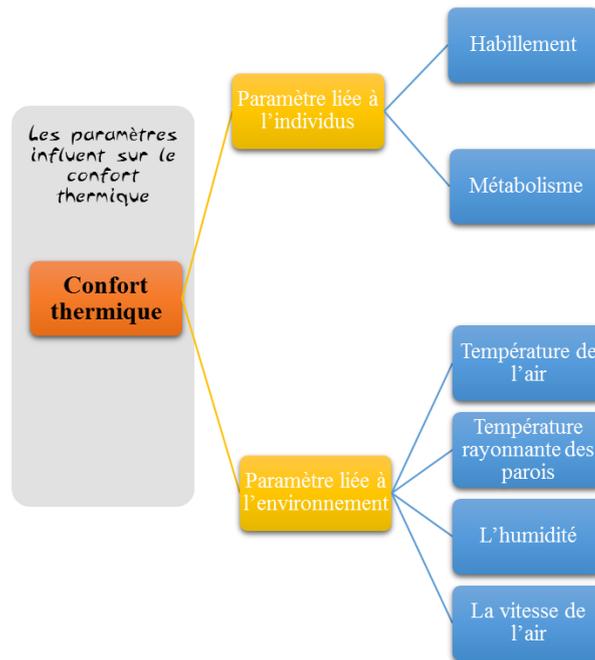


Figure 1.19 : Les paramètres influant sur le confort thermique. (Source :

Adapté par Auteur)

1.2.1.1. Les approches d'évaluation de la zone de confort thermique

Les chercheurs se sont intéressés au confort thermique afin de répondre aux exigences croissantes en matière de confort intérieur et à la volonté de réduire la consommation d'énergie. Deux approches principales et complémentaires ont été développées : l'approche analytique et l'approche adaptative.

1.2.1.1.1. La méthode analytique (Statique)

L'approche analytique, également appelée méthode statique, repose principalement sur le calcul du bilan thermique du corps humain et de ses échanges avec l'environnement thermique. Les modèles d'analyse les plus connus sont le modèle de Fanger (PMV & PPD) et le modèle de Gagge à deux nœuds (Cécile Batier, 2018; Moujalled, 2007).

1.2.1.1.1.1. Modèle de Fanger (PMV & PPD)

Le modèle de Fanger (PMV & PPD), développé en 1967, propose deux indices pour évaluer le confort thermique. Basés sur des expérimentations avec près de 1300 personnes dans des chambres climatiques, ces indices prennent en compte l'équilibre thermique, la température moyenne de la peau et la sudation pour déterminer le confort thermique (ROBILLART, 2016).

L'indice PMV, "Predicted Mean Vote" ou "Vote Moyen Prévisible", prédit le confort thermique des occupants en se basant sur des évaluations de sensation thermique effectuées par un groupe de personnes selon une échelle de sept niveaux définis par l'ASHRAE (Cécile Batier, 2018). Selon la figure 1.20, la zone de confort thermique se situe entre -1 et +1.

Cependant, il est important de noter que les conditions considérées comme confortables (-1, 0 et +1) pour certaines personnes peuvent ne pas l'être pour d'autres. Pour compléter l'indice PMV, Fanger a développé l'indice de PPD, "Predicted Percentage Dissatisfied" ou "pourcentage prévisible d'insatisfaits", qui permet de déterminer le pourcentage de personnes insatisfaites dans un environnement donné. D'après la figure 1.20, même dans une situation de confort (PMV=0), il y aura toujours 5 % de personnes insatisfaites sur le plan thermique (Cécile Batier, 2018; Moujalled, 2007; ROBILLART, 2016).

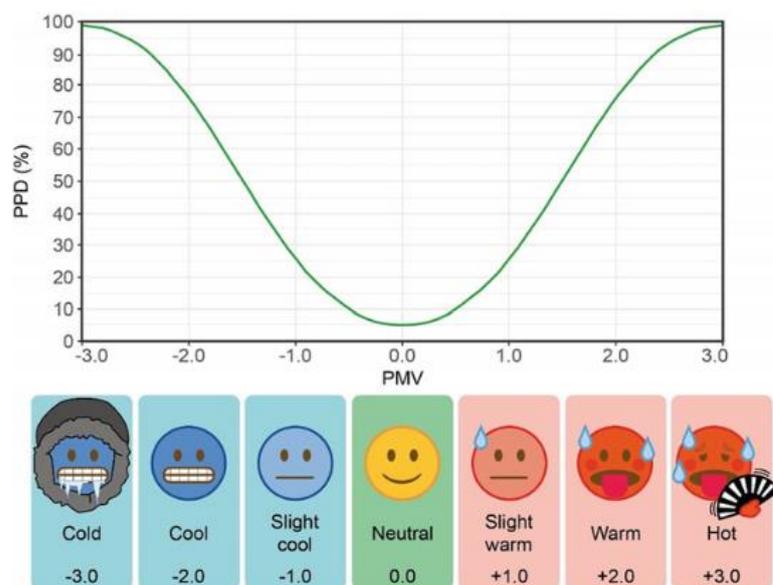


Figure 1.20 : Répartition du PPD en fonction du PMV, ainsi que les échelles d'évaluation de sensation thermique. (source : Bienvenido-Huertas and Rubio-Bellido, (2021)

1.2.1.1.1.2. Le modèle à deux nœuds de Gagge

C'est une version simplifiée du modèle de Stolwijk et Hardy pour comprendre la thermorégulation (Cantin et al., 2005). Il divise le corps humain en deux parties : le noyau central et la peau. Ce modèle permet de calculer les variables physiologiques dans des conditions transitoires, utilisées pour déterminer l'indice SET, représentant la sensation thermique perçue. L'indice SET suppose des vêtements adaptés et des échanges de chaleur et d'humidité similaires à une enceinte isotherme (Moujalled, 2007). Le tableau 1.2 présente la relation entre les sensations thermiques et les valeurs de l'indice SET.

Tableau 1.2 : La relation des sensations thermiques aux différents valeurs de « SET » (Source : (Moujalled, 2007)

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

| | | |
|------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 14,5-17,5 | Froid, inacceptable | Refroidissement ralenti du corps |
| 10,0-14,5 | Très froid, très inacceptable | Frissons |

L'ASHRAE a introduit en 1997 deux nouveaux indices pour évaluer le confort thermique. Le premier, TSENS (thermal sensation), ajoute deux degrés extrêmes à l'échelle de l'ASHRAE pour évaluer la perception thermique. Le deuxième, DISC (thermal discomfort), mesure le degré d'inconfort thermique sur une échelle à six points. Ces indices mettent l'accent sur l'interaction entre les occupants et leur environnement, en accordant une importance particulière à l'adaptabilité pour assurer le confort thermique (Moujalled, 2007).

1.2.1.1.2. La méthode adaptive

L'approche adaptative du confort thermique reconnaît que les individus réagissent activement et s'adaptent aux conditions thermiques pour maintenir leur confort personnel. Contrairement aux modèles statiques, l'approche adaptative tient compte des ajustements comportementaux, physiologiques et psychologiques des occupants (Allab, 2017). Le principe adaptatif, défini par le projet RP 884, stipule que lorsque des changements se produisent et risquent de causer un inconfort, les occupants réagissent pour rétablir leur confort (de Dear and Brager, 1998). Les limitations des modèles statiques de confort thermique ont donné lieu au développement du modèle adaptatif par Nicol, Humphreys, de Dear et Brager. Ces travaux ont révélé l'inapplicabilité des modèles statiques aux bâtiments à ventilation naturelle et ont démontré la capacité d'adaptation des occupants aux variations de température. La compilation d'une vaste base de données a conduit à la création de la norme ANSI/ASHRAE 55-2004, intégrant un modèle adaptatif. Cette norme a été ensuite mise à jour en 2013 et 2017 pour refléter les avancées dans le domaine

D'après la figure 1.21, La norme ASHRAE 55-2017 établit deux catégories d'acceptabilité du confort thermique (80% et 90%) définissant les limites supérieure et

inférieure de la température opérative. Ces catégories ne sont pas spécifiques à un type de bâtiment particulier (Bienvenido Huertas and Rubio Bellido, 2021).

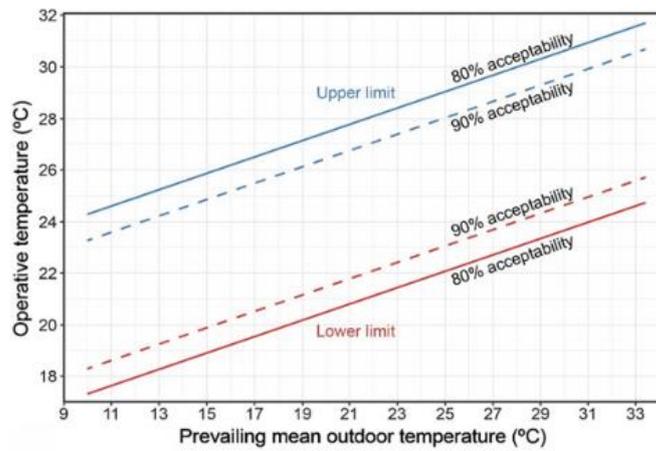


Figure 1.21 : Diagramme de modèle adaptative selon la Norme ASHRAE 55-2017. (Source : (Bienvenido Huertas and Rubio Bellido, 2021))

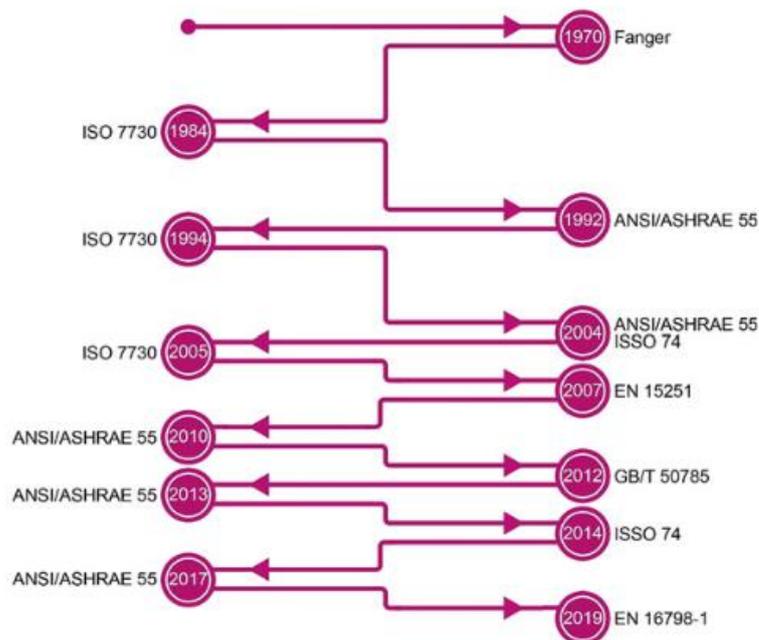


Figure 1.22 : Les différents études, normes et standards liés au confort thermique développées au fil du temps. (Source : (Bienvenido Huertas and Rubio Bellido, 2021))

En conclusion, le confort thermique a suscité un vaste domaine de recherche et d'études approfondies depuis le milieu du 20^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui (voir Figure 1.22). En raison de sa nature multidisciplinaire, cela a conduit à l'émergence de

plusieurs normes et standards internationaux qui intègrent à la fois des modèles statiques et adaptatifs de confort thermique.

1.2.2. Les chartes bioclimatiques : Outils d'intégration des bâtiments au climat

Les chartes bioclimatiques sont des outils qui analysent les caractéristiques climatiques d'un lieu pour optimiser le confort des occupants dans les bâtiments non climatisés. Elles combinent la température et l'humidité sur un graphique psychrométrique et fournissent des lignes directrices de conception basées sur la "zone de confort", où la plupart des personnes se sentent à l'aise thermiquement (Košir, 2019; Sayigh and Marafia, 1998).

De nombreux chercheurs ont développé des méthodes et des outils pour intégrer les bâtiments dans leur environnement. Victor Olgyay a initié l'approche bioclimatique en 1963 avec sa charte bioclimatique, suivie par Baruch Givoni (Figure 1.23). Ces chartes relient les données climatiques au confort humain dans les bâtiments et permettent d'estimer la période où un bâtiment est en équilibre thermique avec son environnement (Košir, 2019).

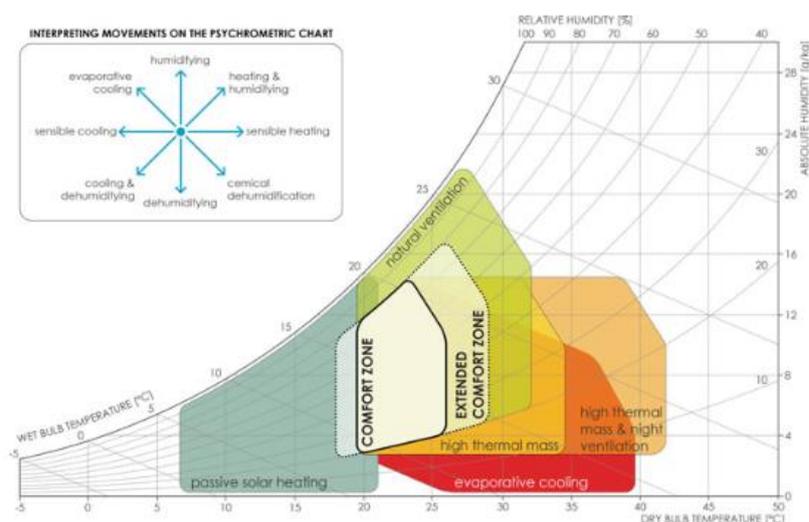


Figure 1. 23 : Le diagramme bioclimatique de Givoni, présenté sur une charte psychrométrique. (Source : (Bienvenido Huertas and Rubio Bellido, 2021))

Au fil des années, la méthodologie de la charte bioclimatique a été améliorée par de nombreux chercheurs tels que Rohles et al. (1975), Szokolay (1980), Givoni

(1992), Lomas et al. (2004) et La Roche (2017). Ces améliorations ont permis des adaptations spécifiques aux climats, aux contextes culturels et aux types de bâtiments (Bienvenido Huertas and Rubio Bellido, 2021).

1.3. Performance énergétique des bâtiments

Depuis des temps immémoriaux, l'homme a modelé ses habitats pour rechercher un confort accru. Des cavernes préhistoriques aux constructions modernes, notre quête de bien-être s'est accompagnée d'embellissements, d'aménagements et de technologies innovantes. Aujourd'hui, les dispositifs technologiques sont indispensables pour chauffer, éclairer, ventiler et climatiser nos bâtiments, exploitant diverses sources d'énergie. Cependant, une prise de conscience grandissante des conséquences néfastes de l'utilisation excessive d'énergies non renouvelables nous pousse à repenser notre approche en matière de confort, afin de relever les défis environnementaux et énergétiques actuels.

Au cours des dernières années, la nécessité d'économiser l'énergie et de lutter contre le réchauffement climatique a pris une importance croissante. Pour maîtriser la consommation d'énergie à des niveaux raisonnables, il est crucial de savoir où intervenir. C'est dans cette perspective que la performance thermique des enveloppes architecturales revêt une importance capitale. En effet, elle est largement reconnue comme l'un des éléments essentiels de la gestion de l'utilisation d'énergie fossile dans les bâtiments, ainsi que pour garantir une sensation de confort thermique optimale. À cet égard, Jean Paul Boudreau, (2011) souligne que "la conception d'un bâtiment performant commence par le contrôle des pertes thermiques, des gains solaires et l'utilisation efficace de la lumière naturelle". De même, Woytek Kujawski, directeur de la Société canadienne d'hypothèques et de logement, affirme que le comportement thermique des matériaux et la géométrie de l'enveloppe du bâtiment a un impact immédiat sur les charges de refroidissement et la consommation d'énergie des bâtiments (Kujawski, 2014).

1.3.1. Impact de la performance thermique de l'enveloppe sur la consommation d'énergie

“The worst the thermal performance, the highest the energy consumption for air-conditioning”

Ghisi et Felipe Massignani, (2007).

la Directive 2010/31/UE, (2010) définit un bâtiment comme une structure comprenant un toit et des murs, nécessitant l'utilisation d'énergie pour maintenir un climat intérieur régulé. Selon les constats précédents, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments implique la prise de décisions concernant le choix et la dimension des éléments du bâtiment ayant une influence déterminante sur sa consommation énergétique, comme le décrit Velázquez en 2016.

Selon Morel and Gnansounou, (2008), afin de limiter la consommation d'énergie à des niveaux raisonnables, il est essentiel de comprendre et de prendre des mesures concernant les flux d'énergie dans le bâtiment. Ces mesures visent à établir des économies d'énergie tout en offrant un confort élevé. Nayak and Prajapati, (2006) ajoutent que la performance thermique d'un bâtiment implique la modélisation des transferts d'énergie entre le bâtiment et son environnement. Cela permet d'estimer la durée des périodes de confort ou d'inconfort, ainsi que les besoins de chauffage ou de refroidissements nécessaires. Snkey a élaboré un diagramme présentant le bilan énergétique d'un bâtiment, comme illustré dans la figure 1.24. Ce diagramme met en évidence les apports, les gains, les pertes et les déperditions qui déterminent les "besoins nets" nécessaires pour assurer le chauffage ou la climatisation du bâtiment.

Dans ce contexte , VELÁZQUEZ, (2016) dans son travail sur "le processus de conception énergétique de bâtiments durables", souligne les quatre aspects à prendre en compte pour créer un bâtiment énergétiquement performant :

1. **Géométrie** : Cela englobe la forme du bâtiment, ses dimensions, son orientation, sa relation avec l'environnement et l'organisation spatiale.
2. **Enveloppe** : Il s'agit des échanges thermiques avec l'extérieur par le biais des murs, des fenêtres, de la toiture et du plancher bas. Ces échanges incluent les pertes thermiques et les apports solaires.

3. **Matériaux** : Les caractéristiques thermos-physiques des matériaux sont importantes, notamment l'inertie thermique et l'isolation thermique.
4. **Systèmes (équipements)** : Il est essentiel d'utiliser des systèmes de ventilation, d'éclairage, de chauffage et de refroidissement performants.

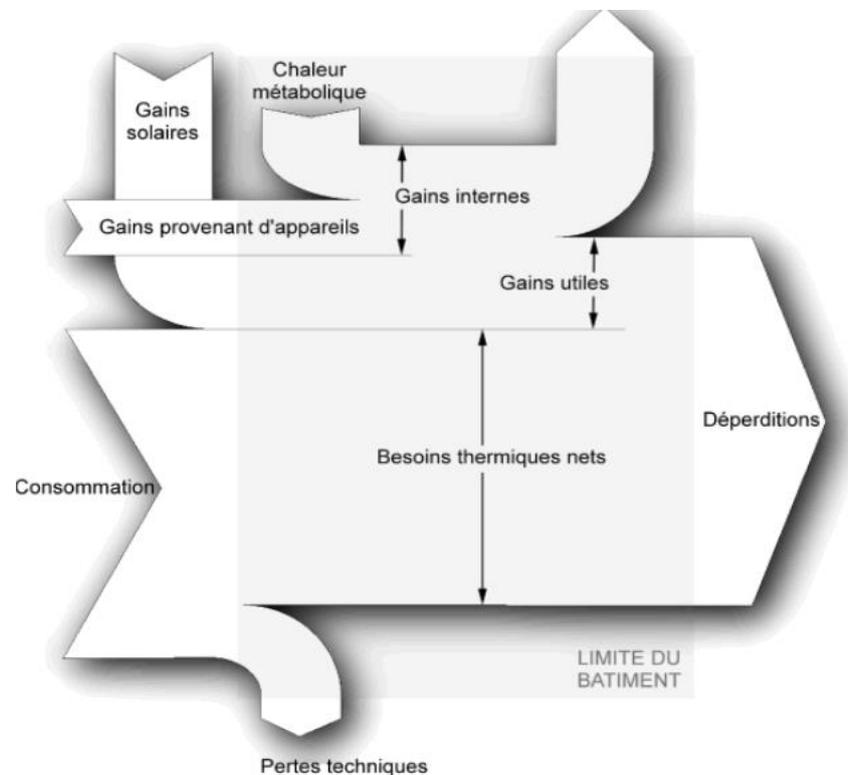


Figure 1.24 : Diagramme de Sankey reprenant les différents apports et pertes d'énergie dans le bâtiment (source : https://docs.izuba-energies.com/v4/fr/index.php/Synth%C3%A8se_STD%28R%C3%A9sultats%29)

Selon Velázquez, un bâtiment est considéré comme énergétiquement performant s'il intègre ces quatre aspects lors de sa conception. De même, Cécile Batier (2018) souligne que les systèmes constructifs, les matériaux, la géométrie du bâtiment et sa localisation géographique sont autant d'éléments qui peuvent influencer sur les échanges thermiques, le confort des occupants et les consommations d'énergie.

En résumé, la quantification de la performance thermique des bâtiments (toiture, murs, fenêtres et sol) permet d'évaluer l'efficacité de leur conception et de développer des designs améliorés pour des bâtiments économes en énergie offrant un confort intérieur optimal.

En Algérie, l'évaluation de la performance thermique des bâtiments vise à concevoir des constructions économes en énergie et offrant un confort intérieur optimal. Le ministère du logement a élaboré des Documents Techniques Règlementaires (DTR) qui sont mis en œuvre par le CNERIB. Ces documents ont pour objectif d'introduire la performance énergétique dans les enveloppes des bâtiments résidentiels neufs ou en réhabilitation, avec une réduction des besoins en chauffage de 40% selon l'APRUE. Les DTR comprennent :

- **Le DTR C3-2** : il définit les règles de calcul des pertes de chaleur pour limiter la consommation énergétique en chauffage hivernal.
- **Le DTR C3-4** : il calcule les apports de chaleur estivaux pour limiter la consommation énergétique en climatisation.
- **Le DTR C3.34** : il vise à maîtriser la ventilation naturelle.

Cependant, l'application obligatoire de ces réglementations n'est pas encore en vigueur, ce qui se traduit par l'absence d'efficacité énergétique dans les constructions en Algérie.

1.3.2. Consommation énergétique des bâtiments

1.3.2.1. Aperçue au niveau du mondiale.

Depuis la crise de l'énergie de 1970, la question énergétique est devenue l'une des préoccupations majeures des politiques économiques à l'échelle mondiale (Lapisa, 2016). Selon les données "définitives" de l'IEA (IEA, 2019), la consommation mondiale d'énergie primaire a atteint 13 972 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) en 2017. Cette consommation reposait encore à 81,3% sur les énergies fossiles en 2019, dont 32% provenaient uniquement du pétrole.

Le secteur du bâtiment se distingue par sa consommation énergétique élevée et ses répercussions sur l'environnement. En 2017, il représentait 40% de la consommation d'énergie finale et 36% des émissions de dioxyde de carbone de l'Union européenne, selon la Commission européenne - Départements. Énergie, (2020) Commission européenne. Ce secteur représente ainsi un levier d'action critique pour diminuer notre impact sur l'environnement (figure 1.25). Près de 44,2% des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie en 2017 provenaient de la combustion du charbon.

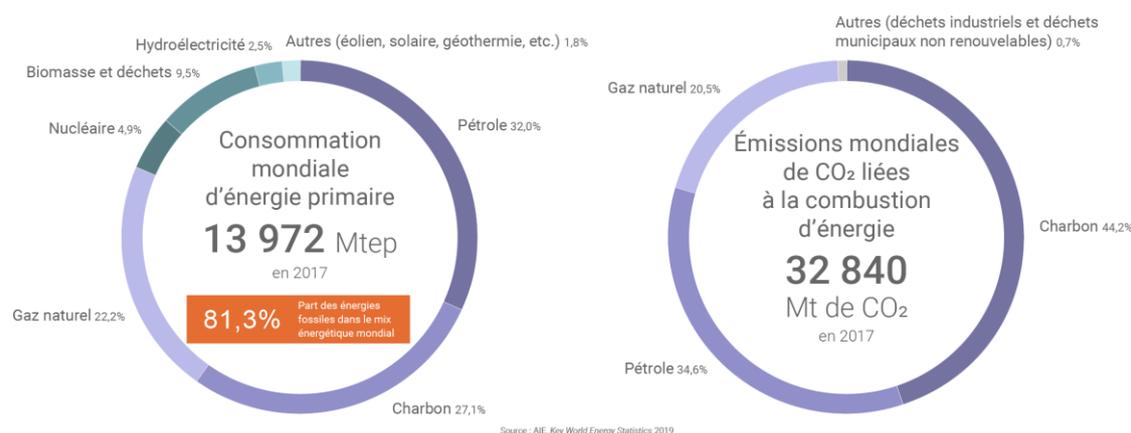


Figure 1.25 : Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2015.

(Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-220218>, D'après IEA, 2019)

Selon EIA², la croissance économique et démographique significative des pays en développement pourrait augmenter la consommation mondiale d'énergie primaire à 46.9% d'ici 2050 (EIA, 2019). L'électricité a compté pour 18,9% de la consommation finale d'énergie dans le monde en 2017 (contre 9,4% en 1973) (IEA, 2019) (Figure 1.26). En ce qui concerne la consommation finale d'électricité, le secteur résidentiel se distingue en représentant 27% de la consommation totale mondiale. Cela en fait le deuxième secteur le plus énergivore après l'industrie.

Cette donnée met en évidence l'importance cruciale de promouvoir des pratiques économes en énergie au sein des foyers.

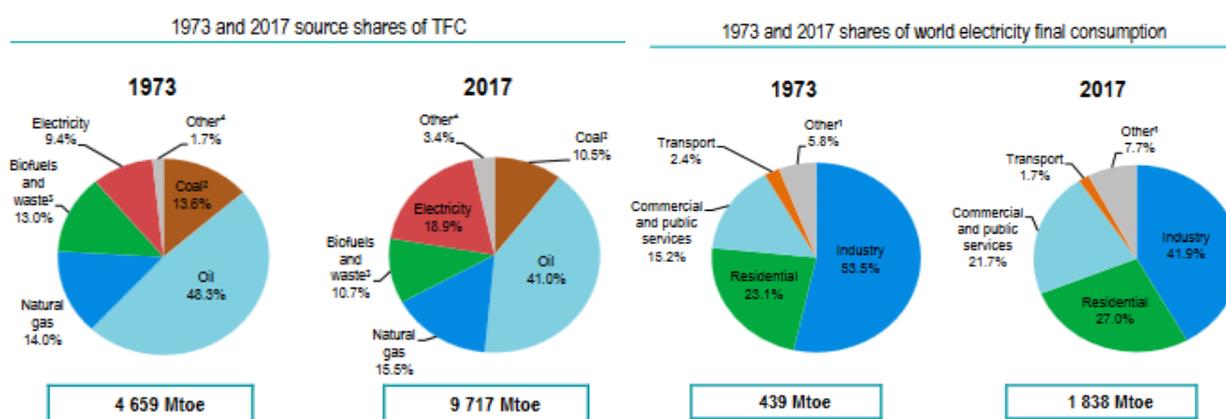


Figure 1.26 : Consommation finale totale (CFT) mondiale par source « électricité » et par secteur. (Source : (EIA, 2019))

² The américaine Energy Information Administration.

1.3.2.2. Aperçue au niveau d'Algérie.

Les changements démographiques, le développement industriel et l'urbanisation sont tous des moteurs de la demande énergétique croissante de l'Algérie. Entre 2000 et 2017, à la fois la consommation primaire et la consommation finale de l'Algérie ont connu une croissance significative (la croissance était environ 5%). La consommation primaire est passée de 27,9 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 2000 à 57,6 Mtep en 2017, représentant une augmentation annuelle de 4,4%. La consommation finale, quant à elle, est passée de 13,8 Mtep en 2000 à 34,7 Mtep en 2017, enregistrant une hausse annuelle de 5,6% (Figure 1.27).

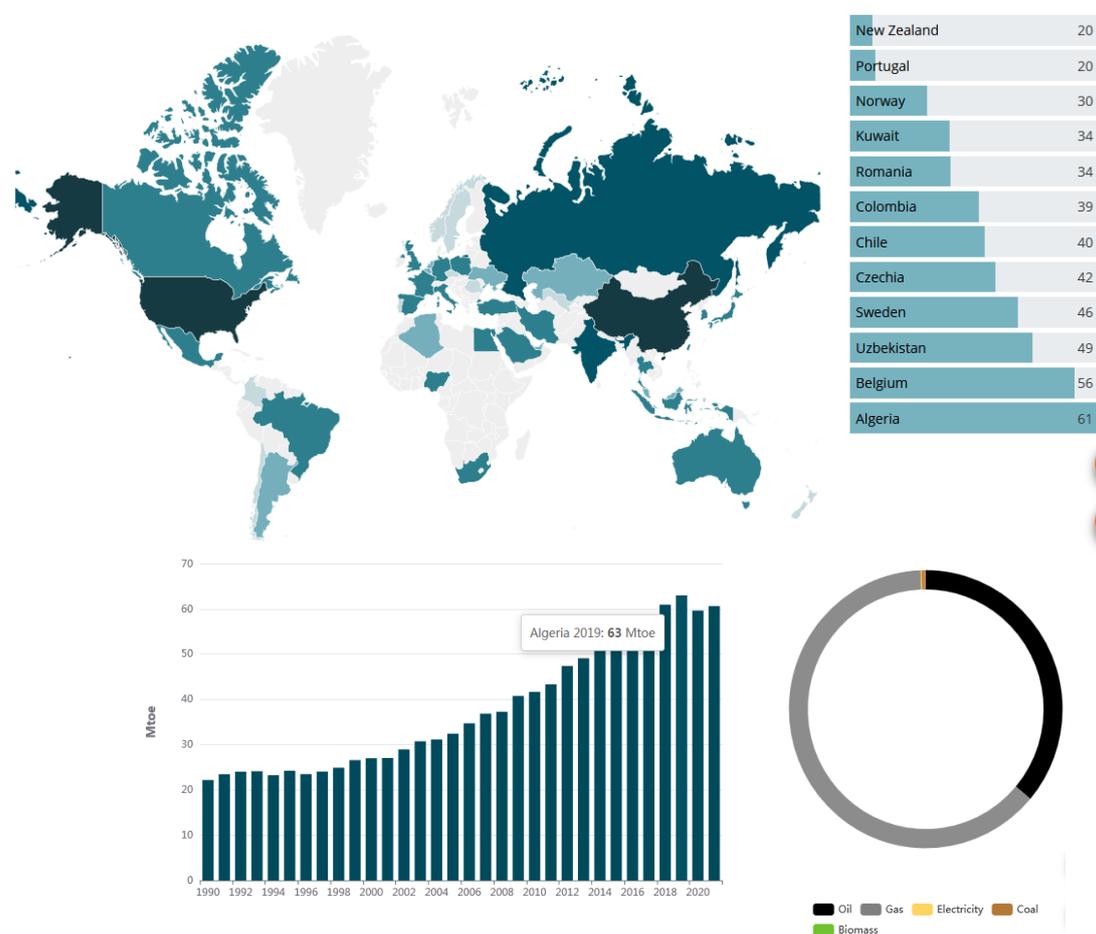


Figure 1.27 : La consommation énergétique de l'Algérie entre 1990-2021.

(Source : World energy and climate statistics ³- yearbook, 2022)

En 2017, le secteur des transports s'est avéré être le principal consommateur d'énergie, représentant 38% de la consommation finale. Cependant, cette part a diminué

³ <https://yearbook.enerdata.net/>.

par rapport à 2000 (42%) et 2010 (44%). Ensuite, le secteur résidentiel est en train de gagner en importance, avec une part croissante de la consommation finale (33% en 2017 contre 26% en 2000).

Cette augmentation s'explique par la croissance significative du nombre de ménages (+3,3% par an) et la consommation unitaire des ménages, qui est influencée par l'amélioration du niveau de vie (MeetMED4, 2020).

De plus, La consommation électrique du secteur résidentiel a atteint 2139 Ktep. Elle représente 43% de la consommation totale d'électricité. Tandis que, les logements individuels représentent 65% de cette consommation (APRUE, 2019) (Figure 1.28). L'Algérie se classe la troisième en Afrique en termes d'émissions de CO₂, avec une consommation d'énergie par habitant élevée de 1 327 kg en équivalent pétrole en 2014, par rapport aux autres pays du Maghreb. En 2018, les émissions de CO₂ provenaient principalement du secteur des transports (32%), suivi des producteurs d'électricité et de chaleur (28%), du secteur résidentiel (19%) et de l'industrie (9%).

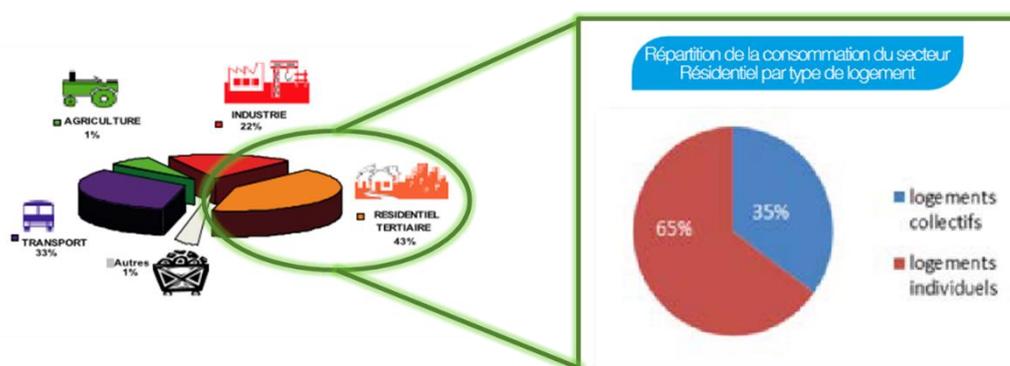


Figure 1.28 : Répartition de la consommation énergétique du secteur Résidentiel par type de logement. (Source : APRUE, (2019)).

Depuis 2005, les émissions de CO₂ ont augmenté de 77% en raison de la croissance démographique, du développement industriel et des impacts du changement climatique (Figure 1.29). Selon la figure 1.30, la wilaya de Biskra se classe parmi les 10 premières wilayas en termes de consommation énergétique élevée. Cette consommation semble être directement influencée par le climat contrasté de la région, où la demande en énergie pour la climatisation est en constante croissance,

⁴ Mitigation Enabling Energy Transition in the MEDiterranean region. "Together We Switch to Clean Energy".

principalement en été. Cette situation est exacerbée par le modèle architectural largement répandu dans la région, qui s'avère inadapté aux conditions climatiques locales.

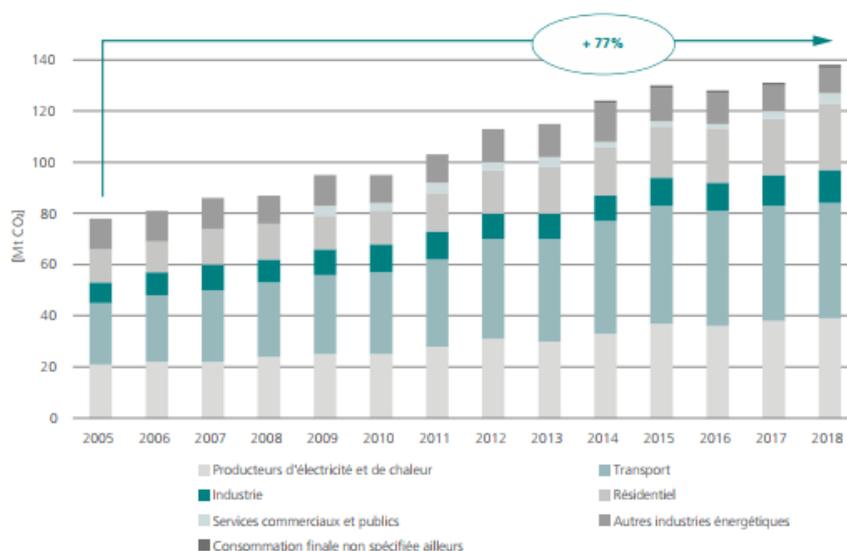


Figure 1.29 : Emissions de CO₂ (Mt CO₂) par secteur en Algérie entre 2005-2018. (Source : (Sibel Raquel Ersoy, 2021)).

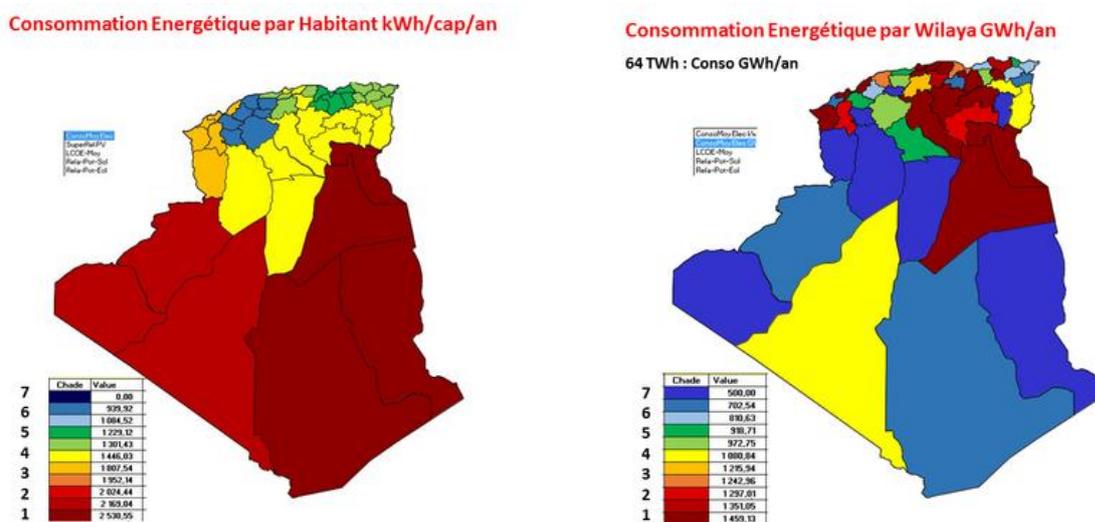


Figure 1.30 : La consommation énergétique annuelle par habitant kWh/cap/an et par wilaya GWh/an. (Source : Mohamed Hammoudi⁵, 2018)

Afin de faire face à ces changements climatiques, il est impératif de mettre en place des dispositifs passifs appropriés pour les bâtiments résidentiels, en particulier les

⁵ <https://care.dz/fr/evenements/le-developpement-des-energies-renouvelables-en-algerie-potentiel-opportunités-et-defis-event74>.

logements individuels. Dans cette optique, la toiture joue un rôle crucial. En raison de sa grande surface et de son exposition significative au soleil, elle offre un potentiel considérable à explorer. Ainsi, il est essentiel d'étudier en profondeur les possibilités d'amélioration de la toiture afin de la rendre plus efficace sur le plan énergétique. Cette recherche permettra de développer des solutions adaptées, capables de réduire la consommation énergétique liée à la climatisation, tout en assurant un meilleur confort thermique aux habitants de la région.

1.3.3. Efficacité énergétique

« Il n'existe pas de style propre à la construction économe en énergie. Celle-ci ne réclame pas d'esthétique particulière, ni même de régie générale, juste une attitude respectueuse de l'environnement (du moins qui ne le pollue pas). »

(Robert Kaltenbrunner, 1993)

La relation entre l'énergie et les bâtiments est un élément crucial pour comprendre les défis liés à la mise en œuvre du concept de bâtiment à énergie positive. L'efficacité énergétique est devenue rapidement l'une des préoccupations majeures de notre époque et les bâtiments jouent un rôle essentiel à cet égard. Ils consomment davantage d'énergie que n'importe quel autre secteur, ce qui les place en grande partie responsable du changement climatique.

Pour contribuer à l'efficacité énergétique des bâtiments, tout le monde s'accorde qu'il existe principalement trois leviers qui peuvent être activés : les solutions passives (enveloppe, orientations...), les solutions actives et le comportement des occupants (Figure 1.31).

Selon Velázquez-Romo (2015), il existe trois méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment les plus répandus et pertinente à directioner les concepteurs à prendre les bonnes décisions (voir figure 1.32):

- Les certifications environnementales.
- Les outils d'évaluation ;
- Les outils numériques.

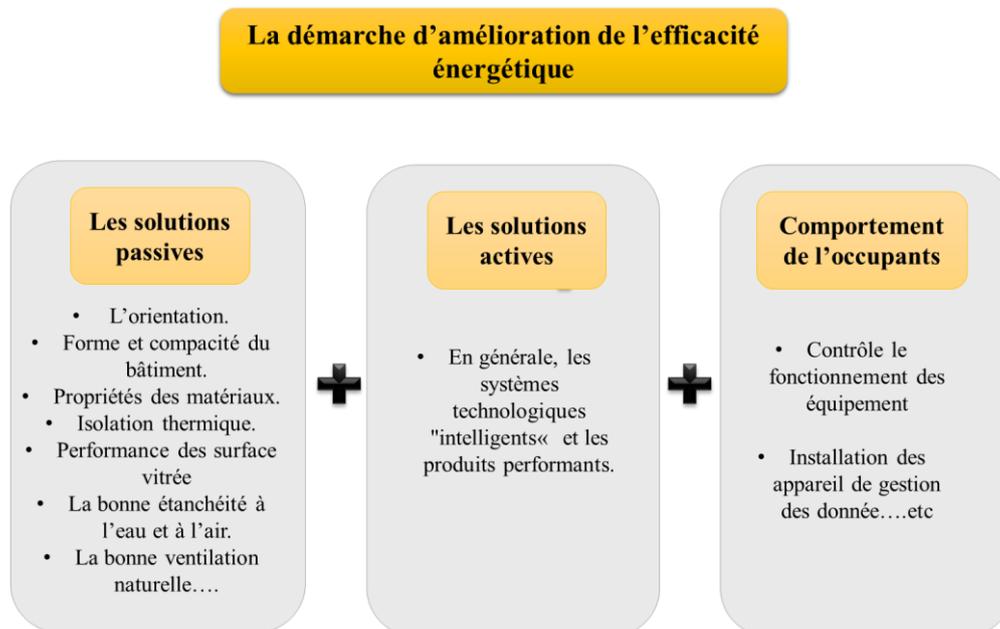


Figure 1.31 : Démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

(Source : Adapté par Auteur)

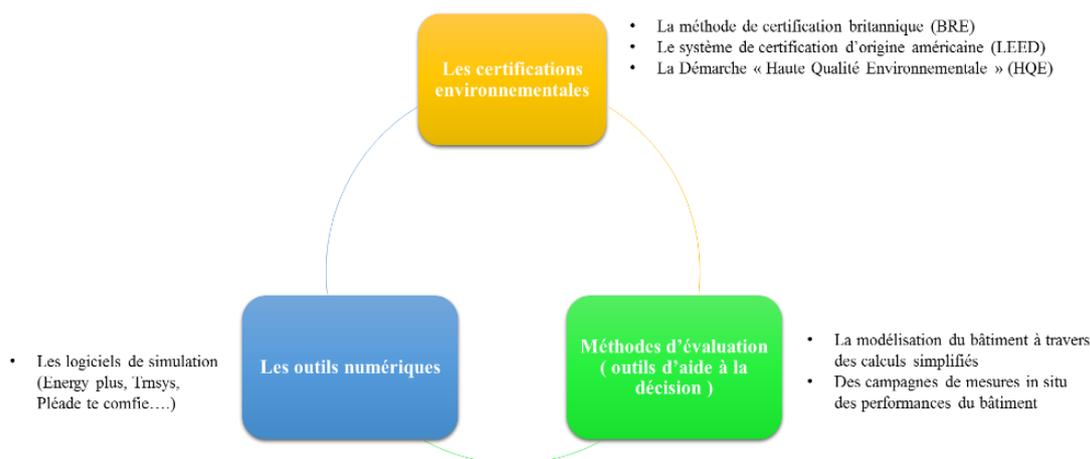


Figure 1.32 : Méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment

(Source : Velázquez-Romo (2015) Adapté par auteur)

1.3.3.1. L'efficacité énergétique en Algérie

L'État algérien prend conscience de l'importance d'une politique d'efficacité énergétique par la mise en route d'un certain nombre des lois règlementaires et des programmes nationaux de la maîtrise d'énergie. La réglementation thermique du bâtiment est une discipline qui se consacre à l'étude des besoins énergétiques des constructions. Elle se concentre principalement sur l'isolation thermique et la ventilation, dans le but d'offrir un confort thermique optimal aux occupants

Les lois relatives à la maîtrise de l'énergie comprennent :

- **La loi 09-99 du 28 juillet 1999** : elle concerne la gestion rationnelle de la demande d'énergie dans le domaine de la construction.
- **Le décret exécutif n° 2000-90 du 24 avril 2000** : il concerne la réglementation thermique des nouveaux bâtiments résidentiels.
- **La loi 04-09 du 14 août 2004** : elle vise à promouvoir les énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- **Le décret exécutif 04-149 du 19 mai 2004** : il établit les modalités d'élaboration du programme national de maîtrise de l'énergie.
- **Le décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005** : il concerne l'efficacité énergétique des appareils fonctionnant à l'électricité, au gaz et aux produits pétroliers.
- **L'arrêté interministériel du 29 novembre 2008** : il définit la classification d'efficacité énergétique des appareils domestiques.

