

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 dans les Zones Arides

**L'apport référentiel de l'habitat vernaculaire
pour assister la production d'une architecture
contemporaine localement située et climatiquement
performante : l'exemple des ksour des Ziban**

Présentée par :

BOUMERZOUG Adel

Soutenue publiquement le : 28/10/2023

Devant le jury composé de :

Dr. MADHOU Meriem

MCA

Présidente

Université de Biskra

Dr. SRITI Leila

Professeur

Rapporteur

Université de Biskra

Dr. HAMOUDA Abida

Professeur

Examinatrice

Université de Batna 1

Dr. BOUZIR Tallal Abel Karim

MCA

Examinateur

Université de Blida

Année Universitaire : 2023 /2024

Dédicace

Je dédie cette thèse à mes parents, Keltoum et Ahmed, qui ont été des piliers solides de soutien et d'inspiration tout au long de mon parcours académique. Leur dévouement, leur amour indéfectible et leur sacrifice personnel ont constitué les fondations sur lesquelles j'ai construit mon éducation.

Les valeurs d'intégrité, de persévérance et de respect qu'ils m'ont transmises ont été des leçons précieuses. Leur exemple de dévouement envers l'éducation m'a motivé à donner le meilleur de moi-même dans cette aventure.

À travers les hauts et les bas, les moments de triomphe et les défis inévitables, ils ont été présents à chaque étape. Leur influence positive a contribué de manière significative à ma formation et à la réussite de cette thèse.

Pour toutes ces raisons, et bien plus encore, cette thèse est dédiée à mes parents, qui ont façonné mon chemin, éclairé mes horizons et fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui.

Avec une gratitude éternelle,

À tous ceux qui croient en la quête de la vérité, au pouvoir de la connaissance et à l'importance de l'apprentissage tout au long de la vie. Par leur travail, leurs études, leurs recherches et leur foi inébranlable, ils contribuent inlassablement à l'amélioration du monde. Leurs efforts, quelle qu'en soit la portée, éclairent notre chemin vers la connaissance, le progrès et l'élévation de l'humanité. Avec gratitude, je leur offre ce travail en hommage à leur dévouement, qu'il soit individuel ou collectif.

Avec respect et admiration,

Puisse cette thèse contribuer, d'une manière ou d'une autre, au vaste corpus de connaissances et inspirer les générations futures de chercheurs.

Adel

Remerciements

J'entame ces remerciements en exprimant ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de manière significative à la réalisation de cette thèse.

Je souhaite remercier mon directeur de thèse, le Professeur Sriti Leila, qui m'a fait l'honneur de m'accompagner dans le travail de cette thèse. Son exigence et son sérieux dans le travail m'ont apporté l'orientation pour mener à bien ce lourd projet. De plus, sa flexibilité et sa disponibilité ont été d'une grande aide. En toute circonstance, il s'est montré compréhensif et bienveillant, ce qui a grandement facilité ce voyage.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury, pour avoir pris le temps et l'effort pour expertiser et évaluer cette thèse.

À mon épouse, Imen, je suis profondément reconnaissant. Sa compréhension a été une source d'inspiration. Son aide, sa patience et son encouragement ont éclairé les moments sombres de ce voyage académique.

À mes sœurs bien-aimés, Rym, Amel et Lamia, je dédie une part de cette réussite. Leurs encouragements, leurs mots inspirants m'ont motivé tout au long de ce travail.

Enfin, à mes amis, dont la présence et l'amitié fidèle ont joué un rôle crucial, je dis un grand merci. Vos encouragements, vos discussions enrichissantes et votre soutien m'ont rappelé l'importance de l'amitié dans les moments d'ambiguïté.

Ce travail est le fruit d'un effort collectif, et je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous pour votre soutien, votre encouragement et votre amitié. Vous avez fait de cette quête une expérience inoubliable.

Adel

Résumé

L'architecture vernaculaire des ksour des Ziban se distingue par un style enraciné dans les pratiques locales et ingénieusement adapté aux conditions climatiques chaudes et sèches de la région. La présente recherche porte sur l'évaluation des performances thermiques et visuelles de cette architecture séculaire et se fixe comme objectif d'identifier les stratégies et techniques architecturales et urbaines passives puis d'examiner la possibilité de les réemployer dans des bâtiments contemporains situés dans le contexte climatique chaud et sec comme moyen d'améliorer leur potentiel d'adaptabilité thermique et visuelle.

Dans la première partie de la thèse, une approche théorique approfondie a permis d'appréhender les paramètres du confort thermique et visuel dans les bâtiments. La manière dont ces paramètres ont été mis en œuvre par les techniques de l'architecture vernaculaire dans le but d'améliorer les performances des habitations a également été examinée. Par la suite, les stratégies adaptatives propres à l'architecture vernaculaire des régions chaudes et arides à travers le monde ont été exposées. Cela a mis en exergue l'importance de tenir compte des spécificités du climat chaud et aride lors de la conception architecturale. Ainsi, des solutions pratiques ont été proposées pour améliorer le confort thermique et visuel en minimisant les effets de la chaleur et en favorisant la ventilation naturelle et le refroidissement par évaporation.

La deuxième partie de la thèse s'est d'abord concentrée sur une analyse judicieuse de l'état actuel des connaissances en matière d'architecture adaptée aux climats chauds et arides. Une attention particulière a été portée aux approches scientifiques utilisées pour identifier, évaluer et adapter les stratégies et techniques vernaculaires passives aux exigences actuelles en vue de les appliquer dans des bâtiments contemporains. Dans un deuxième temps, les techniques et stratégies spécifiques à la région des Ziban ont été identifiées grâce à une synthèse des travaux antérieurs effectués dans la région, complétée par des observations sur le terrain, le tout étant comparé aux stratégies et techniques vernaculaires similaires existantes dans d'autres régions présentant un climat similaire. Cette approche fondée sur une analyse qualitative a permis de mettre en évidence les techniques architecturales spécifiques à la région. Pour corroborer ces premiers résultats, des mesures hygrothermiques et d'éclairement ont été réalisées sur des habitations traditionnelles représentatives de la région des Ziban afin d'évaluer leurs performances thermiques et visuelles. Les données quantitatives prélevées et analysées ont révélé que les habitations vernaculaires situées dans un environnement urbain traditionnel, c'est-à-dire dans le ksar, présentaient des avantages significatifs en termes de stabilité thermique et de régulation de l'humidité par rapport aux habitations vernaculaires situées en dehors du ksar. Cependant, les niveaux d'éclairement dans les espaces

internes étaient relativement bas, soulignant ainsi la nécessité de trouver un équilibre entre la protection solaire et l'éclairage naturel.

Tenant compte de ces résultats empiriques, une approche d'optimisation paramétrique a été mise en œuvre pour compléter le travail d'investigation accompli sur les techniques vernaculaires étudiées. De ce point de vue, divers paramètres architecturaux ont été pris en considération pour déterminer la combinaison optimale des stratégies ciblées et réunies dans un modèle virtuel hypothétique représentant une habitation contemporaine. Les résultats ont démontré que l'intégration des techniques vernaculaires optimisées offrait la possibilité d'améliorer considérablement la régulation thermique et le confort visuel. Par la suite, et afin de vérifier ces résultats, une habitation individuelle contemporaine a été choisie comme cas d'étude pour l'application et la validation de l'efficacité des techniques et stratégies vernaculaires optimisées. Les résultats obtenus ont démontré que les conditions de confort thermique et visuel de l'habitation existante ont sensiblement été améliorées grâce à l'intégration des techniques vernaculaires optimisées. De plus, étant donné l'importance de la stratégie de ventilation qui a permis à l'habitation traditionnelle intégrée dans le ksar de surpasser les performances thermiques de l'habitation située hors du ksar, une optimisation de la stratégie de ventilation nocturne a été entreprise. Les résultats ont montré que l'optimisation de la stratégie de ventilation nocturne en ventilation adaptative a nettement amélioré le confort thermique dans les habitations, faisant de cette stratégie un complément essentiel aux autres techniques vernaculaires adaptatives.

Finalement, ce travail de recherche focalisé sur la région des Ziban a mis en exergue le potentiel des techniques de l'architecture vernaculaire dans les régions chaudes et sèches. En adaptant une approche holistique, ces techniques et stratégies vernaculaires réajustées aux conditions et exigences actuelles sont applicables aux constructions contemporaines tout en étant capables d'améliorer leur performance en termes de confort thermique et visuel. Ces résultats revêtent une signification pour la conception architecturale dans les régions à climat chaud et aride, contribuant ainsi au développement durable et à un avenir plus viable sur le plan environnemental.

Mots-clés : Habitat vernaculaire ; ksour des Ziban ; stratégies passives d'adaptabilité climatique ; amélioration des performance thermique et visuelle des bâtiments contemporains ; zones chaudes et arides ; simulation ; optimisation paramétrique.

Abstract

The vernacular architecture of the Ziban Ksour is distinguished by a style deeply rooted in local practices and ingeniously adapted to the hot and dry climatic conditions of the region. This research aims to evaluate the thermal and visual performance of this centuries-old architecture, with the objective of identifying passive architectural and urban strategies and techniques, and examining the possibility of applying them to contemporary buildings in hot and dry climates to enhance their thermal and visual adaptability.

The first part of the thesis involved a comprehensive theoretical approach to understanding the parameters of thermal and visual comfort in buildings. It also examined how these parameters were implemented through vernacular architectural techniques to improve housing performance. Subsequently, adaptive strategies specific to vernacular architecture in hot and arid regions worldwide were presented. This highlighted the importance of considering the specificities of hot and arid climates in architectural design. Practical solutions were proposed to enhance thermal and visual comfort by minimizing heat effects and promoting natural ventilation and evaporative cooling.

The second part of the thesis initially focused on a judicious analysis of the current state of knowledge in architecture adapted to hot and arid climates. Special attention was paid to the scientific approaches used to identify, evaluate, and adapt passive vernacular strategies and techniques to current requirements for application in contemporary buildings. Next, techniques and strategies specific to the Ziban region were identified through a synthesis of previous work in the area, supplemented by field observations, and compared to similar vernacular strategies and techniques in other regions with similar climates. This qualitative analysis approach highlighted region-specific architectural techniques. To verify these initial findings, hygrothermal and illuminance measurements were conducted on representative traditional dwellings in the Ziban region to assess their thermal and visual performance. The quantitative data collected and analyzed revealed that vernacular dwellings located in a traditional urban environment, i.e., within the Ksar, exhibited significant advantages in terms of thermal stability and humidity regulation compared to vernacular dwellings located outside the Ksar. However, indoor illuminance levels were relatively low, emphasizing the need to strike a balance between sun protection and natural lighting.

Taking these empirical results into account, a parametric optimization approach was implemented to complement the research on the studied vernacular techniques. From this perspective, various architectural parameters were considered to determine the optimal combination of targeted strategies integrated into a hypothetical virtual model representing a contemporary dwelling. The results demonstrated that the integration of optimized vernacular techniques offered the potential for

significant improvements in thermal regulation and visual comfort. Subsequently, to verify these results, a contemporary individual dwelling was chosen as a case study for the application and validation of the efficiency of optimized vernacular techniques and strategies. The results obtained showed that the thermal and visual comfort conditions of the existing dwelling were substantially improved through the integration of optimized vernacular techniques. Furthermore, given the importance of the ventilation strategy that allowed the traditional dwelling integrated into the Ksar to outperform the thermal performance of the dwelling located outside the Ksar, an optimization of the nighttime ventilation strategy was undertaken. The results showed that optimizing the adaptive ventilation strategy significantly improved thermal comfort in the dwellings, making it an essential complement to other adaptive vernacular techniques.

In conclusion, this research focused on the Ziban region has highlighted the potential of vernacular architecture techniques in hot and dry regions. By adopting a holistic approach, these adjusted vernacular techniques and strategies, tailored to current conditions and requirements, are applicable to contemporary constructions while capable of enhancing their thermal and visual comfort performance. These results hold significance for architectural design in hot and arid regions, contributing to sustainable development and a more environmentally viable future.

Keywords: Vernacular housing; Ziban Ksour; passive climate adaptability strategies; improvement of thermal and visual performance of contemporary buildings; hot and arid regions; simulation; parametric optimization.

ملخص

تتميز العمارة التقليدية في قصور الزيبان بأسلوب متجذر بعمق في الممارسات المحلية ومكيف ببراعة مع الظروف المناخية الحارة والجافة في المنطقة. يهدف هذا البحث إلى تقييم الأداء الحراري والبصري لهذه العمارة التي تعود إلى قرون، بهدف تحديد الاستراتيجيات والتقنيات المعمارية والحضرية السلبية وفحص إمكانية تطبيقها على المباني المعاصرة في المناخات الحارة والجافة لتعزيز قدرتها على التكيف الحراري والبصري.

تضمن الجزء الأول من الأطروحة نهجًا نظريًا شاملاً لفهم معايير الراحة الحرارية والبصرية في المباني. كما تم القيام بفحص كيفية تطبيق هذه المعايير من خلال التقنيات المعمارية التقليدية لتحسين أداء السكن. بعد ذلك، تم تقديم الاستراتيجيات التكيفية الخاصة بالعمارة التقليدية في المناطق الحارة والجافة حول العالم. وهذا يبرز أهمية مراعاة خصوصيات المناخات الحارة والجافة في التصميم المعماري. كما تم عرض إجراءات عملية لتعزيز الراحة الحرارية والبصرية عن طريق تقليل التأثيرات الحرارية وتعزيز التهوية الطبيعية والتبريد التبخيري.