L'APRUE a lancé des programmes de maîtrise et d'économie d'énergie dans les bâtiments dans le cadre de la stratégie nationale de maîtrise de l'énergie en 2009. Ces programmes comprennent :

- **Programme Eco-Lumière** : Il vise à assurer un éclairage performant en utilisant des lampes à basse consommation.
- **Programme Alsol** : Il consiste à distribuer 1000 chauffe-eaux solaires dans les ménages et le secteur tertiaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- **Programme Eco-Bât** : Son objectif est d'optimiser le confort thermique des logements tout en réduisant la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation d'environ 40%.
- **Isolation thermique de 1500 constructions existantes** : Ce programme vise à réduire la consommation énergétique annuelle des logements de 20% à 40% en isolant les ouvrants extérieurs et la toiture

Conclusion

Dans l'ensemble, l'architecture se présente comme une réponse ingénieuse et sensible aux particularités climatiques de chaque région du monde. Cette réponse se

manifeste à travers des pratiques et des stratégies architecturales qui englobent des éléments-clés du processus de la conception du projet : tels que l'emplacement, l'orientation, la forme, les matériaux de construction et les dispositifs de protection. Tous ces aspects doivent être pensés dans le but d'adapter le bâtiment à son environnement naturel.

Il est indéniable que le confort thermique est une sensation complexe et subjective, influencée par de nombreux paramètres. L'inconfort thermique conduit à une utilisation excessive de la climatisation électrique, compromettant ainsi la performance énergétique des bâtiments. Par conséquent, dans un contexte de standardisation croissante des modèles architecturaux dans les climats chauds et secs, il est crucial de redécouvrir et de réintégrer ces principes fondamentaux. Cette démarche est essentielle pour parvenir à une architecture bioclimatique optimale et pour faire face aux défis pressants tels que l'épuisement énergétique, la surchauffe intérieure et le changement climatique.

Ces stratégies se concentrent principalement sur l'amélioration du comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment, en mettant un accent particulier sur la toiture. En effet, la toiture joue un rôle déterminant dans l'efficacité énergétique des bâtiments, leur confort thermique et leur intégration harmonieuse dans leur contexte naturel. Ainsi, en revisitant ces principes fondamentaux de l'architecture bioclimatique, nous ouvrons la voie vers une approche plus durable et respectueuse de notre planète, offrant des solutions cruciales face aux défis énergétiques actuels et futurs.

Chapitre II

Procédés de rafraîchissement passif

" Cool Roof "

*“Good design is essential where **passive cooling methods** are considered as part of an overall energy efficient building”.*

Mark J. Limb, 1998

Introduction

Dans les faibles latitudes, le refroidissement des espaces de vie est l'une des principales exigences pour le confort des occupants. Pour satisfaire ce besoin, les bâtiments résidentiels contemporains repose principalement sur des systèmes mécaniques énergivores. Limiter l'excès de chaleur et contrôler les échanges thermiques au niveau des toits contribuent à garantir une performance thermique optimale, tout en réduisant les dépenses énergétiques et leur impact sur le réchauffement climatique

Dans ce type de climat, la conception des toits doit assurer le contrôle de l'absorption du rayonnement solaire. Grâce à des choix judicieux en termes de forme, de matériaux de construction et de traitement de la surface extérieure du toit, il est possible de réguler cette absorption de chaleur, qui impacte principalement les besoins en climatisation. Les toits frais, également appelés "Cool Roof", représentent l'une des stratégies passives efficaces pour réduire la consommation d'électricité destinée à la climatisation, améliorer le confort thermique et atténuer l'effet d'îlot de chaleur estival, réduisant ainsi la demande maximale en énergie. De plus, l'ombrage des surfaces des toits que ce soit par la superposition d'éléments constructifs ou l'ajout de matériaux tels que la végétation ou une surface d'eau, permet de réduire l'incidence du rayonnement solaire, favorise la dissipation de la chaleur et stabilise les fluctuations de la température de l'air intérieur des bâtiments.

Dans ce contexte, il est désormais essentiel d'étudier ces alternatives passives pour faire face aux défis climatiques et à la crise énergétique, tout en garantissant un confort thermique à la fois à l'intérieur et à l'extérieur. L'objectif du chapitre est de fournir une base théorique visant à clarifier le fonctionnement des procédés de rafraîchissement passif de type « cool roof » ; cette solution étant le principal sujet d'investigation dans le cadre de cette recherche. Ce chapitre abordera d'abord les différents types de toitures et leurs fonctions dans le monde et en Algérie, ainsi que leur comportement thermique. Ensuite, le concept de rafraîchissement passif sera défini et les techniques passives les plus appropriées aux climats chauds seront identifiées. Enfin, une analyse détaillée de chaque technique sera effectuée, en présentant leurs principes de fonctionnement, avantages, contraintes et limitations.

2.1. Qu'est-ce qu'un Toit ?

Le toit constitue une couverture située au sommet d'un bâtiment ou d'une maison, dont la principale fonction est de protéger l'intérieur de la structure contre les conditions météorologiques, notamment la pluie.

La toiture désigne l'ensemble des éléments structurels et des dispositifs de protection intégrés, qui constituent la partie supérieure d'un bâtiment. Elle peut être inclinée ou horizontale. La toiture joue un rôle essentiel en offrant une fermeture supérieure à l'édifice, assurant ainsi la protection de l'intérieur (occupants et espace).

En plus de sa fonction de protection, le toit a également une dimension esthétique et contribue à façonner l'environnement architectural, s'harmonisant ou se démarquant du site. Elle constitue souvent la cinquième façade du bâtiment, marquant ainsi l'achèvement de sa structure.

Selon DICOBAT¹, la toiture est un « *ensemble des ouvrages et matériaux de revêtement qui assurent le “couvert” d'un édifice. La couverture, partie extérieure du toit, ne participe pas à la stabilité des ouvrages, mais doit protéger de façon étanche et durable les superstructures d'un édifice contre les intempéries* » .

2.1.1. Pourquoi on s'intéresse aux toits ?

Les toits sont généralement les composants les plus exposés de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment (Yannas et al., 2006). Sous les faibles latitudes, la conception de la cinquième façade est souvent négligée, pourtant que c'est la surface qui reçoit une quantité significative de rayonnement solaire. Ces surfaces couvrant environ 15 à 24% de certaines zones urbaines (Akbari et al., 2008, 2009) ainsi, il contribue à environ 50 à 60% de la charge de refroidissement des bâtiments dans les zones climatiques chaudes et sèches, ainsi que chaudes et humides (Rawat and Singh, 2022). Selon Al-Obaidi et al., (2014), la toiture est responsable de 70% des gains chaleur totale.

D'après Abdesselam, Mohamed, (2013) cité par Thierry et al., (2019) , le toit plat reçoit 40% de l'énergie solaire en comparaison aux différentes façades de

¹ C'est un dictionnaire des mots des constructions. Il fournit une maîtrise complète de tous les termes du domaine du bâtiment.

l'enveloppe. En outre, pour une surface de 162 m², la toiture reçoit 1134 kwh du rayonnement solaire incident durant le mois du Juin (Figure 2.1).

En somme, sa conception (la forme) et sa construction (Matérialité) jouent un rôle important dans la dissipation de la chaleur et la fourniture de refroidissement pour le confort thermique des occupants. Ainsi, pour une conception thermique et énergétique optimale, il est primordial et prioritaire de garantir une protection solaire efficace au niveau de la toiture.

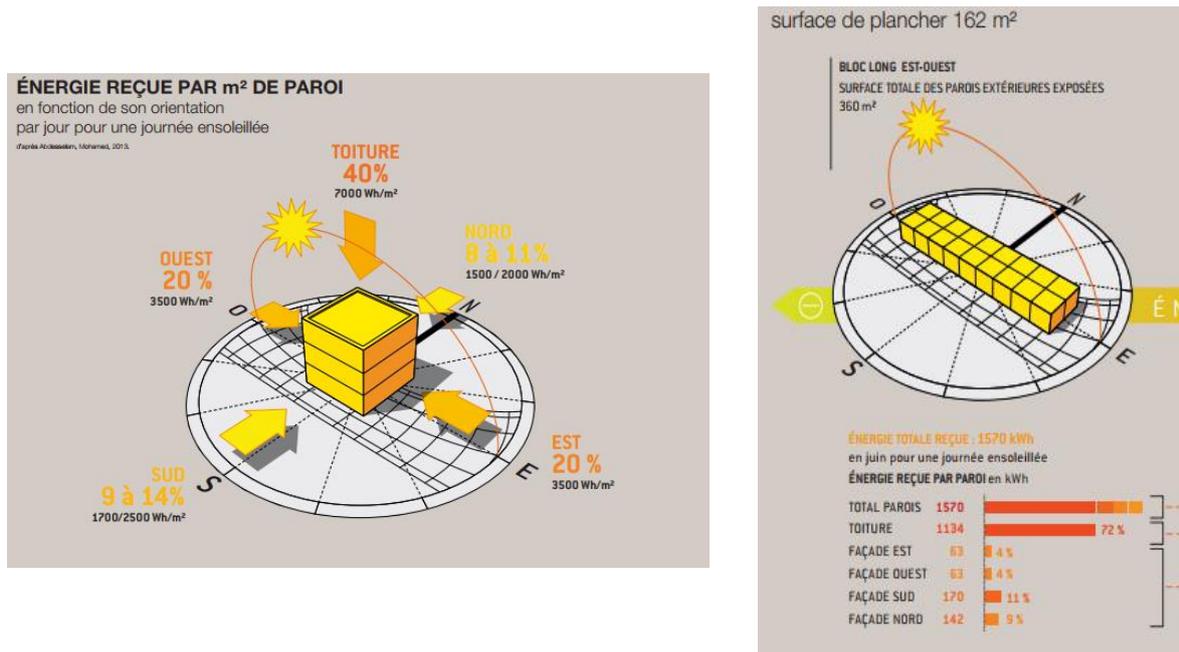


Figure 2.1 : La quantité du rayonnement solaire reçue par m² des parois opaques des bâtiments. (Source : Thierry et al., (2019)

2.2.2. Les fonctions des toits

Cet élément possède plusieurs fonctions distinctives, à savoir :

2.2.2.1. Fonctions physiques

Le rôle principal de la toiture d'un bâtiment est de protéger les occupants contre les conditions climatiques extrêmes telles que l'exposition au soleil, les précipitations, les vents violents et les tempêtes. Sa conception lui confère plusieurs responsabilités essentielles :

- **Prévention des fuites d'eau :** La toiture doit être conçue de manière à évacuer efficacement l'eau de pluie, en utilisant une pente appropriée, afin de garantir la stabilité de la structure et d'empêcher toute infiltration d'eau.
- **Contrôle du rayonnement solaire :** La toiture doit résister aux rayons ultraviolets (UV) ou être protégée par des dispositifs ou des revêtements réfléchissants. Cela permet de prolonger la durée de vie des toits en réduisant les effets néfastes du rayonnement solaire.
- **Capacité de supporter les charges :** La toiture doit être en mesure de supporter les charges permanentes, d'exploitation et accidentelles. Cela inclut le poids de la structure elle-même.

En maintenant sa stabilité structurelle, sa résistance mécanique et thermique, la toiture assure une protection optimale de l'intérieur du bâtiment et garantit la sécurité des résidents.

2.2.2.2. Fonction de protection thermique

Le toit occupe une place cruciale en tant qu'élément le plus exposé d'un bâtiment, absorbant ainsi le rayonnement solaire et provoquant une augmentation de sa température de surface. Selon Yannas et al., (2006), les toits jouent un rôle protecteur important en assurant un contrôle solaire, en garantissant une isolation thermique adéquate et en fournissant une forte capacité de stockage de chaleur. Il existe trois aspects importants à considérer pour assurer cette protection thermique.

- 1- Contrôle solaire :** Dans les régions à forte radiation solaire, il est important de contrôler l'absorption solaire pour préserver l'ambiance intérieure. Cela peut être réalisé en utilisant des revêtements externes de couleur claire (réfléchissants) et en intégrant des techniques d'ombrage pour réduire l'exposition directe aux rayons du soleil.
- 2- Isolation thermique :** Généralement, L'échange de chaleur entre le bâtiment et l'environnement extérieur dépend de la différence de température, de l'exposition et des propriétés thermiques des éléments extérieurs du bâtiment. L'isolation thermique permet de réduire ces échanges, ce qui réduit la dépendance aux énergies conventionnelles pour maintenir le confort intérieur.

3- Capacité de stockage de chaleur : La capacité thermique des éléments constructif de l'enveloppe joue un rôle crucial dans les climats chaud set secs. Elle permet de stocker la chaleur diurne et de différer son entrée dans les espaces intérieurs vers la nuit. Un bâtiment avec une capacité thermique élevée a tendance à maintenir des températures intérieures plus constantes.

En somme, la forme doit être développés selon le type du climat tandis que les propriétés thermiques des matériaux de la toiture tels que l'inertie thermique, la présence de l'isolant, et la couleur de la surface externe, sont essentielles pour assurer une protection thermique efficace.

2.2.2.3. Fonction environnementale

Les toitures des bâtiments nécessitent des dissipateurs d'énergie appropriés pour dissiper l'excès de chaleur et garantir un confort thermique optimale et une faible demande de climatisation. Dans leur livre intitulé "*Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*", Yannas et al., (2006) soulignent l'importance de mettre en œuvre des stratégies de rafraîchissement passif par le biais des toits. Ces stratégies comprennent :

- 1- **Refroidissement radiatif :** Il s'agit d'augmenter la dissipation de la chaleur absorbée par les surfaces, notamment pendant les heures nocturnes en utilisant des revêtements ou des écrans radiatifs.
- 2- **Refroidissement par évaporation :** Cette technique favoriser l'évaporation de l'eau pendant la journée pour réduire la chaleur absorbée. Les toits-étangs sont un exemple de cette approche.
- 3- **Refroidissement par convection :** Il s'agit de favoriser les mouvements d'air pour évacuer la chaleur loin du bâtiment, qui peut être réalisé en installant des ouvertures sur la surface du toit afin de créer un effet de tirage.
- 4- **Toits verts :** Les toits végétalisés réduisent les transferts de chaleur, atténuent l'effet d'îlot de chaleur urbain, absorbent le CO₂ par les plantes et favorisent la biodiversité urbaine.

Ces stratégies de rafraîchissement passif par la toiture offrent des avantages significatifs en termes de confort thermique, d'efficacité énergétique et de durabilité environnementale. Il est donc essentiel de les intégrer lors de la conception et de la

construction des bâtiments afin de réduire la dépendance à la climatisation et de minimiser l'impact environnemental.

2.2.2.4. Fonction psychologique

« En zone aride, ils sont massifs et plats pour offrir une protection conséquente face aux conditions extrêmes et créer un espace de plus le soir pour se rencontrer » (Le CAUD², 2021).

Dans les climats chauds et secs, le toit est considéré comme une extension de la vie. Il offre un sentiment de sécurité, d'intimité et de confort, jouant ainsi un rôle essentiel dans la perception psychologique de l'espace. En plus de leur contribution esthétique et identitaire aux bâtiments, les toitures offrent un confort thermique et acoustique, contribuant au bien-être des occupants.

2.2.3. Les types de toitures

La figure 2.2 présente les types des toitures qui existent autour du monde.

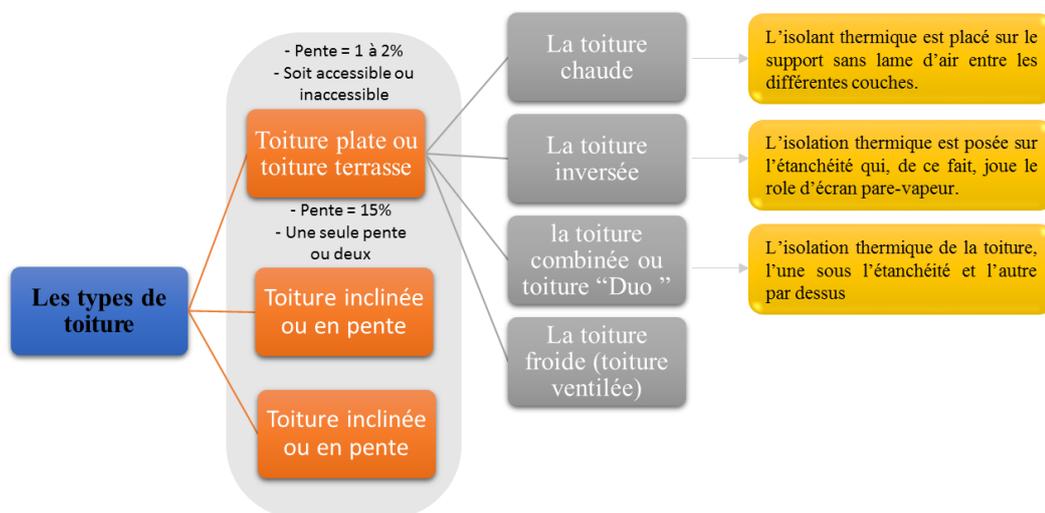


Figure 2.2 : Les types de toiture existant dans l'architecture moderne.

(Source : Adapté par Auteur).

² <https://www.caue-martinique.com>.

2.2.4. Pratique de construction des toitures en Algérie

2.2.4.1. Toiture traditionnelle

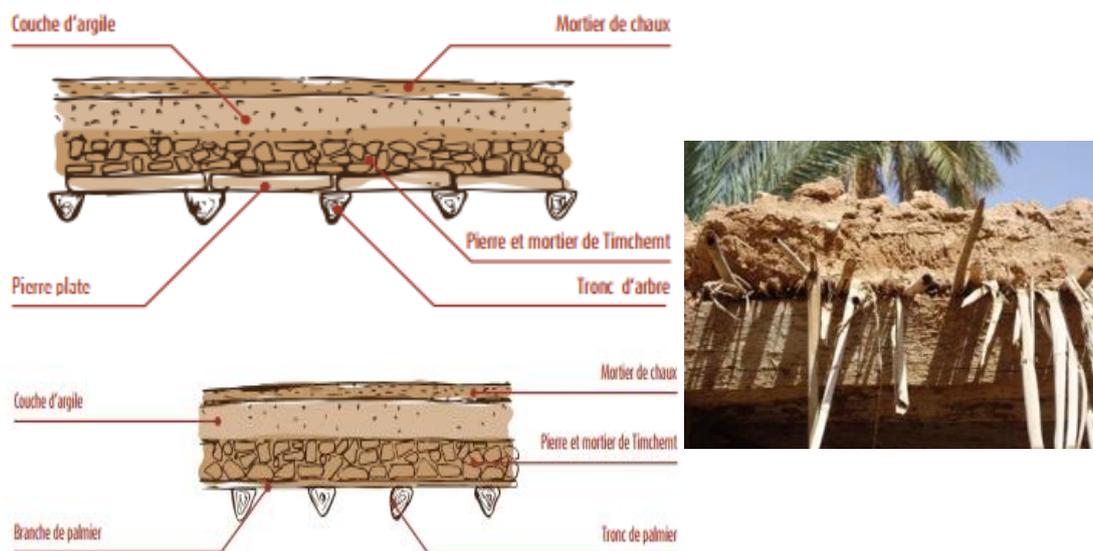


Figure 2.3 : Détails de construction de quelques types de toitures traditionnelles employées au M'Zab. (Source : (OPVM, 2013))

Dans les climats chauds et secs d'Algérie, les toitures-terrasses ou plates sont couramment utilisées dans l'architecture vernaculaire. Ces derniers sont construits à partir des matériaux locaux comme la pierre, la terre, la boue et la chaux, et se distinguent par leur épaisseur. Leur avantage réside dans leur forte inertie thermique, ce qui leur permet de réguler la température interne en stockant la chaleur pendant la journée et en la libérant progressivement pendant la nuit. Dans certaines régions chaudes d'Algérie, comme El-Oued, les toitures en voûte ou en dôme étaient largement utilisées dans l'architecture traditionnelle. La figure 2.3 présentent détails de construction de quelques types de de toiture dans la vallée de M'Zab.

2.2.4.2. La toiture contemporaine

La modernisation de la construction a donné lieu à l'émergence de nouvelles typologies de toitures en Algérie, à la fois techniquement avancées et culturellement ambiguës, se démarquant de l'architecture traditionnelle. Les toitures plates sont largement répandues, principalement construites à partir de matériaux à base de ciment (figure 2.4).

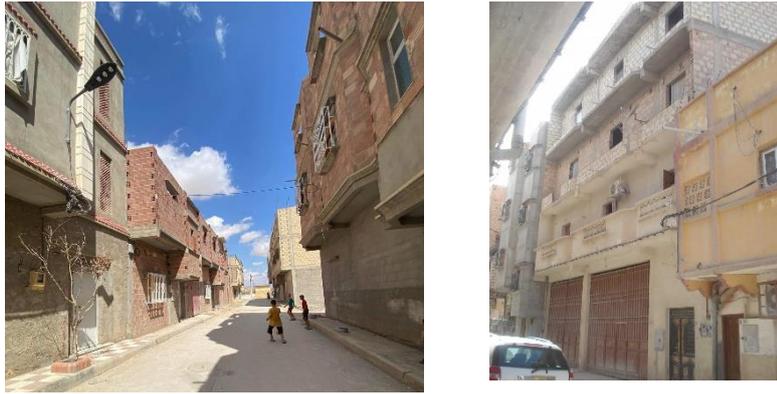


Figure 2.4 : La typologie la plus répandue des habitations privées (autoproduites) à Biskra. (Source : Auteur, 2018)

Elles comprennent généralement une couche de béton armé appelée dalle de compression d'une épaisseur de 4 cm, des parpaings creux ou des entrevous en brique (16 cm) et des poutrelles reposant sur des poutres, comme illustré dans la figure 2.5. D'après Hernández-Pérez, (2021) la température surfacique de ce type de toit peuvent atteindre des températures de 88 °C lors les jours d'été chauds et ensoleillés.

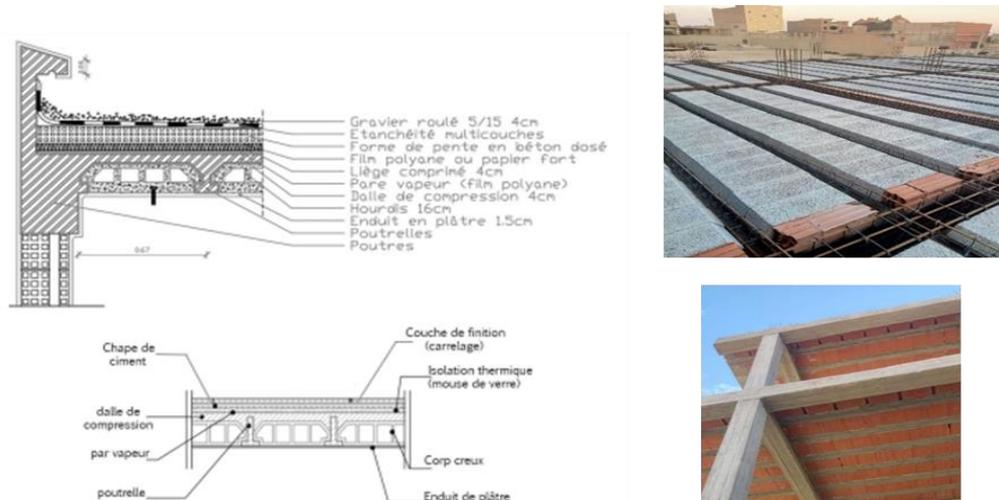


Figure 2.5 : Détails de construction de toiture en Algérie, en haut, une toiture d'habitat collectif et en bas une toiture d'habitation privée. (Source : Adapté par auteur, 2019)

2.2.5. Comportement thermique des parois opaques d'un bâtiment

La performance thermique d'un bâtiment dépend principalement du transfert de chaleur entre ses composants et son environnement extérieur. La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur joue un rôle clé dans le flux d'énergie ou le flux de chaleur à travers le bâtiment, affectant ainsi la demande de chauffage ou de refroidissement du bâtiment (Nayak and Prajapati, 2006). En outre, Kabore, (2015) déclare que « *la morphologie, l'orientation, et l'organisation des espaces caractérisent les modalités des interactions et transferts d'énergie entre l'intérieur et l'extérieur. Les transferts d'énergie sont essentiellement des transferts de masse et de chaleur* ». Selon Saint-Gobain, (2012), le transfert de chaleur se produit principalement par trois modes de transmission (voir la Figure 2.6) :

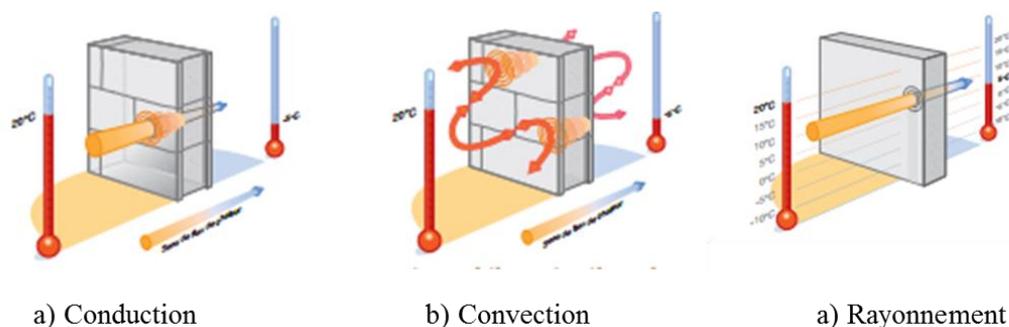


Figure 2.6 : Les modes de transfert de chaleur. (Source : Saint-Gobain, 2012)

a) **La conduction** : grâce à une différence de température, la chaleur se propage de proche en proche à travers l'agitation thermique des particules constituant dans un corps solide. Elle dépend plusieurs facteurs comme la conductivité thermique du matériau, sa densité, sa capacité thermique...etc.

b) **La convection** : la chaleur se transfère entre un fluide (généralement de l'air ou de l'eau) et une surface d'un corps solide (murs, planchers et toits). Il implique la circulation d'un fluide le long de la surface des parois pour transférer la chaleur.

c) **Le rayonnement** : il s'agit d'un transfert de chaleur entre deux corps par des ondes électromagnétiques, sans nécessiter de contact direct. Dans les études sur le transfert de chaleur, le rayonnement thermique est d'un intérêt majeur. Lorsque le rayonnement solaire atteint une surface opaque telle qu'un toit, une partie est absorbée et transmet à travers la surface tandis que le reste est réfléchi.

Ces phénomènes dépendent principalement de trois facteurs (voir Figure 2.7) :

1. **Réfectivité** : Le flux solaire réfléchi dépend du facteur de réflexion solaire de la surface, également connu sous le nom d'albédo, qui est principalement lié à sa couleur.
2. **Absorbivité** : Le flux solaire absorbé dépend du facteur d'absorption solaire de la surface.
3. **Transmissivité** : L'énergie thermique absorbée par les parois est ensuite rayonnée vers d'autres surfaces ; la transmissivité dépend des propriétés émissives des matériaux, également appelées émissivités.

Le transfert de chaleur à travers ces mécanismes est principalement influencé par les propriétés thermo-physiques des matériaux, notamment la conductivité thermique (exprimée en W/m.K) et la résistance thermique (exprimée en m².K/W). De plus, la diffusivité et l'effusivité thermiques fournissent la compréhension de la transmission de chaleur à travers un matériau.

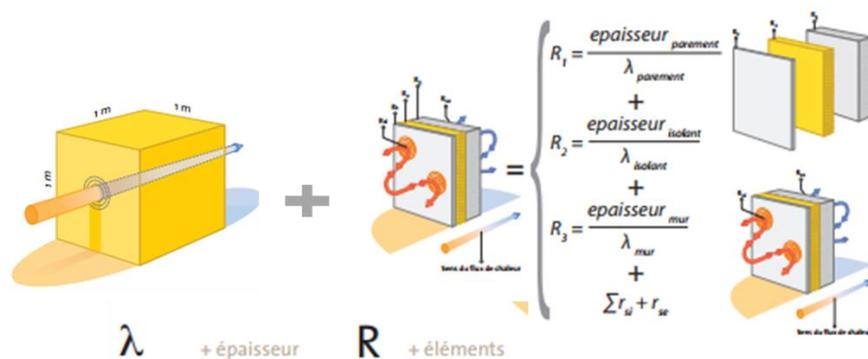


Figure 2.7 : La conductivité thermique et la résistance d'un matériau. (Source : Saint-Gobain, 2012)

- 1- **L'effusivité thermique** (exprimée en J/m².S.°C) mesure la capacité d'un matériau à absorber et à restituer l'énergie thermique.

$$Ef = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot C}$$

- 2- **La diffusivité thermique** (exprimée en m²/s ou α) quantifie la rapidité avec laquelle la chaleur se propage à travers la masse d'un matériau.

$$d = \frac{\lambda}{\rho \cdot C}$$

ρ : la masse volumique (kg/m^{-3});

λ : la conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

C : la chaleur spécifique ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

La maîtrise des phénomènes thermiques qui s'opèrent à travers les parois opaques, notamment le toit permet de proposer des solutions de conception adéquates afin d'obtenir un bâtiment performant sur le plan thermique et énergétique.

2.2. La conception passive

L'humanité a utilisé la conception passive dès les premiers temps de construction des logements, en adaptant les maisons à leur climat spécifique grâce à des techniques ingénieuses. Les principes de cette approche reposent sur l'exploitation des éléments naturels afin d'améliorer le confort sans aucune dépendance aux systèmes mécaniques. Par ailleurs, Altan et al., (2016) voient que la conception qui maintient une température confortable à l'intérieur du bâtiment en exploitant les conditions climatiques et les éléments naturels, dans le but de réduire, voire éliminer, la dépendance aux systèmes mécaniques pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage, est appelée 'une conception passive'.

Les stratégies de conception passive peuvent être regroupées selon les critères illustrés dans la figure 2.8. Ces derniers sont déterminés en fonction des caractéristiques climatiques propres à chaque localité.



Figure 2.8: Stratégies d'une conception passive. (Source : Adapté par Auteur, 2019)

2.2.1. Le rafraîchissement passif

« Contrôler la chaleur qu'un bâtiment reçoit de son environnement, c'est ce que le refroidissement passif signifie » **AIA Research Corporation, (1979).**

Dans de nombreux pays chauds, en particulier ceux ayant un climat chaud et sec, la demande croissante de refroidissement des espaces de vie a conduit à l'intérêt pour les systèmes de refroidissement passifs à faible consommation d'énergie. Cet intérêt découle du désir de préserver l'énergie et de réduire la forte demande en électricité lors des pics estivaux.

Bien que le terme "*refroidissement passif*" soit relativement récent, sa pratique remonte à des temps immémoriaux à travers le monde. Givoni, (2011) a affirmé que le refroidissement passif consiste à considérer tout traitement du bâtiment qui permettent de réduire sa charge de refroidissement, telles que le contrôle solaire, la réduction des apports de chaleur internes, etc., comme des techniques de refroidissement passif. En outre, selon Alvarado *et al.*, (2009), le refroidissement passif implique la conception des bâtiments et la sélection des matériaux de construction de manière à réduire l'absorption et la conduction de la chaleur à travers le toit et les murs.

Les systèmes de refroidissement passif sont des techniques écologiques et économes en énergie qui ont pour objectif de limiter l'entrée de chaleur provenant de sources externes dans l'espace de vie, ou d'évacuer la chaleur générée à l'intérieur du bâtiment vers un puits thermique naturel. Ces méthodes permettent d'améliorer le confort thermique avec une consommation d'énergie réduite, voire nulle. À ce sujet, les techniques de refroidissement passif peuvent être classées en trois catégories principales (Limb, 1998; Matheos Santamouris, 2005); à savoir :

1- Prévention des gains de chaleur (protection)

La protection implique une conception réfléchie des éléments du bâtiment afin de réduire les apports de chaleur en limitant le rayonnement et la conduction à travers les parois opaques, tout en assurant une gestion efficace des gains de chaleur internes. Elle nécessite également une compréhension approfondie de la radiation solaire, de l'ombrage, ainsi que des caractéristiques des matériaux de surface (couleur, texture..etc).

2- Modulation des gains de chaleur (modification)

Ce principe repose sur l'utilisation de matériaux de construction ayant une capacité de stockage thermique élevée. L'objectif principal est d'amortir la pénétration de la chaleur extérieure dans le bâtiment, évitant ainsi les variations de température excessives.

3- La dissipation thermique

Les techniques de dissipation de chaleur reposent sur l'utilisation d'un environnement plus frais pour éliminer l'excès de chaleur du bâtiment. Son évacuation naturelle de l'intérieur du bâtiment s'est effectuée généralement par le rayonnement, évaporation, convection ou transfert thermique avec le sol. Le potentiel de ce principe dépend fortement des conditions climatiques.

En résumé, la maîtrise des apports de chaleur, qu'ils proviennent de sources internes (personnes et appareils) ou externes (radiation solaire directe), constitue la première étape essentielle de toute approche de refroidissement passif des bâtiments.

2.2.2. Les techniques de rafraîchissement passif par la toiture

“Before energy was plentiful and air conditioning omnipresent, designers came up with ingenious techniques for letting the forces of nature keep their buildings cool. Today's designers are relearning those techniques. And coming up with a few more.”

AIA Research Corporation, 1979

Différentes techniques de refroidissement passif sont disponibles, chacune avec ses propres principes de fonctionnement et niveaux de performance distincts. La faisabilité de ces techniques dépend largement du climat local, ainsi que des caractéristiques structurelles et architecturales spécifiques du bâtiment. Figure 2.9 présente une classification des approches de refroidissement passif pour les bâtiments. Dans les climats chauds et secs, l'accumulation de l'énergie thermique non désirable dans l'enveloppe du bâtiment, en particulier dans les toits, est un problème majeur. Cela est particulièrement pertinent dans les zones où des matériaux à base de ciment, tels que le béton, sont couramment utilisés dans la construction.

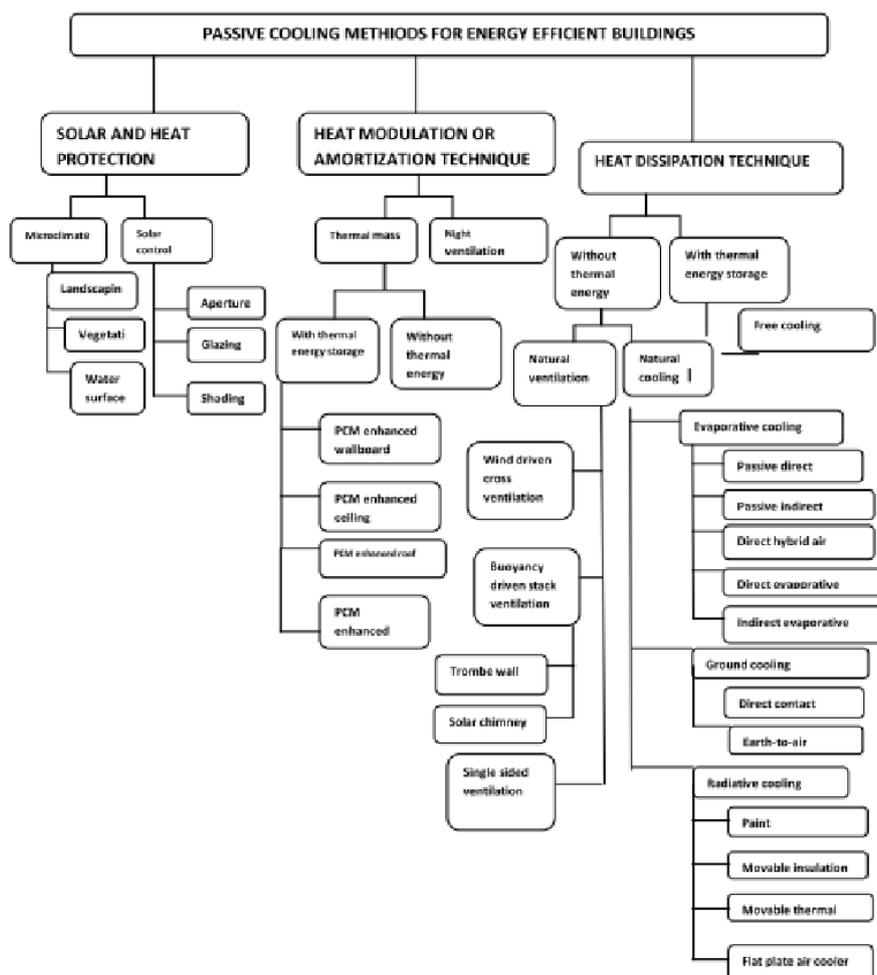


Figure 2.9 : Classification des approches de refroidissement passif pour les différents types de bâtiments. (Source : Geetha and Velraj, 2012)

Généralement, le béton a la capacité de conserver l'énergie thermique pendant de longues périodes, surtout lorsqu'ils sont exposés à des températures ambiantes élevées et à un rayonnement solaire intense. Malheureusement, ces matériaux ont également du mal à dissiper la chaleur accumulée pendant la nuit, lorsque le refroidissement par rayonnement vers le ciel est important, entraînant une rétention de chaleur prolongée. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de proposer et d'appliquer un système de refroidissement passif efficace et abordable qui puisse utiliser des matériaux disponibles pour réduire la consommation d'énergie.

Après une analyse approfondie de la littérature existante, il est évident qu'il existe une variété de systèmes passifs par la toiture qui présentent des niveaux d'efficacité, de coût et de défis différents (Bhamare *et al.*, 2019). Dans le cadre de notre étude, les approches de rafraîchissement passif par rayonnement, telles que le cool roof

et le roof pond, l'approche évaporatoire par l'utilisation d'une toiture végétalisée, ainsi que l'approche de refroidissement par ventilation naturelle en utilisant une toiture ventilée, ont démontré les meilleures performances thermique, énergétique, financière et environnemental pour les bâtiments résidentiels dans les climats chauds.

La Figure 2.10 présente une représentation graphique des divers procédés de rafraîchissement passif par la toiture les plus adaptés aux bâtiments résidentiels dans les climats chauds, tels qu'identifiés dans la littérature. Les propriétés des matériaux de la couche externe d'un toit jouent un rôle crucial dans la détermination de la quantité de chaleur transmise par sa surface (Kolokotroni *et al.*, 2018). Selon la littérature existante, les revêtements ou membranes de toits frais avec une haute réflectance solaire et une haute émissivité thermique sont considérés comme des stratégies passives abordables, respectueuses de l'environnement et faciles à installer.