ركز الجزء الثاني من الأطروحة في البداية على تحليل دقيق لحالة المعرفة الحالية في العمارة المكيفة للمناخات الحارة والجافة. تم إيلاء اهتمام خاص للمقاربات العلمية المستخدمة لتحديد وتقييم تطوير الاستراتيجيات والتقنيات التقليدية السلبية مع المتطلبات الحالية للتطبيق في المباني المعاصرة. بعد ذلك، تم تحديد التقنيات والاستراتيجيات الخاصة بمنطقة الزيبان من خلال تجميع الأعمال السابقة في المنطقة، واستكمالها بملاحظات ميدانية، ومقارنتها باستراتيجيات وتقنيات عامة مماثلة في مناطق أخرى ذات مناخات مماثلة. حيث أبرز نهج التحليل النوعي هذا التقنيات المعمارية الخاصة بالمنطقة. للتحقق من هذه النتائج الأولية، تم إجراء قياسات الرطوبة الحرارية والإضاءة على المساكن التقليدية في منطقة الزيبان لتقييم أدائها الحراري والبصري. أظهرت البيانات الكمية التي تم جمعها وتحليلها أن المساكن التقليدية الواقعة في بيئة حضرية تقليدية، أي داخل القصر، أظهرت مزايا كبيرة من حيث الثبات الحراري وتنظيم الرطوبة مقارنةً بالمساكن التقليدية الواقعة خارج القصر. ومع ذلك، كانت مستويات الإضاءة الداخلية منخفضة نسبيًا، مما يؤكد على ضرورة إيجاد توازن بين حماية الشمس والإضاءة الطبيعية.

مع الأخذ بعين الاعتبار هذه النتائج التجريبية، تم تنفيذ تقنية التحسين البارامتري لتحسين التقنيات التقليدية المدروسة. من خلال هذا النهج، تم النظر في العوامل المعمارية المختلفة لتحديد التركيبة المثلى للاستراتيجيات المستهدفة المدمجة في نموذج افتراضي يمثل مسكنًا معاصرًا. أظهرت النتائج أن دمج التقنيات التقليدية المحسنة يوفر إمكانية تحقيق تحسينات كبيرة في التنظيم الحراري والراحة البصرية. بعد ذلك، للتحقق من هذه النتائج، تم اختيار مسكن فردي معاصر كحالة دراسية لتطبيق والتحقق من فعالية التقنيات والاستراتيجيات التقليدية المحسنة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن ظروف الراحة الحرارية والبصرية للمسكن الحالي تم تحسينها بشكل كبير من خلال دمج التقنيات التقليدية المحسنة. علاوة على ذلك، نظرًا لأهمية استراتيجيات التهوية التي سمحت للمسكن التقليدي المدمج في القصر بتفوق على الأداء الحراري للمسكن الواقع خارج القصر، ثم تم إجراء تحسين لاستراتيجية التهوية الليلية. أظهرت النتائج أن تحسين استراتيجيات التهوية التكيفية أدى إلى تحسين كبير في الراحة الحرارية في المساكن، مما يجعلها مكملاً أساسياً للتقنيات التقليدية التكيفية الأخرى.

في الختام، سلط هذا العمل البحثي الذي يركز على منطقة الزيبان الضوء على إمكانات تقنيات العمارة التقليدية في المناطق الحارة والجافة. من خلال تبني نهج شامل، يمكن تطبيق هذه التقنيات والاستراتيجيات التقليدية المعدلة لتناسب مع الظروف والمتطلبات الحالية على المباني المعاصرة، مع تحسين أدائها من حيث الراحة الحرارية والبصرية. تتسم هذه النتائج بأهمية للتصميم المعماري في المناطق ذات المناخ الحار والجاف، مما يساهم في التنمية المستدامة والمستقبل الأكثر استدامة من الناحية البيئية.

كلمات مفتاحية

السكن التقليدي، قصور الزيبان، استراتيجيات التكيف المناخي السلبية، تحسين أداء المباني المعاصرة من حيث الحرارة والرؤية، المناطق الحارة والجافة، المحاكاة، التحسين البارامتري.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
I) INTRODUCTION	2
II) PROBLEMATIQUE	2
III) QUESTIONS DE RECHERCHE	4
IV) HYPOTHESES	4
V) CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	4
VI) ANALYSE CONCEPTUELLE	5
VII) METHODOLOGIE	7
VIII) STRUCTURE DE LA THESE	7
CHAPITRE 1. LES PERFORMANCES THERMIQUES ET VISUELLES DES BATIMENTS	13
1.1 INTRODUCTION	14
1.2 LE CONFORT THERMIQUE	15
1.2.1 LE CONTROL DE LA TEMPERATURE DU CORPS (THERMOREGULATION)	15
1.2.2 LES FACTEURS QUI INFLUENT LE CONFORT THERMIQUE	16
1.2.3 AUTRES INDICATEURS DE TEMPERATURE	24
1.3 LES MODELES D'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE	26
1.3.1 LES METHODES PMV/PPD	26
1.3.2 L'INCONFORT THERMIQUE LOCAL	33
1.3.3 THEORIE DU CONFORT ADAPTIVE	37
1.3.4 MODELE ADAPTIVE DE LA REGION CHAUDE ET ARIDE EN ALGERIE	40
1.3.5 INDICE CLIMATIQUE THERMIQUE UNIVERSEL UTCI	40
1.4 LE CONFORT VISUEL	42
1.4.1 INTRODUCTION SUR LE CONFORT VISUEL	42
1.4.2 PARAMETRES QUI INFLUENT LE CONFORT VISUEL	43
1.4.3 LES OUTILS D'EVALUATION DU CONFORT VISUEL	45
1.4.4 LES NORMES INTERNATIONALES DU CONFORT VISUEL	47
1.4.5 LES INDICATEURS DU CONFORT VISUEL	50
1.5 CONCLUSION	51
CHAPITRE 2. STRATÉGIES ADAPTÉES AU CLIMAT CHAUD ET ARIDE	52
2.1 INTRODUCTION	53
2.2 LES ZONES CHAUDES ET ARIDES	53
2.2.1 LE CLIMAT CHAUD ARIDE DESERTIQUE (BHW)	54
2.2.2 LE CLIMAT CHAUD ARIDE STEPPIQUE OU CHAUDE SEMI-ARIDE (BHS)	55
2.3 STRATEGIES ARCHITECTURALES ET URBAINES DES ZONES CHAUDES ET ARIDES	56
2.3.1 STRATEGIES URBAINES	56
2.3.2 STRATEGIES ARCHITECTURALES	60
2.4 TECHNIQUES ET DISPOSITIFS URBAINS	65
2.4.1 POSITIONNEMENT ET CONFIGURATION DU TERRAIN	66
2.4.2 MORPHOLOGIE URBAINE	69
2.4.3 ORIENTATION ET TYPES DES TISSUS URBAINS	72
2.5 TECHNIQUES ET DISPOSITIFS ARCHITECTURAUX	75
2.5.1 MORPHOLOGIE DU PLAN	75

2.5.2	AGENCEMENT DES ESPACES (ZONING)	75
2.5.3	LA MAISON A PATIO	76
2.5.4	LE TAKHTABÜSH	77
2.5.5	TECHNIQUE DE CONSTRUCTION DES SURFACES OPAQUES DE L'ENVELOPPES	77
2.5.6	TECHNIQUE DE CONSTRUCTION DES SURFACES NON-OPAQUES DE L'ENVELOPPES	79
2.5.7	LES ATTRAPES VENT (MALQAF ET BADJIR)	81
2.5.8	FONTAINES	82
2.5.9	SALSABIL	83
2.5.10	LES CAVES ET NIVEAUX ENTERRES	83
2.5.11	COUPOLES	83
2.5.12	CLAUSTRAS	84
2.5.13	MOUCHARABIEH	85
2.6	CONCLUSION	86

CHAPITRE 3. ARCHITECTURE ET URBANISME DE LA REGION DES ZIBAN **87**

3.1	INTRODUCTION	88
3.2	HISTORIQUE	88
3.3	SITUATION GEOGRAPHIQUE	89
3.4	COMPOSITION TERRITORIALE	89
3.5	DONNEES CLIMATIQUES	91
3.5.1	CLASSIFICATION CLIMATIQUE DES ZIBAN	91
3.5.2	LES DONNEES DE TEMPERATURE	92
3.5.3	LES DONNEES D'HUMIDITE	92
3.5.4	LES DONNEES DES VENTS	93
3.6	LES KSOUR DES ZIBAN	94
3.6.1	LE KSAR	94
3.6.2	L'ETAT ACTUELLE DES KSOUR	94
3.6.3	LES DIFFERENTS KSOUR DE LA REGION DES ZIBAN	95
3.6.4	LA TYPOLOGIE DES KSOUR DES ZIBAN	102
3.6.5	LA MORPHOLOGIE URBAINE	102
3.6.6	L'HABITATION KSOURIENNE	104
3.6.7	LES ÉLÉMENTS ARCHITECTURAUX ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION	108
3.7	CONCLUSION	109

CHAPITRE 4. **110**

ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT EPISTEMOLOGIQUE **110**

4.1	INTRODUCTION	111
4.2	ETAT DE L'ART	111
4.2.1	L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE - UN INTERET EMERGENT	111
4.2.2	ÉTUDES COMPARATIVES ENTRE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE ET L'ARCHITECTURE CONTEMPORAINE	112
4.2.3	LES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES STRATEGIES PASSIVES VERNACULAIRES	114
4.2.4	L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE DANS LES ZONES CHAUDES ET ARIDES	114
4.2.5	LES METHODES D'ANALYSE DES STRATEGIES VERNACULAIRES	118
4.2.6	EXEMPLES CONTEMPORAINS D'APPLICATION DES STRATEGIES VERNACULAIRES EN ARCHITECTURE	122
4.2.7	AMELIORATION DES STRATEGIES PASSIVES VERNACULAIRES	124
4.3	POSITIONNEMENT EPISTEMOLOGIQUE ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE	126
4.4	METHODES DE RECHERCHE	127
POUR ATTEINDRE CES OBJECTIFS, L'ETUDE S'APPUIE SUR DES METHODES QUALITATIVES ET QUANTITATIVES. ELLE A POUR BUT D'IDENTIFIER LES STRATEGIES ARCHITECTURALES VERNACULAIRES ADAPTEES AUX CLIMATS CHAUDS ET SECS, D'EVALUER LEUR EFFICACITE ET D'OPTIMISER LEUR MISE EN ŒUVRE.		127
4.4.1	METHODES QUALITATIVES	127

4.4.2	METHODES QUANTITATIVES	128
4.5	CONCLUSION	130
CHAPITRE 5. LES STRATEGIES VERNACULAIRES ADAPTATIVES DES ZIBAN		131
5.1	INTRODUCTION	132
5.2	LES STRATEGIES ET TECHNIQUES ADAPTATIVES DES ZIBAN	132
5.2.1	SITE, ET ENVIRONNEMENT NATUREL	132
5.2.2	MORPHOLOGIE URBAINE	133
5.2.3	TRAITEMENT DES SURFACES EXTERIEURES (REFLECTIVITE SOLAIRE)	135
5.2.4	VOLUME CONSTRUIT, FORME ET ENVELOPPE	136
5.2.5	DISPOSITION SPATIALE/ ORGANISATION INTERIEURE	136
5.2.6	MATERIAUX ET TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	137
5.2.7	OUVERTURES	138
5.3	ANALYSE COMPARATIVE DES PRATIQUES ARCHITECTURALES VERNACULAIRES D'ADAPTABILITE CLIMATIQUE DANS LES REGIONS ARIDES AVEC CELLES DES ZIBAN	140
5.3.1	ANALYSE COMPARATIVE DES STRATEGIES URBAINES VERNACULAIRES A L'ECHELLE URBAINE	140
5.3.2	ANALYSE COMPARATIVE DES STRATEGIES ARCHITECTURALES VERNACULAIRES A L'ECHELLE ARCHITECTURALE	141
5.3.3	ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNIQUES ET DISPOSITIFS URBAINS	143
5.3.4	ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNIQUES ET DISPOSITIFS ARCHITECTURAUX	145
5.3.5	TECHNIQUE DE CONSTRUCTION DES ELEMENTS DE L'ENVELOPPE	147
5.4	EVALUATION THERMIQUE ET VISUEL DE L'ARCHITECTURE DES ZIBAN	148
5.4.1	PRESENTATION DES CAS D'ETUDES	149
5.4.2	PROTOCOLE DE MESURE	153
5.4.3	PRESENTATION DES RESULTATS	156
5.4.4	DISCUSSION DES RESULTATS	162
5.5	CONCLUSION	163
CHAPITRE 6. OPTIMISATION DES STRATEGIES ADAPTIVES DES ZIBAN		165
6.1	INTRODUCTION	166
6.2	PARAMETRES DU MODELE HYPOTHETIQUE	166
6.2.1	LE TYPE D'HABITATION RECURRENTTE	167
6.2.2	LA PARCELLE DU MODELE	167
6.2.3	L'ILOT DE LA PARCELLE DU MODELE	172
6.2.4	REGLES D'IMPLANTATION DES PARCELLES (COMPOSITION URBAINE)	173
6.3	LES MODELES VIRTUELS GENERES	177
6.4	OPTIMISATION DES TECHNIQUES VERNACULAIRES DE LA REGION DES ZIBAN	178
6.5	RECAPITULATIF DE L'OPTIMISATION PARAMETRIQUE	185
6.6	PROTOCOLE DE SIMULATION	186
6.6.1	OUTILS UTILISES	186
6.6.2	LES DONNEES CLIMATIQUES DE LA SIMULATION	187
6.6.3	INDICES D'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE ET VISUELLE POUR LA SIMULATION	188
6.7	RESULTATS DE L'OPTIMISATION PARAMETRIQUE DE L'INTEGRATION DES STRATEGIES VERNACULAIRES DES ZIBAN	188
6.7.1	RESULTATS DU CONFORT THERMIQUE	189
6.7.2	DISCUSSION DES RESULTATS DU CONFORT THERMIQUE	197
6.7.3	RESULTATS DU CONFORT VISUEL	198
6.7.4	DISCUSSION DES RESULTATS DE CONFORT VISUELLE	205
6.8	RESULTATS DE LA CORRELATION ENTRE CONFORT THERMIQUE ET VISUEL	206
6.8.1	RESULTATS DU BATIMENT 1	207
6.8.2	RESULTATS DU BATIMENT 2	208
6.8.3	RESULTATS DU BATIMENT 3	210

6.8.4	DISCUSSION DES RESULTATS DE CORRELATION	212
6.9	CONCLUSION	212
CHAPITRE 7. APPLICATION DES STRATEGIES ADAPTATIVES DES ZIBAN		214
7.1	INTRODUCTION	215
7.2	SELECTION DE L'HABITATION CAS D'ETUDE	215
7.3	CALIBRATION ET VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE	217
7.3.1	PROTOCOLE DE MESURES	217
7.3.2	PROTOCOLE DE CALIBRATION	221
7.4	APPLICATION DES RESULTATS DE L'OPTIMISATION SUR LE MODELE DE L'HABITATION	237
7.4.1	EFFET DES CONFIGURATIONS OPTIMISEES DES TECHNIQUES SUR LE CONFORT THERMIQUE	238
7.4.2	EFFET DES CONFIGURATIONS OPTIMISEES DES TECHNIQUES SUR LE CONFORT VISUEL	244
7.4.3	SYNTHESE DE L'APPLICATION DES TECHNIQUES VERNACULAIRES OPTIMISEES	250
7.5	OPTIMISATION DE LA STRATEGIE DE VENTILATION NATURELLE	251
7.5.1	LA VENTILATION NOCTURNE	251
7.5.2	VENTILATION ADAPTIVE	252
7.5.3	APPLICATION DE LA VENTILATION OPTIMISEE (VENTILATION ADAPTIVE)	254
7.5.4	SYNTHESE DE L'OPTIMISATION DE LA VENTILATION	262
7.6	CONCLUSION	262
CONCLUSION GENERALE		264
I)	SYNTHESE GENERALE ET PRINCIPAUX RESULTATS	265
II)	LIMITATIONS DE L'ETUDE	271
III)	PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS	273
BIBLIOGRAPHIE		275
ANNEXES		276
ANNEXE-A		277
ANNEXE-B		280
ANNEXE-C		285
ANNEXE-D		290
ANNEXE-E		296

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma illustrant la structure de la thèse	12
Figure 2 : Anatomie du processus de thermorégulation Source : (Mewtow, 2017)	16
Figure 3: Relation de la température de l'air avec les autres paramètres de confort. (Leusden & Freymark, 1951).	17
Figure 4 : le taux d'humidité relative affecte la survie des microorganismes qui peuvent causer un gêne aux occupants (Itard et al., 2004)	22
Figure 5: Taux de l'humidité relative en relation avec la résistance des effets allergique et résistances microorganismes. (Sterling et al., 1985)	23
Figure 6: La température radiative moyenne (Itard et al., 2004)	24
Figure 7: La balance thermique du corps humain (Fanger, 1970)	27
Figure 8: Diagrammes représentant l'effet de l'humidité sur la température de l'air d'une personne assise avec un métabolisme de 70 W/m ² avec différents types d'habillement (Itard et al., 2004).	29
Figure 9: Effet de la vitesse de l'air et de l'activité métabolique sur la température de l'air (Itard et al., 2004)	30
Figure 10: Diagramme MRT (Itard et al., 2004)	31
Figure 11 : Température opérative (Itard et al., 2004)	31
Figure 12: Le diagramme PMV et PPD (Itard et al., 2004)	32
Figure 13: Fanger et Christensen (Itard et al., 2004)	34
Figure 14: la relation entre le pourcentage de personnes insatisfaites et l'asymétrie radiative (Itard et al., 2004)	35
Figure 15: l'asymétrie des radiations thermiques acceptable (source : ASHRAE 55-2004 (page7)	35
Figure 16: Illustration indiquant qu'une différence de 3°C créera 5 % de personnes insatisfaites (Itard et al., 2004)	36
Figure 17: La relation entre le pourcentage des personnes insatisfaites et la température des planchers (Itard et al., 2004)	36
Figure 18: La relation entre la température opérative et la température moyenne extérieure. (ASHRAE Std.55 :2004)	38
Figure 19: Illustration du model adaptive (Itard et al., 2004)	39
Figure 20: Types de l'éblouissement dans l'intérieur du bâtiment (Knaack & Koenders, 2018)	44
Figure 21 : Instruments d'évaluation de confort visuel (Source : Auteur)	46
Figure 22 :Exemple de processus de simulation de la lumière du jour (Wasilewski et al., 2022)	47
Figure 23: Carte mondiale de la classification climatique Koppen-Geiger (Source: Kottek et al., 2006) .	54
Figure 24: Régions chaudes et arides (désertiques) dans le monde entre 1980 et 2016 Source : (Beck et al., 2018)	55
Figure 25 : Carte des régions semi arides Source : (Beck et al., 2018)	56
Figure 26: l'impact de l'inertie thermique source : (Kamal, 2011)	61
Figure 27 : Exemple de mouvement d'air par différence de pression source : (Fathy, 1986)	63
Figure 28: Eléments d'influence microclimatique et leurs effets sur les parties du bâtiment source : (THE ENERGY BALANCE LinkedIn, 2021)	65
Figure 29: l'effet de l'altitude sur la température de l'air source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	66
Figure 30: illustration du positionnement en terrain plat source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	67
Figure 31: illustration de l'usage de l'ombrage naturel de la colline (a) Les fonds de vallée (b) source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	67
Figure 32: la disponibilité de l'air frais à des altitudes élevées (a) fond des vallées (b) source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	68
Figure 33: l'implantation des bâtiments à côté des points d'eau source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	69
Figure 34: (a) plans de masse (b) vue aérienne de Damas avec une configuration urbaine compacte source : (Haubold, 1994)	70
Figure 35: Illustration schématique du rapport H/L source : (Rojas-Cortorreal et al., 2017)	71
Figure 36: l'effet du model des tissus urbains sur la circulation des vents source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	73
Figure 37: différentes formes de couverture des ruelles	73
Figure 38: l'effet de la végétation sur les températures extérieures source : (Gut & Ackerknecht, 1993).	74
Figure 39: illustration de l'effet oasis source : (Ahriz et al., 2017).	75
Figure 40: Plan de Dar Lajimi, maison à cour, Tunis. Source : (El-Shorbagy, 2010).	76
Figure 41: Plan du rez-de-chaussée du Qā'a de Muhib Ad-Din Ash-Shāf 'i Al-Muwaqqi à Darb Al-Usta, au Caire, montrant deux cours avec un takhtabush entre eux. Source : (Fathy, 1986),	77
Figure 42: l'effet de la forme du toit sur la circulation de l'air source : (Fathy, 1986)	79

Figure 43: Un projet pilote visant à tester l'énergie éolienne a été installé sur le toit du Becton Engineering and Applied Science Center en mars 2009. Source : (Energy Yale Sustainability, 2023.)	82
Figure 44: La cave dans la maison Akhavan-sigari, Yazd source : (Azizi-Bondarabadi & Haji Sadeghi, 2022)	83
Figure 45: Performance de l'ombrage du dôme semi-sphérique source : (Muhaisen, 2011.)	84
Figure 46: illustration des habitations à Balat intégrant des claustras dans les l'enveloppe extérieure (Omar, 2014)	85
Figure 47: Détails de Moucharabieh traditionnel en élévation et en coupe. source : (Ragette, 2003)	86
Figure 48: Situation géographique de la région des Ziban en Algérie source : (Waran18, 2020)	89
Figure 49: Illustration cartographique de la composition territoriale des Ziban source : Auteur	90
Figure 50: la classification climatique de la région des Ziban selon le Köppen-Geiger	91
Figure 51: Graphique des températures horaires durant toute l'année	92
Figure 52: Graphique horaire de l'humidité source : Auteur	93
Figure 53: Rose des vents de la région de Biskra source : Auteur	93
Figure 54: Illustration de l'état actuelle de la plupart des Ksour(exemple Ksar Oumech) source : Auteur	95
Figure 55: la mutation urbaine du ksar de Tolga entre octobre 2005 et décembre 2020	96
Figure 56: illustration cartographique du Ksar de Lichina	97
Figure 57: Des vues prises depuis le Ksar de Lichana (source : auteur)	97
Figure 58: illustration cartographique du Ksar de Farfar	98
Figure 59: Des vues prises depuis le Ksar de Farfar (source : auteur)	98
Figure 60: illustration cartographique du Ksar d'ourelal	99
Figure 61: Des vues prises depuis le Ksar d'Ourelal source : Auteur	99
Figure 62: Des vues prises depuis le Ksar d'Oumache source : Auteur	100
Figure 63: illustration cartographique du Ksar de Sidi Okba	101
Figure 64: Des vues prises depuis le Ksar de Chetma source : Auteur	101
Figure 65: Le Ksar le la région Tehouda source : Auteur	101
Figure 66: Exemple de plan de masse du ksar d'Ourelal source : (Ouamane & Saker, 1991)	103
Figure 67: illustration schématique de l'accès aux ruelles et la hiérarchie d'accès source : (Ouamane & Saker, 1991)	103
Figure 68: introversion urbaine et architecturale de l'habitation Ksourienne source : (Ouamane & Saker, 1991)	105
Figure 69 Disposition spatiale d'une habitation Ksourienne source : (Gouzli et al., 1991).	107
Figure 70: illustration de la construction des murs source : (Ouamane & Saker, 1991).	108
Figure 71: illustration de la construction de la dalle - source : (Ouamane & Saker, 1991).	109
Figure 72: Schème expérimental de l'évaluation des techniques et stratégies architecturales de la région des Ziban	128
Figure 73 : schème expérimental de l'optimisation paramétrique des techniques vernaculaire	129
Figure 74: L'effet du site et environnement naturel des Ziban (Source : Auteur)	133
Figure 75: Illustration de la compacité urbaine. Exemple Ksar de Farfar (Source : Auteur)	134
Figure 76: Proportion de hauteur sur la largeur (H/L) d'une ruelle typique dans les Ksour de Zibane (exemple Ksar à Chetma) (Source : Auteur)	134
Figure 77: Exemple de Skifa urbaine dans le Ksar de Lichana (Source : Auteur)	135
Figure 78: Exemple de Skifa urbaine dans le Ksar de Farfar (Source : Auteur)	135
Figure 79: bâtiment des Ksour de Ziban. Exemple d'une maison à Oumech (Source : Auteur)	136
Figure 80: Plan d'une habitation vernaculaire dans les Ziban (Source : Auteur)	137
Figure 81: illustration des matériaux utilisées des murs et de Toit. Exemple Maison à Ourelel (Source : Auteur)	138
Figure 82: Coupes de détail sur la technique de constructions pour les toits et les murs	138
Figure 83: la configuration des ouvertures dans les maisons Zibanaises (Source : Auteur)	139
Figure 84: Illustration de la Raouzna. Exemple maison à Farfar (Source : Auteur)	139
Figure 85: Caractéristiques urbaines de la maison du Mcid ; une vue d'une construction en cours à côté de la maison vernaculaire de Mcid	149
Figure 86: Les plans de la maison du quartier Mcid	150
Figure 87: Illustration de l'état actuel des aspects urbains et architecturaux de l'habitation dans le quartier de Farfar	152
Figure 88: Plan RDC et 1er étage de l'habitation de Farfar	152
Figure 89: Plans Maison Mcid qui présentent les endroits des prises de mesures	154
Figure 90: Plans Maison Farfar qui présentent les endroits des prises de mesures	154
Figure 91: Tableau d'information de là son « Lux »	155
Figure 92: Résultats de mesures des températures dans l'habitation du Mcid	157
Figure 93: Résultats de mesures de l'humidité dans l'habitation du Mcid	158
Figure 94: Résultats de mesures de l'éclairement dans l'habitation du Mcid	159

Figure 95: Résultats de mesures des températures dans l'habitation de Farfar	160
Figure 96: Résultats de mesures de l'humidité dans l'habitation de Farfar	161
Figure 97: Résultats de mesures de l'éclairément dans l'habitation de Farfar	162
Figure 98: Répartition des logements habités des ménages ordinaire et collectifs par wilaya	167
Figure 99 : Les six quartiers sélectionnés pour l'analyse des parcelles	168
Figure 100: Des images satellitaires de différents quartiers illustrant la détection de contours des parcelles (Source : auteur)	169
Figure 101: Répartition générale des parcelles dans la ville de Biskra en fonction de leur taille.	169
Figure 102: La taille la plus répandue parmi ces parcelles est de 203 m ²	170
Figure 103: Analyse de la relation entre largeur et hauteur des parcelles	171
Figure 104: Les quartiers choisis pour l'étude de la forme des îlots.	172
Figure 105: Exemples des plans issus de Google Earth de différents quartiers (Source : auteur)	173
Figure 106: Illustration des règles d'implantation des parcelles	174
Figure 107 : Espacement entre les îlots considérant la règle d'implantation urbaine	174
Figure 108: Analyse des radiations solaires annuelles de l'îlot de référence	175
Figure 109: Résultats des radiations solaires qui atteignant l'îlot sous différentes orientations	176
Figure 110: Représentation des trois variantes du Modèle hypothétique	177
Figure 111: Modélisation des trois variantes représentant les habitations individuelles générées sur la base du Modèle hypothétique.	178
Figure 112 : Relation entre densité, teneur en ciment et conductivité thermique. (Zhang et al., 2017)	182
Figure 113: Relations entre quantité de ciment, densité et résistance à la compression (Zhang et al., 2017).	183
Figure 114: résultats des heures de confort pour le bâtiment n°1	190
Figure 115: résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°1	190
Figure 116: Résultats des heures de confort pour le bâtiment n°2	192
Figure 117: Résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°2	193
Figure 118: Résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°3	195
Figure 119: Résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°3	195
Figure 120: résultats d'éclairément utile en lumière du jour bâtiment n°1	198
Figure 121: résultats d'éclairément des modèles les plus performant bâtiment n°1	199
Figure 122 : résultats d'éclairément utile en lumière du jour bâtiment n°2	201
Figure 123: résultats d'éclairément des modèles les plus performant bâtiment n°2	201
Figure 124: résultats d'éclairément utile en lumière du jour bâtiment n°3	203
Figure 125 : résultats d'éclairément des modèles les plus performant bâtiment n°3	204
Figure 126: Résultats du confort thermique et visuel du bâtiment n°1	208
Figure 127: Résultats du confort thermique et visuel du bâtiment n°2	210
Figure 128: Résultats du confort thermique et visuel du bâtiment n°3	211
Figure 129: Aménagement spatial de l'habitation sélectionnée.	216
Figure 130: Illustration de la façade de l'habitation sélectionnée	216
Figure 131 : Désignation des espaces pour faciliter la lecture	217
Figure 132 : Illustration du data logger utilisée dans la prise de mesures	218
Figure 133 : Les points de mesures dans l'habitation	219
Figure 134: Les données de température prises dans l'habitation à des intervalles d'une minute.	220
Figure 135 : Résultats de l'interpolation des données de mesures	221
Figure 136 : Modèle numérique de l'habitation individuelle et son environnement immédiat	223
Figure 137: Résultats de simulation de 265 scénarios pour la calibration des paramètres du mur	230
Figure 138: Les 4 variations des propriétés thermiques proposé par le DTR	231
Figure 139: Résultats de simulation de 268 scénarios pour la calibration des paramètres de la toiture	232
Figure 140 : Résultats de simulation de 488 scénarios pour la calibration des paramètres de l'infiltration extérieure.	234
Figure 141 : Résultats de simulation de 488 scénarios pour la calibration des paramètres de l'infiltration intérieure	235
Figure 142: Somme de la moyenne des valeurs de CVRMSE et NMBE	236
Figure 143: Résultats de l'applications des stratégies optimisées selon les trois configurations sur les espaces de vie	239
Figure 144 Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort selon les trois configurations sur les espaces de vie	239
Figure 145 : Résultats de l'applications des stratégies optimisées selon les trois configurations sur les espaces de circulation	240
Figure 146 : Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort selon les trois configurations sur les espaces de circulation	241
Figure 147: Résultats de l'applications des stratégies optimisées selon les trois configurations sur les espaces de service	242