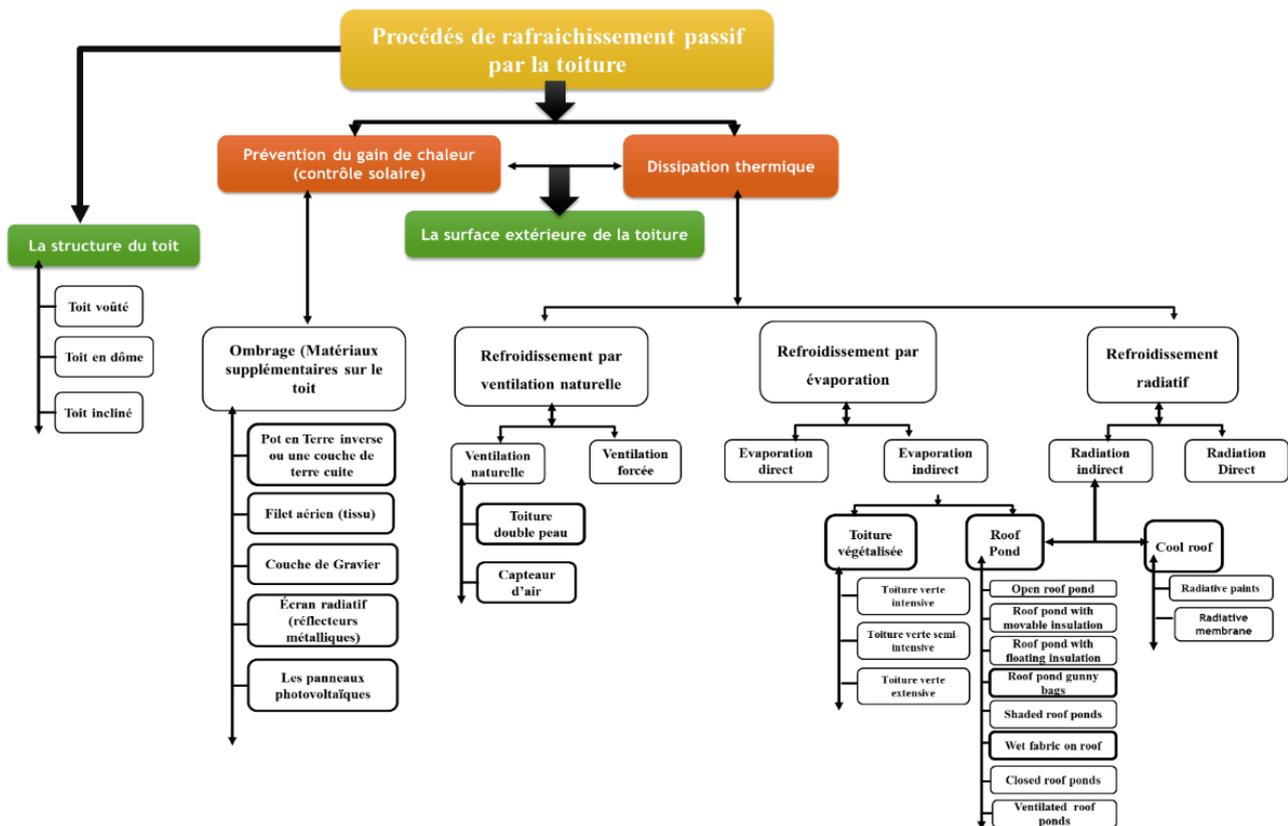


Figure 2.10: Techniques de rafraîchissement passif par la toiture les plus adaptés aux bâtiments résidentiels dans les climats chauds. (Source : Auteur, 2019)

Des chercheurs tels que Boixo et ses collègues ont souligné la simplicité de cette approche, car les propriétés optiques peuvent être contrôlées en ajustant simplement la couleur du toit ou en ajoutant des matériaux hautement réfléchissants (Boixo *et al.*,

2012). En outre, l'application des toitures végétalisées, les toits-étangs et les toitures ventilées ont également été largement étudiés et ont prouvé leur efficacité pour réduire l'absorption de la chaleur solaire, améliorer l'isolation du toit et rafraîchir la surface et les environs par évaporation. De plus, ces stratégies offrent des avantages sociaux, environnementaux et économiques.

Il convient de souligner qu'il existe d'autres techniques de toiture passive sont mentionnées dans la littérature, mais leur applicabilité peut être limitée en raison des contraintes financières des propriétaires de bâtiments littérature (Emziane and Al Ali, 2015; Haghighi et al., 2016; Shafique et al., 2020). Par conséquent, l'aspect économique devrait être soigneusement pris en compte lors de la détermination de la sélection optimale des stratégies passives de toiture.

2.2.2.1. Aperçu sur la technique du « Cool roof »

2.2.2.1.1. Qu'est-ce qu'un cool roof ou « Toit frais » ?

"If all roads were made a paler colour and all roofs converted to cool roofs, there could be "the equivalent effect of taking every car in the world off the road for 11 years".

Déclaration du **Steven Chu** (Secrétaire d'État américain d'énergie) dans le symposium des lauréats du prix Nobel au St James Palace, le 26 mai 2009.

En fusionnant des concepts anciens avec de nouvelles technologies, les techniques des toits réfléchissants ont connu une croissance significative au cours de la dernière décennie. Dans les climats chauds tels que l'Inde, où la gestion des gains solaires constitue une préoccupation majeure, les toits étaient traditionnellement recouverts de chaux et de craie blanche, ou des tuiles de céramique blanc (une pratique populaire chaque été) pour maintenir une surface de terrasse frais, qui se traduit par une influence positive sur la température intérieure du bâtiment. Ces toits sont appelés "Cool Roofs" (Tetali, 2011).

Levinson and Akbari, (2010) ont défini les toits froids comme des *"toits qui restent frais au soleil en minimisant l'absorption solaire et en maximisant les émissions thermiques - ils diminuent le flux de chaleur du toit vers le bâtiment, réduisant ainsi le besoin d'énergie de refroidissement des locaux dans les bâtiments climatisés"*. Selon

une autre définition récente du Cool Roof Rating Council (CRRC)³, un "Cool roof" est une structure qui réfléchit la lumière du soleil et émet de la chaleur vers le ciel au lieu de l'absorber ou de la transférer au bâtiment situé en bas. "(Cool Roof Rating Council, 2020). Pour sa part, Dominique *et al.*, (2016) déclarent que « ces types de toits restent littéralement frais, réduisant ainsi la quantité de chaleur retenue et transférée au bâtiment situé en dessous, maintenant ainsi le bâtiment à une température plus fraîche et plus constante ». La Figure 2.11 présente le principe de protection solaire d'un « Cool Roof ».

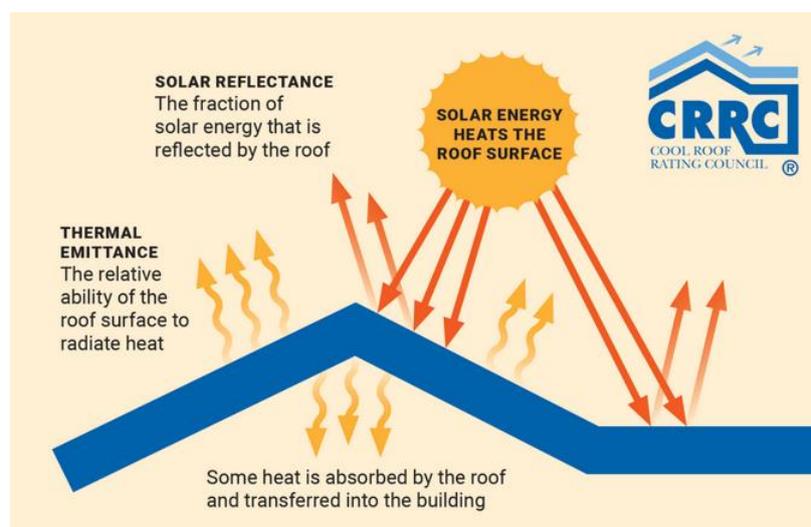


Figure 2.11 : Le principe de protection d'un « Cool Roof ». (Source: Cool Roof Rating Council (CRRC)).

À titre d'exemple, durant une journée estivale typique, la température d'une toiture conventionnelle peut grimper jusqu'à 88 °C, tandis qu'un toit frais ne dépasse pas les 49 °C (Hernández-Pérez, 2021). De plus, les toits frais présentent l'avantage indéniable d'économiser environ 15 % d'énergie dans les régions chaudes (Rawat and Singh, 2022).

En somme, les Cool roofs « Toits frais », également connus sous les noms de « Toits blancs », « Toits réfléchissants » ou « Toits radiateurs », se distinguent par leur capacité à maintenir des températures de surface inférieures à celles des membranes sombres. Leur réflectance solaire élevée, connue sous le nom d'albédo, leur permet d'absorber moins de rayonnement solaire. Ainsi, ils dissipent efficacement la chaleur

³ Le Cool Roof Rating Council est une organisation à but non lucratif (501(c)(3)) qui développe des méthodes correctes, précises et crédibles d'évaluation et de labellisation des propriétés radiatives des produits de toiture et de murs extérieurs.

excédentaire du bâtiment par rayonnement, ce qui limite le transfert de chaleur par conduction vers l'intérieur des espaces (Figure 2.12). Grâce à ces caractéristiques, les toits frais contribuent à réduire la demande en énergie de refroidissement et à améliorer le confort thermique des bâtiments.

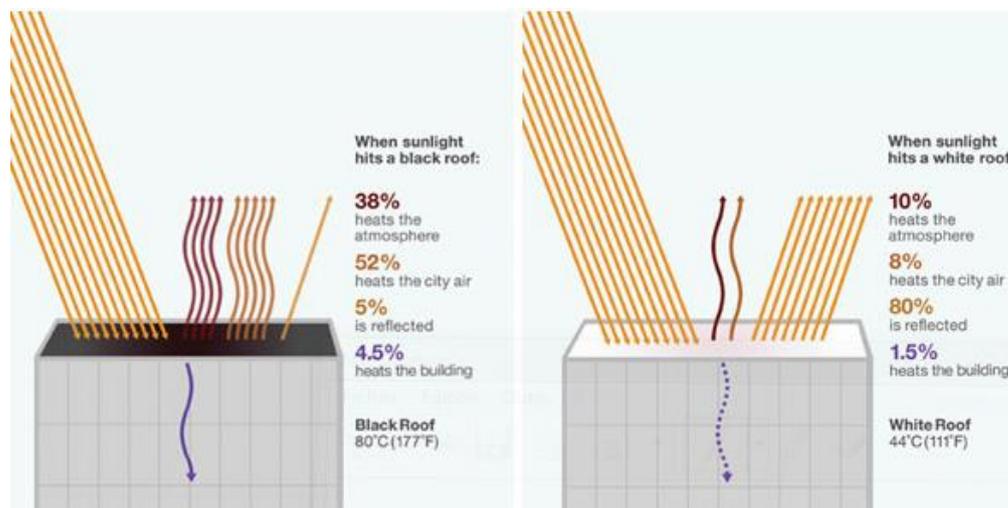


Figure 2.12 : La différence entre un toit frais et un toit conventionnel. (Source :

https://mcgrawimages.buildingmedia.com/CE/CE_images/2011/May_crrc_3.jpg)

2.2.2.1.2. Le mécanisme des toits frais

Lorsqu'un matériau est exposé au rayonnement solaire, il peut émettre, transmettre ou réfléchir ce rayonnement, soit de manière individuelle, soit en combinaison. Pour comprendre le fonctionnement des revêtements des toits frais, Levinson et al., (2005) affirment qu'il suffit de considérer leur capacité à réfléchir à la fois une quantité élevée de rayonnement visible et infrarouge (Near Infrared NIR), ainsi qu'à émettre efficacement la chaleur. Ces caractéristiques permettent de limiter la quantité de rayonnement solaire qui pénètre dans le bâtiment.

Afin de mesurer l'efficacité des « Cool Roofs », il est important de se concentrer sur les propriétés suivantes :

a) La réflectance solaire

Fait référence à la capacité d'une surface d'un matériau à réfléchir à la fois la lumière infrarouge (NIR) et ultraviolet (UV) (englobant l'ensemble du spectre de rayonnement solaire (longueur d'onde de 0.3-2.5 μm), y compris les longueurs d'onde visibles et invisibles (Elnabawi et al., 2022). Les agents chimiques spécifiques utilisés dans la production de peinture fraîche jouent un rôle crucial dans la détermination des

valeurs de réflectance solaire (SR), pouvant dépasser 80%, comme l'a rapporté (Costanzo, 2016). Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer la réflectance solaire des matériaux. Les deux méthodes les plus couramment utilisées sont l'ASTM⁴ 903-12, qui utilise un spectrophotomètre équipé de sphères intégrantes, et l'ASTM C1549-09, qui utilise un réflectomètre solaire portable (Hernández-Pérez *et al.*, 2017). Figure 2.13 présente la réflectivité solaire des matériaux mesurée selon ASTM E 903.

Lorsqu'un toit n'est pas en mesure de ne parvient pas à refléter l'énergie incidente, il l'absorbe à la place, et c'est là que l'émissivité thermique devient un facteur pertinent.

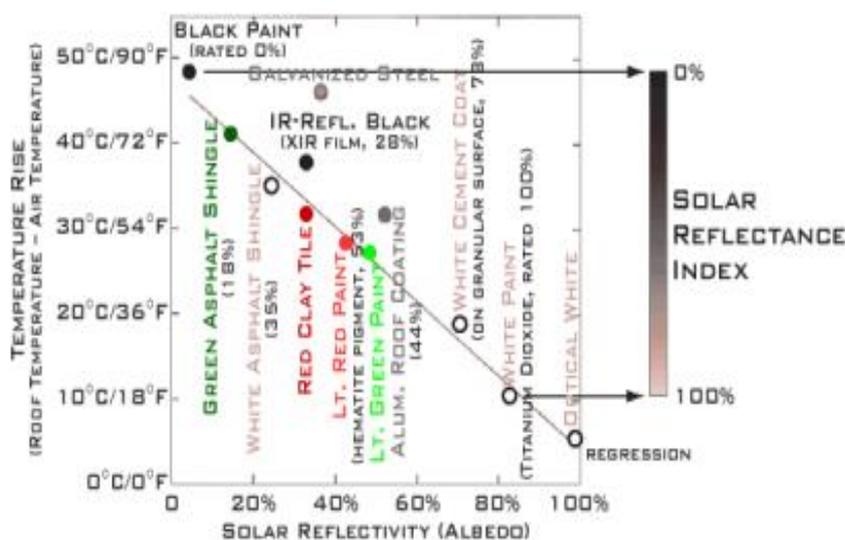


Figure 2.13 : La réflectivité solaire des matériaux mesurée selon ASTM E 903.

(Source : Tetali, (2011)).

a) Emittance thermique (IE)

C'est la forte émittance infrarouge. Il s'agit d'un revêtement froid qui a la capacité de réémettre la chaleur absorbée et d'évacuer le rayonnement thermique dans la gamme des infrarouges (longueur d'onde de 4 à 80 μm). Cela doit se faire rapidement, sinon la chaleur sera piégée dans la surface du toit et il y aura davantage de transfert de chaleur vers les espaces du bâtiment (Pisello, 2017).

Ces deux propriétés sont couramment évaluées sur une échelle allant de 0 à 1 ou de 0 à 100 %. Deux méthodes les plus utilisées pour mesurer l'émissivité thermique sont

⁴ Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres

l'ASTM C1371, qui utilise des émissomètres portables, et l'ASTM E408, qui utilise des instruments portables d'inspection-mesure (Hernández-Pérez *et al.*, 2017). Selon Pisello, (2017), les propriétés essentielles de la réflectance solaire et de l'émissivité thermique sont fortement influencées par la couche extérieure de la surface exposée au rayonnement solaire. Elles ont donc un impact significatif sur l'équilibre thermique des surfaces horizontales lorsqu'elles sont soumises à des conditions stables de rayonnement solaire.

b) L'indice de réflectance solaire (SRI)

Il est important de se souligner que la réflectivité solaire et l'émissivité thermique ne garantissent pas la fraîcheur d'un toit. Afin d'évaluer les caractéristiques thermiques d'un matériau de toit, l'indice de réflectance solaire (SRI) est un paramètre utile. Le SRI fournit des informations sur le potentiel de refroidissement passif d'une surface cool par rapport à une surface noire standard (avec une réflectance solaire de 5 % et une émissivité thermique de 90 %), qui a un SRI de zéro, et à une surface blanche standard (avec une réflectance solaire de 80 % et une émissivité thermique de 90 %), qui a un SRI de 100. Le calcul de SRI est comme suit (2) (Pisello, 2017) :

$$SRI = \frac{(T_{noir} - T_{surface})}{(T_{noir} - T_{blanc})} \times 100 \quad (2)$$

Où, T (noir, surface et blanc) : est la température des surfaces dans des conditions stable.

Levinson et al., (2010) ont déclarées que l'indice SRI ne peut fournir une évaluation complète des performances des revêtements rafraîchissants en raison de l'influence de divers facteurs climatologiques (le rayonnement solaire, la température, l'humidité, la vitesse du vent, les précipitations et la pollution) qui doivent être pris en compte.

2.2.2.1.3. Équilibre énergétique des toits frais

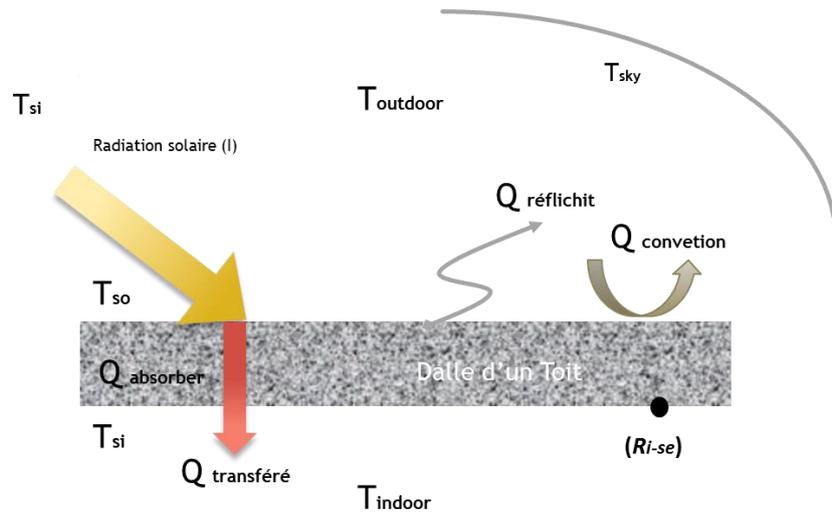


Figure 2.14: Bilan énergétique d'un système de toiture. (Source : Adapter par Auteur)

La Figure 2.14 illustre le bilan énergétique d'un toit standard. Cependant, pour un toit frais, le bilan énergétique de la surface peut être calculé en utilisant la même équation que celle d'un toit standard (équation 3) (Gagliano *et al.*, 2015). La différence réside dans la réflectance de la surface (r) qui joue un rôle déterminant dans le bilan énergétique.

$$\underbrace{q_{\text{transférer}}}_{\sigma \cdot I} + \underbrace{q_{\text{absorber}}}_{\tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{so}}^4} - \underbrace{q_{\text{radiant}}}_{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{so}}^4} - \underbrace{q_{\text{convective}}}_{h_c \cdot (T_{\text{so}} - T_{\text{air}})} = 0 \quad (3)$$

Où,

T_{so} : température de la surface extérieure (K).

T_i : est la température de l'air à l'intérieur (K).

r : est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,6685 \cdot 10^{-8}$ [W/m² K⁴]).

σ : réflectance solaire, compris entre 0 et 1.

ε : émittance thermique, compris entre 0 et 1.

I : irradiance solaire [W/m²].

T_o : température de l'air extérieur (K).

T_{sky} : température du ciel (K).

h_c : le coefficient de transfert de chaleur par convection externe [W/m² K].

R_{i-se} : résistance thermique globale de la toiture. [W/mK].

2.2.2.1.4. Les matériaux de Cool Roof

L'application de matériaux réfléchissants "Cool" sur les toits des bâtiments représente une mesure de rénovation écoénergétique, rentable, respectueuse de l'environnement et économiquement réalisable. Ces matériaux jouent un rôle significatif dans la rétention et la prévention de la chaleur, ce qui se traduit par une amélioration du confort thermique interne et une réduction de la demande énergétique pour la climatisation. En outre, ils offrent également un meilleur confort extérieur et contribuent à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. De plus, Leur utilisation permet également de prolonger la durée de vie des toits, ce qui entraîne des économies sur les coûts d'entretien et réduit la quantité de déchets générée. (Antonaia et al., 2016; Hernández-Pérez et al., 2017; Pisello, 2017; Seifhashem et al., 2018)

En pratique, les matériaux de toit frais sont généralement des membranes, des revêtements, des peintures, du métal, des bardeaux et des tuiles (Pisello, 2017). En outre, les toits frais ou réfléchissants sont généralement de couleur blanche et peuvent être mono-couche ou liquides (Figure 2.15). Il est important de tenir compte du spectre infrarouge (NIR), car environ la moitié de la puissance solaire se présente sous cette forme de rayonnement (Mastrapostoli et al., 2016). Récemment, des matériaux colorés réfléchissants ont été développés pour répondre à la demande des clients en matière de toits colorés. Ces matériaux sont disponibles dans une variété de couleurs populaires et ont une réflectance similaire à celle des matériaux conventionnels dans le spectre visible, mais une réflectance plus élevée dans le spectre infrarouge proche (Hernández-Pérez *et al.*, 2017). La Figure 2.16 présente une comparaison de réflectance spectrale (NIR et VIS) d'un matériau coloré marron réfléchissant et standard.

Différentes catégories de produits sont organisées dans la figure 2.17 (Santamouris et al., 2011). Ces dernières années, la communauté scientifique a développé des matériaux frais plus avancés tels que les matériaux rétro réfléchissants qui renvoient le rayonnement incident à l'envers dans les canyons urbains (Yuan et al., 2016), les revêtements intelligents "revêtements organiques pigmentés" qui varient leur réflectance en fonction des quantités de rayonnement infrarouge (Graeve, 2011), les peintures thermo-chimiques (4^{ème} génération de solutions fraîches) (Garshasbi and Santamouris, 2019), les revêtements dopés de PCM, les barrières radiantes, etc (Medina, 2012).



Figure 2.15 : Exemple des matériaux utilisés pour les toits froids ; de gauche à droite ; membranes monocouches ; bitume modifié et des peintures. (Source : (Costanzo, 2016)

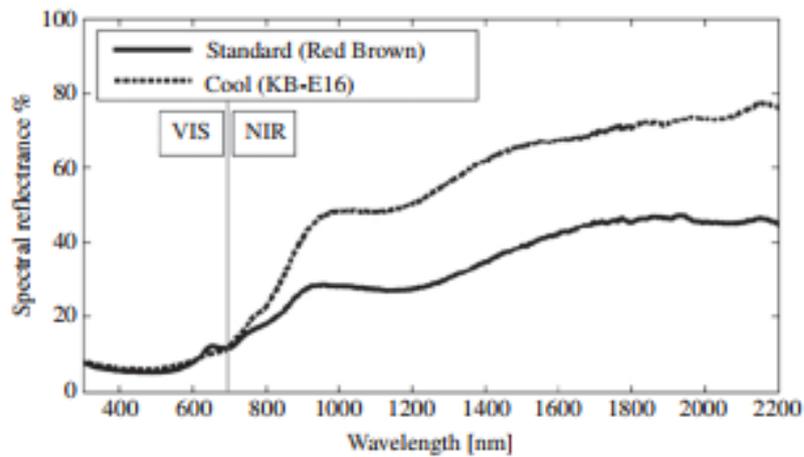


Figure 2.16: La réflectance spectrale du couleur marron réfléchissant et standard. (Source : (Revel *et al.*, 2013)).

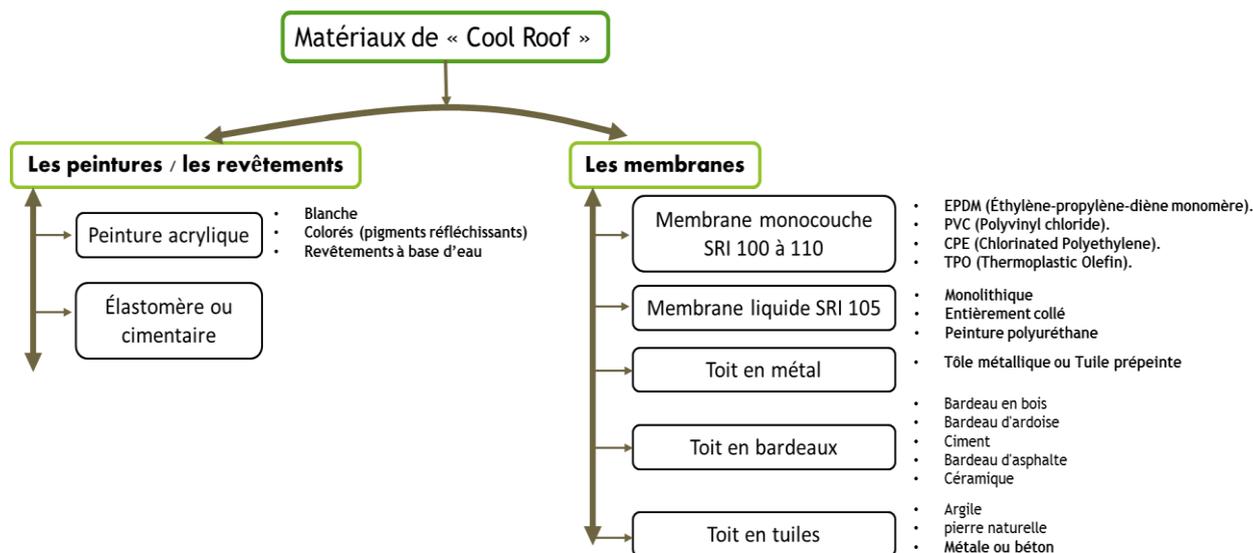


Figure 2.17: Catégories et types de produits pour toits froids. (Source : Adapter par Auteur de (Santamouris et al., 2011).

Il est important de souligner que l'accumulation de saleté et de poussière réduit l'albédo des toits jusqu'à 0,15 (Berdahl and Bretz, 2002), cependant, le lavage simple de la surface avec de l'eau peut restaurer l'albédo jusqu'à 70 à 100% de ses valeurs initiales (Akbahi *et al.*, 2005). A ce fait, Salem Algarni et Darin Nutter ont découvert que l'accumulation des grains de poussière augmente l'absorptivité solaire du toit, ce qui augmente la consommation annuelle d'énergie de refroidissement de 44,7 à 181,1 kWh/m²/an dans les régions chaudes et secs caractériser souvent par les tempêtes de poussières de modérées à extrêmes.

2.2.2.1.5. Impact du cool roof sur les performances des bâtiments

De nombreuses études portent sur l'application des toitures réfléchissantes, également appelées "cool roofs", sur les bâtiments résidentiels existants et neufs dans les régions à climat chaud. Ces recherches se concentrent principalement sur la quantification des économies d'énergie potentielles, l'amélioration du confort thermique et la réduction des îlots de chaleur.

Synnefa et al., (2007) ont estimé l'impact des revêtements de toiture réfléchissants sur les besoins énergétiques et le confort thermique dans des bâtiments résidentiels différentes conditions climatiques. Leurs résultats ont montré que l'augmentation de l'albédo de la toiture de 0,2 à 0,6 et 0,8 entraînait des améliorations économiques de 19 % et 31 % au Caire (Figure 2.18). De plus, ils ont observé une réduction du temps

d'inconfort de 9 à 100 %, ainsi qu'une diminution des températures maximales dans les résidences non climatisées de 1,2 à 3,3 °C. En 2012, une série de simulations a été effectuée en utilisant le logiciel TRNSYS pour étudier l'effet de modification de l'albédo du toit gris, passant de 0,2 à 0,89 en utilisant un revêtement cool appelé ABOLIN. Les résultats ont montré une diminution de la température intérieure de 1,5 à 2 °C et une réduction de 40 % de la demande d'énergie pour le refroidissement (Synnefa et al., 2012).

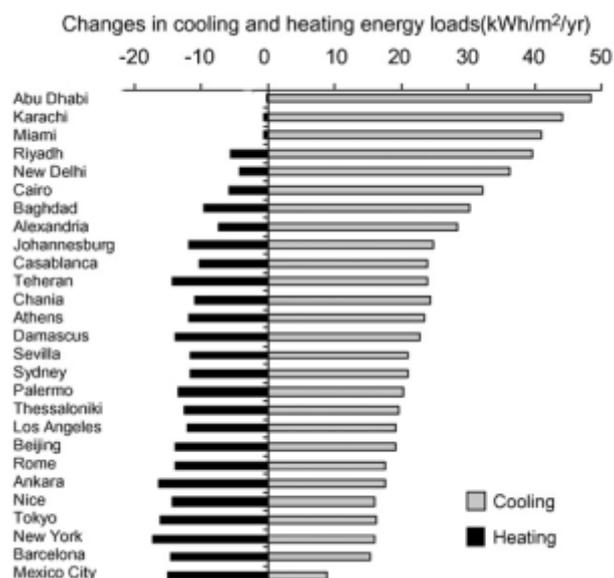


Figure 2.18 : Les besoins de chauffage et de climatisation des bâtiments dans 27 villes après l'application de revêtements de toiture réfléchissants. (Source : (Synnefa et al., 2007))

Dans une autre étude, il a été constaté qu'en faisant varier la réflectance solaire de 20 à 90 %, la demande énergétique pour le refroidissement diminuait à 2,91 kWh/m² dans un climat chaud et sec (Arumugam et al., 2014). Cependant, en Arabie Saoudite, l'utilisation de toits frais avec une réflectivité élevée (SR = 0,85, IE = 0,90) peut réduire la consommation annuelle d'énergie pour le refroidissement de 110,3 à 181,9 kWh/m² (Algarni, 2019). Les toits frais ont un impact significatif sur l'environnement local des bâtiments. Grâce à une série de simulations, il a été démontré que les toits frais peuvent réduire les émissions de CO₂ de 90,33 à 173,88 tonnes par an (Jo et al., 2010). Dans un travail distinct, Dias et al., (2014) ont étudié l'efficacité des toits frais dans les climats chauds et secs. Ils ont utilisé un algorithme hybride pour simuler différentes options de toiture. Les résultats ont montré qu'un revêtement de toit à haute albédo réduisait de 53

% les heures d'inconfort et permettait des économies d'énergie estivales de 826 kWh par rapport à un toit plat conventionnel à Cairo. En 2018, Une étude expérimentale a été réalisée par Hernández-Pérez et al., pour évaluer la performance thermique de différents types de toitures à Cuernavaca, au Mexique. Ils ont constaté que la toiture rouge avait une température de surface plus élevée de 3 °C par rapport à la toiture grise, entraînant un flux de chaleur de pointe supérieur de 20 %. En revanche, les toitures blanches réfléchissantes ont réduit la température de surface de 10 à 14,6 °C par rapport à la toiture grise, réduisant ainsi le gain de chaleur quotidien.

En outre, Qin et al., (2017) ont développé un modèle théorique pour évaluer les gains de chaleur des bâtiments et estimer le potentiel d'économie d'énergie des toitures à haut pouvoir réfléchissant. Les résultats de leur étude expérimentale ont confirmé que la chaleur quotidienne accumulée à l'intérieur du toit du bâtiment (DAIH) diminuait de manière linéaire avec l'albédo. La DAIH pouvait atteindre 200 à 230 W/m² pour un toit à faible albédo ($\sigma = 0,123$), tandis qu'elle était réduite à 100 W/m² pour un toit à haut albédo. Également, l'augmentation de l'albédo du toit de 0,123 à 0,672 a permis de réduire la température du toit de 70 °C à 50 °C en plein midi la plupart des jours. Par ailleurs, l'application d'une peinture rafraîchissante sur un toit en béton d'une véritable maison à Jamaica a entraîné une réduction de 2,3°C de la température intérieure et de 6°C de la température de surface du plafond (Kolokotroni et al., 2018).

Enfin, de nombreuses études ont été menées pour quantifier les potentiels des toitures réfléchissantes, en utilisant des expérimentations sur des bâtiments réels ou des cellules de test, des simulations numériques et des calculs d'équations. Ces études ont été rapportées dans plusieurs revues de littérature, notamment Algarni, (2018); Gian Marco Revel a et al., (2014); Pisello, (2017); Santamouris, (2014)

2.2.2.2. Aperçu sur le Roof Pond (Bassin de toit)

Parmi les différentes techniques passives, le refroidissement par évaporation est considéré comme la technologie de refroidissement la plus efficace (Amer, 2006). Pendant les jours d'été, les bassins de toiture permettent de dissiper la chaleur en utilisant l'eau comme puits thermique intermédiaire (processus d'évaporation) ainsi que comme un élément de stockage de chaleur (en convertissant l'énergie solaire en chaleur sensible qui est ensuite transférée à l'intérieur par conduction et rayonnement), contribuant ainsi au refroidissement des bâtiments et de l'air environnant (Chan et al.,

2010; Tejero-González et al., 2016) (voir la Figure 2.19) . Cette technique de climatisation, la plus ancienne, continue de susciter un vif intérêt en raison de sa simplicité et de son faible coût en termes de matériaux de construction (Spanaki et al., 2014). Bien qu'elle puisse être utilisée à la fois pour le refroidissement et le chauffage, elle est particulièrement efficace dans les régions à climat chaud et sec (Goudarzi and Mostafaeipour, 2017). En 1983, les bassins de toiture ont été classés en trois grandes catégories : secs, humides et ouverts (Sharifi and Yamagata, 2015).

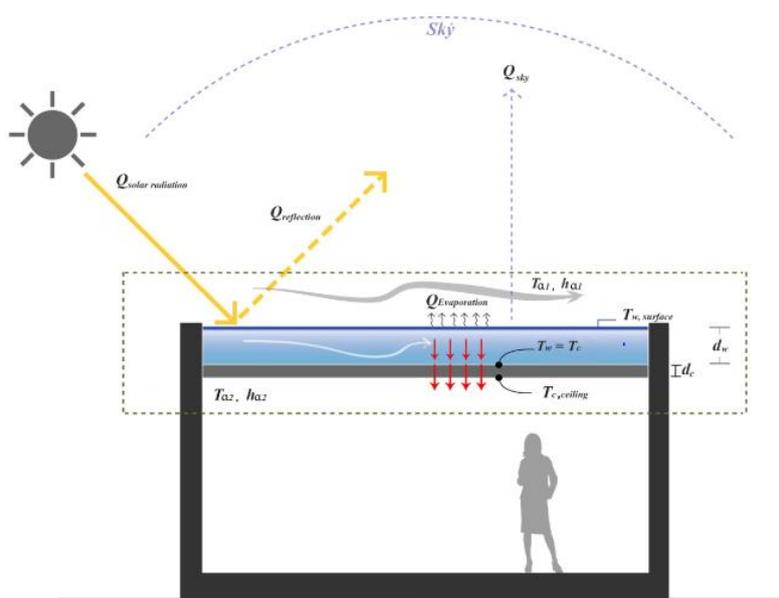


Figure 2.19 : Mécanisme de transfert de chaleur Roof Pond ouvert. (Source : (Sakdawattananon et al., 2017))

Le tableau 2.1 illustre en détail les variantes de bassins de toiture, en soulignant leurs caractéristiques structurelles et fonctionnelles. Ces informations ont été extraites de deux revues de littérature menée par Sharifi and Yamagata (2015) et Spanaki et al. (2011).

Grâce au refroidissement par rayonnement et par évaporation indirecte, les bassins de toiture contribuent à réduire les besoins en chauffage et en climatisation, tout en atténuant les échanges thermiques et en augmentant la capacité thermique du toit (Hosseini et al., 2017; Spanaki et al., 2014). Cependant, l'esthétique des bassins de toiture, les fuites et la surcharge imposée à la structure doivent être examinées dès la première étape. De même, des facteurs tels que les coûts initiaux, les dépenses

d'entretien et d'exploitation, la nécessité d'une assistance mécanique et la consommation d'eau déterminent également la faisabilité de la mesure (Sadineni et al., 2011). Les toits humides peuvent permettre des économies d'énergie allant jusqu'à 100 % dans des endroits spécifiques ; leur performance dépend donc des conditions climatiques, du type d'étang, des matériaux de toiture, des panneaux isolants et, en particulier, de la profondeur de l'eau qui affecte le taux d'évaporation (Spanaki et al., 2011).

Pour les régions soumises à un stress hydrique, l'utilisation de sacs en plastique remplis d'eau et l'exposition permanente du bassin sans système d'arrosage permettent de limiter la consommation d'eau (Spanaki et al., 2011).

Plusieurs études expérimentales et de simulation menées ont démontré que les toits avec des bassins ont réussi à améliorer le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments dans les climats chauds. Yannas et Erell ont démontré que les bassins de toit ouvert avec isolation mobile et pulvérisation d'eau continue permettent des économies d'énergie de 50 à 100% dans différentes localités européennes (Yannas et al., 2006). De même, dans une simulation réalisée à Stellenbosch, en Afrique du Sud, la température intérieure maximale a été réduite de 33,97°C à 28,41°C, réduisant la charge de refroidissement de la pièce de 51,07% et l'énergie thermique totale transférée de 40,62% (Vorster and Dobson, 2011). Les toits Skytherm ont également montré des réductions de température intérieure allant jusqu'à 6°C par rapport aux bâtiments conventionnels durant le mois de juillet (Givoni, 2011). Les toits RPWGB ont réduit la température intérieure d'environ 7°C par rapport aux toits secs conventionnels (Tang and Etzion, 2005).

En somme, à travers différentes études comparatives menée dans des conditions arides et tempérées, Sharifi et Yamagata ont indiqué que le Bassin de toit avec des sacs en toile mouillés « Roof Pond Wet Gunny Bags (RPWGB) », les bassins de toiture ombragés, les bassins de toiture ventilés et les bassins avec isolation mobile sont plus efficaces que les autres variantes (Sharifi and Yamagata, 2015). Le RPWGB présente l'avantage d'une faible consommation d'eau, d'une construction facile avec des matériaux peu coûteux (sacs en toile de jute ou jute) et ne nécessite pas d'équipement mécanique supplémentaire et entretien important (Spanaki et al., 2011).

Tableau 2.1 : Différentes configurations de bassins de toiture résultant de différentes combinaisons. (Source : Adapté par Auteur de (Sharifi and Yamagata, 2015; Spanaki *et al.*, 2011))

| Types de bassins | | Profondeur de l'eau | Remarque |
|--|---|--|--|
| Bassin de toit ouvert (Open roof pond) | Sans pulvérisateurs | 5 à 50 cm | - Les toits doivent supporter une charge de 200 à 400 kg/m ² . |
| | Avec pulvérisateurs | Rayon des gouttelettes : 0,005 à 0,010 m Débit des pulvérisateurs : de 1 à 1,5 vol/h | - |
| Bassin de toit couvert Par isolation mobile (covered roof pond) | Avec pulvérisation juste pendant la nuit | 6 à 25 cm | -Panneaux d'isolation hautement réfléchissants et émissifs sur le dessus (de préférence en métal ondulé) et ils doivent être retirés la nuit. |
| | Avec pulvérisation jour et nuit | | |
| | Sans pulvérisation | 10 à 25cm | |
| | Skytherm | 10cm | -L'eau est contenue dans des sacs en plastique, tels que des sacs en polyéthylène ou en PVC. -Les besoins en eau sont modérés. -Une surveillance mécanique supplémentaire est nécessaire, ce qui entraîne des coûts d'entretien élevés et une opération quotidienne. |
| Bassin de toit avec isolation flottante. | Energy roof | 40cm | -Un contrôle mécanique pendant la nuit pour la circulation de l'eau |
| | Cool roof | 9 cm | -Une membrane flottante réfléchissante et imperméable (PVC blanc) -Nécessaire une quantité d'eau inférieure au variante préalable |
| Walkable roof ponds | Avec isolation fixé. | 3 cm | -Les toits doivent supporter une charge de 400 kg/m ² . -Deux couches de cailloux d'une épaisseur de 2 cm. -Une couche supplémentaire de cailloux d'une épaisseur de 2 cm. |
| | Avec circulation d'eau pendant la nuit | - | -Les toits doivent supporter une charge de 400 kg/m ² . -Deux couches de cailloux d'une épaisseur de 2 cm. -Une couche supplémentaire de cailloux d'une épaisseur de 2 cm. |
| Bassin de toit avec des sacs en toile mouillés. | Exposée | 15 cm | -Nécessitent pas d'équipement mécanique supplémentaire et ont des exigences opérationnelles et d'entretien réduites. -L'ombrage réduit la consommation d'eau. |
| | couvert | | |
| Bassin de toit couvert | L'eau est enfermée dans des sacs étanches, avec et sans pulvérisation d'eau. | - | -Consommation d'eau intensive. -Absence de tout mécanisme opérationnel. |
| | Cool pool | | -Exigences et coûts d'entretien élevés. -Faible consommation d'eau. |
| Bassin de toit ventilée | | 3cm – 9cm | - L'utilisation de panneaux de protection radiative est recommandée. -Un espace d'air de 30 cm. - Présente des exigences minimales en matière d'entretien. -Consomme une grande quantité d'eau. |

2.2.2.3. Aperçu sur les toitures ventilées

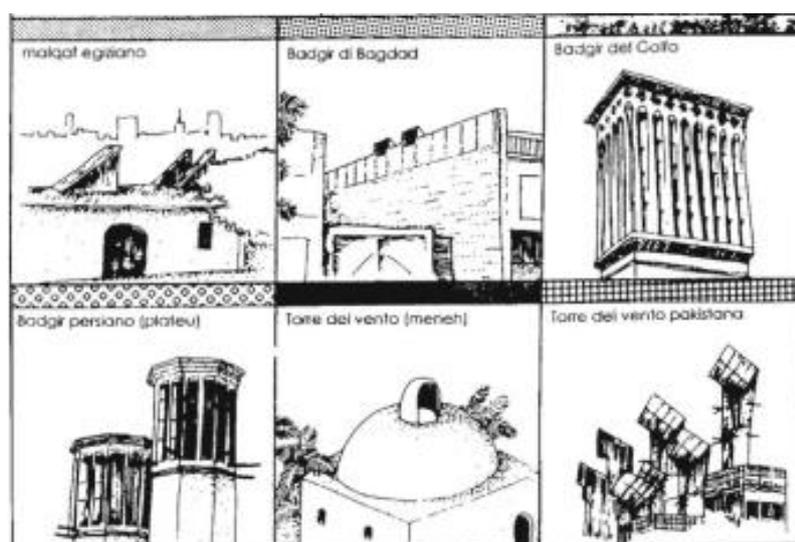


Figure 2.20 : Schémas de différents types de capteurs de vent par la toiture au Moyen-Orient.(Source : (Grosso, 2021)

Le refroidissement par ventilation naturelle à travers la toiture est couramment utilisé dans les régions chaudes par l'architecture traditionnelle (voir figure 2.20). Les systèmes de toit double peau ventilé sont composés de deux couches, une couche supplémentaire ajoutée au-dessus de la peau principale du bâtiment où l'air circule dans un espace. Cet espace d'air agit comme une couche isolante et offre une résistance dynamique à l'accumulation et à la transmission de chaleur de la dalle de toit principale, comme le montre la figure 2.21. De plus, le mouvement de l'air favorise le transfert de chaleur par convection (Zingre et al., 2017). Grâce à cette combinaison d'ombrage et de flux d'air, la chaleur et l'humidité sont évacuées vers l'extérieur, maintenant ainsi l'intérieur du toit au frais (Dimoudi et al., 2006).

Pour évaluer l'efficacité de refroidissement des structures ventilées, il est essentiel de prendre en compte plusieurs facteurs; à savoir la vitesse et direction du vent, l'intensité du rayonnement solaire, l'emplacement du bâtiment, l'environnement local, la taille et la forme de la cavité, le débit d'air, les propriétés thermos-physiques (surtout optique) des matériaux et la distribution de température dans la cavité (Gagliano *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2009a). Par ailleurs, la complexité du mécanisme de circulation d'air nécessite une connaissance détaillée.