Figure 148 : Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort selon les trois configurations sur les espaces de service	243
Figure 149 : Cumul des pourcentages d'heures de confort en fonction des quatre configurations pour tous les espaces	244
Figure 150 : Résultats de la simulation de l'éclairment du jour utile dans l'habitation, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont orientés vers le nord.	245
Figure 151 : Résultats de la simulation de m'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°1, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage.	246
Figure 152 : Résultats de la simulation de l'éclairment du jour utile dans la configuration N°1, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, Les plans sont orientés vers le nord.	247
Figure 153 : Résultats de la simulation de m'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°1, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont positionnés vers le nord.	247
Figure 154 : Résultats de la simulation de l'éclairment du jour utile dans la configuration N°2, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, Les plans sont orientés vers le nord.	248
Figure 155 : Résultats de la simulation de m'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°2, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont positionnés vers le nord.	249
Figure 156: Résultats de la simulation de l'éclairment du jour utile dans la configuration N°3, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, Les plans sont orientés vers le nord.	249
Figure 157 : Résultats de la simulation de m'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont positionnés vers le nord.	250
Figure 158: Les heures de l'application de la stratégie de la ventilation nocturne	252
Figure 159: Les heures (en vert) qui nécessitent de la ventilation au cours de l'année pour le Salon du 1er étage	253
Figure 160: Les heures (en vert) qui nécessitent de la ventilation au cours de l'année pour le Chambre N°3 du 1er étage	253
Figure 161 : Comparaison de la ventilation nocturne et du besoin réel en ventilation pour le Salon du 1er étage.	254
Figure 162: : Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort des chambres	256
Figure 163: Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort des pièces de séjour	257
Figure 164: Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort des pièces de Halls	258
Figure 165 : Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort les pièces de services	259
Figure 166: Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort dans toutes les pièces	260
Figure 167 : Résultats du pourcentage d'heures de confort annuelle dans tous les espaces des deux modèles optimisés, plus le modèle de base l'habitation (calibré)	261

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: les activités humaines en fonction de leur production d'énergie.	18
Tableau 2: différents types d'ensable d'habillement et leurs valeurs en Clo Source: (Itard et al., 2004).	19
Tableau 3: Vitesse de l'air et condition de confort. source : (Dong et al., 2017)	21
Tableau 4: Plage UTCI catégorisé termes de stress thermique.	41
Tableau 5 : Niveaux d'éclairément requis par la norme BREEM (Giarma et al., 2017)	48
Tableau 6:Tableau des critères d'évaluation du confort visuel dans LEED. (Giarma et al., 2017)	49
Tableau 7: La composition territoriale de la région des Ziban	90
Tableau 8: Analyse comparative des stratégies urbaines vernaculaire	141
Tableau 9 : Analyse comparative des stratégies architecturales vernaculaire	142
Tableau 10: Analyse comparative des techniques et dispositifs urbains	143
Tableau 11: Analyse comparative des techniques et dispositifs architecturaux	146
Tableau 12: Technique de construction des éléments l'enveloppes	147
Tableau 13: Les stratégies utilisées dans la maison du quartier Mcid	150
Tableau 14 : Les stratégies utilisées dans la maison du Ksar Farfar	152
Tableau 15 : les sondes hygrothermiques utilisées du Testo "480	155
Tableau 16:Choix du type de BTCS avec des performances thermiques optimales	183
Tableau 17:propriétés thermiques du BTCS utilisée dans l'étude	184
Tableau 18: Les différents couches utilisées pour les 9 variantes de murs	185
Tableau 19: Heures de confort thermique pour chaque stratégie du Ziban-bâtiment n°1	191
Tableau 20: Heures de confort thermique pour chaque stratégie vernaculaire cas bâtiment n°2	194
Tableau 21 Heures de confort thermique pour chaque stratégie vernaculaire cas bâtiment n°3	196
Tableau 22 : Pourcentage Éclairage du Jour Utile (%) pour les différents techniques- bâtiment n°1	199
Tableau 23 : Pourcentage d'éclairiment du Jour Utile (%) pour les différents techniques- bâtiment n°2	202
Tableau 24 : Pourcentage d'éclairiment du Jour Utile (%) pour les différents techniques-bâtiment n°3	204
Tableau 25: résulta des trois modèles les plus performants du bâtiment n°1	208
Tableau 26: Résulta des trois modèles les plus performants du bâtiment n°2	210
Tableau 27: Spécifications de l'outil utilisée pour la prise de mesures	218
Tableau 28 : propitiâtes thermique de l'enveloppe du modèle numérique	224
Tableau 29 : Propriétés du mur de la configuration initiale	229
Tableau 30 : Les 4 variantes des paramètres d'entrée de la toiture	232
Tableau 31 : Valeurs utilisées comme paramètres d'entrée de l'infiltration	233
Tableau 32: caractéristiques du modèle calibré	237
Tableau 33 : Résultat des indices statistique de la calibration	237
Tableau 34: dénomination et techniques des trois configurations	238

Introduction Générale

I) Introduction

En règle générale, l'architecture modèle la matière et l'espace de manière à créer un environnement bâti qui garantit la sécurité et le confort à ses occupants. Dans cette optique, les architectes en début du XXe siècle ont choisi de répondre aux besoins de leurs contemporains en produisant des œuvres architecturales induisant des solutions uniquement issues de l'ingéniosité humaine et de l'industrie, tout en sous-estimant parfois partiellement ou totalement l'environnement climatique local. Cela a fini par donner lieu à de belles réalisations architecturales et souvent innovantes, à l'image des bâtiments conçus par Frank Lloyd Wright, Adolf Loos, Le Corbusier, et Mies van der Rohe (Colquhoun, 2002).

Cependant, après la crise pétrolière de 1972 et les changements climatiques observés par les climatologues à travers le monde, une remise en question de cette façon de concevoir a été initiée. Aujourd'hui, l'être humain doit réduire les émissions de gaz à effet de serre et de carbone dans toutes ses activités afin de limiter le réchauffement climatique et de préserver les ressources naturelles. Parallèlement, dans le domaine de la construction, l'architecture énergivore du mouvement moderne, qui contribue à la dégradation de la planète en ignorant l'environnement physique, doit céder sa place à une architecture respectueuse du lieu. C'est ainsi qu'est née l'architecture environnementale ou durable, qui vise à minimiser l'impact négatif des bâtiments sur l'environnement en optimisant l'utilisation efficace des matériaux, de l'énergie et de l'espace bâti. L'architecture environnementale s'inscrit donc dans un processus de prise en compte des paramètres environnementaux dès la conception des plans, programmes, et tout au long du cycle de vie de la construction (2019 Global Status Report for Buildings and Construction, 2019).

L'un des types d'architecture qui peut servir de référence en termes de réponses aux besoins de l'être humain les plus divers, est bel et bien l'architecture vernaculaire. L'architecture vernaculaire est une optimisation à long terme, c'est-à-dire une architecture issue d'un savoir-faire accumulé au fil des générations, en fonction des caractéristiques climatiques et géographiques locales. Elle associe des formes et des stratégies simples pour apporter des solutions radicales aux besoins fonctionnels et physiques (Rodriguez, 2013). Une partie de ce savoir-faire est traduite par des stratégies architecturales bioclimatiques sous forme d'éléments architecturaux. Ces stratégies correspondent aux choix relatifs aux techniques et formes de la construction qui sont les plus adaptées aux contraintes climatiques (Olgay et al., 2015).

II) Problématique

Depuis le début de la révolution industrielle, les activités humaines entraînent une augmentation de la concentration des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui a conduit à une

augmentation de la température globale de la planète (Ippc, 2022). L'augmentation de cette température a entraîné une utilisation accrue de l'énergie électrique dans le secteur du bâtiment pour les besoins de refroidissement des espaces intérieurs. En conséquence, ce secteur est devenu l'un des plus gros consommateurs d'énergie ; il représente à l'heure actuelle plus de 35 % de la consommation d'énergie mondiale et près de 40 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie (IEA, 2019). En Algérie, il a été rapporté que 35% de la consommation d'énergie globale était attribuée aux bâtiments, cette valeur ayant augmenté de manière alarmante entre 2018 et 2019 de 2,9% (Ministère De L'énergie Et Des Mines, 2019).

Par ailleurs, le climat chaud et sec couvre la majeure partie de la superficie du pays. Biskra qui se situe au nord-est de la zone chaude et sèche est la wilaya ayant le taux de population le plus élevé, avec plus de 700000 (ONS, 2008). Elle est caractérisée par un excès de gains solaires et une température extérieure extrême en été. De plus, son architecture contemporaine ignore souvent et parfois radicalement les paramètres climatiques locaux (Rais et al., 2021). D'autre part, pour parvenir à maintenir des conditions minimales de confort thermique, l'utilisation d'une climatisation continue est inévitable ; ce qui entraîne une consommation énergétique énorme combinée à des émissions de gaz à effet de serre accrues et leur conséquence désastreuses sur l'environnement. En conclusion, c'est un cycle vicieux qui se constitue autour du réchauffement planétaire et l'augmentation des besoins en énergie, incluant l'augmentation des températures et la surexploitation des appareils de climatisation, ce qui entraîne plus d'émissions de carbone et encore plus de périodes de surchauffe. Pour rompre ce cycle, une conception bioclimatique qui se traduira par l'adaptation des bâtiments aux facteurs climatiques de l'environnement immédiat, doit être mise en place. Cette approche peut jouer un rôle important dans le maintien du confort thermique des occupants tout en réduisant la consommation énergétique des bâtiments, minimisant ainsi l'impact environnemental des bâtiments (Aghimien et al., 2021).

A ce titre, l'une des ressources du bio-climatisme dans le domaine de la construction est l'architecture vernaculaire. Elle est largement connue pour sa prise en compte des caractéristiques climatiques locales tout en offrant un certain degré de confort thermique, même lorsque les moyens disponibles étaient rudimentaires. Elle représente un modèle performant dans l'utilisation efficace des stratégies de conception passives ; l'architecture vernaculaire est décrite comme une véritable architecture respectueuse du climat et de l'environnement (Chandel et al., 2016).

L'architecture vernaculaire de la wilaya de Biskra est connue par les ksour assimilables à des villages fortifiés qui se trouvent étalés tout au long de la région des Ziban. En général, les ksour se caractérisent par une excellente intégration dans leur environnement. Le tissu urbain est dense et compact, avec des voies étroites et sinueuses déterminées par des murs extérieurs massifs (Alkama & Tacherift, 2013; Alkama, 1995; Djamel & Abdelmalek, 2008).

De là s'est imposée la nécessité d'étudier les stratégies architecturales vernaculaires passives employées dans les ksour de la région des Ziban et d'examiner la possibilité de les intégrer dans des bâtiments contemporains situés dans le contexte climatique chaud et sec comme moyen d'améliorer leur potentiel d'adaptabilité climatique tout en optimisant leur consommation énergétique.

III) Questions de recherche

A travers l'architecture vernaculaire des ksour des Ziban, cette recherche tente de répondre à un certain nombre de questions, notamment :

- Quels sont les techniques architecturales spécifiques des habitations vernaculaires de la région des Ziban qui peuvent améliorer les performances thermiques et visuelles des bâtiments dans les zones chaudes et sèches, et comment ces éléments peuvent être adaptés pour une utilisation dans des bâtiments contemporains ?
- Comment l'adaptation et l'optimisation des stratégies architecturales passives inspirées de l'habitat vernaculaire de la région des Ziban, en prenant en compte les aspects thermiques et visuels, peuvent-elles permettre l'intégration des bâtiments contemporains dans l'environnement local ?

IV) Hypothèses

Afin de répondre à la problématique posée, nous émettons les hypothèses suivantes :

- L'habitat vernaculaire de la région des Ziban est doté de stratégies passives sous la forme d'éléments architecturaux qui peuvent améliorer les performances thermiques et visuelles des bâtiments dans les zones chaudes et sèches.
- L'optimisation des stratégies architecturales passives dans la région des Ziban permettra d'augmenter les performances thermiques et visuelles des bâtiments contemporains de manière significative.