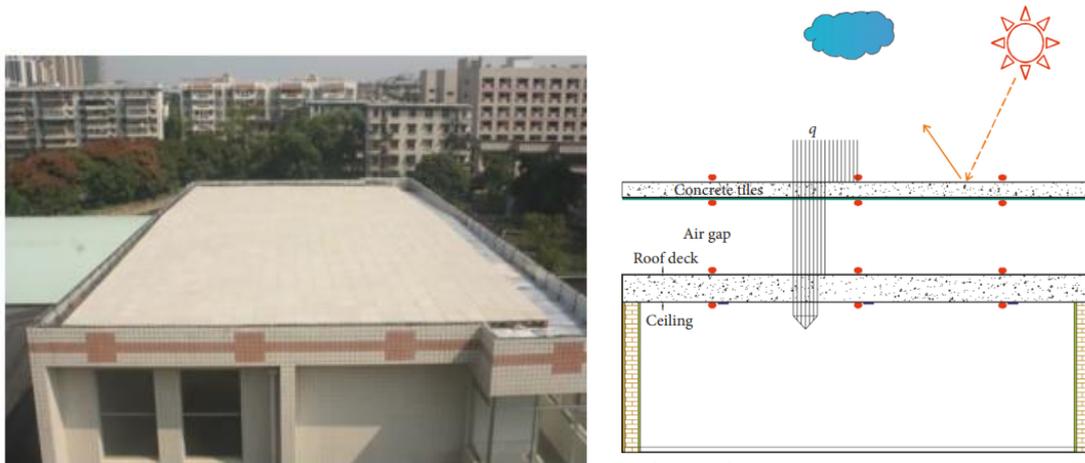


Figure 2.21 : Le fonctionnement d'un système de toiture double peau ventilée en béton dans un bâtiment du sud de la Chine. (Source : (Chen *et al.*, 2019)).

Des études expérimentales et numériques ont suggéré une hauteur d'espace d'air de 6 à 10 cm (Biwole *et al.*, 2008). L'utilisation de matériaux réfléchissants pour la couche ajoutée, afin de bloquer davantage de lumière solaire et de réduire les transferts de chaleur entre le toit et le plafond, a également été recommandée (Puangsombut *et al.*, 2007). En combinant ces deux approches de conception, l'utilisation de barrières radiantes (RBS) s'est avérée très efficace, car elle émet et réfléchit davantage de chaleur thermique, améliorant ainsi les performances globales d'isolation thermique du toit (Change *et al.*, 2008).

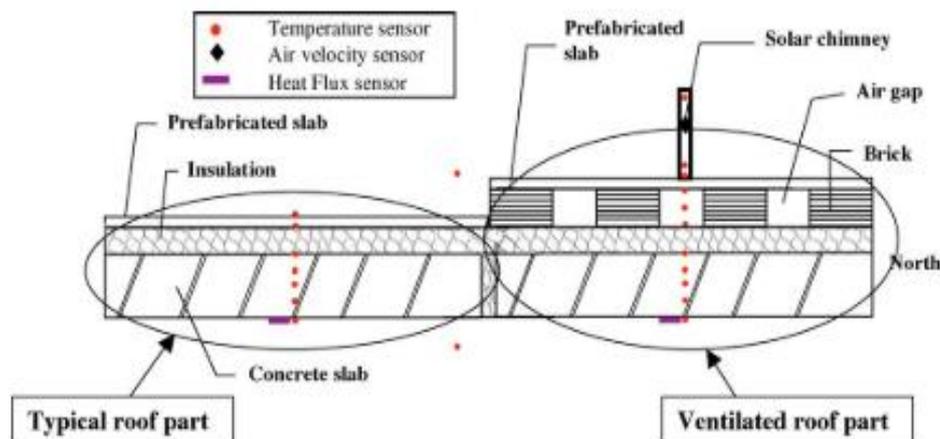


Figure 2.22. Une coupe de toiture ventilée indiquant l'emplacement de la cheminée installée. (Source : Dimoudi *et al.*, 2006)

Dans une application à grande échelle, il est essentiel d'évacuer l'air chaud accumulé dans la cavité d'air. Cependant, selon Dimoudi *et al.*, (2006), une solution

efficace consiste à créer de petites ouvertures sur la surface pour générer une pression d'air. Les chercheurs ont ainsi installé une cheminée circulaire en tôle métallique peinte en noir à l'extérieur, au centre du toit ventilé, afin d'améliorer l'extraction de l'air chaud de l'espace (voir la Figure 2.22).

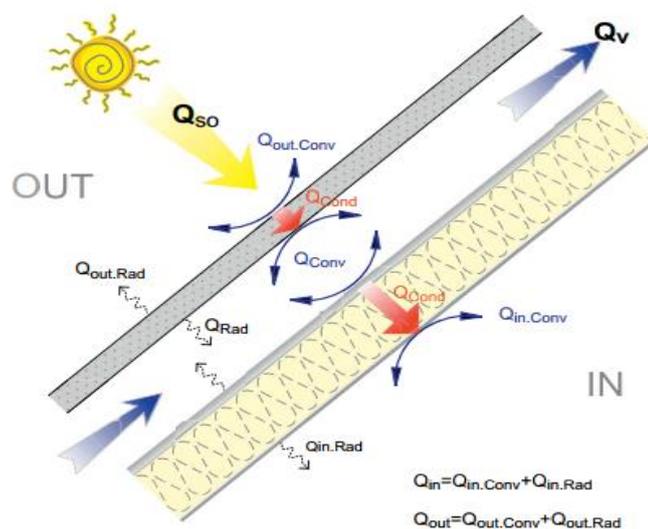


Figure 2.23 : Mécanisme de transfert de chaleur dans une toiture double peau naturellement ventilée. (Source : (Lee *et al.*, 2009b))

La figure 2.23 présente le bilan du transfert de chaleur d'une toiture ventilée, dont l'équation présentée vise à estimer la quantité de chaleur évacuée, Où :

Q_{so} : est le gain de chaleur dû au rayonnement solaire (W).

Q_{out} : est le flux de chaleur vers l'extérieur (W).

Q_{in} : est le flux de chaleur vers l'intérieur (W).

Plusieurs recherches ont étudié les avantages d'une toiture ventilée sur la réduction des gains de chaleur, la surchauffe intérieure et les besoins en énergie de refroidissement dans les climats chauds. Dimoudi *et al.*, (2006) ont constaté qu'une toiture ventilée avec une cavité de 6 cm au-dessus de la dalle de la toiture en béton, a réduit les gains de chaleur de 56% et jusqu'à 68% avec l'ajout d'une barrière radiante en Grèce. Ils ont également déclaré qu'une toiture ventilée peut permettre des économies d'énergie supérieures à 30% par rapport à une toiture conventionnelle. L'utilisation d'un revêtement réfléchissant ($SR = 0.74$) sur les toitures à double peau à Singapour a entraîné une baisse significative de $14.1^{\circ}C$ pour la température du toit, tandis que la température de l'air intérieur a baissé jusqu'à $2.4^{\circ}C$ et les gains de chaleur

quotidiens ont diminué de 51% (Zingre *et al.*, 2015). Une étude a montré que la période de récupération des investissements pour une toiture ventilée est inférieure à 6 mois dans un climat tropical, ce qui indique des économies d'énergie importantes (Zhang *et al.*, 2016).

2.2.2.4. Aperçu sur les toitures végétalisées

Les toitures végétalisées sont aujourd'hui largement reconnues comme un système passif efficace (Vijayaraghavan, 2016). Elles se composent essentiellement de végétation, de substrat (sol ou la terre), de système de drainage et de membranes d'étanchéité (Bevilacqua *et al.*, 2016). Les différentes couches de ces toitures varient en fonction du type de bâtiment, de son utilisation, des contraintes de construction et des besoins d'entretien, se distinguant en systèmes extensifs, semi-intensifs et intensifs (Raji *et al.*, 2015). La figure 2.24 illustre le bilan énergétique d'une toiture végétalisée dont la convection et l'évaporation jouent un rôle important dans la détermination de la température de surface du toit.

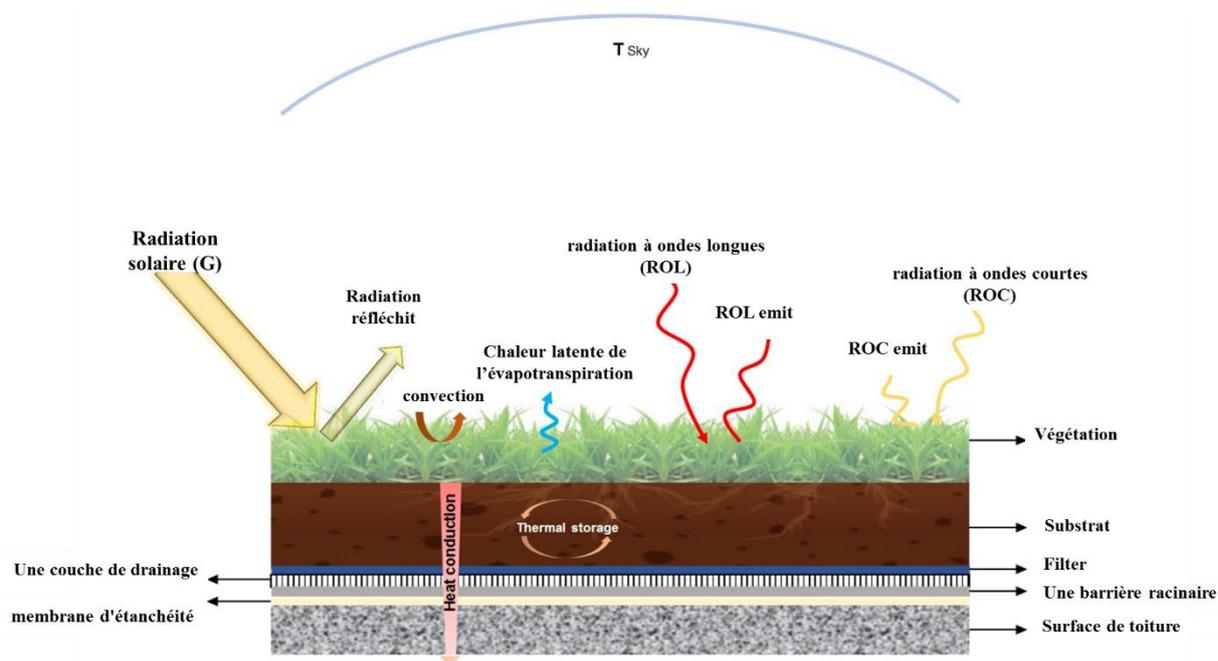


Figure 2.24 : Bilan énergétique d'une toiture végétalisée. (Source : Adapté par Auteur, 2019)

La toiture végétalisée est complexe à comprendre et requiert des connaissances approfondies pour la sélection optimale de chaque composant de manière équitable afin d'obtenir les meilleurs résultats (Shafique *et al.*, 2020). En combinant les effets d'ombrage, d'évapotranspiration, de masse thermique et d'isolation, les toits verts

empêchent la pénétration de la chaleur solaire (albédo = 0,7-0,85), économisent l'énergie de refroidissement estival, améliorent la performance thermique des bâtiments et peuvent même contribuer à rafraîchir les villes, à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain et à arrêter les émissions de gaz à effet de serre (Pisello et al., 2015; Santamouris et al., 2007). De plus, cette technique augmente la résistance thermique et prolonge la durée de vie des structures des toits (Castleton et al., 2010).

Dans les climats chauds et arides, les toits végétalisés permettent de réaliser des économies d'énergie annuelles de 15 à 32 % en fonction de l'épaisseur du substrat ainsi que de sa conductivité thermique (Kamel et al., 2012), ainsi que réduire le flux de chaleur de 31 à 37 % (D'Orazio et al., 2012). La performance des toitures-jardins est affectée par une variété de facteurs climatiques, les propriétés physiques de la structure (propriétés thermiques et radiatives), la taille et le type de végétation (indice de surface foliaire (LAI), taux de couverture (CR), résistance stomatique et albédo), le substrat de couverture (composition, épaisseur, teneur en eau) et le système de drainage (Getter *et al.*, 2011; Sailor, 2008; Sailor and Hagos, 2011). En outre, le système d'installation des toits verts est confronté à certains défis liés aux contraintes de coût, aux restrictions de charge des bâtiments et à la consommation élevée d'eau d'irrigation, en particulier dans les climats arides.

Il convient de noter que le toit extensif est le meilleur type pratique dans les climats chauds et secs en raison de leur rentabilité, de leur facilité d'entretien sur les toits existants (substrat de croissance moins profond), de la nécessité d'un entretien minimal et d'une faible irrigation (espèces végétales autosuffisantes et indigènes). Cependant, il a été souligné que le substrat doit être bien arrosé dans ces conditions d'air sec, et qu'il consomme donc de grandes quantités d'eau, ce qui reste un défi (Fioretti et al., 2010; Yang et al., 2018).

De nombreuses études ont été menées sur ce type de toiture dans différents climats. Cependant, les résultats d'un travail expérimental ont montré que l'utilisation d'un système de toiture végétalisée extensive peut réduire la consommation d'énergie de la climatisation dans un bâtiment résidentiel commun de 12 % à 33 % (Muharam et al., 2016). Une autre étude réalisée en Jordanie a analysé l'impact des toitures végétalisées sur la consommation d'énergie de refroidissement dans les bâtiments. Les résultats ont révélé une réduction totale de la consommation énergétique de 17 % (Goussous *et al.*,

2015). De plus, la toiture végétalisée permettant des économies d'énergie annuelles allant de 15 % à 32 % en fonction de l'épaisseur du sol et de la conductivité thermique dans un climat chaud de l'Égypte (Kamel *et al.*, 2012).

Il est crucial de mentionner que malgré les performances satisfaisantes des toitures végétalisées dans les climats chaud et sec, les limites sont liées au coût d'installation élevé, à l'entretien particulier des plantes et surtout au système d'irrigation qui implique des coûts d'arrosage supplémentaires en cas de faibles précipitations comme à Biskra, ce qui réduirait les économies d'énergie pour l'air conditionné. En outre, des études comparatives sur le potentiel de refroidissement des toits verts et des toits froids ont montré que l'utilisation de toits verts permet d'économiser de 2,8 à 13,9 % d'énergie de refroidissement, tandis que les toits froids permettent d'économiser de 13,7 à 30,1 % d'énergie de refroidissement (Zinzi *et al.*, 2012).

2.2.2.5. Coûts d'installation des toitures passives

Les techniques de toitures passives analysées dans les sections précédentes ont montré un potentiel prometteur en termes de réduction des besoins de refroidissement et d'amélioration de la sensation de confort dans l'environnement intérieur des bâtiments. Cependant, pour évaluer la faisabilité d'une telle stratégie, il est crucial de prendre en compte les coûts d'installation et d'entretien. Ces coûts sont influencés par des facteurs tels que les conditions climatiques spécifiques, les caractéristiques des bâtiments (taille, forme et utilisation), l'âge et l'état du toit, ainsi que les prix du marché dans chaque pays. Cette section du texte fournit une analyse économique basée sur des études publiées dans plusieurs pays afin d'éclairer ces aspects financiers.

Il a été souligné que les toitures végétalisées ont un investissement initial élevé qui limite leur adoption sur le marché (Bevilacqua *et al.*, 2016). Leur coût initial est de trois à six fois plus élevé que celui des toitures conventionnelles (Bianchini and Hewage, 2012). Selon le Centre des Toitures Végétalisées du Royaume-Uni, les coûts indicatifs pour les toitures extensives se situent entre 60 \$ /m² et 100 \$ /m² (Erell *et al.*, 2006), tandis qu'en Colombie-Britannique, au Canada, le prix moyen varie de 130 \$ à 165 \$ /m² (Bianchini and Hewage, 2012), alors qu'à Singapour, il varie de 40 \$ à 65 \$/m² en fonction du type de toiture végétalisée (Wong *et al.*, 2003).

Concernant les toits frais, différentes options de revêtement et différents coûts existent dans le marché. Selon Sproul et al., (2014b), la membrane TPO la plus coûteuse est évaluée à seulement 20 \$/m² (1,88 \$/ft²). D'un autre côté, Levinson et al., (2005) ont rapporté que le revêtement blanc peut coûter entre 1,2 \$ et 2,15 \$/ft².

Pour évaluer les avantages économiques des différentes options, Sproul et al. (2014) ont comparé les toits frais aux toitures végétalisées en réalisant une analyse sur 50 ans. Ils ont collecté des données auprès de 22 projets de toitures plates aux États-Unis pour les toits blancs, verts et noirs. Les résultats de leur étude indiquent que les toits blancs permettent des économies nettes de 25 \$/m² (2,40 \$/pi²) sur 50 ans. En revanche, les toitures végétalisées présentent des économies nettes négatives de 71 \$/m² (6,60 \$/pi²) par rapport à une toiture de référence. Comparativement, les économies nettes entre les toits blancs et les toitures végétalisées s'élèvent à 96 \$/m² (8,90 \$/pi²), ce qui signifie que la prime de coût annualisée est seulement de 3,20 \$/m²-an (0,30 \$/pi²-an). Ici, les auteurs suggèrent que le choix entre ces deux solutions innovantes revient au propriétaire du bâtiment. Celui-ci devra prendre en compte les économies potentielles sur le long terme et décider en fonction de ses préférences et de ses objectifs financiers.

Selon une étude comparative menée par Goudarzi et Mostafaeipour, les coûts initiaux d'une toiture végétalisée et d'une toiture-étang ont été évalués en fonction de la surface du toit dans les climats chauds et secs. Le coût initial d'une toiture végétalisée avec toutes les couches standard est de 72 \$ par m², tandis que la construction d'un toit-étang non couvert, sans système de pulvérisation, impose un coût supplémentaire de seulement 15 \$/m² par rapport au coût initial d'une toiture conventionnelle (Goudarzi et Mostafaeipour, 2017).

Par ailleurs, les toitures végétalisées nécessitent un entretien régulier sur le long terme, qui est 20 fois plus élevé que celui des toitures noires et blanches. Le coût annuel d'entretien d'un toit jardin (eau, entretien du sol et des plantes) est estimé à 85,7 \$/an, tandis que le coût annuel d'entretien d'un toit-étang est estimé à 14,2 \$/an. Sur une période d'exploitation de 20 ans, il est conclu que le toit jardin est le système de refroidissement passif le plus coûteux (General Services Administration, 2011).

En conclusion, le coût d'installation et d'entretien est un facteur clé dans le choix de chaque alternative de toiture, et doit être examiné en fonction de nombreux facteurs

tels que l'emplacement, le prix des matériaux, la structure et la taille de la toiture, les coûts de main-d'œuvre et les spécificités du marché dans chaque pays. Des études supplémentaires sont nécessaires pour explorer d'autres options de conception de toitures afin de combler les lacunes importantes dans la littérature actuelle.

Conclusion

La toiture d'une construction est bien plus qu'une simple couverture. Elle constitue une barrière essentielle face aux variations thermiques, exerçant un rôle déterminant dans la régulation thermique qui impacte directement le confort des occupants et la consommation énergétique globale du bâtiment. Sa capacité à réguler efficacement les ambiances thermiques est cruciale, notamment dans les climats à forte radiation solaire. Ainsi, le fonctionnement thermique de la toiture est tributaire de multiples facteurs conceptuels, matériels et techniques.

La conception intelligente des toits plats en béton revêt ainsi un rôle central dans le contrôle du transfert de chaleur vers l'intérieur des bâtiments résidentiels. En choisissant judicieusement les matériaux de construction et le revêtement extérieur, il devient possible de maîtriser l'absorption de chaleur. Cette maîtrise a un impact significatif sur les besoins en climatisation, particulièrement dans les régions chaudes et sèches.

En outre, le traitement de la surface extérieure du toit prend une importance capitale. En effet, les techniques de rafraîchissement passif constituent une solution optimale pour maintenir une température intérieure confortable tout en réduisant la dépendance aux systèmes de climatisation coûteux et énergivores. Il est indéniable qu'il existe une variété de systèmes passifs adaptés aux climats chauds et secs. Chacune de ces techniques présente des niveaux d'efficacité, de coûts et de défis différents, qui ont été minutieusement analysés au sein de ce chapitre. Les conclusions tirées de cette analyse mettent en évidence des points clés pour aider à prendre des décisions éclairées en matière de refroidissement passif des toits en fonction des besoins et des contraintes spécifiques de chaque situation :

1. Les toits frais se révèlent être des solutions particulièrement appropriées dans les climats arides en raison de leur simplicité d'installation, de leur coût

abordable et de leur adaptabilité à tous types de toits. Cependant, leur efficacité peut être compromise avec le temps en raison du vieillissement des matériaux et de l'accumulation de poussière, des problèmes qui peuvent être résolus par un entretien régulier sous forme de nettoyage ou de repeinture.

2. Les toits ventilés peuvent connaître d'excellentes améliorations lorsqu'ils sont associés à des matériaux à forte réflexion solaire et à une émissivité thermique élevée. Cependant, l'efficacité de cette technique dépend grandement de la connaissance approfondie des caractéristiques du vent, de son débit et de son orientation, nécessaires pour en exploiter pleinement le potentiel.
3. En ce qui concerne le "roof pond" ou bassin de toit, ce système entraîne une consommation importante d'eau, ce qui pose problème dans les zones souffrant de stress hydrique. Toutefois, cette consommation pourrait être réduite en utilisant des textiles de rétention d'eau tels que le jute ou la toile de sac, ce qui mérite d'être exploré. Il est important de noter que cette technique comporte des risques significatifs pour la structure du toit, tels que les fuites d'eau et la contamination, qu'il convient de prendre en compte.
4. La toiture végétalisée est reconnue comme le système passif le plus efficace à la fois à l'échelle du bâtiment et de l'environnement urbain. Cependant, sa complexité nécessite une compréhension approfondie et une expertise pointue pour sélectionner judicieusement chaque composant, garantissant ainsi les meilleurs résultats. De plus, son efficacité est étroitement liée à la disponibilité d'eau, ce qui constitue un défi particulièrement important dans des régions chaudes et arides telles que Biskra. Par conséquent, la réussite de ce système exige un entretien intensif et constant pour maintenir ses performances optimales.

Il est essentiel de souligner que le coût initial d'investissement ainsi que le programme d'entretien associé jouent un rôle déterminant dans la décision d'opter pour l'application d'un tel système sur les toits des bâtiments.

Chapitre III

État de l'art :

**« Optimisation des Performances Thermiques et
Énergétiques des Bâtiments par la Toiture »**

« L'étude des méthodes permettant de constituer des connaissances »

(Avenier et al., 2011)

Introduction

La modernisation du style de vie, la standardisation des constructions ainsi que l'utilisation généralisée des climatiseurs, ont engendré des défis en termes d'inconfort thermique, d'épuisement des énergies fossiles et de réchauffement climatique. Face à ces enjeux, la communauté scientifique s'oriente vers l'intégration de mesures durables et de stratégies passives afin d'adapter les bâtiments à ces conditions, sans recourir à des solutions énergivores et polluantes pour l'environnement. Parmi tous les composants de l'enveloppe du bâtiment, le toit est celui qui subit les fluctuations de température les plus importantes, en particulier dans les climats chauds et arides, où il est fortement exposé aux rayonnements solaires intenses.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs à travers le monde ont développé et étudié différentes techniques de rafraîchissement passif par la toiture, visant à optimiser ses performances thermiques et à assurer un niveau de confort intérieur optimal avec une consommation d'énergie minimale. L'intérêt croissant pour ce sujet s'est concrétisé par de nombreuses études menées à l'échelle mondiale, dans différentes conditions climatiques, en utilisant diverses méthodes de recherche. Ce chapitre se consacre à l'état des connaissances actuelles sur les différentes approches du rafraîchissement passif par la toiture, développées dans le but d'optimiser les performances thermiques et énergétiques des bâtiments résidentiels.

Dans le cadre d'une étude comparative, l'objectif de cette partie de la thèse est de fournir une synthèse des meilleures techniques de refroidissement passif par la toiture adaptées aux bâtiments résidentiels dans les climats chauds et arides, en mettant l'accent sur les études qui ont effectué des comparaisons entre différentes approches passifs. Notre intérêt se porte spécifiquement sur les recherches qui ont évalué un large éventail de techniques de toitures passives dans des climats chauds, en mettant en évidence les avantages, les limites et les défis propres à chaque méthode de refroidissement passif. Cette approche nous permettra de fournir des recommandations pratiques, tout en situant notre travail par rapport aux recherches existantes en abordant les aspects méthodologiques et pratiques liés au domaine étudié.

3.1. Les méthodes de recherche utilisées pour l'étude des toitures

"La méthode, c'est l'ensemble des démarches, des cheminements ordonnés et rationnels, fixant le mode d'intervention."

Giardina et Marton (1998)

Le domaine de l'optimisation des performances thermiques et énergétiques des bâtiments à travers l'amélioration de la toiture a été largement étudié et continue d'attirer l'attention des chercheurs. Pour entamer ces recherches, la première étape consiste à effectuer une recherche bibliographique dans la littérature scientifique en utilisant des mots-clés spécifiques pour les différents types de toiture sélectionnés, tels que les toits frais, les toitures ventilées, les roofs pond et les toitures végétalisées, dans des climats chauds. Au total, 469 publications (articles, livres, actes de conférence, revues, etc.) ont été identifiées dans la base de données Scopus. Les résultats montrent que les toitures végétalisées ont suscité le plus d'attention de la part des chercheurs, avec 216 articles, suivies par les toits frais "Cool Roof" avec 154 articles. En revanche, les toitures à double peau ventilée et les roofs pond ont moins d'articles publiés, respectivement 71 et 28. Les États-Unis, la Chine, l'Italie et l'Inde se sont révélés être les pays les plus actifs dans ce domaine, tandis que le Moyen-Orient, l'Arabie saoudite et l'Égypte dominent également les recherches (Voir Figure 3.1).

L'analyse préliminaire des publications a révélé que la plupart d'entre elles fournissent des études de cas basées sur des expérimentations ou des simulations, mais peu d'entre elles ont réalisé des comparaisons entre deux à quatre systèmes ou une combinaison de ceux-ci. Il est important de noter qu'il existe une abondante littérature de revues sur chaque technique spécifique.

Les recherches effectuées dans ce domaine peuvent être regroupées en trois catégories distinctes :

1. Les études qui se concentrent sur une seule technique de rafraîchissement passif, explorant ses différentes variantes et les analysant soit dans un contexte spécifique, soit dans différents climats.
2. Les études qui comparent plusieurs stratégies passives afin de déterminer la meilleure solution en fonction de différents aspects tels que thermique, énergétique, économique, social, environnemental, etc., dans un contexte donné.

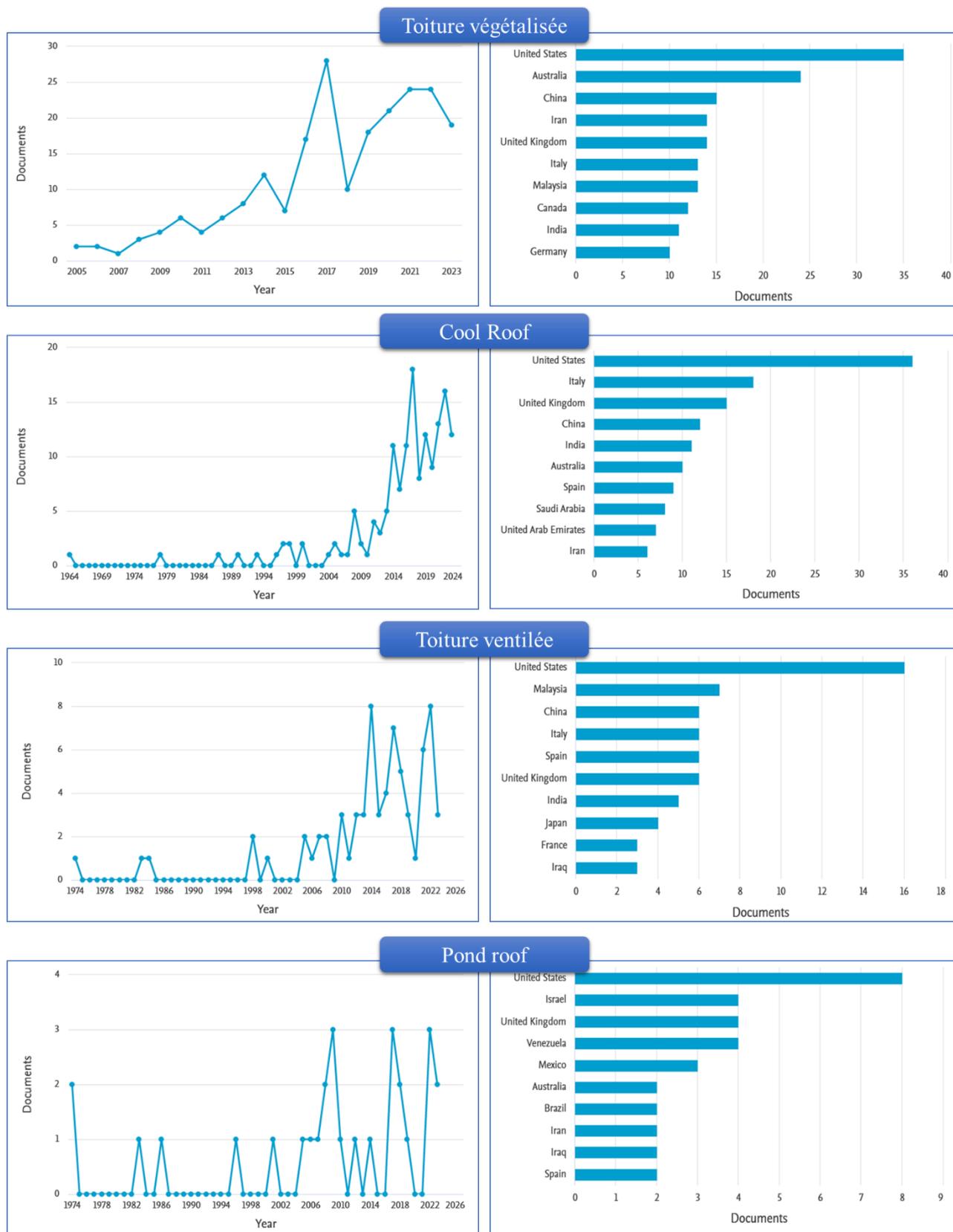


Figure 3.1 : Nombre de recherches menées dans le domaine du rafraîchissement passif par la toiture dans les climats chauds selon la base de données Scopus.

(Source : Scopus,2023 Adapté par Auteur)

3. Les études qui combinent ou associent différentes techniques passives afin de relever les défis existants et d'améliorer l'efficacité des systèmes en surmontant les contraintes rencontrées.

Cependant, cette partie se concentre principalement sur les deuxième et troisième catégories d'études, menées principalement dans les climats chauds, afin de comprendre les méthodes employées, les avantages et les inconvénients de ces combinaisons, ainsi que les lacunes des études existantes. De plus, nous nous intéressons aux recherches menées sur les toits plats des bâtiments résidentiels en tant que cas d'application spécifique.

En ce qui concerne les méthodologies utilisées dans les recherches axées sur la toiture, plusieurs approches ont été abordées dans la littérature. Parmi celles-ci, on retrouve l'étude empirique basée sur des enquêtes et des mesures in situ, la méthode analytique reposant sur des calculs mathématiques, l'approche expérimentale réalisée sur des bâtiments réels ou des modèles réduits, et enfin, la méthode numérique qui fait appel à des simulations calibrées.

3.1.1 La méthode empirique

La méthode empirique de recherche désigne une approche qui se fonde principalement sur l'expérience pratique et l'investigation sur le terrain. Dans le domaine de l'optimisation des performances thermiques et énergétiques des bâtiments, une étude empirique consiste à réaliser des mesures in situ, telles que des relevés de température, des mesures d'énergie et des relevés météorologiques, sur des bâtiments réels existants (Figure 3.2). Elle comprend également des enquêtes par questionnaire ou des entretiens.



Figure 3.2 : Exemple d'instrumentation utilisées dans les études sur terrain.

(Source : Eltrapolsi, 2014; Moujalled, 2007)

La fiabilité des résultats obtenus par cette méthode repose sur l'analyse des phénomènes réels en prenant en compte l'interaction de tous les facteurs. Par conséquent, de nombreux chercheurs l'utilisent couramment dans leurs travaux, comme en témoignent les études de Eltrapolsi, (2014); Mazari, (2012); Moujalled, (2007); et Batier, (2018)...etc.

3.1.2 La méthode analytique

La méthode analytique est une méthode basée principalement sur des calculs relatifs aux modèles en régime permanent ou transitoire. Elle permet d'examiner le comportement thermique de la toiture en appliquant les principes de la physique du bâtiment. Elle offre une approche traditionnelle et essentielle pour étudier les performances thermiques. Par exemple, en utilisant des équations mathématiques et des modèles simplifiés, il est possible d'évaluer les transferts de chaleur à travers les différents matériaux de la toiture, ainsi que les pertes énergétiques et les échanges thermiques avec l'environnement extérieur.

À titre d'exemple, Assem, (2011) a utilisé la méthode TETD pour estimer le coefficient de transmission thermique (valeur U) des murs et des toits couramment utilisés au Koweït. Une série de corrélations basées sur la réflectance solaire a été établie. L'augmentation de la réflectance du toit a entraîné une réduction du gain de chaleur quotidien pouvant atteindre 42%. En outre, Polo-labarrrios et al., (2020) ont développés un modèle mathématique dynamique pour étudier le comportement thermique des toits conventionnels et des toits végétalisés. Ce modèle prend également en compte le bilan énergétique pour évaluer les variations de température à l'intérieur des bâtiments (figure 3.3).

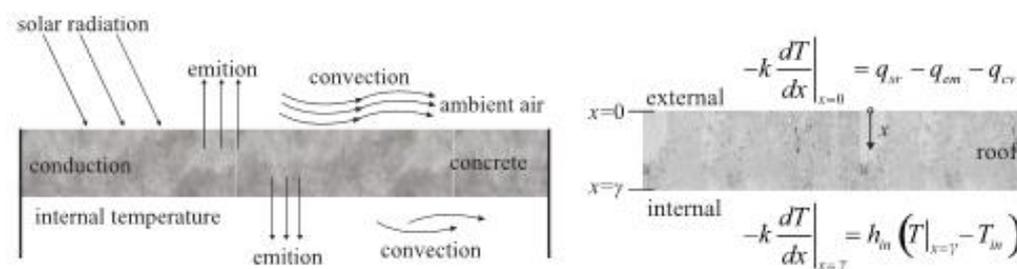


Figure 3.3 : Equations utilisées pour le calcul de la performance thermique des toitures. (Source : (Polo-labarrrios *et al.*, 2020))

Cette méthode analytique constitue une fondation solide pour le développement de méthodes numériques plus avancées, telles que la simulation thermique.

3.1.3 La méthode expérimentale

Dans le domaine du bâtiment, la méthode expérimentale est l'une des techniques de recherche les plus largement utilisées à l'échelle mondiale. Elle offre la possibilité de tester divers éléments, paramètres et phénomènes des modèles réels ou réduits dans des conditions climatiques naturelles (sur le terrain) ou contrôlées, notamment en laboratoire.

3.1.3.1. Expérimentation par des bâtiments réels

L'expérimentation par des bâtiments réels est une méthode qui implique la réalisation d'expériences directement sur des bâtiments existants, en collectant des données sur le terrain à l'aide de différentes mesures. Cette approche offre une compréhension concrète et tangible des performances des bâtiments dans des conditions réelles, en prenant en compte les interactions complexes entre les différents facteurs tels que la conception du bâtiment, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ainsi que les conditions météorologiques.

Dans sa thèse intitulée "Assessment of cool roof technology for its energy performance in buildings", Tetali, (2011) a étudié six revêtements de toit frais (ciment blanc, deux types de peinture acrylique et deux types de carrelage en céramique) appliqués directement sur le toit d'un hôtel en Inde. Les résultats obtenus à l'aide d'une instrumentation spécialisée ont montré que les carreaux en céramique blanche présentaient les meilleures réductions de température. Dans une étude menée par Kolokotroni et al., (2018), une peinture réfléchissante ($\rho=0,82$, $\varepsilon=0,90$) a été appliquée sur le toit d'une maison à faible revenu en Jamaïque. Les mesures de la température de l'air intérieur ont démontré qu'après l'application de la peinture froide, le salon était en moyenne plus frais de $2,3^{\circ}\text{C}$.

Une comparaison de l'efficacité de quatre revêtements de toiture existants par rapport à un toit en béton conventionnel a été réalisée par Radhi et al., (2017) sur différentes maisons à Bahreïn, dans des climats chauds et secs. Les résultats ont indiqué que les toits en tuiles de couleur claire et les revêtements métalliques blancs étaient relativement plus frais et plus confortables que les autres options. En Algérie, dans une étude de magister réalisée par Adjiel, (2010), une application extensive de toiture végétalisée a été effectuée sur une maison située dans un climat semi-aride à Constantine. Les résultats ont montré une réduction moyenne de $1,20^{\circ}\text{C}$ de la

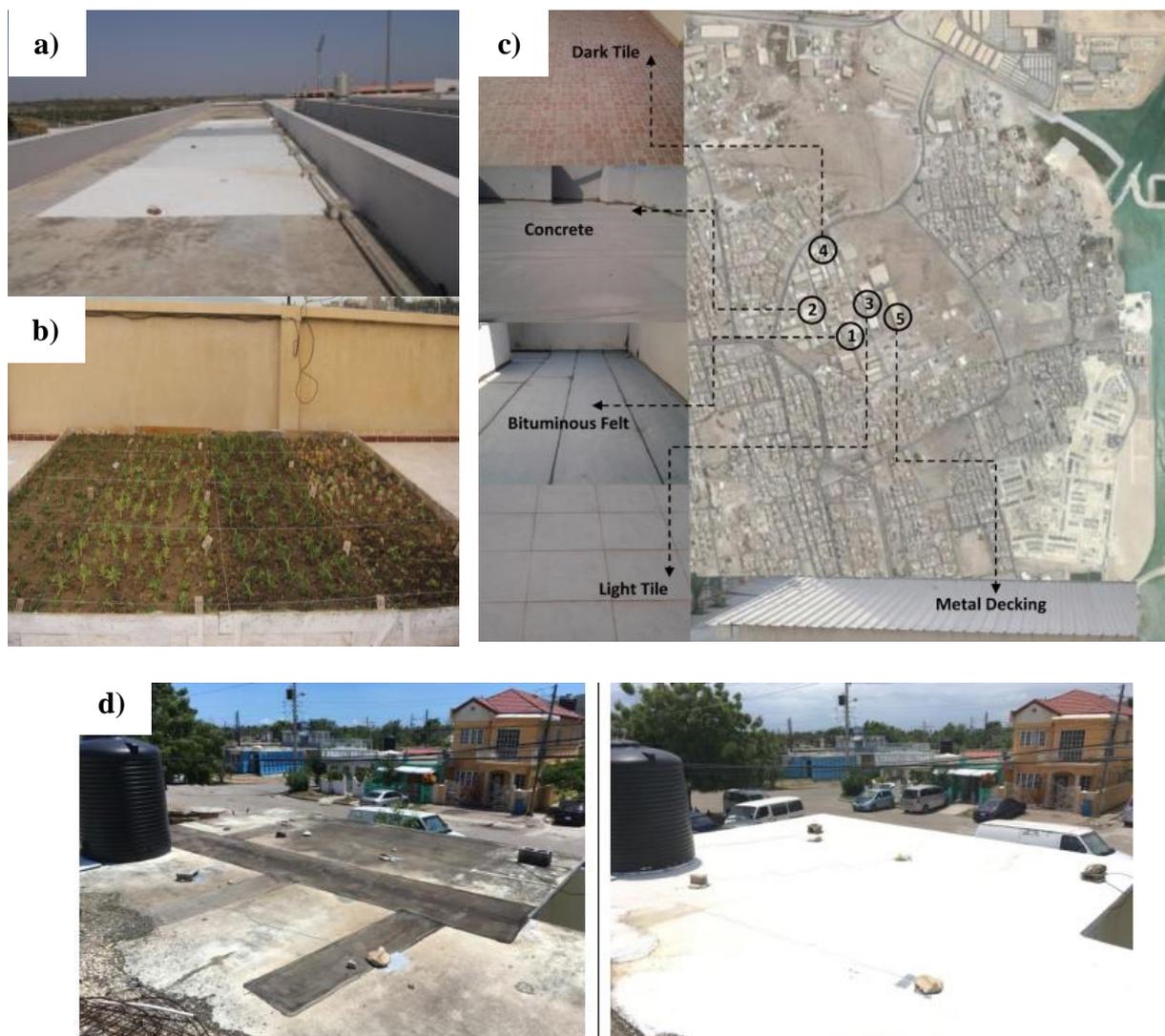


Figure 3.4 : Exemples d'études expérimentales utilisant des bâtiments réels existants. (Source : a) (Tetali, 2011) ; b) (Adjiel, 2010) ; c) (Radhi *et al.*, 2017) et d) (Kolokotroni *et al.*, 2018)).

Température intérieure pendant le mois de juin par rapport à une toiture conventionnelle en carrelage de type granito ($\rho = 0,15$ à $0,20$). La figure 3.4 illustrant quelques exemples des études expérimentales effectuées sur des bâtiments réels. Cependant, cette méthode n'est pas largement utilisée par les chercheurs en raison de ses coûts élevés, des limitations de contrôle, de la disponibilité des bâtiments et parfois de la complexité des systèmes.

3.1.3.2. Expérimentation par des modèles réduits

De nombreux chercheurs ont utilisé des cellules d'essai à échelle réduites pour mener des expériences visant à évaluer l'efficacité thermique des techniques de toiture passive, en particulier dans des conditions climatiques chaudes. Cette méthode est

largement adoptée dans la recherche académique en raison de ses avantages et de sa capacité à étudier et analyser des phénomènes physiques complexes grâce à la similitude entre la cellule d'essai et le modèle réel. Elle permet de fournir des prédictions réalistes pour une application à grande échelle et de contrôler des facteurs qui peuvent être confondus à une échelle plus vaste. Le tableau 3.1 présentent des Exemples de cellules tests à une échelle réduite réalisées pour étudier les toitures.

Pleins d'informations peut se trouver dans le travail de Lirola et al., (2017) intitulé « *A review on experimental research using scale models for buildings : Application and methodologies* » qui couvert tous les détails possibles sur les types des modèles réduits. D'après cet article, les échelles utilisées par les chercheurs allant jusqu'à "1/12" et les échelles les plus fréquentes sont "1/20" et "1/50". Bien que cette méthode présente de nombreux avantages, le coût élevé reste un problème majeur à prendre en compte. En outre, Cattarin *et al.*, (2016) ont réalisé un état de l'art sur les études menées à l'aide de cellules de test à petite et grande échelle installées à l'extérieur. Leur analyse met en évidence les différentes opportunités et limitations de cette technique par rapport aux études réalisées en laboratoire ou sur des bâtiments réels existants. Ils soulignent les avantages de pouvoir contrôler les conditions expérimentales et d'obtenir des résultats plus proches des conditions réelles, ainsi que les défis liés à la représentativité et à la complexité de la mise en place de ces installations.

Dans cette section, l'analyse des études comparatives vise à évaluer l'impact des protections passives des toitures sur les fluctuations de la température intérieure, la réduction du flux de chaleur et la température des surfaces des dalles en comparaison à un cas de référence.

Dans le but de comparer le potentiel des techniques de rafraîchissement radiatif utilisant différents matériaux réfléchissants avec d'autres approches, plusieurs études expérimentales ont été réalisées. En 2003, une publication de Nahar et ses collègues a décrit une expérimentation portant sur la performance thermique de huit techniques passives. Cette étude a utilisé plusieurs cellules de test identiques dans des régions arides (Figure 3.5). Les résultats de l'analyse comparative ont révélé que le système de toit-étang présentait les meilleures performances tout au long de la journée. Cependant, pendant les heures diurnes de l'été, l'utilisation de petits morceaux de céramique blanche fixés sur le toit a démontré les meilleurs résultats, entraînant une réduction de 11 °C de la température de l'air intérieur de la structure. **En conclusion, le potentiel de ces techniques varie en fonction du moment de la journée (Nahar *et al.*, 2003).**

En utilisant le même principe de comparaison expérimentale à l'aide de cellules de test, Amer, (2006a) et Hamdan et al., (2012a) ont mis en évidence que le traitement des toitures en béton avec une peinture blanche réfléchissante offre un fort potentiel de refroidissement de l'air intérieur dans les climats chauds et arides. De plus, ces auteurs ont conclu que le refroidissement par évaporation est la technique passive la plus efficace. Cependant, il convient de noter que cette technique nécessite une importante quantité d'eau (environ 50 litres par mètre carré par jour). Dans cette optique, ils ont recommandé l'utilisation de peinture blanche et de carreaux de céramique blanc comme solution à la fois économique, pratique et durable, permettant une réduction significative du flux de chaleur à travers le toit.



Figure 3.5 : Les différentes cellules tests construit à Jodhpur, Inde. (Source : (Nahar *et al.*, 2003))

Récemment, Kachkouch, (2019) a réalisé une thèse de doctorat sur « l'évaluation des performances thermiques de techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud de Marrakech (Maroc) ». Il a évalué expérimentalement au cours d'une surveillance estivale de 29 jours quatre techniques passive à savoir ; la peinture blanche, l'ombrage à l'aide de textile blanc ventilé (13 cm) et l'isolation thermique appliqués à des toitures en béton (Figure 3.6). Les résultats montrent que la toiture blanche hautement réfléchissante a la performance thermique la plus élevée puisqu'elle abaisse la température du plafond de 13,0 °C par rapport à la cellule de référence ; tandis que pour les toits thermiquement isolés et les toits ombragés, la réduction de la température était inférieure à 9,9 °C et 8,9 °C respectivement. Enfin, la toiture peinte en blanc a permis de réduire le flux de chaleur de 66 %.

La conclusion que nous avons tirée de ce travail est que les propriétés du matériau d'ombrage (réflexion, émissivité et conductivité) affectent la température du flux d'air à l'intérieur de la cavité, ce qui diminue l'aspect de

protection du système contre les gains de chaleur solaire. En outre, l'isolation dans les climats chauds et arides est moins performante que dans les climats froids.

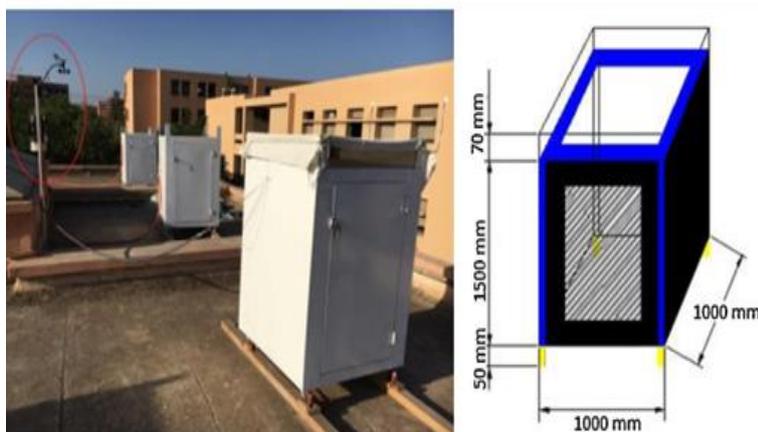


Figure 3.6 : Les cellules-test utilisées dans l'étude des techniques passives. (Source : (Kachkouch, 2019))

Dans une comparaison expérimentale supplémentaire, Krüger et al., (2016).ont étudié le potentiel de refroidissement d'une toiture à bassin ombragée, naturellement ventilée et hautement réfléchissante par rapport à un bâtiment résidentiel à forte masse thermique dans un climat chaud et aride. Les résultats indiquent que les toitures à bassin ventilé permettaient une réduction plus importante de la température maximale, jusqu'à 7,7°C. L'efficacité supérieure du bâtiment à masse thermique élevée a également permis de réduire le nombre de degrés-jours de refroidissement. Les auteurs recommandent l'utilisation de toitures à bassin ventilé avec une masse thermique élevée pour résoudre ces problématiques. En 2004, des chercheurs ont comparé les performances de refroidissement d'une cellule d'essai équipée d'un toit hautement réfléchissant à celles d'un Skytherm dans des conditions climatiques chaudes à Maracaibo. Les résultats ont démontré que la cellule d'essai avec Skytherm avait une meilleure performance de refroidissement, avec une température intérieure constamment inférieure de 2°C (González and Givoni, 2004). **Il est important de noter que le Skytherm présente des coûts de construction et d'entretien plus élevés qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude.**

En Algérie, les chercheurs Bencheikh and Bouchair, (2008) ont mené une étude sur un toit évapo-réfléchissant à Laghouat, qui combine une feuille d'aluminium réfléchissante, une peinture blanche à base de titane et un lit de roche à haute capacité thermique partiellement rempli d'eau (Figure 3.7). Ses résultats ont démontré que ce système peut réduire les températures internes des pièces jusqu'à 10 °C par rapport à une toiture nue pendant l'été. **Cependant, aucune évaluation de la consommation d'eau, de la charge supplémentaire sur la structure du toit et du processus d'entretien n'a été réalisée par les auteurs.**



Figure 3.7 : Cellules test avec une toiture évapo-réfléchissante. Source : (Bencheikh and Bouchair, 2008)

Pendant les étés omanais, deux cellules d'essai mesurant 160cm×160cm×230cm (Figure 3.8) ont été construites dans le but d'évaluer les avantages de l'utilisation d'une isolation en mousse de polystyrène associée à un réflecteur thermique en tant que toiture froide, ainsi que l'effet de la circulation d'air entre ces éléments. Les essais sur le terrain ont démontré que la pièce équipée de ce système présentait des températures de l'air intérieur et des flux de chaleur plus bas que ceux de la toiture de référence classique. En effet, le flux de chaleur à travers le toit ventilé a diminué respectivement de 23 W/m² et 29 W/m² lorsque les ouvertures de la cavité étaient de 0,25 cm et 50 cm. (Kumar V. and Mahalle, 2016). **Ce domaine de recherche suscite un vif intérêt au sein de la communauté académique. Cependant, il est évident que des avancées supplémentaires sont nécessaires dans le domaine de l'optimisation des toits passifs, en particulier dans les climats chauds et arides.**



Figure 3.8 : Les chambres d'essais utilisées dans l'étude expérimentale. Source :
(Kumar V. and Mahalle, 2016))

3.1.4. La méthode numérique

L'utilisation de la simulation numérique est devenue un outil incontournable pour l'analyse de divers facteurs critiques interconnectés. En particulier, elle permet de prédire le comportement futur d'un système et d'apporter les ajustements nécessaires. Dans le domaine de la thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments, de nombreux logiciels sont capables de fournir des informations détaillées sur le flux de chaleur et le transfert de masse, ainsi que sur les besoins en énergie pour le refroidissement des espaces. Une étude comparative approfondie menée par Spitz, (2012), dans sa thèse intitulée "Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments" a confirmé la fiabilité des principaux outils de simulation tels que Trnsys, EnergyPlus, Comfiepléiade, CoDyBa et SimSpark. Parmi ces outils, le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS est largement reconnu pour la crédibilité de ses résultats et est couramment utilisé dans les études environnementales axées sur la thermique des bâtiments. De plus, selon Lirola *et al.*, (2017), la simulation numérique est devenue la méthode prédominante dans le domaine de l'architecture.

Récemment, Mahmoud and Ismaeel, (2019) ont effectué une séquence itérative de 21 simulations validées en utilisant le logiciel Design Builder, qui utilise le moteur de simulation EnergyPlus. L'objectif était d'évaluer l'impact de différentes solutions de toiture passive sur la consommation d'énergie, les charges de refroidissement et les émissions de carbone dans trois zones climatiques différentes en Égypte : chaud et

humide, modérément humide et chaud et aride. Les quatre types de toiture étudiés étaient les suivants : a) toiture conventionnelle, b) toiture végétalisée (plantation extensive et intensive), c) toiture à haute réflectivité solaire, et d) toiture inclinée (avec une inclinaison de 30° et 60°). Les résultats ont montré de meilleures performances dans les climats arides par rapport aux autres régions. La peinture réfléchissante blanche s'est avérée être la meilleure solution en termes de performance du bâtiment pour la ville d'Assouan. Elle a permis de réduire la charge de refroidissement de 31% (16,7 kW/an) et la consommation d'énergie de 17% (9000 kWh/an), tout en enregistrant la plus forte réduction moyenne des émissions de carbone de 19% (434,6 kgCO₂/an) à Assouan. La toiture végétalisée extensive a réduit la charge de refroidissement de 7%, la consommation d'énergie de 3% et les émissions de carbone de 3%. Les résultats ont recommandé l'application de la peinture solaire réfléchissante dans les climats chauds et arides, tandis que ses performances étaient relativement moins efficaces pour les villes du Caire et d'Alexandrie, caractérisées par des climats chauds et humides et modérément humides, respectivement.

Dans le même scénario de comparaison entre toiture végétalisée et toiture réfléchissante, Zinzi and Agnoli, (2012b) a réalisé une simulation numérique comparative des conditions de confort thermique avec la performance énergétique des bâtiments résidentiels dans trois villes différentes. En utilisant l'interface Design Builder, deux typologies de bâtiments résidentiels les plus courantes ont été modélisées. Trois scénarios ont été simulés : toiture conventionnelle ST ($\rho = 0,25$, $\varepsilon = 0,9$), toiture réfléchissante CR - blanche ($\rho = 0,8$, $\varepsilon = 0,9$), toiture réfléchissante CR avec revêtement réfléchissant métallique à faible émissivité ($\rho = 0,65$, $\varepsilon = 0,4$) et toiture végétalisée GR. Les résultats ont montré que l'application de la toiture réfléchissante et de la toiture végétalisée a entraîné une réduction de plus de 73% du nombre d'heures avec des températures de fonctionnement supérieures à 28 °C dans le climat aride chaud de l'Égypte. La toiture réfléchissante a permis une économie de 40%, tandis que la toiture végétalisée humide s'est avérée être la meilleure solution avec une économie totale d'énergie de 45%. La toiture réfléchissante a été considérée comme la meilleure solution passive dans les zones principalement dominées par le refroidissement. De plus, l'efficacité de la toiture végétalisée dépend de l'humidité du sol. Une toiture végétalisée bien humidifiée présente de bonnes performances de refroidissement mais nécessite une consommation d'eau élevée pendant la saison chaude et sèche.

Pour sa part, Dabaieh *et al.*, (2015) ont étudié l'efficacité de la toiture réfléchissante passive en tant que mesure rentable pour réduire les charges de refroidissement et maintenir le confort thermique des occupants. En utilisant Design

Builder avec EnergyPlus, ils ont exploré différentes combinaisons de forme de toiture et de matériau, ce qui a donné lieu à 37 probabilités de conception de toiture.

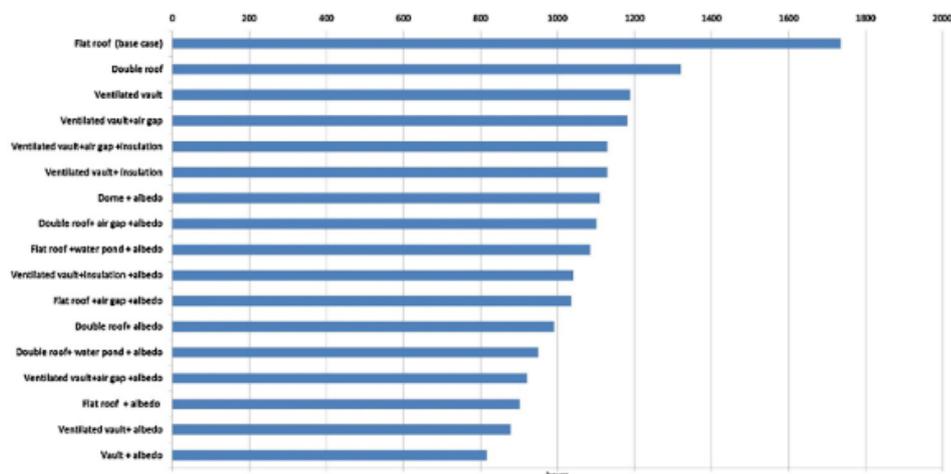


Figure 3.9 : Nombre d'heures d'inconfort pour les différents types de toits simulés.

(Source : (Dabaieh *et al.*, 2015))

À travers une série de comparaisons et de combinaisons, les résultats ont indiqué que l'utilisation d'une toiture en voûte avec revêtement à haut albédo était la solution de toiture réfléchissante la plus efficace. Les simulations ont démontré une réduction de 53% des heures d'inconfort (816 heures de refroidissement par rapport aux 1735 heures du cas de référence). Cela se traduit par une économie de 826 kWh d'énergie et une économie nette de 400 livres égyptiennes/m² pendant la saison estivale par rapport au cas de référence. De plus, en combinant les effets de la ventilation naturelle et d'une toiture réfléchissante, les conditions de confort intérieur ont été améliorées de 32% par rapport au cas de référence.

Une comparaison entre une toiture double avec bassin d'eau et revêtement réfléchissant et une toiture plate avec eau et revêtement réfléchissant a démontré que la première option obtenait de meilleurs résultats. Cela confirme que la combinaison d'une toiture ventilée avec un bassin d'eau est plus efficace qu'un bassin ouvert réfléchissant dans les climats chauds et secs (Sharifi and Yamagata, 2015). Par contre, lorsqu'on compare ces derniers à une toiture plate avec albédo (toiture réfléchissante), on constate qu'elle est plus efficace que l'approche par évaporation pour réduire les heures d'inconfort (Figure 3.9).

Goudarzi et Mostafaeipour, (2017) ont mené des expériences et des évaluations numériques afin d'évaluer l'impact de quatre systèmes passifs sur la demande énergétique d'une maison résidentielle à Kerman, en Iran. Les systèmes étudiés

comprenaient un bassin sur le toit (bassins non couverts sans aspersion avec des profondeurs de 10 cm et 20 cm, et une isolation de 5 cm d'épaisseur), une toiture végétalisée (avec une couche de terre de 20 cm et deux types de plantes, l'herbe Savanna et l'herbe Manila), une maison souterraine et un capteur de vent. L'étude a également évalué le coût du cycle de vie (CCV), incluant les coûts initiaux, d'exploitation et de maintenance, ainsi que le potentiel d'économie d'énergie de refroidissement de chaque système sur une période de 20 ans. La durée de l'étude s'est étendue sur 138 jours, de mai à octobre. Les résultats ont démontré que le capteur de vent était le système le plus efficace en termes d'économie d'énergie de refroidissement, suivi de la toiture végétalisée, du bassin sur le toit et de la maison souterraine.

Lorsqu'on compare les approches basées sur l'évapotranspiration et l'évaporation, la toiture végétalisée avec de l'herbe Savanna a réduit les pertes de chaleur de 78,1%, tandis que le bassin sur le toit avec une profondeur de 20 cm a réduit les pertes de chaleur de 48,6%. De plus, la perte d'énergie quotidienne de la maison avec toiture végétalisée a présenté de meilleures performances (1740,3 kcal/h) par rapport au bassin sur le toit (1090,1 kcal/h). Les économies d'énergie annuelles les plus élevées, même sur 20 ans, ont été observées dans le cas de la toiture végétalisée (82 600 000 kcal/h) par rapport au bassin sur le toit (51 400 000 kcal/h). L'analyse économique a révélé que le capteur de vent et le bassin sur le toit étaient les approches les plus économiques. L'étude a utilisé les coûts de construction, d'exploitation et de maintenance de chaque système, ainsi que les économies d'énergie réalisées par chaque système, comme critère de décision principal pour la sélection du système le plus rentable.

Dans une étude menée par Sabzi *et al.*, (2015), les performances de trois systèmes passifs de refroidissement ont été évaluées et comparées sur un bâtiment résidentiel typique à Shiraz, en Iran, pendant la période estivale chaude et sèche. Les systèmes étudiés étaient un bassin d'eau (avec une profondeur de 6 cm), un bassin d'eau avec de l'eau contenue dans des sacs, et un écran réfléchissant (voir Figure 3.10).

Les auteurs ont résolu numériquement le modèle mathématique pour chaque configuration de toiture, puis ont validé les résultats avec des données expérimentales. Les résultats ont montré que le bassin d'eau, l'écran réfléchissant et l'enveloppe d'eau réduisaient les gains de chaleur de 19 %, 13 % et 4 % respectivement par rapport à une toiture conventionnelle. L'étude a conclu que les performances de chaque technique dépendent de l'heure de la journée. Le bassin d'eau et l'écran réfléchissant ont montré une performance relativement similaire le matin, tandis que l'après-midi, le bassin d'eau

a entraîné des températures intérieures plus basses et une demande de refroidissement réduite.

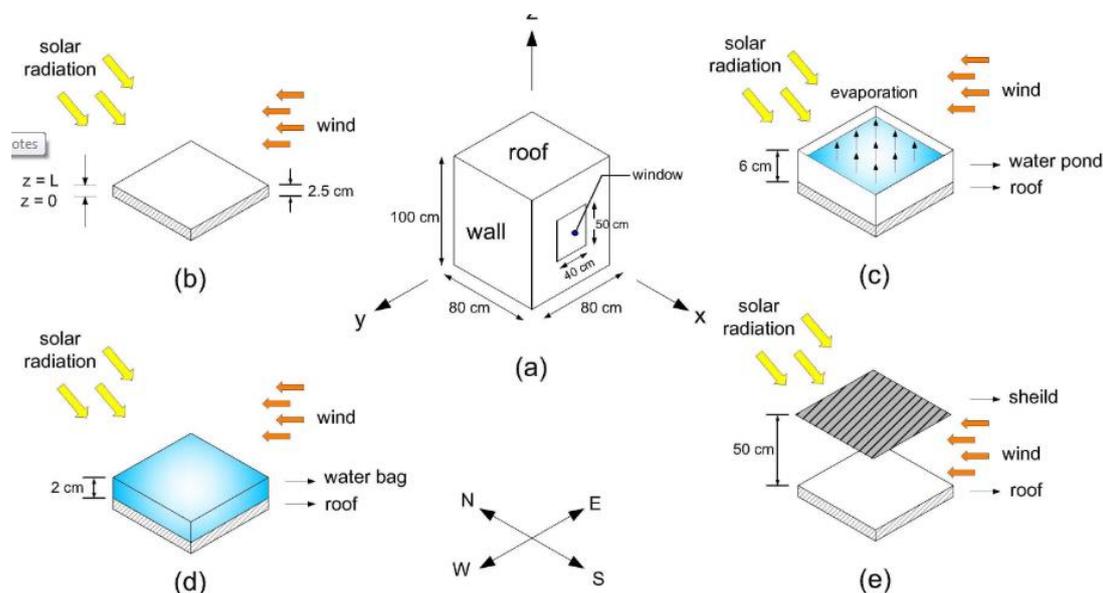


Figure 3.10 : Représentation schématique des différentes configurations de toiture expérimentées. (Source : (Sabzi et al., 2015)).

3.2. Synthèse des études analysées

Les recherches mondiales se sont intensifiées pour répondre aux défis liés à la demande croissante de refroidissement mécanique des bâtiments, aux exigences de confort intérieur et extérieur, ainsi qu'au changement climatique urbain. Les études scientifiques ont démontré que le refroidissement passif par le biais des toitures constitue une alternative rentable permettant d'économiser de l'énergie, d'assurer le confort thermique dans l'environnement bâti et de réduire l'empreinte carbone.

Une analyse comparative de nombreux articles et thèses de doctorat a révélé des informations importantes sur les performances des différentes techniques de rafraîchissement passif appliquées au niveau de la toiture, telles que les toits réfléchissants, les toits ventilés, les toits avec bassins d'eau et les toits végétalisés ; ainsi que sur les effets combinés de ces techniques. Les résultats des études systématiques ont confirmé l'efficacité des toits réfléchissants pour les bâtiments résidentiels dans les régions chaudes et arides, en utilisant des approches analytiques expérimentales, numériques ou une combinaison des deux.

Tableau 3.1 : Exemples de cellules de test construites pour étudier les toitures passives dans les climats chauds. (Source : Adapté par Auteur, 2019)

| Référence | Climat | Les cellules test | Les systèmes étudiés |
|--|---|---|--|
| (Hernández-Pérez <i>et al.</i> , 2018) | Tropical |  | Toit gris Toit rouge Toit blanc réfléchissant |
| (May Tzuc <i>et al.</i> , 2019) | Climat chaud |  | Toit ventilé ajustable |
| (Qin <i>et al.</i> , 2017) | Chaud et tempéré |  | Peintures de laques : (bleu, vert, jaune, noir, blanc) |
| (Amer, 2006b) | Chaud et aride |  | Cool Roof Toit isolé (couche de laine de verre 5cm) Pond roof Toit évaporatif (sac d'eau) Cheminée solaire |
| (Pearlmutter and Rosenfeld, 2008) | Climat chaud et aride (Désert de Negev) |  | Terre sèche Terre mouillée Gravier léger Ombrage par un tissu |
| (Hamdan <i>et al.</i> , 2012) | Climat chaud et aride |  | Ciment blanc Morceaux brisés de céramique blanc Couche d'argile de 3cm d'épaisseur |

| Référence | Climat | Les cellules test | Les systèmes étudiés |
|---|--|--|---|
| (Zingre <i>et al.</i> , 2015) | Climat tropicale |  | Toiture ventilée naturellement |
| (MANNIVANNAN and JAFFARSATHIQ ALI, 2015) | Climat chaud et aride |  | Matériau à changement de phase |
| (Pisello, Castaldo, <i>et al.</i> , 2015) | Chaud et tempéré. |  | Cool Roof. Toit d'une membrane bitumineuse. |
| (Gian Marco Revel <i>et al.</i> , 2014) | mix of Mediterranean and Continental climate with hot summer and cold winter |  | Membrane gris standard $\rho = 0.13$ $\varepsilon = 0.82$ Membrane froide : $\rho = 0.30$ $\varepsilon = 0.78$ |
| (Esparza L. <i>et al.</i> , 2018) | 3 types de climat chaud et humide |  | Bassin d'eau sur le toit Bassin d'eau sur le toit avec tissu flottant Tissu humide |
| (Pearlmutter and Berliner, 2017) | Climat chaud et sec |  | Bassin de toit psychrométrique opérable |

De plus, il est essentiel de prendre une décision éclairée lors du choix de la méthode passive de toiture la mieux adaptée à un bâtiment spécifique, car chaque technique présente des niveaux de performance différents. Parmi toutes les techniques de refroidissement passif analysées, les toits réfléchissants, utilisant des

revêtements/membranes à haute réflectivité et à haute émissivité, se sont avérés efficaces dans les climats arides. Outre leur coût avantageux, ces systèmes respectueux de l'environnement peuvent être installés sur des toits existants en utilisant des matériaux abordables disponibles sur le marché local et nécessitant des compétences d'installation simples. Il convient également de noter que certains bâtiments peuvent atteindre un niveau de durabilité souhaité en combinant plusieurs méthodes. Selon Kolokotroni et al. (2013), les toits réfléchissants pourraient être envisagés en combinaison avec d'autres rénovations passives.

Une autre conclusion importante tirée de cette étude est que l'utilisation de toits végétalisés extensifs n'est pas toujours avantageuse dans les climats chauds et secs, car leurs performances dépendent fortement de la teneur en eau du substrat, ce qui affecte la perte de chaleur par évapotranspiration. Étant donné la variabilité des techniques passives de toiture, chaque pays doit mener des recherches approfondies à l'échelle locale pour identifier les meilleures pratiques en matière de refroidissement passif grâce à des études comparatives.

3.3. Le positionnement épistémologique

Après une analyse approfondie des différentes études scientifiques menées sur le sujet de cette recherche, plusieurs solutions ont été examinées en tenant compte de divers aspects et en utilisant différentes méthodologies de recherche. En se basant sur les données de Scopus, la Figure 3.11 présente un nuage de mots-clés ("cloud words") qui illustre la fréquence des mots dans le domaine du rafraîchissement passif par la toiture. Cette représentation permet de mettre en évidence les principaux thèmes abordés. Les mots les plus fréquents apparaissent plus grands et sont placés au centre du nuage, tandis que les mots moins fréquents sont plus petits et situés en périphérie.

Sur la base de cette représentation, il ressort que l'axe le plus exploré dans les recherches, est l'efficacité énergétique, principalement établie par le biais d'outils de simulation. Par ailleurs, les systèmes les plus abordés sont la toiture végétalisée et le "cool roof". En conclusion, cette thèse se positionne par rapport à la multitude de recherches portant sur le refroidissement passif par la toiture en se concentrant sur l'étude de l'impact des procédés de rafraîchissement passif de type "cool roof" sur la performance énergétique des bâtiments résidentiels dans un contexte climatique chaud et aride.

différents dispositifs de rafraîchissement passif appliqués aux toitures, dans des conditions climatiques réelles et naturelles, sur des variables et des paramètres spécifiques. À l'aide de cellules de test, des informations concrètes seront recueillies concernant les interactions et les effets de ces éléments sur les performances thermiques, sur une période donnée. Ces résultats peuvent ensuite être exploités pour ajuster les modèles et les hypothèses de la méthode finale.

3- La simulation numérique

La simulation offre la possibilité d'explorer et d'analyser de manière approfondie l'impact de chaque solution sur les performances thermiques et énergétiques d'un bâtiment en isolant les paramètres à étudier. Elle permet de créer des scénarios virtuels en modifiant des paramètres spécifiques et d'évaluer les résultats obtenus. Cela permet d'obtenir une compréhension détaillée des effets de chaque solution et facilite la prise de décisions éclairées en matière de conception et de gestion des bâtiments.

Conclusion

Le domaine de l'optimisation de la performance des bâtiments à travers l'utilisation de techniques de rafraîchissement passif par la toiture constitue un vaste champ de recherche. La toiture joue un rôle crucial dans la performance thermique et énergétique des bâtiments, ce qui suscite un intérêt particulier parmi les académiciens et se traduit par de nombreuses recherches. A, ce titre, les études effectuées reposent principalement sur deux approches analytiques : l'expérimentation à l'aide de cellules réduites et la simulation numérique.

À la lumière de cette revue de littérature, il est clair que l'évaluation comparative des performances thermiques et énergétiques des différentes techniques de toiture passive mérite d'être approfondie, notamment dans les climats chauds et arides. En effet, les performances thermiques de ces techniques sont étroitement liées à la localisation géographique, ce qui nécessite une exploration approfondie dans des conditions climatiques réelles, telles que celles prédominantes à Biskra.

Par conséquent, des recherches supplémentaires menées dans cette région spécifique pourraient fournir des informations précieuses sur l'efficacité des toitures passives dans des conditions climatiques chaudes et arides. Ces connaissances contribueront à l'amélioration de la conception et de l'efficacité énergétique des bâtiments en proposant des solutions adaptées aux défis spécifiques de cette région.

PARTIE PRATIQUE

« Etude de l'impact des toitures passive sur la performance thermique et énergétique des bâtiments résidentiels dans un climat chaud et aride »

Chapitre IV

Evaluation Thermique in situ d'un Corpus Restreint d'Habitations

*« Aucun problème n'est aussi crucial pour l'architecte
que la nécessité de résoudre le problème dialectique
entre l'intérieur et l'extérieur »
Arnheim (1978)*

Introduction

La satisfaction et le bien-être humains sont directement affectés par l'environnement bâti. L'installation massive des climatiseurs sur les façades des bâtiments résidentiels, aujourd'hui, n'est qu'une forte preuve de l'inefficacité de l'enveloppe des constructions (propriétés thermo physiques des toits, de surfaces, de dispositifs, etc...). En outre, l'adaptabilité inadéquate des bâtiments au climat locale (régime de rayonnement solaire, température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et les précipitations) constitue le problème majeur dans la situation d'inconfort thermique ressentie par les résidents, ainsi que, la forte demande de l'énergie électrique pendant l'été.

Ce chapitre, par conséquent, abordera en premier lieu une analyse climatique de la ville d'étude afin de comprendre les exigences du confort humain dans les bâtiments des climats chauds. Considérant un échantillon des maisons contemporaines situées dans le sud Algérien, les conditions réelles de confort hydrothermique seront analysées à l'aide d'une méthode d'évaluation post-occupationnelle (POE). Cette méthode comprend deux outils complémentaires : des mesures in situ à l'aide d'une instrumentation technique et une enquête par questionnaire.

- Le premier outil consiste en des mesures in situ de températures de l'air intérieure et extérieure, de température de surface et d'humidité relative, réalisées pendant les journées les plus chaudes de la période estivale. L'acquisition des données a eu lieu dans un ensemble des maisons individuelles contemporaines sélectionnées pour cette étude, et elles seront utilisées pour valider le modèle de simulation.
- Le deuxième outil consiste en une enquête par questionnaire portant sur la perception du confort thermique dans les espaces intérieurs et le niveau de satisfaction des habitants vis-à-vis des valeurs physiques mesurées. L'analyse inclut également le comportement des occupants et le contrôle individuel.

Le but ultime de ce travail empirique est de fournir une compréhension globale des problèmes de confort hydrothermique existant dans les maisons à plusieurs étages à Biskra, tout en évaluant le comportement thermique des toitures-terrasses dans des conditions climatiques extrêmes.

4.1. Présentation du contexte d'étude

« Plus la compréhension du concept de climat est enrichie, et plus son extension est réduite »
(Durand-Dastés, 2011).

Généralement, les bâtiments sont marqués par des formes déterminées par les exigences du climat ; alors que ; chaque localité présente des facteurs et des variables climatiques qu'il est impératif de pouvoir les indiquer. Outre, la performance énergétique d'une construction dépend en grande partie des conditions climatiques de son environnement. Dans cette optique, afin d'évaluer le potentiel des stratégies de rafraîchissement passif appliquées aux bâtiments (nouveaux ou existants), il est primordial d'étudier leur environnement climatique. Cette étude nous permet la mise en exergue les limites, les opportunités d'amélioration et les choix judicieux d'emplacements pour les systèmes de rafraîchissement passif. La connaissance du climat est donc la base essentielle pour créer des habitats efficaces.

Notre recherche se concentre sur les techniques de rafraîchissement passif par les toits des bâtiments résidentiels dans les zones chaudes et arides, où le refroidissement de l'espace est une exigence principale pour les occupants. L'Algérie bénéficie d'une grande diversité climatique (Figure 4.1), avec 85 % de son territoire couvert par des conditions désertiques. C'est pourquoi, la ville de Biskra a été choisie comme contexte d'étude pour sa représentativité des climats désertiques.

4.1.1. Analyse des conditions climatiques de la ville de Biskra

Biskra, la capitale des Ziban et le premier pôle urbain saharien, est située à 470 km au sud-est de l'Algérie, à une latitude de 34.48°N, une longitude de 5.44°E et une altitude de 86 mètres au-dessus du niveau de la mer. Chef-lieu de wilaya, elle s'étend sur une superficie de 21671 km².

Selon la classification climatique de Köppen, le climat de Biskra est classé dans la région climatique BWh, correspondant à un climat chaud-aride (Semahi et al. 2019). Ainsi, Biskra bénéficie d'un climat désertique où l'été est la saison critique. Les degrés-heures de refroidissement atteignent 47708 heures, tandis que les degrés-heures de chauffage ne sont que de 15695 heures au cours de la décennie (2004-2018). Ces conditions climatiques entraînent des besoins importants en climatisation, nécessitant trois à quatre fois plus d'énergie pour refroidir un espace que pour le chauffer. Par conséquent, la problématique de la haute

consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels est l'un des enjeux principaux pour ce type de climat.

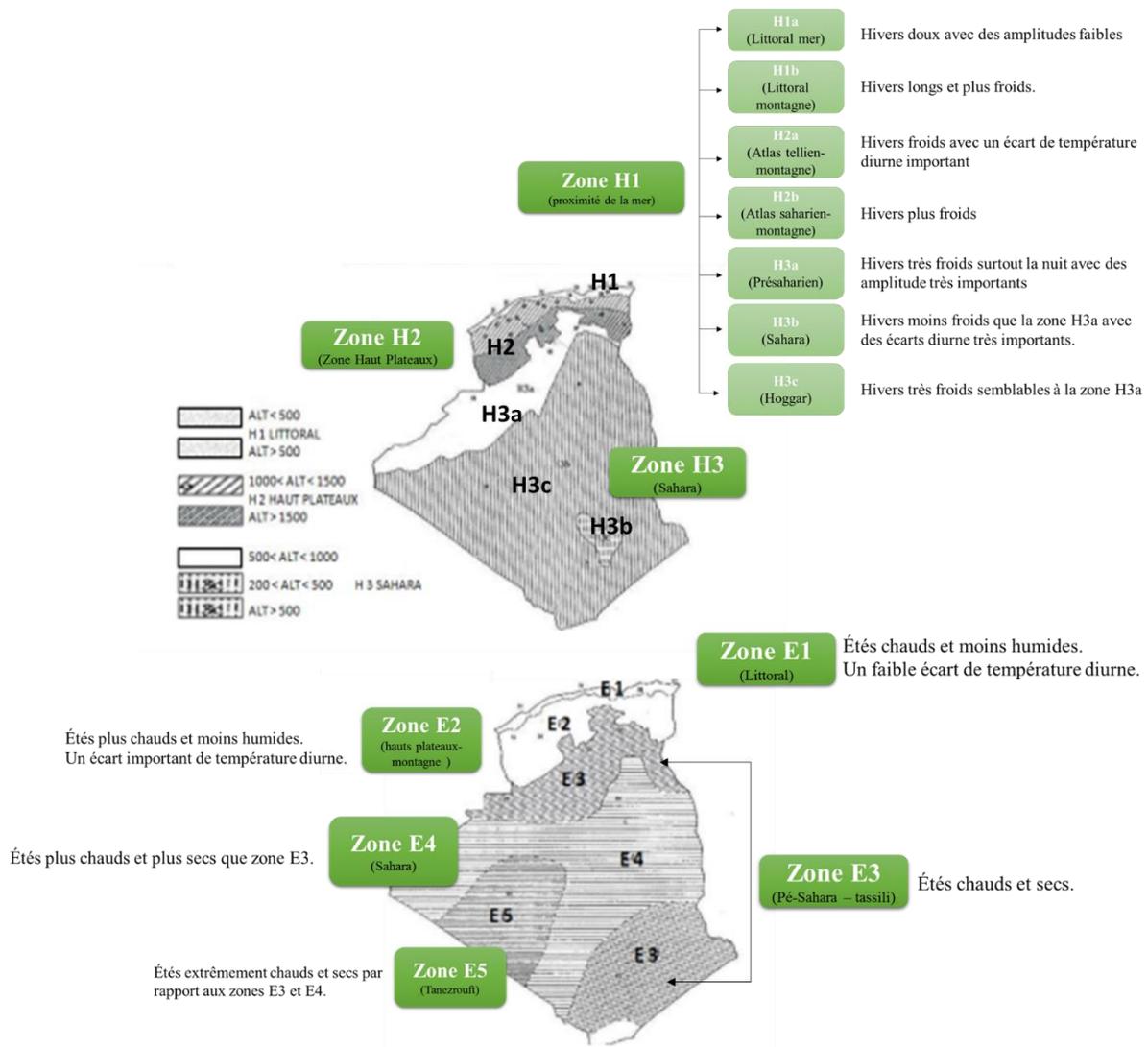


Figure 4.1 : Classifications des zones climatiques en Algérie, (Source : Oueld Henia- adapté par Auteur, 2018)

La saison estivale à Biskra se caractérise par des conditions climatiques extrêmement difficiles, notamment :

- Des températures extrêmement élevées, surtout en juillet, le mois le plus chaud, avec une grande amplitude thermique entre le jour et la nuit. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (ONM), Biskra a enregistré en juillet 2018 des températures maximales allant de 47,4°C à 49,7°C, ce qui en fait l'une des températures les plus élevées en Afrique (voir Figure 4.2).

- Un rayonnement solaire intense où la ville bénéficiant de 2100 à 4400 degrés-heures solaires par an et un rayonnement global quotidien variant entre 4753 Wh/m² à 9465 Wh/m².
- Une faible humidité relative, variant entre 28% le matin et 19% le soir en juillet.
- Des précipitations rares, ne dépassant pas les 20 mm. La précipitation moyenne pendant la période estivale est presque nulle, atteignant seulement 5 mm. Plus de détails sont présentés dans l'Annexe A.

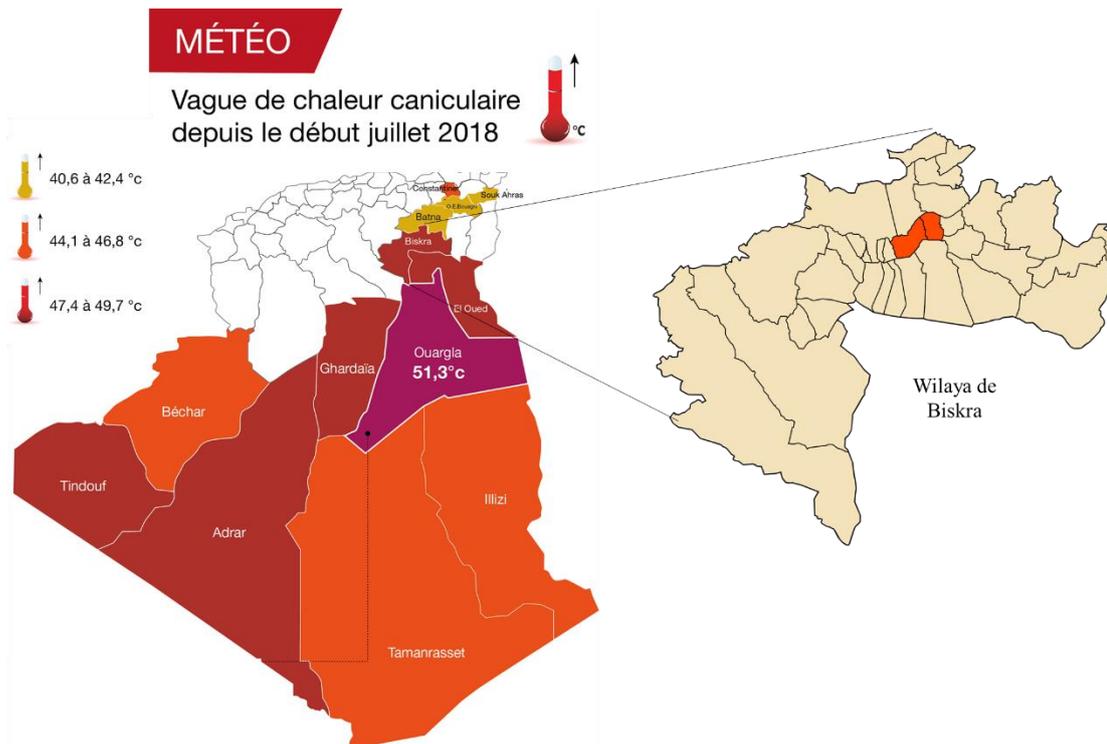


Figure 4.2 : Localisation géographique de la ville de Biskra en Algérie. (Source : Office Nationale de Météorologie (ONM) Juillet 2018).

En conclusion, l'analyse des différents graphes (Annexe A) a révélé que le climat de Biskra est un climat sévère, caractérisé par des températures relativement élevées avec des écarts importants en le jour et la nuit dans la plupart des mois (d'avril à octobre), des précipitations absolument faibles et un rayonnement considérable. Toutes ces informations ont une grande influence sur le type du système passifs le plus approprié, le bon emplacement, la direction optimale et la période la plus défavorable à améliorer. Il s'avère utile de prendre le climat en considération durant le processus de conception / rénovation.

D'après le diagramme psychométrique de Szokolay (Figure 4.3) en utilisant le logiciel de « Climat Consultant 6.0 », la majeure partie des mois d'été (d'avril à octobre) se situe en dehors de la zone de confort thermique (seulement 28.1% dans le confort). Alors que les habitants au cours de ces mois sont susceptibles de subir un stress thermique élevé dans les

espaces extérieurs et consommée une grande quantité d'énergie principalement pour refroidir les espaces intérieurs.