V) Contexte et objectifs de la recherche

Ce travail de recherche se focalise sur l'analyse approfondie de l'architecture vernaculaire de la région des Ziban. L'objectif primordial consiste à étudier les stratégies architecturales passives développées dans l'architecture ksourienne qui auraient le potentiel d'améliorer de manière significative les performances thermiques et visuelles de l'habitat contemporain dans la ville de Biskra. En outre, il s'agit de déterminer les concepts et techniques clés qui peuvent être appliqués à la conception climatique dans les zones chaudes et sèches, afin de proposer des solutions durables permettant de relever les défis environnementaux actuels, tout en préservant des niveaux optimaux de confort thermique et visuel pour les habitants.

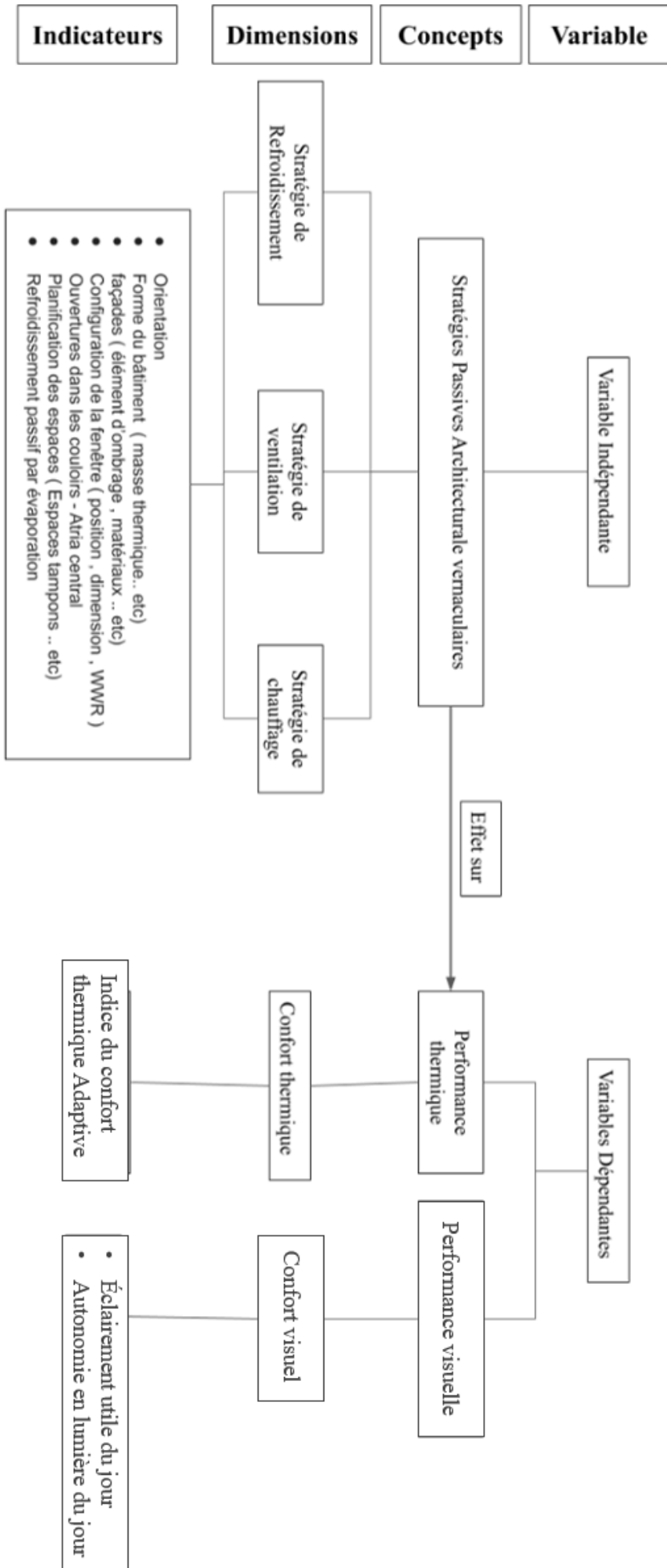
Par conséquent, les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

- Évaluer les performances thermiques et visuel de l'habitat vernaculaire de la région des Ziban.
- Identifier et évaluer les différentes stratégies architecturales et urbaines passives susceptibles d'améliorer le confort thermique et visuel des bâtiments contemporains.
- Réinterpréter et adapter les différentes stratégies passives issues des éléments architecturaux propres à la région des Ziban qui peuvent améliorer le confort thermique des bâtiments dans les zones chaudes et sèches.
- Optimiser les stratégies passives inspirées de l'architecture vernaculaire de la région des Ziban pour une meilleure intégration dans les bâtiments contemporains.

A travers ces objectifs, la recherche tentera de valider et optimiser les techniques architecturales passive de l'architecture des Ziban ayant le potentiel d'optimiser le performances thermiques et visuel des bâtiments dans les zones chaudes et arides.

VI) Analyse conceptuelle

Une analyse conceptuelle a été développée afin de concrétiser les concepts de l'hypothèse principale bivariée. Celle-ci met en relation d'une part les stratégies passives vernaculaires et d'autre part les performances thermiques et visuels des bâtiments. Elle nous aidera à les transformer en indicateurs observables et mesurables dans la réalité.



VII) Méthodologie

Cette recherche est une recherche appliquée, son but est de résoudre un problème réel. Elle est déductive et utilise des méthodes qualitatives et quantitatives expérimentales.

- La première partie de cette étude vise à établir l'état des connaissances actuelles sur le sujet. Son objectif est d'effectuer une analyse approfondie des différents paramètres qui influencent le confort thermique et visuel dans les bâtiments, en mettant particulièrement l'accent sur les éléments architecturaux qui contribuent aux stratégies passives dans les zones chaudes et arides du monde. De plus, cette partie examine les effets de ces stratégies sur les performances thermiques et énergétiques des bâtiments.
- La deuxième étape, qui concerne la collecte d'informations par observation directe sur le terrain, a pour but de faire une analyse descriptive des éléments architecturaux de la région des Ziban. L'objectif est de dégager, par une analyse explicative et interprétative, leur mode de fonctionnement qui conduit à la création de stratégies passives, tout cela en suivant les conclusions de la première partie de l'état de l'art.
- La troisième étape comprend une analyse classificatoire des éléments urbains et architecturaux qui actionnent les stratégies passives vernaculaires de la région des Ziban.
- La quatrième phase, par une expérimentation provoquée sur le terrain, consiste à prendre des mesures des paramètres thermiques et visuelles pour évaluer les performances de l'habitat des Ziban et de leurs stratégies passives.
- La cinquième étape comprend une expérimentation simulée par la modélisation des éléments architecturaux qui participent au fondement des stratégies passives vernaculaires et leur évaluation thermique et visuelle.
- La sixième et dernière partie concerne l'optimisation et l'application des stratégies passives de la région des Ziban sur une habitation contemporaine. Finalement, des recommandations architecturales sont formulées permettant l'amélioration des paramètres thermiques et visuels de l'habitat dans les zones chaudes et arides de l'Algérie.

VIII) Structure de la thèse

Pour mener à bonne fin cette recherche, le travail d'investigation a été divisé en deux parties réparties en six chapitres qui constituent le corps de cette thèse.

- La première partie de l'étude est de nature théorique et comprend trois chapitres. À travers une recherche bibliographique approfondie et une analyse descriptive des recherches précédentes, une compréhension des différents paramètres influençant le confort thermique et visuel dans les bâtiments, ainsi que des paramètres climatiques spécifiques aux régions chaudes et sèches, est initiée. De plus, les différents éléments architecturaux qui participent aux stratégies passives vernaculaires adaptées au climat considéré sont présentés. Cette partie est conclue par une présentation détaillée de la zone d'étude, incluant des informations sur l'architecture locale, les caractéristiques climatiques, la localisation géographique, etc.
- La deuxième partie de la recherche, qui se déploie sur les quatre chapitres suivants, revêt une dimension analytique et pratique. Elle englobe une revue approfondie de la littérature existante sur le sujet, ainsi qu'une clarification épistémologique de la position adoptée dans cette recherche. Cette partie comprend également des observations sur le terrain, l'identification des stratégies passives pertinentes, la collecte de données, la simulation, l'optimisation et l'application de ces stratégies, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus. Ces différentes étapes permettent de vérifier les hypothèses formulées précédemment et de réaliser les objectifs énoncés.

La structure de cette thèse est la suivante :

Chapitre introductif

Il s'agit de l'introduction visant à présenter le contexte de recherche à la fois au niveau national et international. Elle englobe la formulation et l'identification du problème de recherche, ainsi que les objectifs de l'étude. Elle comprend également l'opérationnalisation du problème, c'est-à-dire l'analyse conceptuelle du thème de recherche, ainsi que la méthodologie adoptée pour aborder le problème. Enfin, la structure de la thèse est présentée pour donner un aperçu de l'organisation du travail de recherche.

Premier Chapitre

Ce chapitre se focalise sur le confort thermique et visuel dans les bâtiments contemporains. Différentes méthodes d'évaluation du confort thermique sont examinées, notamment la régulation thermique et les facteurs influant sur la température corporelle tels que le métabolisme, les vêtements, la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité relative et la température radiative moyenne. De plus, des indicateurs de température tels que la température opérative et la température résultante sont abordés. Le confort visuel est également discuté en mettant l'accent sur l'évaluation de l'éclairage, de la luminosité, du contraste, de l'éblouissement et du rendu des couleurs. Les normes internationales relatives au confort visuel, telles que BREEM et LEED, sont également examinées, tout comme les

indices de performance visuelle tels que l'autonomie en lumière du jour et l'éclairage du jour utile. Il convient de souligner que ce chapitre revêt une importance particulière pour la partie pratique de la thèse, car il permet d'introduire les outils scientifiques utilisés pour évaluer les stratégies passives dans les bâtiments.

Deuxième chapitre

Ce chapitre présente une analyse détaillée des climats chauds et de leurs spécificités, ainsi que des stratégies efficaces pour la conception d'espaces urbains et architecturaux adaptés à ces climats arides. L'accent est mis sur les techniques et dispositifs urbains et architecturaux. Les stratégies urbaines comprennent des éléments tels que l'ombrage, la réflectivité solaire et le refroidissement par évaporation, tandis que les stratégies architecturales incluent l'inertie thermique, la ventilation et la protection solaire. Les dispositifs tels que les plans morphologiques, les maisons à patio, les attrapes-vent, les cheminées solaires et les fontaines sont abordés. De plus, des techniques de construction pour les surfaces opaques et non-opaques de l'enveloppe sont également discutées. Une analyse approfondie de ces stratégies d'adaptation aux climats chauds et arides fournit ainsi un guide essentiel pour comparer et sélectionner les stratégies passives les plus efficaces dans la région des Ziban.

Troisième chapitre

Ce chapitre est consacré à une présentation détaillée de la région d'étude, mettant en avant sa composition et les caractéristiques de son architecture vernaculaire. Une étude complète de la région des Ziban est réalisée, incluant son contexte historique, sa situation géographique, sa structure territoriale ainsi que ses données climatiques spécifiques. L'attention se concentre particulièrement sur les Ksour des Ziban, en décrivant leur typologie, leur organisation interne, les éléments architecturaux qui les caractérisent, ainsi que les matériaux de construction traditionnellement utilisés. Ce chapitre souligne également la capacité de cette société ancienne à répondre à ses besoins de construction grâce à ses propres technologies adaptées. En résumé, cette analyse approfondie de la région des Ziban et de son architecture offre une vision globale essentielle pour la mise en place de stratégies d'adaptation au climat chaud et aride propres à cette région spécifique.

Quatrième chapitre

Ce chapitre aborde une revue approfondie de l'état actuel des connaissances dans le domaine de l'architecture adaptée aux climats chauds et arides. Les méthodes scientifiques couramment utilisées pour extraire, évaluer, optimiser et adapter les stratégies vernaculaires passives sont également examinées. Puis la recherche a été positionnée dans le contexte de la littérature existante, en mettant en évidence les différentes approches méthodologiques utilisées dans ce domaine. Parmi ces

approches, l'observation joue un rôle essentiel en permettant d'observer directement les bâtiments dans leur environnement naturel, ce qui facilite une compréhension plus concrète de leur fonctionnement. De plus, les expérimentations contrôlées, qu'elles soient provoquées ou simulées, offrent la possibilité d'expérimenter différentes stratégies de construction et de mesurer leur efficacité dans des conditions contrôlées.

Cinquième chapitre

Intitulé "Les stratégies adaptatives des bâtiments vernaculaires des Ziban", ce chapitre est divisé en deux parties distinctes. La première partie se concentre sur la présentation des différentes stratégies vernaculaires passives observées dans la région des Ziban, en les comparant aux stratégies passives présentes dans la littérature sur les zones chaudes et arides du monde, comme exposé précédemment dans le chapitre deux. Cette analyse comparative permet de mettre en évidence les spécificités et les particularités des stratégies adaptatives utilisées dans les Ziban, par rapport aux pratiques existantes à l'échelle mondiale.

La deuxième partie se consacre à l'évaluation de la performance thermique et visuelle des différentes configurations architecturales présentes dans les Ziban. Cette évaluation vise à mesurer l'efficacité des stratégies mises en œuvre pour maintenir des conditions de température et d'éclairage appropriées à l'intérieur des habitations, en tenant compte des différents types d'habitat. Les résultats obtenus grâce à cette évaluation fournissent une meilleure compréhension des avantages et des limites des stratégies vernaculaires adaptatives employées dans les Ziban, en comparaison avec les pratiques actuelles en matière d'architecture et de construction.

Sixième chapitre

Ce chapitre a pour objectif d'optimiser et d'adapter les différentes stratégies architecturales vernaculaires des Ziban dans le contexte de l'architecture contemporaine. Il se compose de deux parties distinctes. La première partie se concentre sur la création d'une habitation contemporaine hypothétique avec des caractéristiques typiques, en prenant en compte l'environnement local et les réglementations urbaines locales. La deuxième partie consiste à l'optimisation des stratégies vernaculaires dans la région des Ziban pour l'habitation résidentielle hypothétique, afin de déterminer les meilleures configurations de stratégies en termes de performances thermiques et visuelles.