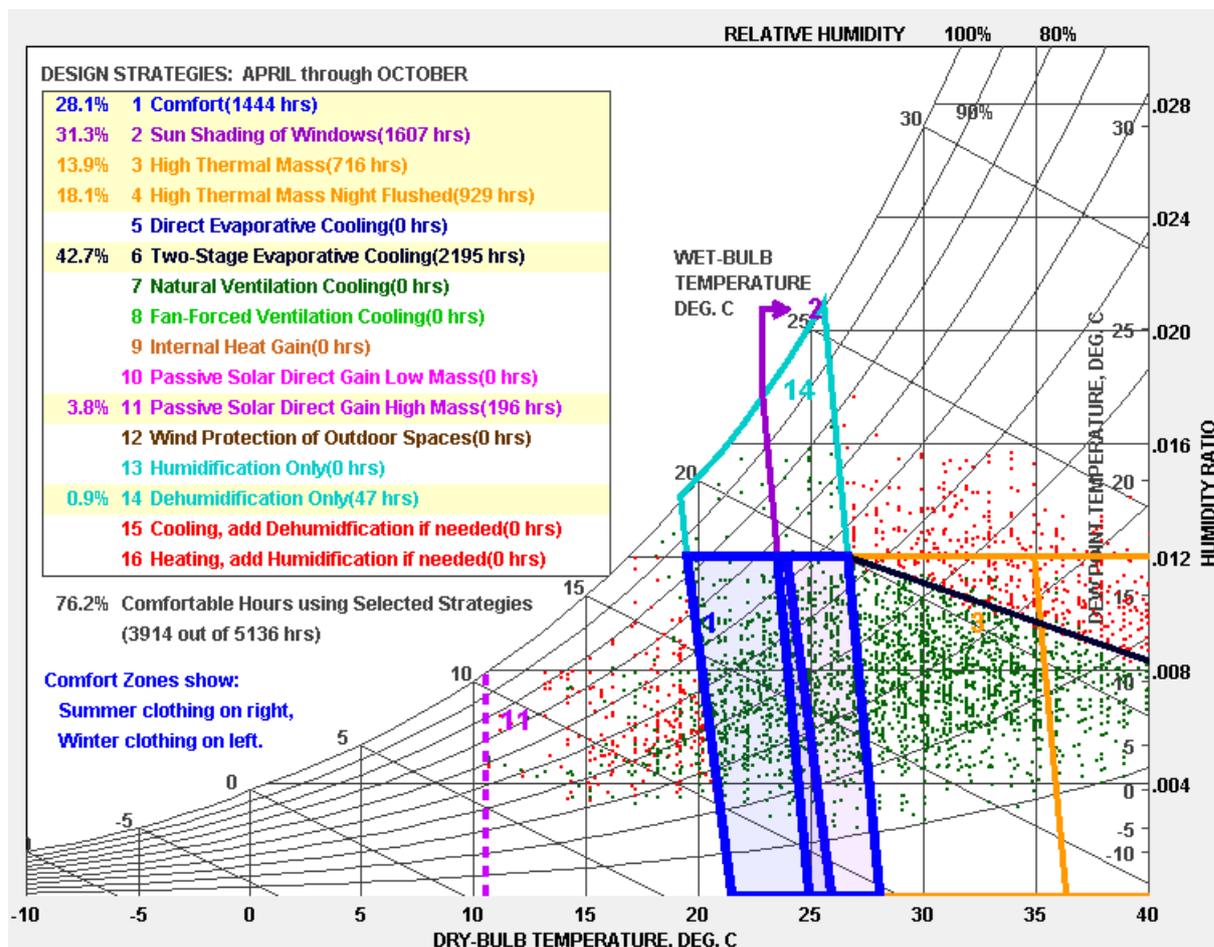


Figure 4.3 : Le diagramme psychométrique présentant les différents stratégies passive convenable pour le climat de Biskra. (Source : Climate consultant 6.0, Auteur 2019)

Encore, le diagramme fait révéler que la protection solaire des fenêtres est en besoin pour 32.4% du temps, alors que le refroidissement par évaporation directe et indirecte, ainsi que l'utilisation de matériaux à forte masse thermique, représentent respectivement 42.7% et 18.1%.

Enfin, parmi les stratégies de conception proposées par le logiciel, l'application d'une barrière radiante sous forme de feuille réfléchissante contribuera à atténuer le gain de chaleur par rayonnement à travers le toit dans les régions à climat chaud. Par ailleurs, l'emploi de matériaux de construction de couleur claire et l'application du concept de toits réfléchissants « cool roofs » aideront à réduire au minimum le gain de chaleur par conduction. Cependant, ces dernières soulignent l'importance de mener des recherches sur les techniques de rafraîchissement passif de type cool roof pour faire face aux problématiques de surchauffe et aux factures énergétiques élevées pendant la période estivale, notamment dans les régions chaudes et arides telles que Biskra.

4.2. Corpus d'étude

4.2.1. Aperçu sur le cadre bâti à Biskra

Chaque région a son propre climat et ses adaptations spécifiques. À Biskra, comme dans de nombreuses villes en cours de développement, la modernisation des modes de vie a relégué le climat au second plan lors de la construction des bâtiments. Le passage de la maçonnerie traditionnelle (toits et murs massifs avec une forte inertie thermique des matériaux locaux tels que la terre, la pierre, les branches de palmier, etc.) à la maçonnerie de blocs de ciment (toits légers, faible résistance thermique) largement utilisée dans le nord du pays, entraîne des surchauffes intérieures qui nécessitent l'utilisation systématique de la climatisation mécanique.

Le cadre bâti résidentiel à Biskra répond principalement aux besoins socioculturels et financiers des propriétaires, en ignorant totalement les conditions climatiques particulièrement rigoureuses pendant la saison chaude. Malheureusement, d'après les constats sur terrain, les maisons contemporaines de cette ville présentent des problèmes liés au confort thermique à l'intérieur des espaces, entraînant une forte demande en énergie électrique. En effet, Assurer le confort thermique d'un bâtiment et améliorer son efficacité énergétique dépend principalement du comportement thermique de son enveloppe, qui est tributaire des matériaux de construction et des caractéristiques architecturales. Bien entendu, la chaleur excessive transférée par le toit en béton est l'une des principales causes d'inconfort thermique. Cette partie de l'enveloppe couvre 36,7% du rayonnement solaire total tombant sur un bâtiment à un seul étage (Nahar, Sharma, and Purohit 2003) et contribue à environ 50% du gain de chaleur intérieur (Nahar, Sharma, and Purohit 1999).

Face à cette situation, il est essentiel d'évaluer l'effet de la composition matérielle et formelle des toitures (propriétés thermophysiques, couleur de surface, texture, dispositifs, dimensions, etc.) sur les échanges thermiques qui s'opèrent entre le bâtiment et son environnement. En traitant judicieusement les toitures en fonction des spécificités climatiques et en intégrant des systèmes de rafraîchissement passif, il est possible de garantir un confort optimal à l'intérieur du bâtiment tout en réduisant les coûts énergétiques et en améliorant considérablement sa performance climatique.

En agissant sur la surface extérieure des toits, la recherche vise à améliorer la performance thermique et énergétiques de l'habitat contemporain à Biskra tout en préservant l'essentiel de ses spécificités. Dans le but de parvenir à l'objectif poursuivi, Pour atteindre cet objectif, notre

recherche se concentre sur l'habitat contemporain de type maison individuelle auto-construite à Biskra. Ce choix est motivé par plusieurs raisons :

- Le secteur résidentiel est l'un des principaux consommateurs d'électricité, représentant 43% de la consommation totale du pays (APRUE 2019).
- L'habitat individuel contemporain auto-construit est la typologie la plus répandue, couvrant une grande partie du tissu urbain de Biskra (voir la Figure 4.4) (Sriti 2013).
- La quasi-totalité de ces habitats ont des toitures en béton sans protection extérieure.

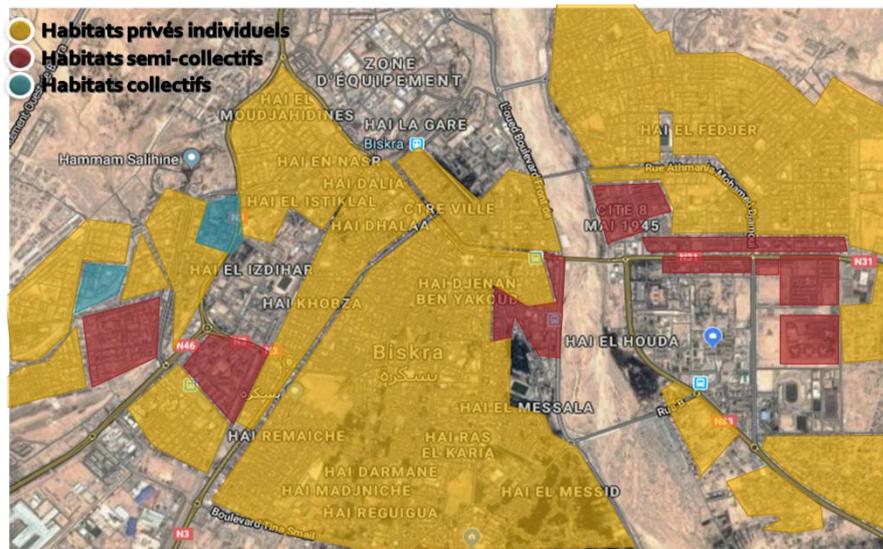


Figure 4.4 : Répartition de différent type d’habitats à Biskra. (Source : Auteur, 2019)

4.2.1.1. Caractéristique de l’enveloppe de l’habitat individuel contemporain.

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle essentiel dans les pertes d'énergie entre les environnements intérieur et extérieur (Ascione et al. 2021). Pour sélectionner les maisons à étudier, une enquête sur le terrain est effectuée, utilisant des documents graphiques tels que les plans architecturaux fournis, ainsi que des visites sur site pour identifier les caractéristiques matérielles (systèmes constructifs de l'enveloppe et traitement extérieur) et architecturales les plus récurrentes qui définissent la construction des habitations individuelles contemporaines auto-construites à Biskra.

Les résultats obtenus par l’enquête fait montrer que :

- La plupart des maisons sont construites sur un ou deux étages, incluant un accès au dernier étage, tout en partageant des murs mitoyens avec les maisons avoisinantes

- Le système de construction repose largement sur l'utilisation du béton armé comme structure porteuse.
- Les toits plats accessibles sont le type de toiture le plus couramment utilisé dans les habitats auto-construits.
- Les façades sont généralement inachevées, laissées brutes, sans enduit ni revêtement extérieur. Cependant, lorsqu'un revêtement est présent, il s'agit le plus souvent de mortier de ciment, généralement de couleur grise.
- Les fenêtres ont une dimension moyenne (variant de 1 m² à 1,44 m²) avec un vitrage simple.
- La maçonnerie des murs repose principalement sur l'usage de la brique creuse ou du parpaing creux, avec une épaisseur variant de 15 cm à 30 cm pour les murs extérieurs et de 10 cm pour les cloisons intérieures. L'emploi de la brique est la pratique la plus courante.

4.2.1.1.1. Analyse des caractéristiques des toitures

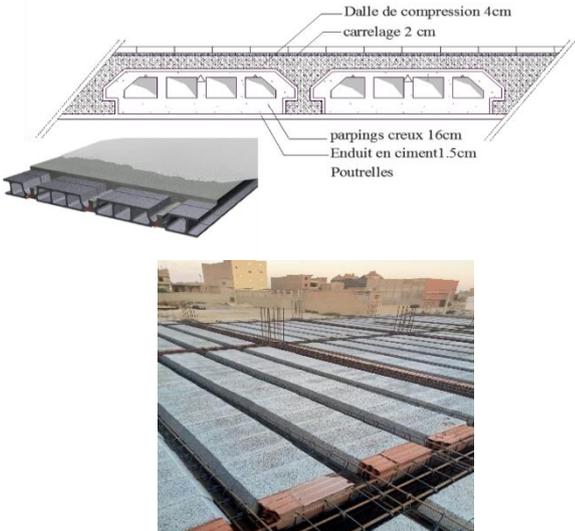
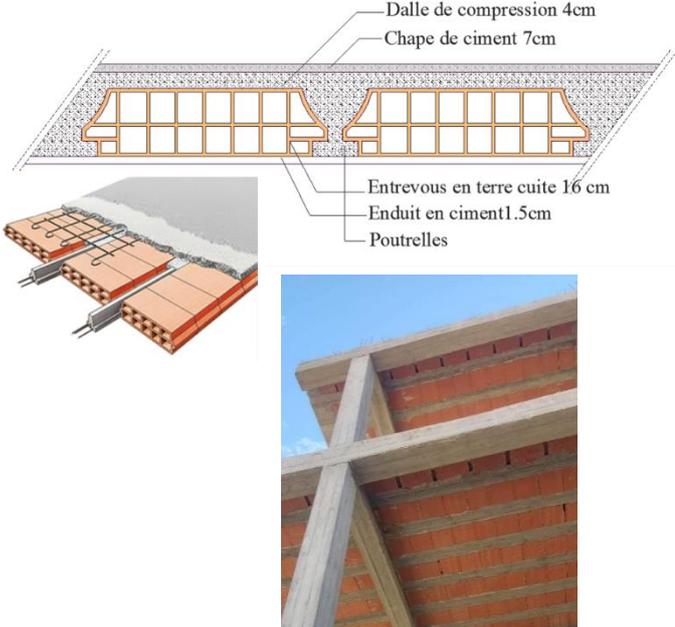
La toiture, en raison de son exposition aux conditions extérieures, en particulier au rayonnement solaire intense, s'avère être l'un des éléments de l'enveloppe du bâtiment les plus vulnérables. Elle exerce une influence majeure sur la performance thermique et énergétique des habitations, car une grande partie des transferts et échanges de chaleur avec l'air environnant s'effectuent à travers elle

Les savoir-faire ancestraux de construction de toitures massifs avec une forte inertie thermique, typiques des maisons de Biskra, ont été totalement oubliés. Ce changement dans les méthodes et les systèmes de construction est principalement dû à l'avènement des méthodes de construction modernes, ainsi qu'à la mauvaise résistance des matériaux traditionnels aux intempéries et à leur vieillissement. Dorénavant, les matériaux de construction locaux sont perçus par les habitants comme un signe de pauvreté (Sriti 2013).

L'analyse typologique effectuée a révélé que la caractérisation matérielle de l'enveloppe des habitations auto construites en lotissements montre l'absence de prise en compte de la dimension environnementale (climatique) dans les exigences conceptuelles et constructives lors de la production du cadre bâti résidentiel. Étant donné que la performance thermique et la demande énergétique des bâtiments dépendent principalement des attributs géométriques, formels et surtout des caractéristiques matérielles des toitures, le système constructif a été pris

comme paramètre décisif pour définir la taille de l'échantillon à considérer. L'Agence internationale de l'énergie affirme que plus de 40 % des économies d'énergie de refroidissement attendues sont directement attribuables aux améliorations de l'enveloppe des bâtiments, notamment le comportement thermique des toitures (Ascione et al. 2018). Ainsi, une interprétation architecturale de cet élément a été effectuée pour déterminer ses caractéristiques morphologiques et matérielles, telles qu'elles ont été construites par le propriétaire (voir Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Les caractéristiques prédominantes des toitures dans les habitats individuels autoproducts à Biskra.

| Caractéristique architecturale | | Photos sur terrain |
|--------------------------------|--|--|
| Type de dalle | Dalle de compression (béton armé) (4cm) + corps creux (16cm) |  |
| | Dalle de compression (béton armé) (4cm) + entrevous en brique (16cm) |  |

| | | | |
|--------------------------------|-------------------|--|--|
| Traitement des surfaces | Extérieure | Chape d'étanchéité en ciment |  |
| | | Pavage en carrelage, généralement de type Granito et de couleur claire |  |
| | | Sans revêtement (la dalle de béton armé) |  |
| | Intérieure | Faux plafond ou plâtre |  |

| | | | |
|--|---|--|--|
| | | <p>Enduit en ciment + peinture</p> |  |
| <p>L'usage</p> | <p>Pratique pour les tâches ménagères (séchage de linge...)</p> <p>En été, cette surface est utilisée pour passer la nuit sous le ciel.</p> |  | |
| <p>Dispositif de protection</p> | <p>Aucune mesure de protection n'a été mise en place sur les toits. Par contre, dans ce genre de maisons, les toits sont délimités par un parapet de 1.50 à 2 m de hauteur ; l'ombre procurée par ce mur terrasse et les murs des maisons mitoyens consiste la seule protection dont bénéficie cette partie horizontale de l'enveloppe.</p> | | |
| |  |  | |

4.3. Etude empirique : l'approche d'Evaluation Post- Occupationnelle (EPO)

4.3.1. Présentation de l'échantillon d'étude

« Le choix de tel ou tel type d'échantillon se fait en fonction des objectifs à atteindre, mais surtout des moyens et des conditions de l'enquête. » (Sriti 2013)

Le corpus de cette étude est, donc, un ensemble d'unités d'habitations représentatives de la production populaire en matière d'habitat de type maison individuelle unifamiliale, réalisées dans la ville de Biskra. Ces maisons ont été sélectionnées selon les critères suivants :

- 1) Le type de dalle le plus récurrent et le moins favorable en termes d'échanges thermiques.
- 2) La surface extérieure des toitures (en contact direct avec l'atmosphère) doit être revêtus en chape de ciment ou bien sans aucun traitement (la couche de béton armé).
- 3) Les clôtures et les murs mitoyens doivent être dans le faible hauteur possible pour éviter l'effet de l'ombre porté sur la surface.

Au total, douze (12) maisons avec toits-terrasses construits en utilisant des blocs de parpaings creux et sans aucun revêtement externe (chape de ciment), ont été examinées et étudiées dans le contexte de l'habitat individuel à Biskra (voir Figure 4.5). Cette typologie est la plus répandue et présente le moins d'avantages dans cette région en ce qui concerne la construction résidentielle. En été, cette typologie, cette typologie présente un inconvénient majeur en transmettant une quantité considérable de chaleur emmagasinée dans la surface par conduction (proportionnelle au coefficient de transmission de la chaleur du béton), augmentant significativement la charge de refroidissement. Le Tableau B.1 présenté dans l'annexe B fourni une description détaillée des caractéristiques physique et formelles des 12 maisons sélectionnées, incluant des plans architecturaux et photographies nécessaires pour offrir une représentation précise de chaque résidence.

4.3.2. L'approche d'évaluation post-occupationnelle (EPO)

« Un bon bâtiment doit pouvoir répondre à l'environnement et aux besoins des utilisateurs »

Clements-Croome, (2009).

Le bien-être humain est au cœur de tous les débats sur le confort des espaces intérieurs. Le confort thermique est une préoccupation essentielle pour les aménageurs et les concepteurs dans la production des environnements énergétiquement efficaces. Toutefois, cette notion est difficile à appréhender étant donné son caractère subjectif. Aujourd'hui, l'évaluation des milieux habitables vise à identifier des indicateurs de qualité des lieux en utilisant différentes méthodologies, parfois centrées sur les jugements des individus, parfois sur l'effet de propriétés environnementales mesurables, et parfois sur les deux ensembles.



Figure 4.5 : Les 12 habitats contemporains auto-produits étudiés dans ce travail.

(Source : Auteur, 2019)

L'approche d'évaluation post-occupationnelle (EPO) consiste en « évaluation systématique des constructions occupé pendant une certaine période de temps du point de vue des utilisateurs » (Frontczak et al. 2012) . Elle permet de déterminer dans quelle mesure un bâtiment répond aux besoins des utilisateurs. L'approche EPO facilite la modernisation et la rénovation des bâtiments, contribuant ainsi à améliorer les compétences de gestion et l'expertise en conception, ainsi que la satisfaction des usagers. Une évaluation après l'occupation est

fortement recommandée car elle fournit un feedback d'information des utilisateurs, ce qui peut réduire leur insatisfaction en identifiant les problèmes (Bordass and Leaman 2005).

L'approche EPO comprend deux méthodes complémentaires ; la méthode subjective (indiquant la perception des occupants de leur environnement bâti) et la méthode objective (utilisant des mesures physiques) (Abimbola Asojo 2021). Les deux méthodes sont interdépendantes car le management du bâtiment dépend des mesures physiques pour maximiser l'efficacité énergétique et minimiser l'inconfort thermique. De même, les concepteurs recherchent les réactions des occupants par des méthodes subjectives afin d'améliorer ou d'optimiser leurs structures (Zhang et al. 2018). L'évaluation des bâtiments après utilisation peut réduire les impacts négatifs sur la santé, la température, l'esthétique, la sécurité et l'entretien. Cependant, certains défis subsistent, notamment en termes de coûts, de temps, de ressources et d'expertise.

Cette section traite de l'évaluation du confort thermique dans un échantillon de bâtiments résidentiels situés dans un climat chaud et aride comme celui de Biskra. L'objectif était de fournir aux architectes toutes sortes d'informations sur la performance du bâtiment et formuler des recommandations fondées sur les appréciations et les avis des résidents.

Les objectifs de la réalisation d'une enquête sur terrain sont les suivants :

- L'étude du comportement et le sentiment réels des occupants en fonction des caractéristiques de l'enveloppe des résidences.
- Tirer les premières conclusions sur la performance du confort thermique dans les habitats contemporains autoproduits à Biskra.
- Fournir des données pour la calibration des résultats du logiciel de simulation.

4.3.2.1. Evaluation objective : Les mesures physiques

Généralement, le confort thermique constitue une condition essentielle pour la qualité des espaces résidentiels, en raison de son impact positif sur la productivité et la santé des résidents. L'étude empirique du comportement thermique des bâtiments dans un contexte réel reste la meilleure manière pour comprendre ce phénomène. C'est la stratégie privilégiée pour déterminer la réponse physique du bâtiment et interpréter la sensation et la satisfaction des occupants, ce qui permet d'identifier les problèmes et de les corriger. Cette section présente le

déroulement de la campagne de mesures in situ destinée à évaluer l'impact des paramètres structurelles et physiques de l'enveloppe sur le confort thermique.

4.3.2.1.1. Protocole de la campagne de mesure in-situ

L'ambiance thermique est influencée par une multitude de paramètres auxquels les individus sont plus ou moins sensibles. À ce titre, il convient de rappeler que l'acceptabilité thermique est analysée en fonction des critères quantitatifs représentés par le vote moyen prévisible (PMV) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD). Ces critères sont affectés par quatre grandeurs physiques : la température de l'air, la température surfacique (pour analyser les caractéristiques thermiques des toitures), l'humidité relative de l'air et la vitesse de l'air. Le métabolisme (met) et l'isolement vestimentaires des occupants (Clo) sont également inclus dans l'évaluation (A.N.S.I. ASHRAE 2010).

Dans un logement, la mesure de ces paramètres visent à quantifier l'environnement intérieur global et en particulier le confort thermique ressenti par les habitants. Pour ce faire, la prise des mesures est effectuée à l'aide d'un anémomètre de type "Testo 480" et un thermomètre infrarouge « Laserliner ThermoSpot IR ». Le Testo 480 est un instrument de mesure multifonctionnel équipé de sondes digitales intelligentes et d'une mémoire intégrée qui permet à l'utilisateur d'enregistrer tous les paramètres pertinents du climat intérieur et extérieur, ainsi que le confort thermique humain (PMV et PPD) et la qualité de l'air, le tout avec un seul appareil. De son côté, le thermomètre infrarouge " Laserliner ThermoSpot IR " est un appareil qui permet de mesurer les températures de surface sans contact, grâce à un cercle laser (rayonnement infrarouge) pour la visée. Les valeurs mesurées s'affichent à l'écran éclairé, et la fonction Auto-Hold permet une sauvegarde à court terme de la dernière valeur déterminée. Le Tableau 4.2 présente un récapitulatif des caractéristiques techniques de chaque sonde et appareil de mesure.

La période de l'expérimentation revêt une importance majeure. En fonction des résultats de l'analyse climatique et bioclimatique de la ville de Biskra, la période de rafraîchissement représente les 2/3 de l'ensemble de l'année. En se basant sur les données météorologiques collectées sur une période de 15 ans (2004-2018), présentées en Annexe A, nous avons pu déterminer la semaine et les jours typiques pour effectuer les mesures durant le mois de juillet, considéré comme le mois critique de la saison estivale. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode dite de la "Design Week", qui consiste à calculer la température moyenne journalière pour la période concernée. Selon cette méthode, la semaine la plus défavorable s'étendait du 5

au 11 juillet (voir Tableau A.1 - Annexe A). Les jours sélectionnés pour les mesures sont les 7, 8, 9 et 10 juillet 2017, qui sont représentatifs de la saison chaude.

Tableau 4.2: Caractéristiques techniques des appareils de mesure utilisées dans le travail empirique. Source : (Fiche des données techniques des appareils)

| | | | |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| <p>Thermo anémomètre Testo 480- un appareil qui mesure tous les paramètres climatiques</p> | <p>Sonde de mesure d'humidité et de température (Ø 12 mm)</p> | <p>Le capteur de l'air</p> | <p>Laserliner ThermoSpot IR</p> |
| | <p>Précision : : ± 2 % HR (+2 à +98% HR) ± 0.3 °C Etendue : 0 à 100 % HR,- 20° à +70 °C</p> | <p>Précision : ± (0.2 m/s + 1 % v.m.) Etendue: 0,2m/s à 3,1m/s – 3,1m/s à 35m/s</p> | <p>Précision : ± 2,5°C + 0,05°C/degres (-38°C ... 0°C) ± 2,5°C ou ± 2,5% (0°C ... 365°C) Etendue : -38°C ... 365°C</p> |

4.3.2.1.2. Condition de déroulement de la campagne de mesures

L'ensemble des maisons sélectionnées comme cas d'étude sont situées dans des zones de forte densité urbaine au niveau de la ville de Biskra. Étant donné que nous disposons d'un seul anémomètre et d'un thermomètre infrarouge, l'un des principaux critères de sélection des maisons était leur proximité les unes des autres, de préférence dans le même quartier, afin de garantir la cohérence des mesures (une différence de 10 minutes maximum) entre les 12 maisons sélectionnées. Ainsi, la prise de mesures s'est étalée du 7 au 10 juillet, en consacrant une journée pour 3 maisons.

Ce travail empirique vise à évaluer quantitativement l'influence des paramètres constructifs et physique des toitures sur le confort thermique des habitats résidentiels. Celui-ci est mesuré au niveau du dernier étage, où l'influence des gains de chaleur provenant de la toiture est la plus dominante. Ainsi, les pièces choisies pour les mesures ne possèdent qu'un ou deux

murs extérieurs au maximum. Le protocole exploité durant les journées considérées consiste à effectuer des relevés à 10 h, 14 h et 17 h, moments autorisés par les occupants des maisons.

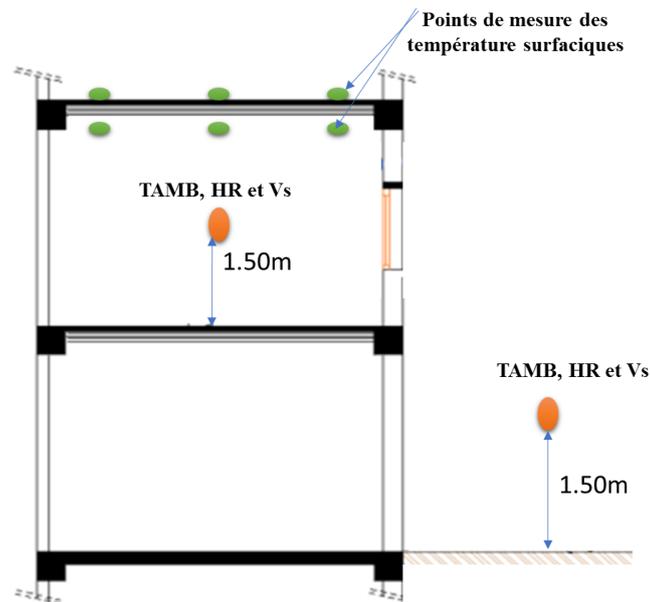


Figure 4.6 : Positionnement des points de mesure au niveau de la pièce et l'environnement extérieure. (Source : Auteur, 2019)

Les mesures des différents paramètres dans les constructions ont été effectuées sous des conditions naturelles, sans utilisation de la climatisation mécanique, tout en fermant les fenêtres et les stores et en éteignant tous les appareils électriques (TV, ordinateur, lampes,) pour éliminer l'influence des gains externes et internes sur les paramètres mesurés. Le tableau 4.3 présente la moyenne des mesures enregistrées dans les douze maisons durant les journées critique du mois de Juillet (du 7 au 10).

Comme le montre la figure 4.6, les mesures des diverses grandeurs physiques ont été réalisées au centre de la pièce, ainsi qu'à différents points, tous à une hauteur de 1,50 m. De même, les mesures extérieures ont été effectuées à cette même hauteur, mais à l'abri de l'ombre. Au finale, ces valeurs seront confrontées à l'opinion des utilisateurs et des occupants du bâtiment, grâce à des questionnaires distribués pendant cette journée.

4.3.2.2. Evaluation subjective : enquête par questionnaire

Un problème dans un bâtiment ne peut être détecté que lorsqu'une enquête est menée en raison d'une défaillance. Ainsi, la perception de l'être humain change constamment, tout comme la relation entre les utilisateurs et un bâtiment (Bordass and Leaman 2005).

L'enquête in situ à travers des questionnaires vise à explorer le confort thermique auprès de la perception des usagers qui se trouvent dans des situations réelles de la vie quotidienne. Ces questionnaires permettent d'évaluer la sensation et la satisfaction thermique personnelle sur des échelles prédéfinies, ainsi que le comportement des occupants vis-à-vis la régulation de l'environnement intérieur des habitations auto-construites à Biskra pendant la période estivale. Dans cette optique, des questionnaires auto-administrés ont été distribués aux participants durant les journées de la prise de mesures, c'est-à-dire aux occupants des maisons instrumentées. Un total de 50 questionnaires a été distribué à cet effet.

Le questionnaire a été élaboré en tenant compte du fait qu'il sera distribué aux participants de différents niveaux éducatifs et culturels. Pour cela, un pré-test a été réalisé auprès d'un petit échantillon afin de distinguer les questions qui n'étaient pas claires ou qui devaient être expliquées pour les simplifier et les rendre compréhensibles. Ensuite, le questionnaire a été traduit en langue arabe (la langue native) pour garantir la compréhension par tous les participants des habitats individuel du cas d'étude. L'intégralité de la version française du questionnaire final est présentée dans l'annexe C.

Après avoir cerné les points importants pour l'enquête, nous avons mis au point un questionnaire structuré composé de 15 questions de types fermés et trois questions ouvertes, qui portent sur les cinq thèmes suivants :

- 1- Des informations générales sur la personne interrogée (sexe, âge, nombre de membres de la famille, localisation et l'activité des personnes dans la salle mesurée).
- 2- Évaluation de l'ambiance thermique : Cette partie vise à évaluer la sensation/satisfaction des usagers vis-à-vis l'ambiance thermique des constructions dans des conditions naturelles et artificielles. Parallèlement, les participants sont également interrogés sur leurs sensations concernant le niveau de mouvement de l'air, le niveau de l'humidité.
- 3- Contrôle personnel sur l'ambiance : Cette partie nous permet de connaître le comportement des locataires et les habitudes d'utilisation des moyens de contrôles et leur impact sur la consommation énergétique (mois d'utilisation des équipements, la fréquence d'utilisation, leurs importances et leurs impacts sur la quantité d'énergie consommée) afin de remédier aux problèmes d'inconfort thermique.

Il est à noter que ce questionnaire nécessite entre dix et quinze minutes pour le remplir. Les réponses sont déterminées sur la base d'un 'échelle à 7 points de l'ASHRAM pour s'enquérir de la sensation thermique. De ce fait, les réponses au questionnaire permettent de qualifier l'environnement intérieur des bâtiments du point de vue des résidents en exprimant leurs attentes et leurs besoins.

4.4. Résultat et discussion

4.4.1. Résultats de l'étude quantitative : mesure sur terrain

4.4.1.1 Analyse des températures surfaciques

La température surfacique externe des toitures joue un rôle crucial dans la détermination de la quantité de chaleur transférée aux espaces du bâtiment influant directement sur l'ambiance thermique intérieure, surtout pendant les périodes estivales.

D'après les données présentées dans le Tableau 4.4, on voit clairement que les températures des surfaces extérieures des toits atteignent des niveaux extrêmement élevés. Elles varient de 35 °C à 10 h00 à 57.6 °C à 15 h00 pour l'ensemble des maisons étudiées. Ces résultats soulignent le fait que, sous l'impact des rayonnements solaires intenses, les surfaces en béton à faible albédo absorbent une quantité considérable de chaleur solaire, provoquant ainsi une augmentation de la température des surfaces extérieures. Ce dernier a un impact sur la quantité de chaleur transférée vers la surface intérieure, augmentant graduellement la température ambiante.

Les relevés des températures des surfaces des plafonds révèlent clairement des températures supérieures à celles de l'air extérieur durant le matin et le soir. Ces températures varient de 35 °C à 46 °C par rapport aux températures de l'air extérieur, qui quant à elles oscillent entre 34 °C et 43 °C. Cette observation s'explique par le fait que les matériaux à base de ciment ont une capacité de dissipation de chaleur relativement lente, ce qui entraîne la rétention de la chaleur accumulée dans les toits pendant la journée, lorsque les rayonnements solaires ne sont plus présents et que la température extérieure diminue.

Ces résultats soulignent l'importance des propriétés thermos-physiques des matériaux utilisés pour les toitures, en particulier les propriétés optiques des revêtements extérieurs. Ces revêtements jouent un rôle central dans la détermination de la quantité de chaleur absorbée ou réfléchiée par la surface environnante, ainsi que son transfert vers les surfaces internes. Par conséquent, il devient possible de réduire ou ralentir la pénétration de chaleur provenant des

toitures existantes, que ce soit par l'incorporation de matériaux à forte réflectivité solaire et émissivité thermique ou par l'installation de protections contre les rayonnements solaires directs. Ces deux solutions représentent les approches passives les plus préconisées dans les régions à climat chaud et sec (Givoni 1994).

4.4.1.2. Analyse de la température de l'air ambiant

En été, la température à l'intérieur d'un bâtiment non climatisé dépend principalement de la température extérieure, l'apport de chaleur provenant du soleil, la vitesse de l'air et les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment (Izard 1993).

Les enregistrements des températures effectués dans les pièces de séjour de différentes maisons, comme présentés dans le Tableau 4.4, indiquent que les températures intérieures dépassent la plage de confort thermique, dépassant les 30 °C, qui représente la limite maximale de cette plage). De plus, les fluctuations de température dans tous les bâtiments sont presque similaires, allant de 34,96 °C à 9 h 00 à 40 °C à 16 h 00. Toutefois, les maisons "M10", "M11", et "M12" enregistrent une augmentation considérable de la température ambiante, dépassant les 40 °C à 16 h 00. Ces valeurs soulignent l'importance de l'ombre projetée par adjacents sur les toits des autres constructions, ce qui réduit le transfert de chaleur en limitant l'exposition aux rayonnements solaires intenses (et donc le coefficient d'absorption de chaleur), entraînant des températures plus modérées. Il convient de noter que les températures les plus basses sont enregistrées la matinée, tandis que les pics de température se produisent le soir. Ceci est dû principalement à la libération de chaleur accumulée dans la structure des toits pendant les heures ensoleillées, qui se dissipe par convection et rayonnement vers l'intérieur.

En ce qui concerne les autres grandeurs physiques, il est notable que l'humidité relative présente une variation, s'établissant entre 28,5 % et 34,5 % le matin, puis de 17,84 % à 27,2 % l'après-midi. Si l'on tient compte de la plage de confort habituellement recommandée pour l'humidité relative, qui se situe entre 40 % et 70 % pour les êtres humains, les valeurs mentionnées confirment le caractère sec du climat. En ce qui concerne les vitesses du flux d'air, celles-ci oscillent entre 0,1 m/s et 0,2 m/s dans tous les espaces.

Les résultats de notre étude révèlent un constat préoccupant ; aucun des bâtiments étudiés ne parvient à offrir un confort thermique satisfaisant pendant la saison estivale. Cette situation entraîne une consommation excessive d'électricité due à l'utilisation intensive des climatiseurs. En résumé, il est évident que le confort thermique à l'intérieur des bâtiments est

largement conditionné par la protection solaire offerte par les toitures, ce qui se répercute directement sur la consommation énergétique.

Enfin, cette étude quantitative menée sur un échantillon de douze habitats contemporains auto-construits à Biskra a mis en évidence l'importante contribution de la toiture au confort thermique de ces constructions. En analysant les données recueillies sur le terrain pendant la période estivale, nous avons constaté un manque de confort à l'intérieur des espaces dotés d'une toiture en béton exposée directement à l'environnement extérieur, sans aucune protection. Ces résultats sont clairement reflétés dans les valeurs moyennes de l'indice PMV enregistrées (voir le Tableau 4.4). En effet, elles montrent que le niveau de satisfaction est très faible, avec une insatisfaction atteignant 97,3% entre 9h et 12h, et même 99,81% (soit un indice de 3,52) entre 14h et 18h, en ce qui concerne les conditions thermiques intérieures. Dans l'ensemble, les relevés indiquent que les bâtiments ne parviennent pas à offrir un niveau de confort thermique adéquat, principalement en raison des fortes fluctuations de température.

En conclusion, il est indéniable que la typologie de dalle des toits à Biskra génère des conditions ambiantes intolérables pendant les étés, confirmant ainsi son inadéquation dans les climats extrêmes. Pour atténuer l'impact de ces conditions, il est impératif d'approfondir la recherche sur les propriétés optiques du revêtement extérieur de la toiture, telles que l'albédo, le coefficient d'absorption thermique et la réflexion solaire. Cette approche vise à réduire le transfert de chaleur depuis l'extérieur vers l'intérieur des habitations. Dans cette perspective, l'adoption de dispositifs passifs au niveau des toitures existantes se révèle être un atout essentiel pour améliorer les performances thermiques des habitations contemporaines dans les régions chaudes et arides. En protégeant efficacement les toits, ces dispositifs contribuent non seulement à minimiser les fluctuations de température à l'intérieur des espaces, mais également à réduire la demande maximale de refroidissement nécessaire pour maintenir un niveau de confort optimal, sans recourir à l'utilisation abusive de climatiseurs. L'intégration de solutions passives au niveau des toitures offre un potentiel prometteur pour améliorer la qualité de vie dans ces environnements climatiques exigeants.

4.4.2. Résultats de l'étude qualitative : le questionnaire

L'enquête a recueilli un total de 43 réponses considérées comme fiables pour le traitement des résultats, correspondant un pourcentage de 86% (les questionnaires incomplets ou incohérents ont été éliminés). L'analyse des données collectées montre que 60% des réponses

Tableau 4.3 : Variations des températures surfaciques des toitures mesurées dans douze maisons lors des journées chaudes de juillet. (Source : Auteur, 2017).

| | | M1 | | | M2 | | | M3 | | | M4 | | | M5 | | | M6 | | |
|---------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 10h-11h | Ts int (°C) | 36,4 | 36,4 | 36,4 | 36,6 | 37 | 36,2 | 35,2 | 35,2 | 35,4 | 38,2 | 37,8 | 37,2 | 37,0 | 36,4 | 36,4 | 36,2 | 35,4 | 35,2 |
| | Ts ext (°C) | 40 | 39,6 | 39,4 | 40,4 | 39,6 | 39,6 | 36,8 | 37,8 | 38,2 | 37,2 | 36,6 | 36,6 | 37,5 | 37,2 | 37,1 | 38,6 | 38,2 | 38 |
| 14h-15h | Ts int (°C) | 37,8 | 37,2 | 36,8 | 42,8 | 42 | 44,4 | 44,4 | 46 | 45,2 | 39,6 | 39,2 | 39,4 | 42 | 42,4 | 41,7 | 44,4 | 45,6 | 43,4 |
| | Ts ext (°C) | 55,5 | 56,2 | 55,6 | 49,6 | 49,2 | 51 | 55,5 | 56,2 | 55,6 | 55 | 51,4 | 52,4 | 53,2 | 52,8 | 53,4 | 53,2 | 53,2 | 55,2 |
| 18h-19h | Ts int (°C) | 37,6 | 38 | 39,6 | 40,4 | 40,4 | 39,4 | 38,3 | 38,4 | 39,2 | 41,2 | 40,2 | 40,6 | 40,7 | 39,9 | 40,9 | 40,2 | 39,2 | 41,2 |
| | Ts ext (°C) | 43,8 | 49,2 | 50,4 | 46,2 | 46,2 | 51 | 46,2 | 47,2 | 47,6 | 54,6 | 52,6 | 57,6 | 52,7 | 53,7 | 54,1 | 50,8 | 49,8 | 50,6 |
| | | M7 | | | M8 | | | M9 | | | M10 | | | M11 | | | M12 | | |
| 10h-11h | Ts int (°C) | 36,8 | 36,6 | 36,6 | 36,2 | 36,6 | 37,2 | 39,2 | 38,8 | 39,2 | 41,4 | 39,9 | 40,2 | 41,4 | 39,4 | 40,6 | 40,4 | 41,4 | 40,6 |
| | Ts ext (°C) | 38 | 38 | 38,2 | 36,6 | 35 | 36,6 | 37,2 | 37,6 | 37,6 | 45,5 | 44 | 45,4 | 44,6 | 43,6 | 44,6 | 45,6 | 44,6 | 43,6 |
| 14h-15h | Ts int (°C) | 44,5 | 43,9 | 45 | 37,2 | 38,2 | 37,6 | 39,6 | 39,2 | 39,4 | 46,5 | 45,4 | 46 | 46,2 | 45,4 | 45,2 | 46,2 | 45,4 | 45,2 |
| | Ts ext (°C) | 56,6 | 57,4 | 57,6 | 51,2 | 51,8 | 51,2 | 55 | 53,4 | 52,4 | 53 | 52,7 | 52,4 | 54,8 | 55,2 | 55,4 | 55,8 | 56,2 | 55,4 |
| 18h-19h | Ts int (°C) | 44,6 | 43,6 | 43,2 | 37,6 | 37,2 | 39 | 41,2 | 40,2 | 40,6 | 44,2 | 46,2 | 45,6 | 43,2 | 45,2 | 44,6 | 43,2 | 45,2 | 44,6 |
| | Ts ext (°C) | 53 | 50,1 | 50 | 48,4 | 48,5 | 50,6 | 52,6 | 50,6 | 49,6 | 43,6 | 44 | 43 | 42,6 | 43,2 | 44,2 | 42,6 | 43,2 | 44,2 |

Tableau 4.4 : La moyenne des mesures enregistrées dans douze maisons au cours des journées chaudes du mois de juillet. (Source : Auteur, 2017)

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 | M12 | |
|----------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10h-11h | T ext (°C) | 36.80 | | | 34.2 | | | 38.4 | | | 40.13 | | |
| | T (°C) | 36.45 | 35.9 | 36.35 | 37.65 | 37.46 | 36.68 | 36.37 | 36.33 | 34.96 | 36.05 | 36.56 | 37.15 |
| | RH (%) | 31.45 | 34.5 | 30.53 | 28.5 | 28.98 | 30.4 | 29.2 | 28.45 | 30.66 | 34.2 | 27.57 | 29.15 |
| | V (m/s) | 0.1 - 0.15 | | | | | | | | | | | |
| | PMV | 2.89 | 2.75 | 2.64 | 3.23 | 3.23 | 3.19 | 3.05 | 2.7 | 2.34 | 2.56 | 2.73 | 3.24 |
| | PPD | 98.5 | 97.4 | 95.7 | 99.7 | 99.7 | 99.7 | 99.3 | 96.8 | 89.3 | 94.6 | 97.1 | 99.8 |
| 14h-15h | T ext (°C) | 41.9 | | | 43.73 | | | 43.26 | | | 42.2 | | |
| | T (°C) | 38.06 | 37.98 | 37.88 | 39.63 | 39.1 | 39.8 | 39.85 | 38.55 | 38.17 | 40.3 | 40.27 | 41.63 |
| | RH (%) | 20.55 | 23.2 | 23.6 | 20.4 | 22.6 | 22.35 | 22.9 | 22.65 | 27.75 | 22.8 | 22.18 | 21.65 |
| | V (m/s) | 0 - 0.1 | | | | | | | | | | | |
| | PMV | 2.98 | 3.28 | 3.24 | 3.49 | 3.39 | 3.85 | 3.65 | 3.25 | 3.12 | 3.92 | 3.91 | 4 |
| | PPD | 99 | 99.8 | 99.8 | 100 | 99.9 | 100 | 100 | 99.8 | 99.5 | 100 | 100 | 100 |
| 18h-19h | T ext (°C) | 39.86 | | | 41 | | | 39.56 | | | 40.6 | | |
| | T (°C) | 38.66 | 37.5 | 36.2 | 39.12 | 38.8 | 40.36 | 39 | 42.66 | 36.5 | 39.4 | 40.63 | 42.96 |
| | RH (%) | 21.8 | 26.5 | 27.2 | 20.9 | 24.7 | 21.84 | 23.2 | 23.4 | 30.4 | 21.9 | 22.10 | 23.8 |
| | V (m/s) | 0.1- 0.2 | | | | | | | | | | | |
| | PMV | 3.63 | 3.51 | 3.14 | 4 | 3.71 | 4 | 3.91 | 4 | 3.24 | 3.92 | 4 | 4 |
| | PPD | 100 | 100 | 99.6 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99.8 | 100 | 100 | 100 |

Proviennent des femmes, tandis que les hommes représentent seulement 26% des réponses. De plus, 56% des personnes interrogées se situent dans la tranche d'âge de 25 à 45 ans. En outre, d'après nos observations sur terrains, le niveau d'isolation des vêtements a été déterminé à 0,5 CLO (vestimentaire d'été), et le taux métabolique pour les activités domestiques a été estimé à 1 met (assis, calme, mouvements légers).