Septième chapitre

Ce chapitre vise à appliquer et évaluer les configurations sélectionnées issues de la partie d'optimisation des stratégies vernaculaires des Ziban présentée dans le chapitre précédent. Il se compose de deux parties distinctes. La première partie concerne la calibration et la validation

rigoureuse d'une habitation individuelle dans la ville de Biskra. La deuxième partie concerne l'application des configurations mentionnées précédemment sur le modèle validé, afin d'observer concrètement l'effet de ces stratégies sur un modèle capable de reproduire le comportement thermique réel des bâtiments. Cela permettra de quantifier de manière précise les performances visuelles et thermiques de ces stratégies.

Conclusion générale

La conclusion générale présente une synthèse globale de l'étude menée, en mettant en perspective les résultats expérimentaux et de simulation obtenus. Les observations, comparaisons, optimisations et applications des stratégies vernaculaires des Ziban sont récapitulées de manière systématique, permettant ainsi de formuler des recommandations architecturales quant à leur utilité et à leur mise en pratique. Cette conclusion met également en évidence les limites de cette étude et propose des pistes de recherche futures et des perspectives pour approfondir le sujet.

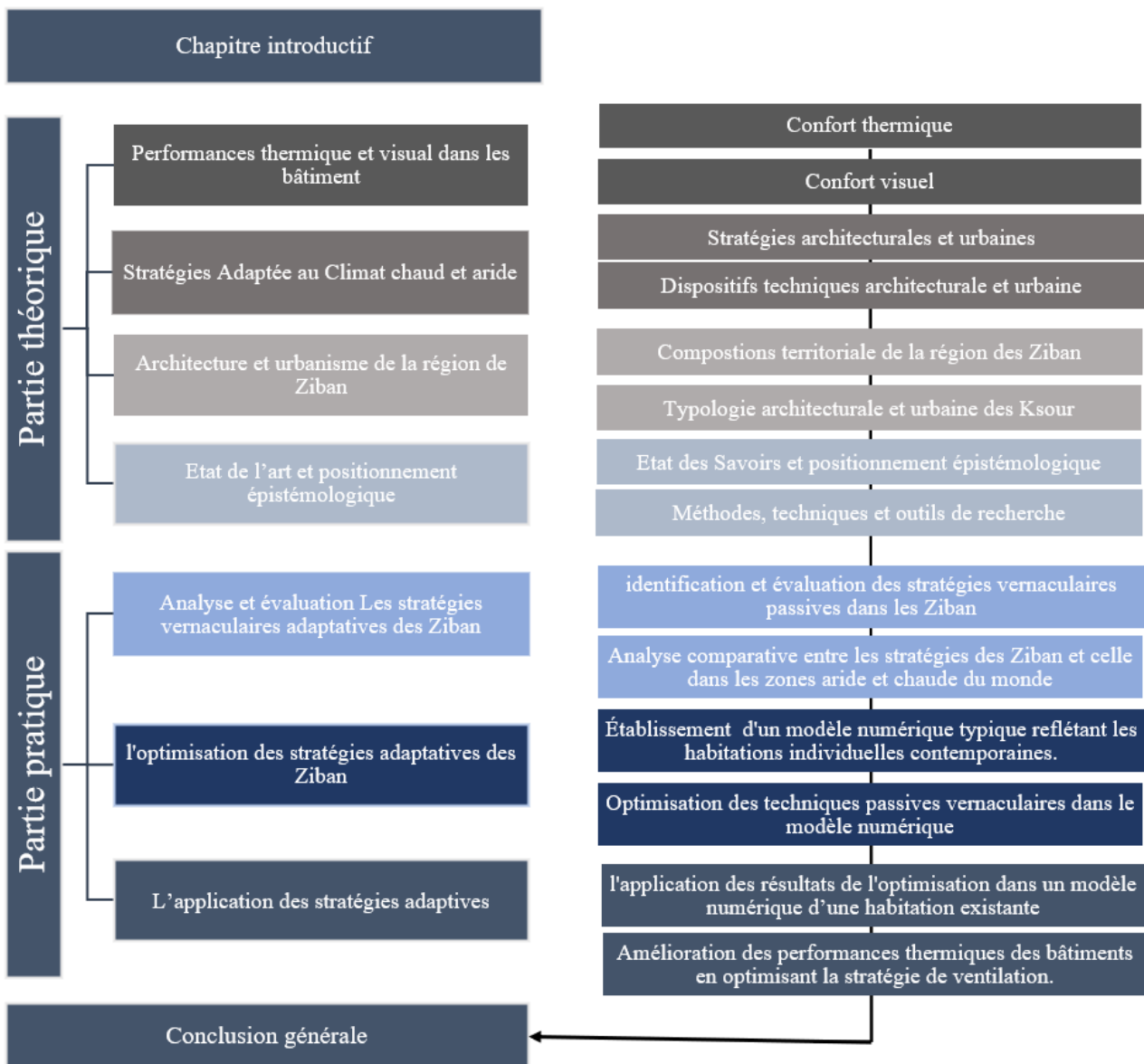


Figure 1: Schéma illustrant la structure de la thèse

Chapitre 1.

LES PERFORMANCES

THERMIQUES ET

VISUELLES DES

BATIMENTS

1.1 Introduction

La sensation de confort thermique est un concept complexe défini comme la satisfaction ressentie par une personne vis-à-vis de son environnement thermique. Selon l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), le confort thermique est "l'état où la plupart des personnes dans un bâtiment sont satisfaites de leur environnement thermique, et où les risques pour la santé et le bien-être dus à l'environnement thermique sont minimisés" (ASHRAE, 2017) . Cette satisfaction dépend d'une combinaison de facteurs corporels et environnementaux qui peuvent varier d'une personne à l'autre, ce qui crée une évaluation subjective de la sensation de confort thermique. Les facteurs corporels incluent les réactions de notre corps aux changements de température, tandis que les facteurs environnementaux incluent des paramètres physiques tels que la température, l'humidité, l'activité et l'habillement. Comprendre ces facteurs est crucial pour évaluer et améliorer les conditions de confort thermique dans les espaces de vie et de travail (Parsons, 2019b).

Les bâtiments jouent un rôle crucial dans la modification des conditions environnementales pour assurer le bon fonctionnement du corps humain. Des études récentes dans le domaine de la construction ont montré qu'il existe une relation directe entre le confort thermique et la santé et la productivité des occupants (Bueno et al., 2021). C'est pourquoi les ingénieurs, architectes et urbanistes utilisent des techniques de conception et de fabrication pour ajuster les paramètres observables mentionnés précédemment, afin de fournir aux occupants un maximum de confort thermique dans les environnements intérieurs et extérieurs (Jamei et al., 2016).

Le confort visuel est également un concept important dans la conception des espaces intérieurs et extérieurs. Il est défini comme la satisfaction ressentie par une personne vis-à-vis de l'éclairage dans son environnement. Cette satisfaction est influencée par plusieurs facteurs, tels que la quantité de lumière, la distribution de la lumière, la couleur de la lumière, la qualité de la lumière et les contrastes dans l'environnement (Tekce et al., 2021). Des niveaux d'éclairage adéquats et bien répartis sont essentiels pour assurer la sécurité et le confort visuel dans les espaces.

L'optimisation du confort thermique et visuel peut présenter des défis lors de la conception de bâtiments. L'intégration d'ouvertures pour favoriser la pénétration de la lumière naturelle peut augmenter les transferts de chaleur, ce qui peut potentiellement compromettre le confort thermique des occupants. Cependant, en ajustant la taille et la disposition de ces ouvertures, il est possible de trouver un équilibre satisfaisant.

1.2 Le confort thermique

1.2.1 Le control de la température du corps (thermorégulation)

Le fonctionnement optimal du corps humain dépend de sa capacité à maintenir une température interne stable, qui est généralement autour de 37°C. Cette régulation thermique est assurée par le système de thermorégulation de l'hypothalamus, qui peut déclencher des réactions conscientes et inconscientes pour maintenir la température du corps à un niveau optimal. Lorsque l'environnement extérieur devient plus froid que 34°C, les thermorécepteurs situés dans la peau envoient des signaux au cerveau pour activer des mécanismes de réchauffement ou de réduction des échanges thermiques avec l'environnement. Grâce à ces mécanismes de régulation thermique, le corps humain peut maintenir son intégrité physique et fonctionner de manière optimale, même dans des conditions extrêmes (Cisneros & Goins, 2009).

La thermorégulation est un processus complexe qui permet au corps de maintenir sa température interne constante, malgré les variations de température extérieure. Le premier mécanisme de thermorégulation, en cas de baisse de la température corporelle, est la vasoconstriction cutanée qui réduit la vitesse du flux sanguin en rétrécissant les vaisseaux sanguins de la peau, ce qui diminue l'échange thermique avec l'environnement et les pertes de chaleur. Le deuxième mécanisme est l'induction d'une activité musculaire, comme les frissons thermiques, pour augmenter la production de chaleur interne. Plus récemment, les scientifiques ont découvert un troisième mécanisme de thermorégulation, la production de chaleur par les tissus adipeux bruns dans les conditions de froid, qui convertissent l'excès d'énergie en chaleur par combustion (Lee et al., 2013).

Dans des conditions de chaleur extrême, les thermorécepteurs de la peau envoient des signaux pour activer des mécanismes de refroidissement. Le premier mécanisme est la vasodilatation cutanée, qui augmente la vitesse du flux sanguin en dilatant les vaisseaux sanguins de la peau, augmentant ainsi les échanges thermiques et refroidissant le corps. Le deuxième mécanisme est la maximisation de la transpiration, qui permet à l'eau de s'évaporer à travers la peau, ce qui est très efficace pour refroidir le corps car l'énergie nécessaire à l'évaporation est prise de la peau. En outre, l'interprétation par le cerveau des différents signaux peut déclencher des réactions comportementales pour renforcer la thermorégulation, telles que manger, boire, faire de l'exercice ou s'habiller de manière appropriée (Cisneros & Goins, 2009). La figure ci-dessous illustre le processus de la thermorégulation Figure 2.

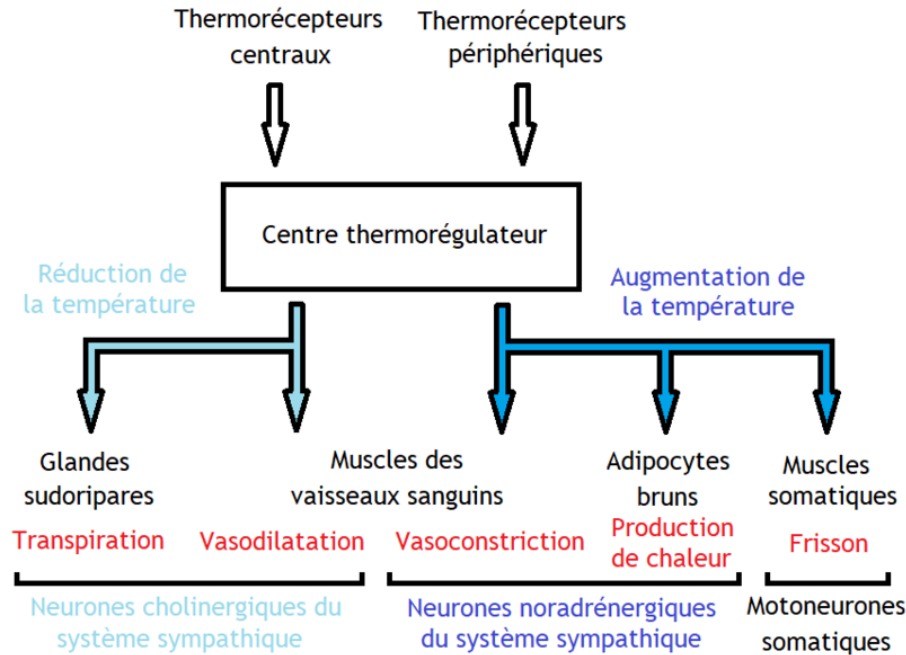


Figure 2 : Anatomie du processus de thermorégulation Source : (Mewtow, 2017)

Lorsque la température ambiante diminue, le corps réagit en produisant de la chaleur pour maintenir sa température interne stable. Cependant, lorsque la température ambiante augmente, le corps réduit sa production de chaleur pour éviter une surchauffe. Les thermorécepteurs situés dans la peau jouent un rôle clé dans la détection des changements de température et l'activation des réponses thermiques appropriées. Ainsi, lorsque la température est idéale, l'absence de signaux émis par les thermorécepteurs indique que l'environnement est confortable pour le corps humain.

1.2.2 Les facteurs qui influent le confort thermique

L'être humain ne perçoit pas directement la température ambiante, mais plutôt l'échange d'énergie entre son corps et l'environnement extérieur. Pour comprendre ce processus, il est important d'étudier les facteurs environnementaux qui influent sur cet échange. Ces facteurs incluent le métabolisme (niveau d'activité), les vêtements (résistance thermique), la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la turbulence de l'air, ainsi que la température radiative moyenne. Afin que le corps humain maintienne sa température à 37 degrés Celsius, l'échange thermique avec l'environnement doit être augmenté ou diminué en fonction des conditions extérieures. Cet échange thermique se fait selon trois principes fondamentaux de la physique thermique : l'évaporation, la convection et le rayonnement. Les facteurs environnementaux mentionnés

précédemment jouent un rôle clé dans les variations de ces principes. Par exemple, un environnement avec une vitesse d'air nulle et une humidité relative élevée réduira considérablement l'effet de l'évaporation, ce qui entraînera une diminution du refroidissement du corps humain (Itard et al., 2004) » .

Les chercheurs ont étudié l'impact des facteurs environnementaux sur les occupants dans des chambres climatiques contrôlées et ont découvert que les perceptions de confort varient en fonction de facteurs individuels. Au lieu de fixer des paramètres de confort, les résultats ont montré des plages de confort (zones de confort) où les facteurs environnementaux sont étroitement liés. La température de l'air est le facteur le plus couramment utilisé pour évaluer le confort thermique, mais l'utilisation de cette variable seule n'est pas suffisante pour déterminer le degré de confort ; il est nécessaire de considérer d'autres facteurs environnementaux également. La figure illustre la relation entre la température de l'air (T_a) et trois paramètres clés influençant le confort thermique des occupants (humidité relative, température radiative moyenne, vitesse de l'air). L'expérience a été menée avec des occupants habillés de manière professionnelle et effectuant une activité de bureau pour évaluer les effets de T_a et d'humidité relative, T_a et de température radiative moyenne, avec une vitesse de l'air d'environ 0,15 m/s (Leusden & Freymark, 1951).

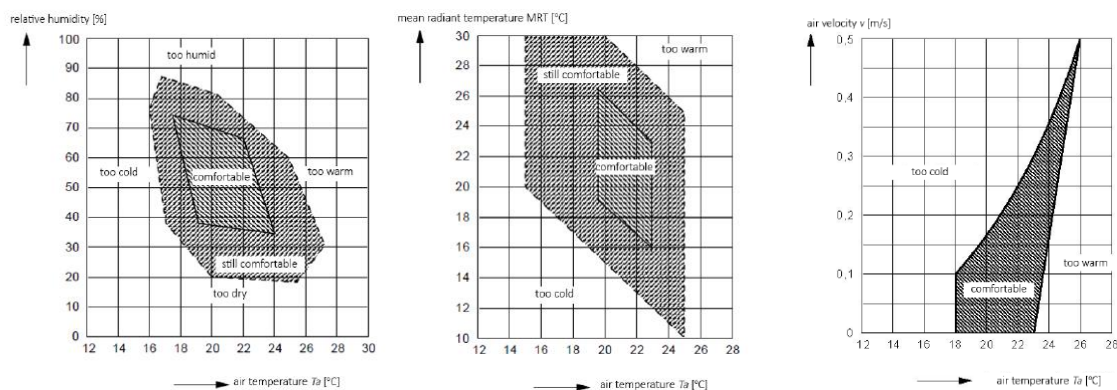


Figure 3: Relation de la température de l'air avec les autres paramètres de confort. (Leusden & Freymark, 1951).

Les études scientifiques ont mis en évidence l'importance de la compréhension des plages de confort en relation avec les différents facteurs environnementaux pour assurer un environnement de travail optimal. La Figure 3 présente les plages de confort recommandées en fonction de différents paramètres tels que la vitesse de l'air, la température de l'air et l'humidité relative. Il a été démontré que, dans certaines limites, une augmentation de la vitesse de l'air peut permettre une

augmentation de la température de l'air, améliorant ainsi l'effet positif de la ventilation (Willems et al., 2006).

1.2.2.1 Le métabolisme (degré d'activité)

Le maintien de la température corporelle à 36,7 degrés Celsius est un processus continu qui nécessite de l'énergie. Cette énergie est produite par le métabolisme, qui transforme l'énergie chimique en chaleur et en travail mécanique dans le corps humain. Le taux de métabolisme est le taux de transformation de l'énergie chimique en chaleur et en travail mécanique par les activités métaboliques d'un individu par unité de surface cutanée. Il est généralement exprimé en unités de flux d'énergie par unité de surface de la peau du corps (métabolisme par mètre carré ou "Met"), 1 Met équivalant à l'énergie produite par une personne assise au repos (Goodfellow & Tahti, 2001). Le taux d'énergie généré par le métabolisme augmente en fonction de l'intensité de l'activité physique. Les activités qui nécessitent plus d'énergie sont associées à des taux d'énergie plus élevés exprimés en W/m² ou en unité Met. Selon (Athienitis et al., 1997) le taux d'énergie généré par le métabolisme augmente en fonction de l'intensité du travail.

Le tableau 1 présente les activités humaines en fonction de leur production d'énergie par unité de surface corporelle (W/m²) ainsi que de leur taux d'énergie de travail par rapport à une personne moyenne, exprimé en unité Met ou en W(Moy) (Leusden & Freymark, 1951). Il offre une vue quantitative de la relation entre l'effort physique et la demande énergétique.

Tableau 1: les activités humaines en fonction de leur production d'énergie.

Activités	Met	W/m ²	W(Moy)
Dormir	0.7	40	80
Allongé au lit	0.8	46	80
Assis, au repos	1.0	58	100
Debout ; travail sédentaire	1.2	70	120
Travail très léger (Shopping, cuisiner ... etc.)	1.6	93	160
Travail léger moyen (Maison, outillage... etc.)	2.0	116	200
Travail moyen fixe (marteau-piqueur ... etc.)	3.0	175	300
Travail dur (sciage, rabotage à la main, tennis ...etc.)	6.0	350	600
Travail très dur (Squash, travail dans une fournaise...)	7.0	410	700

La surface corporelle est un aspect crucial pour comprendre les mécanismes de régulation thermique de l'organisme. Elle joue un rôle fondamental dans la capacité de l'individu à échanger

de la chaleur avec son environnement. Plus la surface corporelle est importante, plus les échanges thermiques sont importants, donc le métabolisme doit augmenter pour maintenir une température corporelle constante. C'est pourquoi les individus de grande taille ont généralement un métabolisme plus élevé que ceux de petite taille. Pour quantifier cela, il existe la formule de (Du Bois & Du Bois, 1916) qui permet de relier la surface corporelle au poids et à la taille d'un individu. La formule est la suivante :

$$A_{du} = 0.202 \cdot m^{0.425} \cdot h^{0.725}$$

Dont m = poids du corps (en kg) et h = taille du corps (en m).

Il est important de noter que la surface corporelle moyenne d'un adulte est de 1,8 m².

1.2.2.2 L'habillement

L'habillement joue un rôle crucial dans le confort thermique, car il affecte directement les échanges thermiques du corps humain avec l'environnement. Il peut réduire la perte de chaleur ou, au contraire, entraîner un surchauffement, perturbant ainsi l'équilibre thermique du corps. L'épaisseur de l'habillement et la nature de ses matériaux sont des facteurs importants dans les échanges thermiques. Plus l'habillement est épais, plus il est capable d'isoler le corps humain de son environnement. Le "Clo" est l'unité de mesure de l'habillement. Cette unité a la même dimension que la résistance "R" utilisée dans le domaine de la physique du bâtiment. En outre, 1 Clo = 0,155 K·m²/W.

1 Clo représente l'habillement officiel d'un homme au bureau dans un climat tempéré, c'est-à-dire un pantalon, un t-shirt, une chemise à manches longues et une veste. Dans le calcul de l'équation des échanges thermiques entre le corps et l'environnement, l'habillement influe sur l'équation de la surface du corps par un facteur de correction "Fcl". Ainsi, la surface corporelle "A_{he}" est obtenue en multipliant la surface corporelle "A_{du}" par le facteur de correction "Fcl" en fonction de la surface de l'habillement (Wang & Liu, 2011)

$$A_{hu} = A_{du} \cdot F_{cl}$$

Le tableau ci-dessous présente les différents types d'habillement et leurs valeurs en unité de mesure de l'habillement (Clo).

Tableau 2: différents types d'ensable d'habillement et leurs valeurs en Clo Source: (Itard et al., 2004).

L'ensemble de l'habillement	I _{cl} [Clo]
Sans habillement	0
Bikini	0.01
Shorte Bermuda	0.1
Habillement estival, short, T-shirt	0.3
Habillement de travaille léger, pantalon chemise à manches longues,	0.5
Habillement de Tenue en Costume estival léger	0.8
Habillement de Tenue normal en Costume de travail	1.0
Habillement de ville traditionnelle	1.5
Habillement d'hiver d'une ville froide	2.2
Habillement polaire	3-4

1.2.2.3 La température de l'air

La température de l'air intérieur joue un rôle important dans la sensation de confort. Elle est déterminée par la température moyenne de l'environnement et est mesurée à l'aide d'un thermomètre sec. Selon (ASHRAE, 2017), la température de l'air est mesurée en tenant compte de la température à différents niveaux du corps, tels que la taille, la cheville et la tête, et peut varier en fonction de la position de l'occupant. Les unités utilisées pour mesurer la température de l'air peuvent être Celsius, Kelvin ou Fahrenheit (Spiridonov & Ćurić, 2021). La température de l'air est souvent désignée en anglais comme "dry bulb temperature" pour la distinguer par rapport à la "température de l'air humide" ou "wet bulb temperature". Bien que la température de l'air soit un facteur clé dans la détermination du confort, il est important de prendre en compte d'autres facteurs tels que l'humidité, la vitesse de l'air, la qualité de l'air et la lumière. En général, une plage de température de l'air intérieur confortable se situe entre 18 et 28°C, mais cela peut varier en fonction des préférences personnelles, de la saison et de la région. Par exemple, la température préférée dans une salle de sport peut être inférieure à celle des autres espaces en raison de l'augmentation du métabolisme durant l'activité physique. Dans les régions du nord de l'Europe, une température de 20°C peut être considérée comme confortable, mais en été, cette même température peut être considérée comme trop froide. Dans les régions chaudes, les préférences en matière de température

de l'air peuvent être plus élevées (Bassoud et al., 2021), à moins que les occupants ne soient habitués à une climatisation rafraîchissante.

1.2.2.4 Vitesse de l'air

Selon l'ASHRAE, la vitesse de l'air est définie comme la vitesse moyenne de l'air qui se trouve en contact avec le corps humain, en tenant compte de l'emplacement et du temps. Elle a une influence directe sur les échanges de chaleur du corps avec son environnement par convection. L'augmentation de la vitesse de l'air augmente les échanges thermiques par convection, alors que la diminution de cette dernière a l'effet inverse. C'est pour cela qu'elle a une influence directe sur le confort thermique. En hiver, en raison de l'effet de la convection, les courants d'air frais procurent une sensation gênante. Ainsi, la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 0,15 m/s. En revanche, la vitesse de l'air peut être augmentée jusqu'à 0,5 m/s. Augmenter l'effet de la convection par la turbulence et les courants d'air procure du confort. Les scientifiques ont pu extraire l'effet de la vitesse de l'air sur les piétons dans un environnement extérieur (Chow et al., 2010).

Tableau 3: Vitesse de l'air et condition de confort. source : (Dong et al., 2017)

Vitesse de l'air (m/s)	Sensation des piétons
$V < 5$	Confortable
$5 < v < 10$	Inconfortable, l'activité est affectée par la vitesse
$10 < v < 15$	Très inconfortable ; l'activité est vraiment affectée par la vitesse
$15 < v < 20$	Insupportable
$20 < v$	Danger

1.2.2.5 Humidité relative

L'air sec est composé de différents pourcentages de gaz : 78 % de nitrogène, un peu moins de 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon et 0,03 % de dioxyde de carbone (Zehnder et al., 2018). Toutefois, l'air sec peut aussi contenir de la vapeur d'eau, qui peut représenter jusqu'à 8 % de sa masse. Le maximum de vapeur d'eau que l'air peut absorber dépend de sa pression et de sa température. Pour une pression atmosphérique normale, l'air à 0°C peut contenir 3,8 g de vapeur d'eau par kg (au-delà, la vapeur d'eau commencera à se condenser et des gouttelettes d'eau apparaîtront). À 20°C, l'air peut contenir 15 g de vapeur d'eau par kg, et à 40°C, il peut en contenir 49,1 g par kg. Ce taux de vapeur d'eau est appelé l'humidité absolue. La sensation d'humidité ressentie par les êtres

humains n'est pas directement liée au taux d'humidité absolue, mais plutôt à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air par rapport à la quantité maximale que l'air peut contenir à une température et une pression spécifique. Cette quantité relative d'eau dans l'air est appelée l'humidité relative (HR).

La pression de vapeur d'eau est notée P_{vap} , et la pression de vapeur d'eau saturée est notée $P_{vap}(T)$. Une humidité relative de 100 % définit un air saturé en vapeur d'eau, tandis qu'un taux d'humidité relative de 0 % indique que l'air est sec. Un taux d'humidité relative de 50 % signifie que l'air est saturé à 50 % en vapeur d'eau à une température et une pression spécifique. Le taux d'humidité relative peut être ressenti indirectement par les occupants d'un espace. Ces derniers peuvent contrôler la température de leur corps par l'évapotranspiration (la sueur), ce qui se traduit par l'expulsion de vapeur d'eau dans l'air. Si le taux d'humidité est élevé, l'air ne peut pas absorber davantage de vapeur d'eau, ce qui réduit l'effet de transpiration des occupants et crée une sensation de chaleur. En revanche, un taux d'humidité faible crée l'effet inverse (l'air peut absorber la vapeur d'eau créée par le mécanisme de transpiration).

Selon ASHRAE, pour assurer le confort des occupants, il est recommandé de maintenir un taux d'humidité compris entre 30 et 60 % dans les espaces intérieurs. L'humidité relative à un effet insignifiant sur le confort thermique lorsque la température de l'air est basse, mais cet effet augmente avec l'augmentation de la température, comme l'indique la Figure 4. Par exemple, à une température de 20°C et une humidité relative de 70 %, l'occupant aura une sensation confortable, et la sensation d'inconfort ne sera ressentie qu'à partir de 80 % d'humidité relative. En revanche, à une température de 24°C, si le taux d'humidité dépasse 65 %, l'occupant se trouvera dans une situation d'inconfort.