La Figure 4.7 présente les résultats des évaluations de la sensation thermique effectuées par les utilisateurs dans des conditions naturelles au cours du mois de juillet." Durant ce mois caniculaire, la quasi-totalité des usagers ont une sensation thermique "très chaude". Pendant les matinées d'été (de 8 à 11 heures), la majorité des personnes interrogées dans les différents locaux ont voté pour une sensation "chaude " (+2) à " très chaude " (+3), avec des pourcentages compris entre 40 et 24 %. Seules 6 % des personnes interrogées ont déclaré avoir eu une sensation de confort et 16 % une sensation de "légèrement chaude" (+1). On a remarqué que ces derniers résultats ont été voté par des personnes âgées. Cependant, au cours de l'après-midi, aucune personne n'a présenté de sensation confortable, tandis que 72 % ont voté "très chaude" (+3) et 14 % ont voté "chaude" (+2). Au cours de la nuit, 52% des personnes ont voté pour une sensation "très chaude".

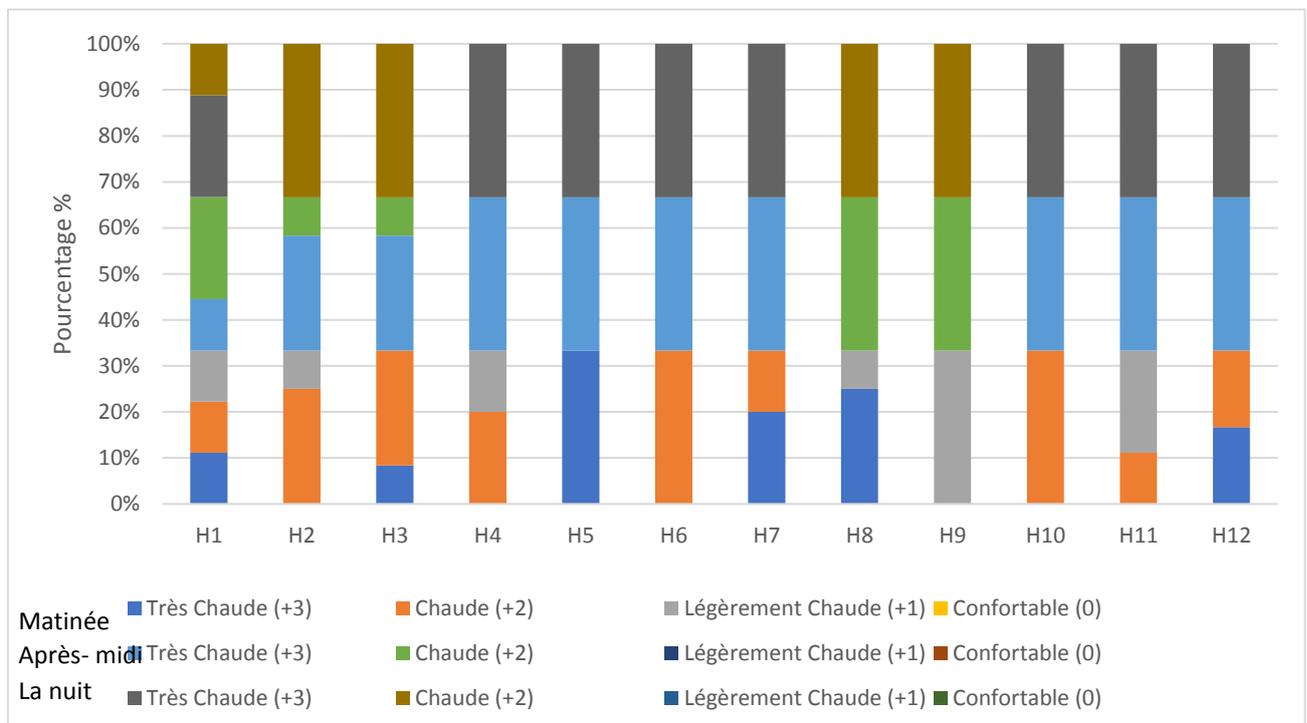


Figure 4.7 : La sensation thermique des habitants dans des conditions naturelles en juillet.

(Source : Auteur, 2017)

Globalement, la sensation thermique la plus ressentie par les utilisateurs était "très chaude" pendant la période estivale, représentant en moyenne 59% des occupants. Cependant, la majorité des usagers, soit 74% sont insatisfaits de l'état thermique de leurs pièces, en particulier celles situées au dernier étage, surtout l'après-midi lorsque les températures atteignent à des niveaux extrêmement élevés, créant une situation qualifiée par « très mauvaise » (insupportables) durant le mois de juillet. Les habitants ont exprimé leur préférence pour passer le temps au RDC, où les températures sont plus tolérables.

Dans l'ensemble, ces déclarations affirmant que le flux de chaleur provenant du toit est identifié comme le facteur prédominant contribuant aux situations de l'inconfort thermique ressenti. De plus, Ces votes sont en accord avec les mesures de la température effectuées à l'aide du kit de Testo 480.

La figure 4.8 illustre le degré de corrélation entre les PMV évalués par les participants et les valeurs mesurées en fonction des températures intérieures mesurées. On peut observer une corrélation significative entre les températures intérieures mesurées et les sensations thermiques évaluées par les participants. Le coefficient de détermination (r^2) de 0,69 confirme la validité des résultats obtenus par le biais du questionnaire. En d'autres termes, les réponses fournies par les participants semblent être en accord avec les mesures objectives de l'étude.

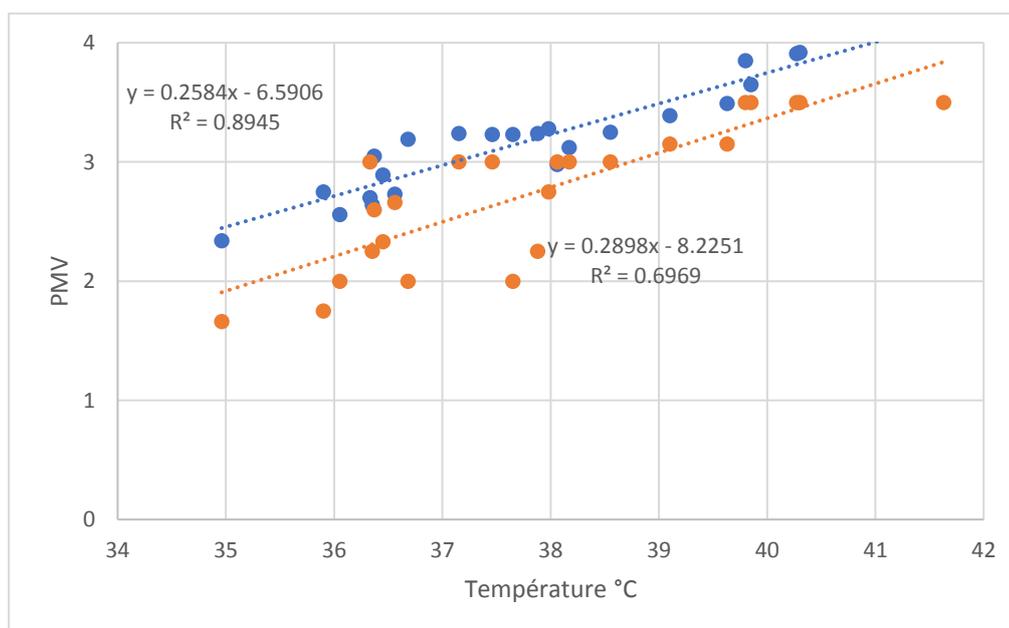


Figure 4.8: Régression linéaire des PMV mesurés et votés en fonction des températures mesurées. (Source : Auteur, 2017)

Comme l'humidité relative (HR) exerce un effet considérable sur la sensation de confort thermique, la figure 4.9 illustre les votes relatifs à la sensation que procure l'humidité relative. Selon les résultats présentés, il apparaît que 46 % des participants ont indiqué que le niveau de HR est simplement « acceptable » ou adéquat, tandis qu'environ 16 % des personnes ont exprimé une « légère sensation de sécheresse » (-1), et les 24 % ont rapporté une sensation de « sécheresse » plus prononcée (-2). Il est intéressant de noter que, malgré cette sensation de sécheresse en été, la majorité des occupants semblent à l'aise avec les niveaux d'humidité relative intérieure. Ceci indique que la sécheresse du climat ne semble pas constituer un obstacle majeur pour les habitants des régions chaudes et arides.

Pour remédier le problème d'inconfort ressenti, les occupants utilisent différents systèmes de régulation thermique. Outre l'utilisation d'appareils de climatisation, les usagers ouvrent les fenêtres pour améliorer la qualité de l'air et réguler la température de la pièce. En juillet, lors des matinées, 76% des résidents ont tendance à ouvrir leur fenêtre « toujours » à « souvent », tandis que durant les après-midis, la majorité (80%) préfère ne « jamais » les ouvrir. Pendant la nuit, 56% privilèges l'aération de leur espace lorsque les températures extérieures sont relativement basses (Voir la figure 4.10).

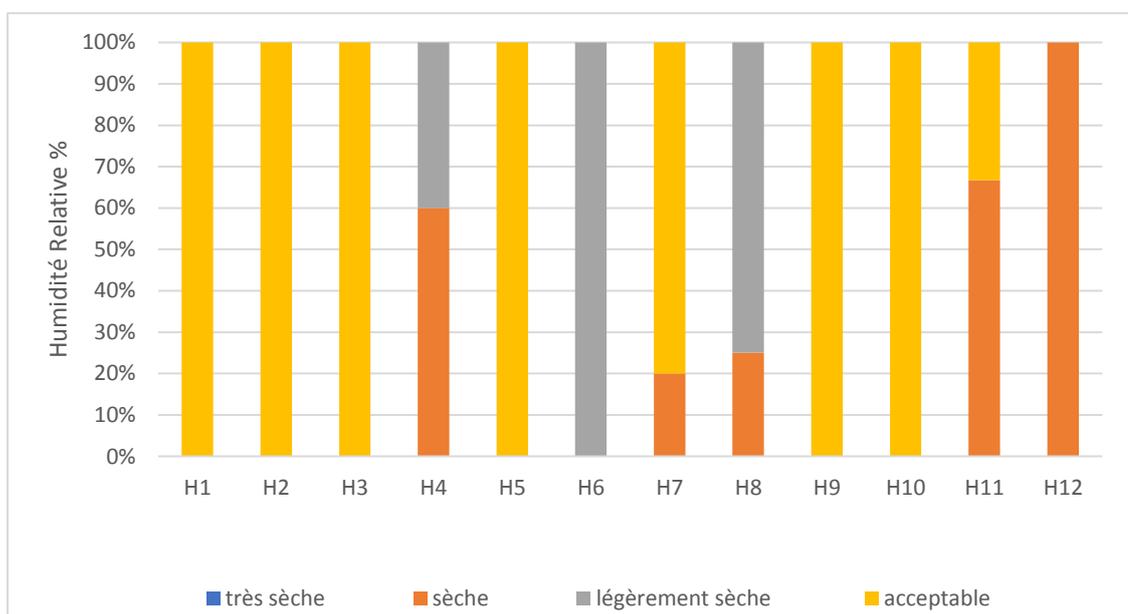


Figure 4.9 : Votes de sensation relatifs à l'humidité relative intérieure. (Source : Auteur, 2017)

En somme, l'ouverture des fenêtres par les usagers dépend des conditions climatiques et les moments de la journée.

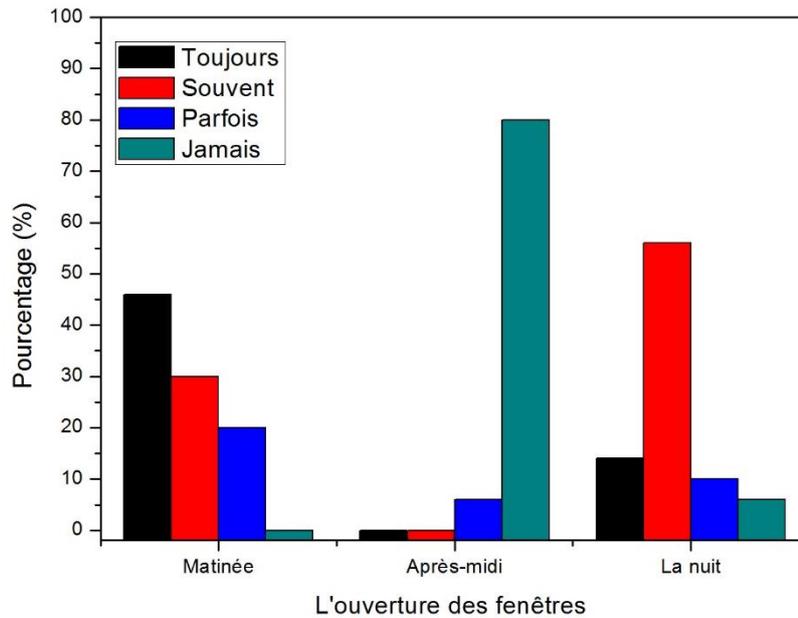


Figure 4.10: L'utilisation es fenêtres durant le mois de Juillet. (Source : Auteur, 2017)

Le recours à la climatisation électrique est la solution la plus prédominante et la plus couramment adoptée dans les habitats contemporains des régions à climats chauds et secs. La lecture du figure 4.11, dévoile que pratiquement tous les utilisateurs exploitent les climatiseurs tout au long de la journée. En effet, près de 68 % des usagers utilisent le climatiseur « Souvent » la matinée et 80% les fonctionnent « Toujours » l'après-midi et 78% la nuit durant le mois de juillet. Ces pourcentages confirment à nouveau la défaillance des enveloppes des habitations à offrir aux habitants des conditions thermiques confortables.

Pendant, On voit clairement sur la figure 4.12 que la majorité des participants expriment leur satisfaction à l'égard des conditions thermiques résultant de l'utilisation de la climatisation dans leur espace. En effet, 20% d'entre eux la qualifient de « bonne », tandis que 36% affirment qu'elle est « très bonne ». Les autres la considèrent comme « acceptable ». Néanmoins, dans le champ facultatif du questionnaire, les utilisateurs ont exprimé leurs préoccupations concernant les différentes maladies respiratoire et la fatigue engendrées par l'utilisation de ces appareils. Il est important de noter que les utilisateurs déclarent que l'utilisation des climatiseurs ne relève pas d'un choix facultatif, mais plutôt d'une nécessité pour faire face aux fortes fluctuations de température lorsque d'autres solutions passives ne sont pas disponibles. Ils manifestent également un vif intérêt pour la recherche de solutions permettant de réduire au minimum la durée d'utilisation de ces appareils.

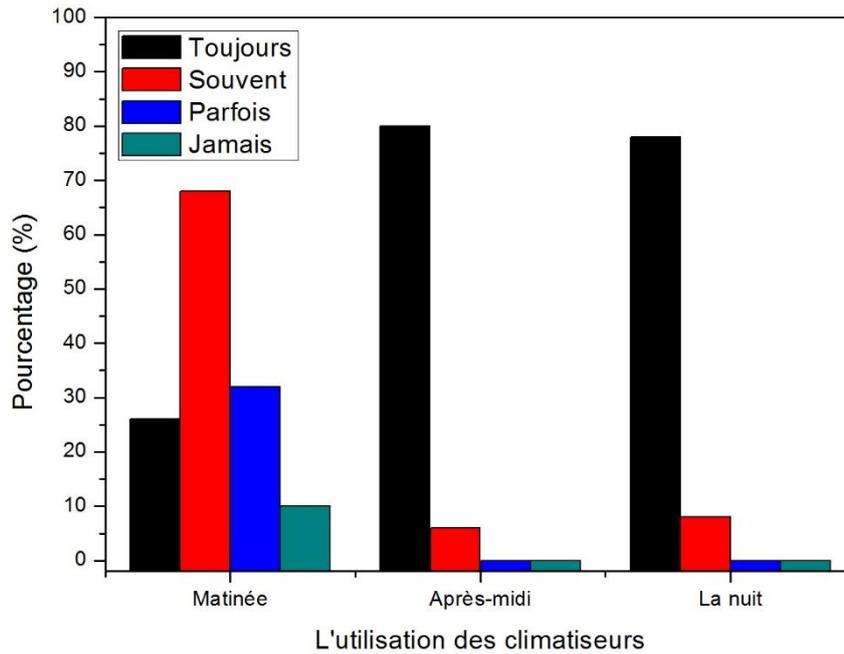


Figure 4.11 : La fréquence d'utilisation de la climatisation dans les habitats contemporains pendant le mois de juillet. (Source : Auteur, 2017)

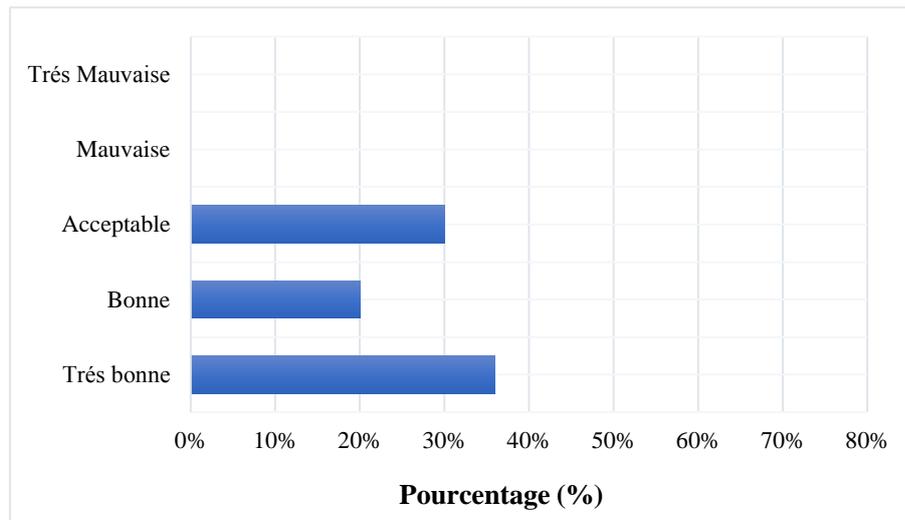


Figure 4.12 : La satisfaction thermique des usagers vis-à-vis la condition thermique du bâtiment créée par les climatiseurs. (Source : Auteur, 2017).

Par ailleurs, il convient de mettre en évidence que ces appareils énergivores fonctionnent pour une moyenne journalière qui dépasse les 10 h, soit un pourcentage de 86% durant le mois de juillet. Généralement, ce pourcentage s'échange en fonction de la sévérité des conditions climatiques extérieures ainsi que le moment de la journée, comme le montre la figure 4.13. Les occupants de l'espace reconnaissent que la période critique de la journée s'étend de 14h à 19h. Cette fréquence d'utilisation des climatiseurs entraîne une consommation d'énergie

électrique énorme, ayant un impact direct sur l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels ainsi que sur le développement économique des individus. Également, son utilisation s'étale principalement sur sept (07) mois de l'année (la fin d'Avril jusqu'au fin d'octobre) dont le grand recours à la climatisation se présente pour les mois de Mai, Juin, Juillet, Aout et Septembre, atteignant 86% comme pourcentage de personnes (voir la Figure 4.13).

Il est clair que les factures d'électricité sont la principale source d'inquiétude pour les résidents pendant la période estivale, où 66 % d'entre eux estiment que leur consommation d'énergie est « très élevée », 14 % la jugent comme « élevée » et 6 % la considèrent comme « acceptable » (voir la Figure 4.14).

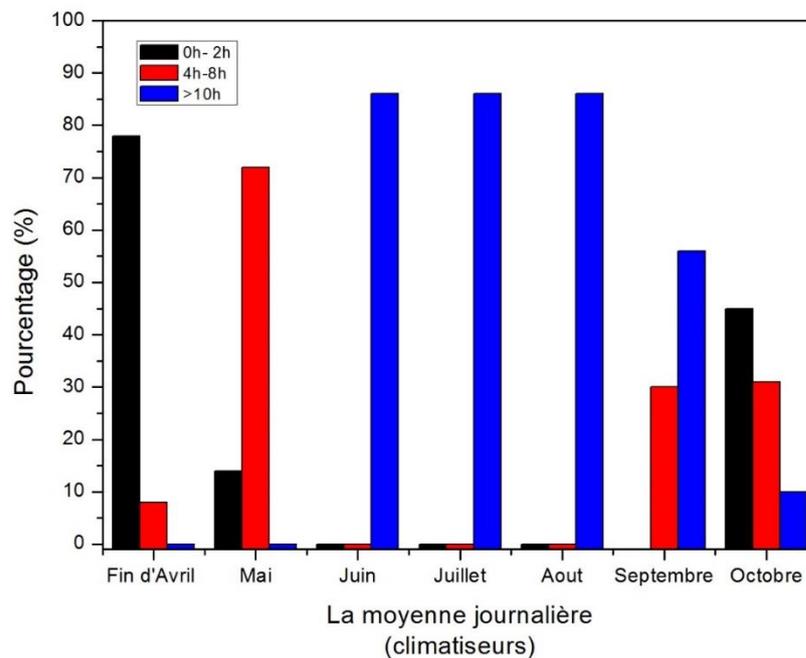


Figure 4.13 : La moyenne journalière de l'utilisation de la climatisation durant la période estivale. (Source : Auteur, 2017)

L'utilisation démesurée de la climatisation sur une période aussi longue de l'année constitue une préoccupation majeure pour les occupants, les architectes, urbanistes et le gouvernement de la ville de Biskra en Algérie, tant sur le plan environnemental, économique que social. Cette analyse révèle l'inefficacité de nos bâtiments résidentiels en termes de performance thermique et énergétique.

Il convient de souligner que les autres questions non abordées dans cette partie de la recherche sont destinées à réaliser différents scénarios de simulation numérique.

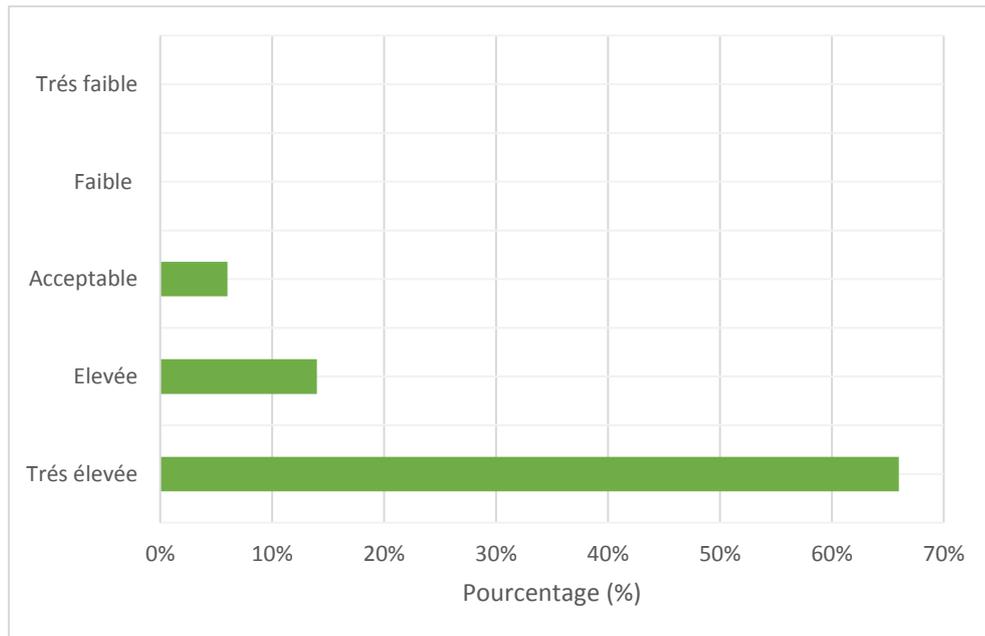


Figure 4.14 : Evaluation de la quantité d'énergie consommée par les climatiseurs. (Source : Auteur, 2017).

Conclusion

De nos jours, le secteur des bâtiments résidentiels tire vigoureusement la sonnette d'alarme concernant l'inefficacité énergétique des habitations à l'échelle mondiale. La compréhension des facteurs climatiques et la maîtrise des phénomènes thermiques liés à leurs interactions avec les éléments de l'enveloppe du bâtiment, en particulier la toiture, nécessitent des études approfondies sur des constructions existantes. Ces études permettent de comprendre les mécanismes des phénomènes physiques qui influencent la réponse du bâtiment, d'identifier les problèmes potentiels et de trouver des solutions adaptées aux spécificités climatiques propres à la région.

L'étude empirique menée dans ce chapitre, en utilisant la méthode d'évaluation post-occupationnelle sur 12 prototypes existants, a permis d'obtenir une vision claire de la contribution effective des toitures en béton à la performance thermique des espaces, ainsi que de la sensation et de la satisfaction des utilisateurs à l'égard de ces conditions thermiques, particulièrement pendant la période estivale. Les résultats obtenus révèlent des situations d'inconfort thermique intérieure, incitant les utilisateurs à une exploitation excessive et prolongée des équipements de refroidissement électrique, ce qui a un impact direct sur

l'efficacité énergétique des habitats contemporains autoproduits à Biskra. Également, ces résultats confirment la pertinence de notre choix de cas d'étude.

En somme, la construction de toitures en béton sans aucunes protections solaires perturbe le comportement thermique des espaces, obligent les architectes, les urbanistes, les constructeurs et les propriétaires à appliquer des dispositifs de protection passive efficace. Ces derniers permettent d'atteindre des niveaux élevés de confort thermique en dépensant moins d'énergie conventionnelle, tout en préservant l'environnement local.

Chapitre V

Évaluation Expérimentale des Systèmes de Rafraîchissement Passif par la Toiture via des Modèles Réduits

*« Force est de constater que, dans le couple “ théorie/expérience”, c’est la
théorie qui est privilégiée dans les faits, l’expérimentation étant alors
souvent traitée comme la “servante” de celle-ci. »*

Chatzis and Fontanon, (2011)

Chapitre VI

Étude par Simulation Numérique des Procédés de Rafrâichissement Passif de type « Cool Roof »

*« Comment évaluer la sureté d'une frégate longue de 200 mètre soumise à l'impact d'une vague haute de 20 mètres sans avoir risque à l'équipage ? avec **la simulation** sur ordinateur..... **la simulation numérique** se fonde sur des équations évoquant des phénomènes physiques. Grace à des calculs sur ordinateur, elle permet de réaliser des expériences virtuelles »*

Jean François Sigrist

Livre : la simulation numérique "un art de la prédiction"

Conclusion Générale

1. Introduction

Depuis que l'homme a commencé à bâtir pour s'abriter, la construction de l'enveloppe et de ses éléments a toujours été conditionnée par l'environnement physique et le climat local. Parmi ces éléments, la toiture occupe une place centrale en étant responsable de la majorité des échanges thermiques entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur d'un bâtiment. En tant que modulateur thermique essentiel de l'enveloppe, sa forme, sa matérialité et sa position jouent un rôle primordial dans la gestion des échanges de chaleur mutuels bâtiment-environnement qui à leur tour influencent les conditions de confort thermique offert aux occupants et par conséquent la quantité d'énergie à consommer.

Suite aux avancées des processus de construction, notamment, l'avènement du béton, du métal, du verre et des appareils mécaniques de refroidissement, la conception des toitures des bâtiments résidentiels a négligé progressivement les considérations climatiques. En Algérie, et à l'instar d'autres pays, cela a entraîné la création d'ambiances intérieures inconfortables, souvent contrôlées principalement par des moyens mécaniques. Cette rupture entre la conception des toitures et l'environnement physique a eu des conséquences non seulement sur les plans énergétique et thermique, mais aussi sur les plans environnemental, économique et sanitaire.

Dans les climats chauds et arides, l'intensité du rayonnement solaire et les températures élevées ont un impact significatif sur le comportement thermique du toit. Ce dernier joue un rôle crucial dans la détermination des conditions de confort thermique à l'intérieur de l'espace. Par conséquent, il est essentiel de traiter cette composante de l'enveloppe afin de contrôler la transmission excessive de chaleur pendant la période estivale. Cela implique l'intégration de dispositifs architecturaux de

rafraîchissement passif pour minimiser efficacement les gains de chaleur, offrir une meilleure qualité de confort hygrothermique aux occupants et contribuer à réduire les dépenses énergétiques.

2. Synthèse de l'étude et principaux résultats

Ce travail constitue une contribution significative à l'étude du comportement thermique des toitures des habitations résidentielles réalisées selon un processus d'autoproduction, sous des conditions climatiques chaudes et arides. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de l'intégration des procédés de rafraîchissement passif de type "Cool Roof" sur la consommation énergétique et le niveau de confort thermique généré dans des habitations individuelles contemporaines de la ville de Biskra. Il est essentiel de souligner que cette recherche vise à proposer une solution de protection des toitures simple, rentable, facile à installer et accessible à tous. Pour atteindre cet objectif, différentes approches de recherche ont été adoptées en utilisant à la fois des méthodes quantitatives et qualitatives.

L'étude empirique réalisée a révélé que la toiture-terrasse est la typologie dominante des habitations individuelles à Biskra. A ce titre, le système constructif le plus fréquemment utilisé pour la construction des toitures des maisons privées auto-produites existantes à Biskra se compose d'une dalle de compression en béton, de blocs en parpaing creux et d'une chape en béton servant de revêtement extérieur. Le travail de terrain comprenait des mesures in situ de paramètres climatiques sur un échantillon de 12 habitations représentatives et une enquête par questionnaire réalisée auprès des habitants propriétaires des habitations étudiées. Les résultats obtenus à partir de ce travail révèlent un manque de confort thermique à l'intérieur de ce type d'habitat. En effet, les températures internes dépassaient fréquemment les 35°C pendant la période estivale. En conséquence, les occupants exprimèrent un niveau élevé d'insatisfaction vis-à-vis de ces conditions ambiantes. En résumé, les caractéristiques matérielles de la toiture ne sont pas adaptées aux conditions climatiques chaudes et arides de la région. Toutefois, il est important de souligner que les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés, notamment les propriétés optiques du revêtement extérieur, jouent un rôle significatif dans la quantité de chaleur absorbée et transmise à l'intérieur de ces habitations, ce qui détermine le niveau de confort thermique des occupants. En outre, il

est important de souligner que les habitants de Biskra considèrent l'utilisation de climatiseurs comme une nécessité, même si cela entraîne des factures d'électricité élevées qu'ils doivent payer chaque été.

Pour garantir la réussite de l'application des procédés passifs par la toiture à grande échelle, le processus de sélection des meilleures solutions pour un tel cas d'étude doit se faire à trois niveaux : la faisabilité, l'accessibilité financière et l'acceptabilité sociale. Ceci a induit le recours à **l'étude expérimentale**. A ce titre, le travail expérimental mené à l'aide de quatre cellules tests à une échelle réduite a démontré le potentiel réel de six techniques de rafraîchissement passif par la toiture pour réduire les températures surfaciques, minimiser le flux de chaleur et, par conséquent, abaisser la surchauffe. L'analyse comparative des résultats a révélé que les systèmes de toiture passive "TV-R" (toiture ventilée- réfléchissante) et "RP" (Roof Pond) ont obtenu les meilleurs résultats. Ces deux solutions passives ont réussi à réduire la température extérieure de la dalle de 17,12°C et 19°C respectivement, ainsi que les températures de surface du plafond de 9,12°C et 11,32°C respectivement par rapport au cas de référence. Ces réductions ont entraîné une diminution du transfert de chaleur vers l'intérieur de 70,65% et 91,35% respectivement. En termes de coût, l'analyse a montré que les systèmes de refroidissement radiatif utilisant les matériaux de type "Cool Roof" tels que "PR", "CB" (carreaux de céramique blancs) et "TV-R" sont économiquement viables pour une application à grande échelle. Parmi eux, la toiture avec une peinture réfléchissante (PR) s'est avérée la plus abordable, avec un coût estimé à 1000 DZD, soit le prix d'un bidon de 10 litres à 10000 DZD. En ce qui concerne l'acceptabilité sociale, évaluée à travers des entretiens, un pourcentage élevé de satisfaction a été accordé aux toitures avec PR, CB et TV-R respectivement. Cela est principalement dû à leur accessibilité économique, à leur viabilité technique (installation simple sans risque pour la structure du toit) et à leur niveau de maintenance (programme d'entretien simple sans coûts élevés supplémentaires). En conclusion, les procédés de rafraîchissement passif par la toiture de type "Cool Roof" se sont avérés être les meilleures solutions de protection solaire par la toiture.

La dernière partie de l'étude a été réalisée sous forme d'une **simulation numérique** effectuée avec TRNSYS V17. Cette dernière a mis en évidence la vulnérabilité de la toiture qui constitue la partie la plus sensible de l'enveloppe d'un

bâtiment. Les résultats obtenus par simulation en protégeant cette partie révèlent l'efficacité des toits réfléchissants « Cool Roof » en tant que méthode de refroidissement passif, permettant de réduire la consommation énergétique tout en améliorant les conditions thermiques intérieures. De plus, l'analyse démontre que l'application d'une toiture double peau ventilée combinée à une peinture réfléchissante offre les meilleures performances.

Ainsi, les résultats de l'étude expérimentale ont démontré de manière convaincante l'impact positif des revêtements réfléchissants de toit sur l'efficacité énergétique des habitations tout en assurant un niveau de confort thermique optimal. De plus, les économies réalisées en termes de charge énergétique de refroidissement, avec une réduction remarquable de 69,59 % (780,75 kWh), sont particulièrement significatives. Ces économies se traduisent par des avantages financiers notables pour les occupants, avec des économies pouvant atteindre 4189,73 DZD en Juillet et jusqu'à 17661,27 DZD sur toute la saison estivale. De plus, cette amélioration de l'efficacité énergétique présente des avantages environnementaux notables, comme en témoigne la réduction des émissions de CO₂ de 69,59 %, soit une diminution de 221,75 KgCO₂ pendant le mois le plus chaud de l'année. Cela souligne l'impact positif sur l'environnement résultant de l'adoption de ces revêtements réfléchissants de toit. L'étude révèle également une amélioration significative du comportement thermique de la toiture, avec une diminution considérable de l'absorption de chaleur solaire, passant de 825,76 W/m² à 77,72 W/m² par rapport au cas de référence. Cette réduction a un effet direct sur la température de l'air ambiant, qui connaît une baisse d'environ 7,25°C. Ces résultats se traduisent par une optimisation des conditions de confort, avec une augmentation notable de 5 % à 69 % des heures de confort par rapport au cas de référence.

En conclusion, il est crucial de souligner que l'application des toitures ventilées réfléchissantes (TV-R) est complexe, et son efficacité dépend principalement de la localisation géographique du bâtiment et de son orientation au vent. Par conséquent, cette technique n'est pas adaptée à tous les types de bâtiments. Il est préférable de l'intégrer dès la phase initiale de la conception du bâtiment, afin que les architectes ou les ingénieurs puissent mener une étude approfondie sur son application. En ce qui concerne les habitations individuelles existantes dans les lotissements, la peinture

réfléchissante ou "Cool Paint" est la meilleure option en termes de protection passive pour la toiture. Cette technique est efficace, offrant des performances thermiques et énergétiques comparables à celles de la TV-R. De plus, elle est simple, rentable, respectueuse de l'environnement et facile à appliquer sur toutes les surfaces.

Dans l'ensemble, cette contribution a dissipé les confusions relatives au comportement thermique des toitures et leurs impacts dans les zones chaudes et arides. Elle a démontré que l'utilisation de dispositifs passifs adaptés aux conditions climatiques locales contribue considérablement à l'efficacité énergétique, thermique et environnementale des constructions. Ainsi, il est essentiel de concevoir les enveloppes des bâtiments dès le début, adaptés aux caractéristiques climatiques. De plus, la maîtrise et le contrôle des phénomènes thermiques qui se produisent à la surface, grâce à un choix judicieux des matériaux ayant des propriétés thermo-physiques appropriées, a un impact direct sur l'efficacité des constructions.

Pour conclure, ces résultats répondent de manière exhaustive à la question de recherche initiale soulevée au sein de cette thèse et atteignent pleinement l'objectif fondamental de cette étude.

3. Recommandations

À partir des résultats et des conclusions de cette étude, plusieurs recommandations clés émergent ; elles visent à orienter les actions futures et à améliorer les solutions passives mises en œuvre. Les recommandations suivantes sont donc formulées :

- Il est recommandé d'adopter un processus simple de lavage périodique à l'eau afin de préserver un niveau élevé de performance des matériaux de toit "Cool Roof", notamment à Biskra, une région sujette aux tempêtes de sable.
- Il est conseillé d'utiliser une peinture présentant une réflectance solaire élevée. Cela signifie qu'elle doit contenir des pigments spéciaux et des additifs capables de réfléchir les rayons UV. Ces derniers constituent une source importante de chaleur et qui contribue au vieillissement des toitures. Ainsi, l'utilisation d'une peinture avec un indice de réflectance solaire élevé

garantit une performance optimale en termes de réduction de l'absorption de chaleur.

- Il est important de veiller à ce que les matériaux réfléchissants utilisés présentent une émissivité élevée, c'est-à-dire qu'ils soient capables de dissiper rapidement la chaleur accumulée, contribuant ainsi à réduire la température de surface.
- Il est conseillé de combiner ces matériaux avec d'autres systèmes de rafraîchissement passif, tels que la toiture double peau ventilée, afin d'augmenter leur efficacité en améliorant les propriétés thermiques de certains matériaux (réduire le coefficient d'absorption solaire et augmenter la dissipation thermique du métal).
- Pour éviter le risque d'éblouissement urbain, il est recommandé d'utiliser des matériaux réfléchissants avec une finition mate.
- Il est recommandé d'inclure l'application de toitures thermo-réfléchissantes dans le code algérien pour les zones arides, compte tenu de la surface désertique représentant les deux tiers de l'Algérie, avec un climat chaud et sec. Cela permettra de contribuer à la stratégie d'efficacité énergétique par les bâtiments lancée par l'état.
- L'optimisation des propriétés de réflexion solaire et d'émissivité thermique de la surface constitue un domaine clé pour améliorer les performances thermiques et l'efficacité énergétique du cadre bâti existant dans les climats chauds et secs.
- Lors du choix d'un système, il est crucial de considérer à la fois les aspects économiques et l'acceptabilité sociale. Évaluez la rentabilité à long terme, les coûts d'installation, de maintenance et d'exploitation, ainsi que l'acceptation par les utilisateurs et la communauté. Cette approche garantit la sélection d'une solution efficace sur le plan thermique et énergétique, économiquement viable et acceptée par les utilisateurs, favorisant ainsi son adoption et son intégration réussies.

4. Les limites de la recherche

La présente étude a apporté des résultats prometteurs, mais certaines limites doivent être mentionnées, notamment :

- Limitations de l'expérimentation sur des cellules tests à échelle réduite : en raison du manque d'instrumentation de mesure, nous n'avons pas pu étudier de manière exhaustive le comportement thermique des différentes configurations de toitures examinées. Cela inclut le flux de chaleur diurne et nocturne, la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface et les températures de surface des dalles tout au long de la journée.
- Manque de ressources et de capacités pour réaliser une expérimentation à grande échelle sur les toitures ventilées réfléchissantes : nous n'avons pas disposé des moyens nécessaires pour mener une étude approfondie sur les différentes contraintes liées à ce système et les améliorations potentielles pour dissiper les ambiguïtés entourant son application. Cela aurait nécessité des ressources supplémentaires pour mettre en place une véritable toiture ventilée réfléchissante à l'échelle réelle.

Il est important de noter ces limites afin de reconnaître les aspects qui n'ont pas pu être explorés dans le cadre de la recherche actuelle. Ces limitations peuvent servir de base pour des travaux futurs visant à combler les lacunes identifiées.

5. Perspectives de recherche

En guise des recherches futures à développer, l'adoption d'une toiture double peau associée à une peinture thermo-réfléchissante représente une nouvelle solution prometteuse et émergente en Algérie, en particulier pour les habitations de la ville de Biskra et celles aux conditions climatiques similaires. Les résultats obtenus jusqu'à présent marquent le début d'un cheminement prometteur et ils posent les bases sur lesquelles d'autres investigations pourraient se construire, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses possibilités d'étude pour ce procédé. Ces possibilités incluent :

1. Étude expérimentale à grande échelle de l'impact réel d'une toiture ventilée réfléchissante sur le comportement thermique de la toiture en béton et son effet sur les conditions de confort à l'intérieur.
2. Utilisation de logiciels de dynamique des fluides (CFD) pour étudier l'impact de la profondeur de la cavité sur le flux d'air et son mouvement à l'intérieur de la cavité.

3. Test de différentes solutions visant à améliorer l'applicabilité de cette technique sur des habitations contiguës, telles que l'utilisation de déflecteurs, de conduits d'air ou de dispositifs de capture du vent pour augmenter le flux d'air et optimiser la ventilation.
4. Expérimentation avec d'autres types de revêtements et de peintures de toiture, tels que les revêtements à réflexion auto-changeante qui réagissent aux radiations solaires, ou les matériaux dotés d'un processus d'auto-nettoyage pour prévenir l'accumulation de poussière, etc.

En explorant ces différentes possibilités, il sera possible de continuer à améliorer cette technique et de l'adapter aux besoins spécifiques des habitations à usage privée de Biskra, ouvrant ainsi la voie à une utilisation plus répandue et à une meilleure efficacité énergétique dans la région.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- A.N.S.I. ASHRAE, S. 55-2010. (2010), “thermal environmental conditions for human occupancy”, *American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, Atlanta.*, available at:[https://doi.org/10.1016/0140-7007\(79\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0140-7007(79)90114-2).
- Abimbola Asojo, H.V. and S.B. (2021), “The Impact of Design Interventions on Occupant Satisfaction: A Workplace Pre-and Post-Occupancy Evaluation Analysis”, *Sustainability*, available at:<https://doi.org/10.3390/su132413571>.
- Abuseif, M. and Gou, Z. (2018), “A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness”, *Energies*, Vol. 11 No. 11, p. 3196.
- Adberrezak, A. (2010), “Evaluation de l’efficacité de rafraîchissement passif d’une toiture végétale sous un climat semi-aride”, *Université Mentouri de Constantine*.
- ADJIEL, A. (2010), “EVALUATION DE L’EFFICACITE DE RAFRAÎCHISSEMENT PASSIF D’UNE TOITURE VEGETALE SOUS UN CLIMAT SEMI- ARIDE «Cas d’une terrasse à végétation extensive à Constantine »”, *Mémoire de Magistère*.
- Agence Parisienne du Climat. (n.d.). *Canicules à Paris : Des Solutions Sobres Pour Se Passer de Climatisation Chez Soi.*, available at: <https://www.apc-paris.com/actualite/canicules-a-paris-solutions-sobres-pour-se-passer-climatisation-chez-soi>.
- AIA Research Corporation. (1979), “Passive Cooling: Designing Natural Solutions to Summer Cooling Loads”, *Research and Design*, Vol. 2 No. 3, p. 20.
- Akbahi, H., Behre, A., Levinson, R., Graveline, S., Foley, K., Delgado, A.H. and Paroli, R.M. (2005), “Aging and weathering of cool roofing membranes”, *Cool Roofing Symposium, Atlanta, GA*, available at:<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Akbari, H., Levinson, R., Miller, W. and Berdahl, P. (2005), “Cool Colored Roofs to Save Energy and Improve Air Quality”, p. Medium: ED.
- Akbari, H., Levinson, R. and Stern, S. (2008), “Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies”, *Solar Energy*, Vol. 82 No. 7, pp. 648–655.

- Akbari, H., Menon, S. and Rosenfeld, A. (2009), “Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂”, *Climatic Change*, Vol. 94 No. 3–4, pp. 275–286.
- Al-Obaidi, K.M., Ismail, M. and Abdul Rahman, A.M. (2014), “Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review”, *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 3 No. 3, pp. 283–297.
- Al-Obaidi, K.M., Ismail, M. and Rahman, A.M.A. (2014), “Investigation of passive design techniques for pitched roof systems in the tropical region”, *Modern Applied Science*, Vol. 8 No. 3, pp. 182–191.
- Al-Sallal, K.A. and 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: How the Past Can Enrich the Future*, Springer International Publishing, Cham, pp. 23–53.
- Alain, L. and André, D.E.H. (2005), *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques - Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Observatoire des énergies renouvelables. Paris CN - 200 LIE 53 ; K 10, available at:
<https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/7394/traite-d-architecture-et-d-urbanisme-bioclimatiques-concevoir-edifier-et-amenager-avec-le-developpement>.
- Algarni, S. (2018), “Potential for cooling load reduction in residential buildings using cool roofs in the harsh climate of Saudi Arabia”, *Energy and Environment*, available at:<https://doi.org/10.1177/0958305X18787340>.
- Algarni, S. (2019), “Potential for cooling load reduction in residential buildings using cool roofs in the harsh climate of Saudi Arabia”, *Energy & Environment*, Vol. 30 No. 2, pp. 235–253.
- Algarni, S. and Nutter, D. (2015), “Influence of dust accumulation on building roof thermal performance and radiant heat gain in hot-dry climates”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 104, pp. 181–190.
- Allab, Y. (2017), “Evaluation expérimentale des performances des systèmes de ventilation dans le bâtiment: efficacité de ventilation et confort thermique”, *Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris*.
- Almusaed, A. (2011), *Biophilic and Bioclimatic Architecture*, *Biophilic and Bioclimatic Architecture*, available at:<https://doi.org/10.1007/978-1-84996-534-7>.
- Altan, H., Hajibandeh, M., Tabet Aoul, K.A. and Deep, A. (2016), “Passive design”, *Springer Tracts in Civil Engineering*, No. June, pp. 209–236.

- Alvarado, J.L., Terrell, W. and Johnson, M.D. (2009), “Passive cooling systems for cement-based roofs”, *Building and Environment*, Vol. 44 No. 9, pp. 1869–1875.
- Amer, E.H. (2006a), “Passive options for solar cooling of buildings in arid areas”, *Energy*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.06.002>.
- Amer, E.H. (2006b), “Passive options for solar cooling of buildings in arid areas”, *Energy*, Vol. 31 No. 8–9, pp. 1332–1344.
- ANSI/ASHRAE. (2002), “ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings”, *Ashrae*, Vol. 8400, p. 170.
- Antonaia, A., Ascione, F., Castaldo, A., D’Angelo, A., De Masi, R.F., Ferrara, M., Vanoli, G.P., *et al.* (2016), “Cool materials for reducing summer energy consumptions in Mediterranean climate: In-lab experiments and numerical analysis of a new coating based on acrylic paint”, *Applied Thermal Engineering*, Elsevier Ltd, Vol. 102, pp. 91–107.
- APRUE. (2019), “Consommation Énergétique Finale de l’Algérie. 2017”, available at: www.aprue.org.dz.
- Arnheim, R. (1978), “Dynamique de la forme architecturale”, available at: http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=xXEWCDskdIC&oi=fnd&pg=PA5&dq=Dynamique+de+la+forme+architecturale&ots=ckt_cADNT3&sig=7BBf9BgrlAEQCZykPt1DjgRP-zE.
- Arumugam, R., Garg, V., Mathur, J., Reddy, N., Gandhi, J. and Fischer, M.L. (2014), “Experimental determination of comfort benefits from cool-roof application to an un-conditioned building in India”, *Advances in Building Energy Research*, Taylor & Francis, Vol. 8 No. 1, pp. 14–27.
- Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M. and Mauro, G.M. (2021), “The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 224 No. June, pp. 703–717.
- Ascione, F., De Masi, R.F., Santamouris, M., Ruggiero, S. and Vanoli, G.P. (2018), “Experimental and numerical evaluations on the energy penalty of reflective roofs during the heating season for Mediterranean climate”, *Energy*, Elsevier B.V., Vol. 144, pp. 178–199.
- Assem, E.O. (2011), “Correlating thermal transmittance limits of walls and roofs to orientation and solar absorption”, *Energy and Buildings*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.015>.
- Avenier, M.J., Thomas, C., Avenier, M.J. and Thomas, C. (2011), *Mixer Quali et Quanti Pour Quoi Faire ? Méthodologie sans Épistémologie n’Est Que Ruine de*

Réflexion.

- Bencherif, M. and Chaouche, S. (2013), “La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud”, *Science et Changements Planétaires - Secheresse*, Vol. 24 No. 3, pp. 203–213.
- Berdahl, P. and Bretz, S.E. (2002), “Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials”, *Energy and Buildings*, available at: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)01004-3).
- 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*, p. 305.
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R. and Arcuri, N. (2016), “Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area”, *Energy and Buildings*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.062>.
- Bhamare, D.K., Rathod, M.K. and Banerjee, J. (2019), “Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 198, pp. 467–490.
- Bianchini, F. and Hewage, K. (2012), “How ‘green’ are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials”, *Building and Environment*, Vol. 48, pp. 57–65.
- Bienvenido Huertas, D. and Rubio Bellido, C. (2021), *Adaptive Thermal Comfort of Indoor Environment for Residential Buildings*, available at: <https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-0906-0>.
- Biwole, P.H., Woloszyn, M. and Pompeo, C. (2008), “Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time”, *Energy and Buildings*, Vol. 40 No. 8, pp. 1487–1497.
- Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A. and Castro, M.A. (2012), “Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia”, *Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 38 No. 1, pp. 425–438.
- BONTEMPS, S. (2015), “VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE MODÈLES : APPLICATION AUX BÂTIMENTS BASSE CONSOMMATION”, *Thèse de Doctorat, L’UNIVERSITÉ DE BORDEAUX*.
- Bordass, B. and Leaman, A. (2005), “Making feedback and post-occupancy evaluation routine 3: Case studies of the use of techniques in the feedback portfolio”, *Building Research and Information*, Vol. 33 No. 4, pp. 361–375.
- Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C. and Castro-Gil, M. (2013),

- “Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti”, *Building and Environment*, Elsevier Ltd, Vol. 59, pp. 116–126.
- Cantin, R., Moujalled, B., Guarracino, G., Guarracino, H.D.R.G. and Audin, R.M. (2005), “Complexité du confort thermique dans les bâtiments”, *6ème Congrès Européen de Science Des Systèmes Paris*, pp. 1–10.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M. and Davison, J.B. (2010), “Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit”, *Energy and Buildings*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>.
- Cattarin, G., Causone, F., Kindinis, A. and Pagliano, L. (2016), “Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation - A literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Vol. 54, pp. 606–625.
- Cécile Batier. (2018), “Confort thermique et énergie dans l ’ habitat social en milieu méditerranéen : d ’ un modèle comportemental de l ’ occupant vers des stratégies architecturales”, *Thèse de Doctorat, de l’UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER Préparée Au Sein de l’école Doctorale : INFORMATION STRUCTURES SYSTÈMES*.
- Chan, H.Y., Riffat, S.B. and Zhu, J. (2010), “Review of passive solar heating and cooling technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.030>.
- Chatzis, K. and Fontanon, C. (2011), “L’expérimentation « en plein air » ou « grandeur nature »”, *Documents Pour l’histoire Des Techniques*, No. 20, pp. 7–14.
- Cheikh, H. Ben and Bouchair, A. (2008), “Experimental Studies of a Passive Cooling Roof in Hot Arid Areas”, *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1 No. 1, pp. 1–6.
- Chelkoff, G. (2018), “Expérimenter l’ambiance par l’architecture”, *Ambiances*, No. 4, pp. 7–14.
- Chen, X., Wang, L., Liu, Z., Qin, Y. and Bao, T. (2019), “Lowering Emissivity of Concrete Roof Tile’s Underside Cuts Down Heat Entry to the Building”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2019, available at:<https://doi.org/10.1155/2019/5438321>.
- Claire, D. and Duplay, M. (1982), *Méthode Illustrée de Création Architecturale*, Editions du Moniteur, available at:<https://books.google.dz/books?id=BtdkQgAACAAJ>.
- Commission européenne – Departments. Énergie. (2020), “L’efficacité énergétique des

bâtiments”.

Cool Roof Rating Council. (2020), “The Cool Roof Rating Council”, Available from: [Http://Www.Coolroofs.Org](http://www.coolroofs.org).

Correia, M., Gustavo, G. and Practices, B. (2019), *Bioclimatic Architecture in Warm Climates*, *Bioclimatic Architecture in Warm Climates*, available at:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-12036-8>.

Costanzo, V. (2016), “Cool Roofs for improving thermal performance of EU office buildings: An investigation for different climates and building layouts”, *Thesis for Doctor of Philosophy in Energetics. University of Catania*.

D’Orazio, M., Di Perna, C. and Di Giuseppe, E. (2012), “Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate”, *Energy and Buildings*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>.

Dabaieh, M. and Johansson, E. (2018), “Building Performance and Post Occupancy Evaluation for an off-grid low carbon and solar PV plus-energy powered building. A case from the Western Desert in Egypt”, *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, Vol. 18 No. January, pp. 418–428.

Dabaieh, M., Wanas, O., Hegazy, M.A. and Johansson, E. (2015), “Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings”, *Energy and Buildings*, Vol. 89, pp. 142–152.

Daoudi, N.S., Mestoul, D., Lamraoui, S., Boussoulim, A., Adolphe, L. and Bensalem, R. (2019), “Vernacular Architecture in Arid Climates: Adaptation to Climate Change BT - Bioclimatic Architecture in Warm Climates: A Guide for Best Practices in Africa”, in Guedes, M.C. and Cantuaria, G. (Eds.), *Springer International Publishing*, Springer International Publishing, Cham, pp. 119–154.

de Dear, R.J. and Brager, G.S. (1998), “Developing an adaptive model of thermal comfort and preference”, *ASHRAE Transactions*, Vol. 104 No. Pt 1A, pp. 145–167.

Dias, D., Machado, J., Leal, V. and Mendes, A. (2014), “Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building”, *Applied Thermal Engineering*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.056>.

Dimoudi, A., Androutsopoulos, A. and Lykoudis, S. (2006), “Summer performance of a ventilated roof component”, *Energy and Buildings*, Vol. 38 No. 6, pp. 610–617.

Directive 2010/31/UE. (2010), “Directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments (refonte)”, *Journal Officiel de l’Union Européenne*, pp. 13–35.

- Djedjig, R. (2013), “Impacts des enveloppes végétales à l’interface bâtiment microclimat urbain”, *Thèse de Doctorat, de l’Université de La Rochelle.*, p. 171.
- Djedjig, R., Ouldboukhite, S.E., Belarbi, R. and Bozonnet, E. (2012), “Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39 No. 6, pp. 752–761.
- Dominique, H., Jensen, C. and Lu Aye. (2016), “Chapter 11: Cool Roof Retrofits as an Alternative to Green Roofs: Building Urban Resilience”, *Green Roof Retrofit: Building Urban Resilience*.
- DTRC3-2. (1997), “Thermal regulation of residential buildings e calculating methods for determining building heat losses”, *CNERIB, Algiers.*.
- DTRC3-4. (1997), “Airconditioning - Calculating Methods for Determining Building Heat Gains”, *CNERIB, Algiers*.
- Duval, E. (2020), “DU VERNACULAIRE AU BIOCLIMATIQUE.En climat tropicale , une prise de conscience”, *Mémoire de Fin d’Études de l’école Nationale Supérieure d’architecture, Montpellier*, available at: https://vebuka.com/print/200401091435-8ba1f95ef9ea02426cf417a2a0591286/Du_vernaculaire_au_bioclimatique_en_climat_tropical_une_prise_de_conscience.
- EIA, U.S.E.I.A. (2019), “International Energy Outlook 2019. with projections to 2050”, available at: [https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/ieo2019 %281%29.pdf](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/ieo2019%281%29.pdf).
- Elnabawi, M.H., Alhumaidi, A., Osman, B. and Alshehhi, R. (2022), “Cool Roofs in Hot Climates: A Conceptual Review of Modelling Methods and Limitations”, *Buildings*, Vol. 12 No. 11, available at: <https://doi.org/10.3390/buildings12111968>.
- Eltrapolsi, A.H. (2014), “Of Architecture The Efficient Strategy of Passive Cooling Design in Desert Housing: A Case Study in”, available at: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?did=13&uin=uk.bl.ethos.684584>.
- Emziane, M. and Al Ali, M. (2015), “Performance assessment of rooftop PV systems in Abu Dhabi”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 108, pp. 101–105.
- Erell, E., Yannas, S. and Molina, J.L. (2006), “Roof Cooling Techniques”, No. September, pp. 6–8.
- Esparza L., C.J., Escobar del Pozo, C., Gómez A., A., Gómez A., G. and Gonzalez C., E. (2018), “Potential of a wet fabric device as a roof evaporative cooling solution:

- Mathematical and experimental analysis”, *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, Vol. 19 No. May, pp. 366–375.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G. and Principi, P. (2010), “Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate”, *Building and Environment*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>.
- Frontczak, M., Schiavon, S., Goins, J., Arens, E., Zhang, H. and Wargocki, P. (2012), “Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design.”, *Indoor Air*, England, Vol. 22 No. 2, pp. 119–131.
- Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F. and Evola, G. (2015), “A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs”, *Building and Environment*, Vol. 90, pp. 71–81.
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A. and Galesi, A. (2012), “Thermal performance of ventilated roofs during summer period”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 49, pp. 611–618.
- Gaillard, C. (2021), “Le climat est-il une ressource?”, *Cahiers de La Recherche Architecturale, Urbaine et Paysagère*, No. 11, pp. 0–15.
- Garcia, Y. (2018), “La méthode des saisons climatiques : stratégie passive de conception architecturale de bâtiments basse consommation énergétique en climat très chaud”, *Thèse de Doctorat, L’UNIVERSITÉ DE BORDEAUX ÉCOLE*.
- Garshasbi, S. and Santamouris, M. (2019), “Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier B.V., Vol. 191 No. October 2018, pp. 21–32.
- Geetha, N. and Velraj, R. (2012), “Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review”, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, Vol. 29 No. 2, pp. 913–946.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A. and Wichman, I.S. (2011), “Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate”, *Energy and Buildings*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.018>.
- Ghisi, E. and Felipe Massignani, R. (2007), “Thermal performance of bedrooms in a multi-storey residential building in southern Brazil”, *Building and Environment*, Vol. 42 No. 2, pp. 730–742.
- Gian Marco Revel a, Martarelli, M., Emiliani, M., Celotti, L., Nadalini, R., Beckers, E.,

- Hermanns, S., *et al.* (2014), “Cool products for building envelope – Part II: Experimental and numerical evaluation of thermal performances”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 105, pp. 780–791.
- Givoni, B. (1969), *Man, Climate, and Architecture*, Elsevier, available at: <https://books.google.dz/books?id=Um1bAAAAMAAJ>.
- Givoni, B. (1978), *L'homme, l'architecture et Le Climat*.
- Givoni, B. (1994), “Building design principles for hot humid regions”, *Renewable Energy*, Vol. 5 No. 5, pp. 908–916.
- Givoni, B. (2011), “Indoor temperature reduction by passive cooling systems”, *Solar Energy*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>.
- Golany, G.S. (1996), “Urban design morphology and thermal performance”, *Atmospheric Environment*, Vol. 30 No. 3, pp. 455–465.
- González, E. and Givoni, B. (2004), “Radiative and Radiative / Evaporative Passive Cooling Systems for a Hot Humid Climate – Maracaibo”, *The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, No. September, pp. 19–22.
- Goudarzi, H. and Mostafaeipour, A. (2017), “Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings in hot and dry regions”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Vol. 68, pp. 432–446.
- Goussous, J., Siam, H. and Alzoubi, H. (2015), “Prospects of green roof technology for energy and thermal benefits in buildings: Case of Jordan”, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 14, pp. 425–440.
- Graeve, I. de. (2011), “The road to intelligent coloured coatings”, *Surface Engineering*, available at: <https://doi.org/10.1179/174329411x13178124951231>.
- Grosso, M. (2021), “Origin and Evolution of the Bioclimatic Approach to Architecture”, in Chiesa, G. (Ed.), *Bioclimatic Approaches in Urban and Building Design*, Springer International Publishing, Cham, pp. 119–152.
- GSA (General Services Administration). (2011), “The Benefits and Challenges of Green Roofs on Public and Commercial Buildings”, *A Report of the United States General Service Administration*, No. May, p. 152.
- Gut, P. and Ackerknecht, D. (1993), *Climate Responsive Building: Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions*, SKAT.
- Hadbaoui, H. (2018), “Pratique du biomimétisme dans l'architecture bioclimatique : Essai sur la performance énergétique des enveloppes architecturales autonomes responsives dans un climat aride”, *Mémoire de Magistère*, UNIVERSITE SALAH

- BOUBNIDER CONSTANTINE* 3., No. May, p. 138.
- HADDAM Muhammad Abdalkhalq Chuayb. (2015), “« Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l ’ amélioration de la t empérature interne d ’ un habitat ».”, *Doctorat En Sciences Physiques. UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAÏD – TLEMCEN*, p. 124.
- Haghighi, A.P., Pakdel, S.H. and Jafari, A. (2016), “A study of a wind catcher assisted adsorption cooling channel for natural cooling of a 2-storey building”, *Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 102, pp. 118–138.
- Hamdan, M.A., Yamin, J. and Abdel Hafez, E.M. (2012), “Passive cooling roof design under Jordanian climate”, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 5 No. 1, pp. 26–29.
- Hernández-Pérez, I. (2021), “Influence of Traditional and Solar Reflective Coatings on the Heat Transfer of Building Roofs in Mexico”, *Applied Sciences*, Vol. 11 No. 7, available at:<https://doi.org/10.3390/app11073263>.
- Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V. and Aguilar-Castro, K.M. (2017), *Reflective Materials for Cost-Effective Energy-Efficient Retrofitting of Roofs, Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting: Materials, Technologies, Optimization and Case Studies*, Elsevier Ltd, available at:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00004-6>.
- Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K.M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I. and Simá, E. (2018), “Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 158, pp. 569–579.
- Hosseini, M., Lee, B. and Vakilinia, S. (2017), “Energy performance of cool roofs under the impact of actual weather data”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 145, pp. 284–292.
- IEA. (2019), “Key world energy statistics”.
- Izard, C.E. (1993), “Four systems for emotion activation: Cognitive and noncognitive processes.”, *Psychological Review*, American Psychological Association, US.
- Jean Paul Boudreau. (2011), “L ’ optimisation énergétique: un travail sur l ’ enveloppe”, *COLLOQUE CEBQ/OAQ SUR L ’ ENVELOPPE DU BÂTIMENT*.
- Jo, J.H., Carlson, J.D., Golden, J.S. and Bryan, H. (2010), “An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings”, *Building and Environment*, Elsevier Ltd, Vol. 45 No. 2, pp. 453–460.
- Kabore, M. (2015), “Assessment on Passive Cooling Techniques to Improve Steel Roof

- Thermal Performance in Hot Tropical Climate”, *International Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 3 No. 6, p. 287.
- Kachkouch, S. (2019), “Évaluation expérimentale et par simulation des performances thermiques de techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud Salah Kachkouch”, *Thèse de Doctorat*, No. Cotutelle à l’Université Cadi Ayyad (Maroc) et l’Université de La Rochelle (France) pour, p. 122.
- Kamel, B., Wahba, S., Nassar, K. and Abdelsalam, A. (2012), “Effectiveness of Green-Roof on Reducing Energy Consumption through Simulation Program for a Residential Building: Cairo, Egypt”, available at:<https://doi.org/10.1061/9780784412329.175>.
- Khoukhi, M. and Fezzioui, N. (2012), “Thermal comfort design of traditional houses in hot dry region of Algeria”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 3 No. 1, p. 5.
- KOCH-NIELSEN, H. (2002), *Stay Cool: A Design Guide for the Built Environment in Hot Climates*, James & James.
- Kolokotroni, M., Gowreesunker, B.L. and Giridharan, R. (2013), “Cool roof technology in London: An experimental and modelling study”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 67, pp. 658–667.
- Kolokotroni, M., Shittu, E., Santos, T., Ramowski, L., Mollard, A., Rowe, K., Wilson, E., *et al.* (2018), “Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries”, *Energy and Buildings*, Vol. 176, pp. 58–70.
- Košir, M. (2019), *Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change*, *Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change*, available at:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-18456-8>.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F. (2006), “World map of the Köppen-Geiger climate classification updated”, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15 No. 3, pp. 259–263.
- Krüger, E., Fernandes, L. and Lange, S. (2016), “Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions”, *Building and Environment*, Elsevier Ltd, Vol. 107, pp. 90–98.
- Kujawski, W. (2014), “Impact de la forme architecturale sur la performance énergétique potentielle des collectifs d ’ habitation”, *Série Technique 14-103*, *Société Canadienne d’hypothèques et de Logement*, Canada.

- Kumar V., V. and Mahalle, A.M. (2016), “Investigation of the Thermal Performance of Green Roof on a Mild Warm Climate”, Vol. 6 No. 2.
- Lapisa, R. (2016), “Étude du rafraîchissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels Remon Lapisa To cite this version : HAL Id : tel-01373452”, *Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle*.
- Latreche Sihem. (2019), *Etude et Amélioration Des Performances Climatiques de l'enveloppe Architecturale En Milieux Chauds et Arides. Cas de l'architecture Domestiques Autoproduite à Biskra*.
- Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S. and Kim, K.W. (2009a), “An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof”, *Building and Environment*, Elsevier Ltd, Vol. 44 No. 7, pp. 1431–1439.
- Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S. and Kim, K.W. (2009b), “An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof”, *Building and Environment*, Vol. 44 No. 7, pp. 1431–1439.
- Levinson, R. and Akbari, H. (2010), “Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants”, *Energy Efficiency*, Vol. 3 No. 1, pp. 53–109.
- Levinson, R., Akbari, H. and Berdahl, P. (2010), “Measuring solar reflectance — Part II : Review of practical methods”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 84 No. 9, pp. 1745–1759.
- Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S. and Bretz, S. (2005), “Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements”, *Energy Policy*, Vol. 33 No. 2, pp. 151–170.
- Li, W., El-Askary, H., Thomas, R., Tiwari, S.P., Manikandan, K.P., Piechota, T. and Struppa, D. (2020), “An assessment of the hydrological trends using synergistic approaches of remote sensing and model evaluations over global arid and semi-arid regions”, *Remote Sensing*, Vol. 12 No. 23, pp. 1–28.
- Lima-Téllez, T., Chávez, Y., Hernández-López, I., Xamán, J. and Hernández-Pérez, I. (2022), “Annual thermal evaluation of a ventilated roof under warm weather conditions of Mexico”, *Energy*, Vol. 246, available at:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123412>.
- Limb, M.J. (1998), “Passive cooling technology for office buildings: An annotated bibliography”, *International Energy Agency OEA*.
- Lirola, J.M., Castañeda, E., Lauret, B. and Khayet, M. (2017), “A review on experimental research using scale models for buildings: Application and

- methodologies”, *Energy and Buildings*, Elsevier, Vol. 142, pp. 72–110.
- Lopez-Besora, J., Coch, H. and Pardal, C. (2019), “Contemporary Roof Design Concepts: Learning from Vernacular Architecture BT - Sustainable Vernacular Architecture: How the Past Can Enrich the Future”, in Sayigh, A. (Ed.), , Springer International Publishing, Cham, pp. 357–376.
- M.Hassan, A., Lee, H. and Oh, S. (2016), “Jurnal Teknologi CHALLENGES OF PASSIVE COOLING TECHNIQUES IN BUILDINGS: A CRITICAL REVIEW”, Vol. 6, pp. 149–162.
- Mahmoud, S. and Ismaeel, W.S.E. (2019), “Developing sustainable design guidelines for roof design in a hot arid climate”, *Architectural Science Review*, Taylor & Francis, Vol. 62 No. 6, pp. 507–519.
- Mandoul, T. (2012), “Climat (s) : nouveau paradigme pour l ’ architecture ?”, *Éditions Presses Universitaires de Rennes*, Vol. 2, p. 141 à 161.
- MANNIVANNAN, A. and JAFFARSATHIQ ALI, M.T. (2015), “Simulation and experimental study of thermal performance of a building roof with a phase change material (PCM)”, *Sadhana*, Vol. 40 No. 8, pp. 2381–2388.
- Matheos Santamouris. (2005), “PASSIVE COOLING OF BUILDINGS”, *Advances of Solar Energy*, No. 2, pp. 1–7.
- May Tzuc, O., Hernández-Pérez, I., Macias-Melo, E. V., Bassam, A., Xamán, J. and Cruz, B. (2019), “Multi-gene genetic programming for predicting the heat gain of flat naturally ventilated roof using data from outdoor environmental monitoring”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Elsevier Ltd, Vol. 138, pp. 106–117.
- MAZARI, M. (2012), “Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d’Architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)”, *MÉMOIRE DE MAGISTER, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou*, p. 146.
- Medina, M.A. (2012), “A comprehensive review of radiant barrier research including laboratory and field experiments”, *ASHRAE Transactions*.
- MeetMED. (2020), “Fiche pays : Algérie”, pp. 1–4.
- Mokhtari, A., Brahimi, K. and 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, pp. 307–315.
- Morel, N. and Gnansounou, E. (2008), “Énergétique du bâtiment”, *Cours de Section de Génie Civil, 4ème/5ème Année (Nouvelle Édition Du Cours Précédemment Donné Par Claude-Alain Roulet et Arnaud Dauriat)*.

- Moujalled, B. (2007), “Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés”, *Thèse de Doctorat de L’Institut Des Sciences Appliquées de Lyon*, p. 329.
- Muharam, A., Amer, E. and Al-Hemiddi, N. (2016), “Thermal Performance of the Extensive Green Roofs in Hot Dry Climate”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 3 No. 5, p. 236725.
- Nahar, N.M., Sharma, P. and Purohit, M.M. (1999), “Studies on solar passive cooling techniques for arid areas”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 40 No. January, pp. 89–95.
- Nahar, N.M., Sharma, P. and Purohit, M.M. (2003), “Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions”, *Building and Environment*, Vol. 38 No. 1, pp. 109–116.
- Nayak, J.K. and Prajapati, J.A. (2006), “Handbook on Energy Conscious Buildings”, *R & D Project No. 3/4(03)/99-SEC between Indian Institute of Technology, Bombay and Solar Energy Centre, Ministry of Non-Conventional Energy Sources*, Vol. 4 No. 3, pp. 2093–2117.
- Nessma, F. and BENBOUAZIZ, A. (2021), “La conception bioclimatique des écoles : un mécanisme efficace pour la protection de l’environnement et la santé de l’enfant”, *Architecture et Environnement de l’enfant*, Vol. 3, pp. 115–139.
- Olgyay, V. (1963), *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: Some Chapters Based on Cooperative Research with Aladar Olgyay*, Princeton University Press, available at: <https://books.google.dz/books?id=y3Ghvu-GjI0C>.
- OPVM. (2013), “PLANCHERS DES CONSTRUCTIONS TRADITIONNELLES DANS LA VALLEE DU M’ZAB”, *Brochure*, Vol. 1.
- Oropeza-Perez, I. and Østergaard, P.A. (2018), “Active and passive cooling methods for dwellings: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, Vol. 82 No. September 2017, pp. 531–544.
- Oscar HERNANDEZ. (2016), “ETUDE ET ANALYSE DE LA VENTILATION ET DE LA QUALITE DES ENVIRONNEMENTS INTERIEURS (QEI) DANS LES BÂTIMENTS DE BUREAUX A FAIBLE DEMANDE ENERGETIQUE LE CAS DE LA TOUR ELITHIS A DIJON”, *Université de La Rochelle, France*, pp. 1–23.
- Pagney, P. (1976), “Les climats de la Terre”, *Initiation Aux Études Géographiques*, p. 150.

- Pearlmutter, D. and Berliner, P. (2017), “Experiments with a ‘psychrometric’ roof pond system for passive cooling in hot-arid regions”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 144, pp. 295–302.
- Pearlmutter, D. and Rosenfeld, S. (2008), “Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives”, *Energy and Buildings*, Vol. 40 No. 5, pp. 855–864.
- Piselli, C., Castaldo, V.L. and Pisello, A.L. (2019), “How to enhance thermal energy storage effect of PCM in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions”, *Solar Energy*, Elsevier, Vol. 192 No. June, pp. 106–119.
- Pisello, A.L. (2017), “State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 144, pp. 660–680.
- Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Piselli, C., Pignatta, G. and Cotana, F. (2015), “Combined thermal effect of cool roof and cool façade on a prototype building”, *Energy Procedia*, Vol. 78, Elsevier B.V., pp. 1556–1561.
- Pisello, A.L., Cotana, F. and Brinchi, L. (2014), “On a cool coating for roof clay tiles: Development of the prototype and thermal-energy assessment”, *Energy Procedia*, Vol. 45, Elsevier B.V., pp. 453–462.
- Pisello, A.L., Pignatta, G. and Piselli, C. (2015), “Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal performance in summer conditions: in field experiment”, *5th CIRIAF National Congress Energy, Environment and Sustainable Development, Perugia, Italy.*, No. April.
- Pisello, A.L., Piselli, C. and Cotana, F. (2015), “Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 116, pp. 337–356.
- Pisello, A.L., Thiemann, A. and Santamouris, M. (2016), “Analysis of a Cool Roof System for Reducing Cooling Loads and Improving Cooling System Efficiency”, No. September.
- Polo-labarríos, M.A., Quezada-garcía, S., Heriberto, S., Escobedo-izquierdo, A. and Espinosa-paredes, G. (2020), “Case Studies in Thermal Engineering Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs”, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 21 No. June, available at:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100697>.
- Puangsoambut, W., Hirunlabh, J., Khedari, J., Zeghmami, B. and Win, M.M. (2007), “Enhancement of natural ventilation rate and attic heat gain reduction of roof solar collector using radiant barrier”, *Building and Environment*, Vol. 42 No. 6, pp.

- 2218–2226.
- Qin, Y., Zhang, M. and Hiller, J.E. (2017a), “Theoretical and experimental studies on the daily accumulative heat gain from cool roofs”, *Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 129, pp. 138–147.
- Qin, Y., Zhang, M. and Hiller, J.E. (2017b), “Theoretical and experimental studies on the daily accumulative heat gain from cool roofs”, *Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 129, pp. 138–147.
- Radhi, H., Sharples, S., Taleb, H. and Fahmy, M. (2017), “Will cool roofs improve the thermal performance of our built environment? A study assessing roof systems in Bahrain”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 135 No. January, pp. 324–337.
- Raji, B., Tenpierik, M.J. and Van Den Dobbelsteen, A. (2015), “The impact of greening systems on building energy performance: A literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>.
- Rawat, M. and Singh, R.N. (2022), “A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions”, *Energy and Built Environment*, Vol. 3 No. 3, pp. 327–347.
- Roaf, S., Crichton, D. and Nicol, F. (2005), *Adapting Buildings and Cities for Climate Change. A 21st Century Survival Guide*, Elsevier.
- ROBILLART, M. (2016), “Etude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants”, *L'École Nationale Supérieure Des Mines de Paris Étude de Stratégies de Gestion En Temps Réel Pour d.*
- Rodriguez, G. and Mod, G.R. (2015), “Modélisation de la réponse de l'architecture au climat local”, *Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I*.
- Runsheng, T., Etzion, Y. and Erell, E. (2003), “Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings”, *Renewable Energy*, Vol. 28 No. 10, pp. 1513–1522.
- Sabzi, D., Haseli, P., Jafarian, M., Karimi, G. and Taheri, M. (2015), “Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof”, *Energy and Buildings*, Vol. 109, pp. 135–142.
- Sailor, D.J. (2008), “A green roof model for building energy simulation programs”, *Energy and Buildings*, available at:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>.
- Sailor, D.J. and Hagos, M. (2011), “An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media”, *Energy and Buildings*, available

- at:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.014>.
- Saint-Gobain. (2012), “Introduction à la thermique du bâtiment”, *Les Essentiels de l’habitat*, Vol. 4, p. 16.
- Sakdawattananon, S., Sudprasert, S. and Rattanadecho, P. (2017), “Numerical study of thermal behaviors in roof ponds under the hot and humid climate”, *Walailak Journal of Science and Technology*, Vol. 14 No. 5, pp. 401–415.
- Sanjai, N. and CHAND, P. (2008), “Passive cooling techniques in buildings: Past and present a review”, *ARISER*, Vol. 4, pp. 37–46.
- Santamouris, M. (2014), “Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 103, pp. 682–703.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A. and Patargias, P. (2007), “Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece”, *Energy*, Vol. 32 No. 9, pp. 1781–1788.
- Santamouris, M., Synnefa, A. and Karlessi, T. (2011a), “Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd.
- Santamouris, M., Synnefa, A. and Karlessi, T. (2011b), “Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions”, *Solar Energy*, available at:
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>.
- Sayigh, A. (2019), *Sustainable Vernacular Architecture*, available at:
<http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-06185-2>.
- Sayigh, A. and Marafia, A.H. (1998), “Chapter 1—Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 2 No. 1, pp. 3–24.
- Seifhashem, M., Capra, B.R., Miller, W. and Bell, J. (2018), “The potential for cool roofs to improve the energy efficiency of single storey warehouse-type retail buildings in Australia: A simulation case study”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 158, pp. 1393–1403.
- Semahi, S., Zemmouri, N., Singh, M.K. and Attia, S. (2019), “Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria”, *Building and Environment*, Elsevier, Vol. 161 No. July, p. 106271.

- Shafique, M., Luo, X. and Zuo, J. (2020), “Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends”, *Solar Energy*, Elsevier, Vol. 202 No. October 2019, pp. 485–497.
- Shannon, R.E. (1975), *Systems Simulation : The Art and Science / Robert E. Shannon.*, *Systems Simulation : The Art and Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Sharifi, A. and Yamagata, Y. (2015a), “Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review”, *Applied Energy*, Vol. 160 No. January, pp. 336–357.
- Sharifi, A. and Yamagata, Y. (2015b), “Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review”, *Applied Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 160, pp. 336–357.
- Sibel Raquel Ersoy, J.T.-P. (2021), “LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DE L’ALGÉRIE”, *FRIEDRICH EBERT STIFTUNGQ.*
- Spanaki, A., Kolokotsa, D., Tsoutsos, T. and Zacharopoulos, I. (2012), “Theoretical and experimental analysis of a novel low emissivity water pond in summer”, *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 86 No. 11, pp. 3331–3344.
- Spanaki, A., Kolokotsa, D., Tsoutsos, T. and Zacharopoulos, I. (2014), “Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer”, *Applied Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 123, pp. 273–280.
- Spanaki, A., Tsoutsos, T. and Kolokotsa, D. (2011), “On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, Vol. 15 No. 8, pp. 3523–3533.
- Spitz, C. (2012), “Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l’efficacité énergétique des bâtiments”, *PhD Thesis*, p. 169.
- Sproul, J., Wan, M.P., Mandel, B.H. and Rosenfeld, A.H. (2014), “Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 71, pp. 20–27.
- Sriti, L. (2013), “Doctorat en sciences en Architecture Architecture domestique en devenir . Formes , usages et représentations Le cas de Biskra SRITI Leila”, *Doctorat En Sciences En Architecture, Université de Biskra.*
- Supic, P. (2010), “L’ aspect bioclimatique de l’ habitat vernaculaire”, *Architecture & Comportement / Architecture & Behaviour*, Vol. 10 No. 1, pp. 27–47.
- Synnefa, A., Saliari, M. and Santamouris, M. (2012), “Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens”, *Energy & Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 55, pp. 7–15.

- Synnefa, A., Santamouris, M. and Akbari, H. (2007), “Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions”, *Energy and Buildings*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>.
- Tang, D. and Kim, J. (2004), “Simulation Support For Sustainable Design Of Buildings”, *Fluid Dynamics*, No. Idm, pp. 1–6.
- Tang, R. and Etzion, Y. (2005), “Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared with a movable insulation”, *Renewable Energy*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.008>.
- Tejero-González, A., Andrés-Chicote, M., García-Ibáñez, P., Velasco-Gómez, E. and Rey-Martínez, F.J. (2016), “Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier.
- Tetali, S. (2011), “Assessment of cool roof technology for its energy performance in buildings”, *A Thesis for the Degree of Master of Science in IT in Building Science*, No. April.
- The green trading house. (2019), *PLANET SUPRA, Barrière Thermique*, available at: <https://thegreentradinghouse.com/downloads/Plaquette-Planet-Supra.pdf>.
- Thierry, J., Misse, A., Celaire, R. and Rakotomalala, L. (2019), “Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal”, *DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DES ÉTABLISSEMENTS CLASSÉS*.
- Till Schaap Editions. (2020), *Patrimonial - N° 4 L'Architecture 1920-1975*.
- Trombadore, A. and Visone, F. (2019), “Vernacular Architecture as Model to Design a Prototype for Affordable Housing in Mosul”, in Sayigh, A. (Ed.), *Sustainable Vernacular Architecture: How the Past Can Enrich the Future*, Springer International Publishing, Cham, pp. 181–205.
- VELÁZQUEZ, E.E.R. (2016), “Processus de conception énergétique de bâtiments durables”, *Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris*.
- Vijayaraghavan, K. (2016), “Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 740–752.
- Vorster, J. and Dobson, R. (2011), “Sustainable cooling alternatives for buildings”, *Journal of Energy in Southern Africa*, Vol. 22 No. 4, pp. 48–66.
- Wong, N.H., Tay, S.F., Wong, R., Ong, C.L. and Sia, A. (2003), “Life cycle cost

- analysis of rooftop gardens in Singapore”, *Building and Environment*, Vol. 38 No. 3, pp. 499–509.
- Yang, J., Mohan Kumar, D. Ilamathy, Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D. and Lee, S.E. (2018), “Green and cool roofs’ urban heat island mitigation potential in tropical climate”, *Solar Energy*, Elsevier, Vol. 173 No. February, pp. 597–609.
- Yannas, S., Erell, E. and Molina, J.L. (2006), *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*, Earthscan, available at: <https://books.google.dz/books?id=Vx2KAhtxBncC>.
- Yu, J., Tian, L., Xu, X. and Wang, J. (2015), “Evaluation on energy and thermal performance for office building envelope in different climate zones of China”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 86, pp. 626–639.
- Yuan, J., Emura, K. and Farnham, C. (2016), “Potential for Application of Retroreflective Materials instead of Highly Reflective Materials for Urban Heat Island Mitigation”, *Urban Studies Research*, Vol. 2016, pp. 1–10.
- Zhang, Y., Bai, X., Mills, F.P. and Pezzey, J.C.V. (2018), “Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 172, pp. 279–294.
- Zhang, Z., Tong, S. and Yu, H. (2016), “Life Cycle Analysis of Cool Roof in Tropical Areas”, *Procedia Engineering*, The Author(s), Vol. 169, pp. 392–399.
- Zingre, K.T., Wan, M.P., Wong, S.K., Toh, W.B.T. and Lee, I.Y.L. (2015), “Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate”, *Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 82, pp. 813–826.
- Zingre, K.T., Yang, E.H. and Wan, M.P. (2017), “Dynamic thermal performance of inclined double-skin roof: Modeling and experimental investigation”, *Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 133 No. December, pp. 900–912.
- Zinzi, M. and Agnoli, S. (2012), “Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region”, *Energy and Buildings*, Vol. 55, Elsevier B.V., pp. 66–76.
- Zinzi, M., Carnielo, E. and Agnoli, S. (2012), “Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 50, pp. 111–119.