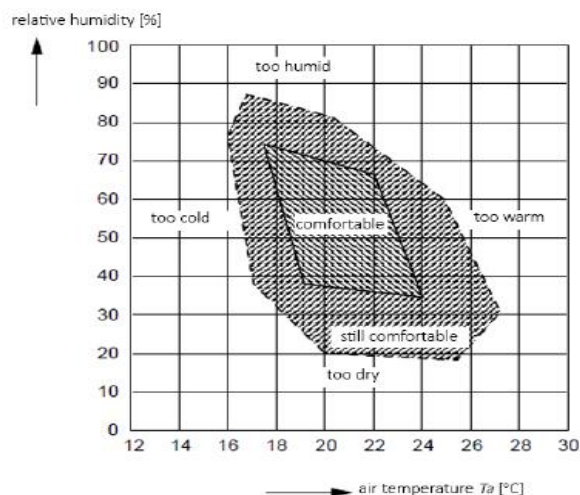


Figure 4 : le taux d'humidité relative affecte la survie des microorganismes qui peuvent causer un gêne aux occupants (Itard et al., 2004)

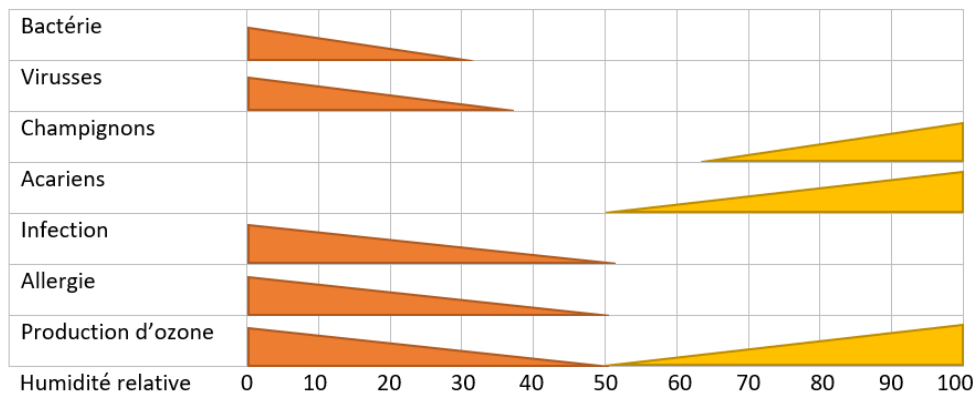


Figure 5: Taux de l'humidité relative en relation avec la résistance des effets allergique et résistances microorganismes. (Sterling et al., 1985)

1.2.2.6 La température radiative moyenne

Les échanges thermiques de la peau humaine ne dépendent pas seulement de la température de l'air, mais aussi des températures des surfaces environnantes. Par exemple, le corps humain perçoit considérablement la chaleur des rayons solaires qui ne sont pas absorbés par l'air, mais absorbés par les objets solides. C'est pourquoi une personne peut ressentir de la chaleur par temps froid lors d'une journée ensoleillée. De même, le corps humain peut ressentir les radiations thermiques provenant de surfaces qui ont une température différente de celle de sa peau. Cette sensation n'est pas d'ordre psychologique, mais est due à un échange thermique radiatif réel. Une personne dans un espace réalise des échanges thermiques avec tous les murs, les fenêtres, le plancher et le plafond qui l'entourent. Chaque surface émet des radiations thermiques dès lors qu'elle a une température supérieure à zéro absolu (0 K, -273,15 °C), et cette température radiative émise est égale à la température surfacique des objets. L'échange thermique radiatif du corps humain avec la surface environnante est complètement différent de l'échange thermique par convection du corps humain avec la température de l'air. Pour simplifier le calcul du confort, il est plus pratique d'utiliser la moyenne des températures des surfaces environnantes plutôt que la température de chaque surface séparément (Siegel, 2001). La moyenne des températures des surfaces environnantes est appelée température radiative moyenne (MRT) (Monteith & Szeicz, 1962).

La MRT a une grande influence sur le confort : une température de l'air basse peut être compensée par une MRT élevée. On peut obtenir du confort avec une MRT de 20 °C et une température de

l'air de 20 °C (voir Figure 6), mais si la MRT baisse à 17 °C, la température de l'air doit être élevée à 22 °C. La température de surface des murs et des fenêtres dépend sérieusement de leur isolation. Les murs et les fenêtres bien isolés ont une température de surface plus élevée que d'autres moins isolés. En conséquence, l'isolation de ces surfaces réduira les échanges thermiques avec l'environnement extérieur, ce qui se traduira par une consommation moindre en chauffage. En plus de cela, des surfaces avec une température élevée pourront réduire la température de l'air, ce qui laissera une possibilité de réduire la température de chauffage, réduisant encore plus la consommation d'énergie (Garty, 1990). De même en été, les rayons solaires et les températures élevées de l'environnement extérieur augmenteront les températures surfaciques intérieures. Avec une MRT de 28°C et une température de l'air de 22°C, cela créera un environnement acceptable. De plus, réduire la MRT à 24°C en protégeant contre les rayonnements solaires et en réduisant les échanges thermiques avec l'environnement extérieur par une isolation (masse thermique) pourra permettre une température de l'air plus élevée de 25°C. Avec cette augmentation de 3 degrés, de grandes économies en climatisation peuvent être réalisées. (Wong et al., 2009)

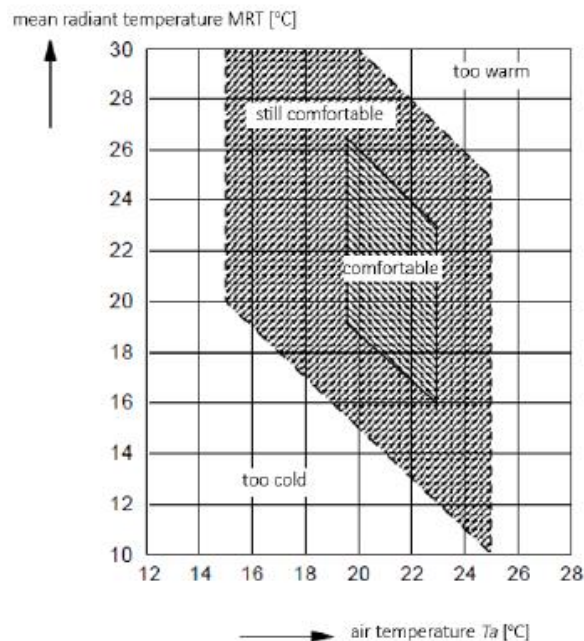


Figure 6: La température radiative moyenne (Itard et al., 2004)

1.2.3 Autres indicateurs de température

Il existe plusieurs recherches qui incluent la combinaison de plusieurs paramètres de confort, et l'indicateur le plus utilisé dans ce cas est la température opérative. (Bacon, 2013)

1.2.3.1 Température opérative T_{op}

La température opérative est la moyenne entre la température de l'air et la température radiative moyenne. Cet indicateur correspond à l'échange thermique entre l'effet de convection et la radiation thermique :

$$T_{op} = \frac{h_r TRM + H_c \cdot T_a}{H_r + H_c}$$

MRT : température radiative moyenne ; T_a : température de l'air ; H_r : coefficient de transfert de chaleur par radiation ; H_c : coefficient de transfert de chaleur par convection.

La température opérative est la combinaison de trois paramètres de confort : température radiative, température de l'air et vitesse de l'air. L'indicateur H_c représente le transfert de chaleur par convection et dépend principalement de la vitesse de l'air.

La signification physique de la température opérative se trouve dans la sensation de l'occupant, c'est-à-dire que si deux environnements ont la même température opérative et le même taux d'humidité, ils peuvent donner la même sensation à l'occupant.

1.2.3.2 Température résultante T_{res}

La température résultante (T_{res}) est un indicateur de confort thermique qui prend en compte la convection et le rayonnement. C'est la température d'un corps noir en équilibre avec l'air ambiant et les rayonnements environnants (Fanger, 1970).

1.2.3.3 Température effective T_{eff}

T_{eff} est semblable à la température opérative, mais l'humidité relative est fixée à 50%

1.2.3.4 La température opérative humide, T_{oh}

La température opérative humide, T_{oh} , est semblable à T_{eff} , mais le taux d'humidité relative est de 100%.

1.2.3.5 Température au thermomètre-globe mouillé

La température au thermomètre-globe mouillé, (The Wet-Bulb Globe Temperature WBGT), comme son nom original l'indique, détermine l'exposition thermique de quatre paramètres de confort : la température de l'air humide T_{wb} , la température de globe noire T_g et la température de l'air T_a . La WBGT peut être présentée par deux équations selon l'exposition aux radiations solaires :

En présence des radiation solaire $WBGT = 0.7T_{wb} + 0.2T_g + 0.1T_a$

En absence des radiation solaire $WBGT = 0.7T_{wb} + 0.3T_g$

1.2.3.6 Indice de stress thermique

L'indice de stress thermique est le ratio entre le taux d'évaporation du corps lors de l'échange thermique (pour qu'il puisse équilibrer sa température) sur le taux maximum possible d'évaporation durant l'échange thermique du corps dans son environnement à 35 °C. Si HIS est inférieur à zéro, le corps entre dans un mécanisme de refroidissement, et si HIS est supérieur à 100, le corps n'a plus la possibilité de perdre de la chaleur pour un refroidissement et risque la surchauffe (Parsons, 2019).

1.3 Les modèles d'évaluation du confort thermique

1.3.1 Les méthodes PMV/PPD

En se basant sur une chambre climatique avec un grand nombre d'individus, P.O. Fanger a pu développer des équations qui permettent d'estimer l'environnement thermique et de prédire le nombre d'individus insatisfaits dans cet environnement. Tout d'abord, il a créé un modèle physique basé sur la balance thermique du corps humain avec unes températures de la peau de 34 °C. Avec ce modèle, il a pu déterminer les variables climatiques intérieures qui influencent le confort thermique de la plupart des individus. Ensuite, il a combiné ce modèle physique avec des informations statistiques obtenues par une analyse qualitative à partir d'un questionnaire sur la sensation de ces individus dans différentes conditions thermiques (Fanger, 1970).

En se basant sur ces recherches, il a introduit l'indice PMV (Predicted Mean Vote), qui explique la situation d'un environnement intérieur par rapport au confort thermique (à quel point cet environnement est éloigné de la condition de confort optimal), en fonction des limites de température et d'humidité. Cet indice contient des valeurs qui prédisent la sensation subjective des

individus dans un environnement intérieur. Pour prédire l'insatisfaction de ces individus, il a introduit l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied people), qui prédit le pourcentage de personnes insatisfaites. Cette partie utilise le modèle physique et sa relation avec les indices PMV et PPD pour déterminer la relation entre les personnes insatisfaites et chaque combinaison de variables de l'environnement intérieur. (Santamouris, 2008)

1.3.1.1 La balance thermique du corps humain

Le premier principe de la thermodynamique définit le principe de la conservation d'énergie : l'énergie ne peut ni disparaître ni être créée à partir de rien. Elle peut seulement être transmise ou transformée d'une forme à une autre. Cela signifie que si un système est maintenu à une température quelconque, il y a une balance thermique entre la chaleur qui entre, la chaleur stockée ou déchargée intérieurement, et la chaleur qui sort. S'il n'y a pas d'équilibre thermique, la température est réduite en cas de déficit de chaleur, et augmente en cas de surplus de chaleur. Dans le cas du modèle de Fanger, le système considéré est le corps humain. (Höppe, 1993)

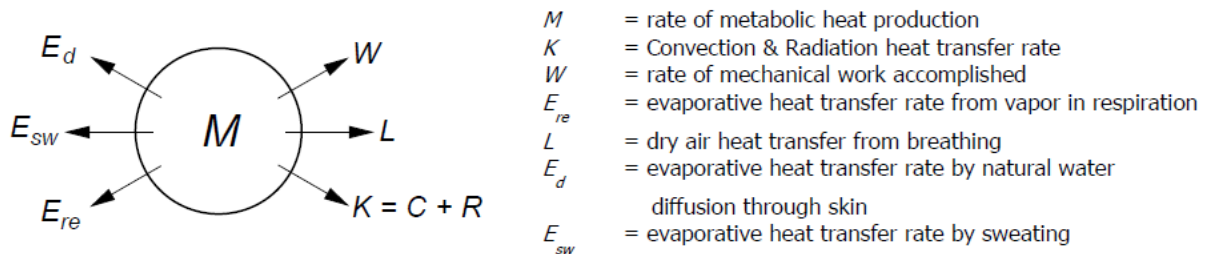


Figure 7: La balance thermique du corps humain (Fanger, 1970)

La Figure 6 décrit tous les transferts d'énergie depuis, dans, et vers le corps humain. "M" est la production interne de chaleur par le métabolisme (M est toujours positive). "K" est le transfert de chaleur par convection et radiation depuis la peau aux vêtements et depuis les vêtements à l'environnement (K est positive si la température de l'air est en dessous de 34°C, sinon elle est négative). "W" est l'activité accomplie par le corps (W est toujours positive en fonction de l'activité). "L" est le transfert de chaleur par la respiration (L est positif si la température de l'air est inférieure à 74°C, sinon il est négatif). "E_{re}" est le transfert de chaleur latent par la vapeur d'eau respirée (E_{re} est un transfert de chaleur latent par vaporisation). Enfin, l'équation contient la

chaleur produite par l'humidité relâchée du corps vers l'environnement "Ed" et la transpiration "Esw" (Fanger, 1970).

Si la balance énergétique est zéro (TS=0), une température constante est maintenue à 37°C dans le corps et à 34°C dans la peau avec une sensation de confort. Si la balance est négative, il y aura un déficit d'énergie dans la peau et le corps, et la personne sentira un effet de froid. Si la balance est positive, le résultat sera un surplus de chaleur et la température de la peau et du corps augmentera, entraînant une sensation de chaleur excessive. L'équation suivante décrit le système énergétique des échanges entre l'environnement et le corps humain.

$$M - W - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - K = TS$$

1.3.1.2 Les diagrammes de confort thermique

L'équation de la balance thermique et du confort peut être convertie en diagrammes de confort qui mettent en corrélation les différents paramètres qui agissent sur ce dernier. Les lignes incurvées représentent le confort optimal.

Premièrement, l'exploration du diagramme de l'effet de l'humidité et de la vitesse de l'air sur la température de l'air est présentée. La Figure 8 représentent une personne assise avec un métabolisme de 70 W/m² avec différents types d'habillement (habillement léger 0,5 clo – habillement normal 1 clo).

Dans l'axe des abscisses (axe des X), la température de l'air est égale à la température radiante.

Dans l'axe des ordonnées (axe des Y), la température de l'air humide est simplement utilisée pour dessiner les lignes en diagonale qui représentent l'humidité relative ($\phi = 1$ signifie que HR est de 100 %, $\phi = 0$ signifie que l'air est sec) (Deval, 1984).

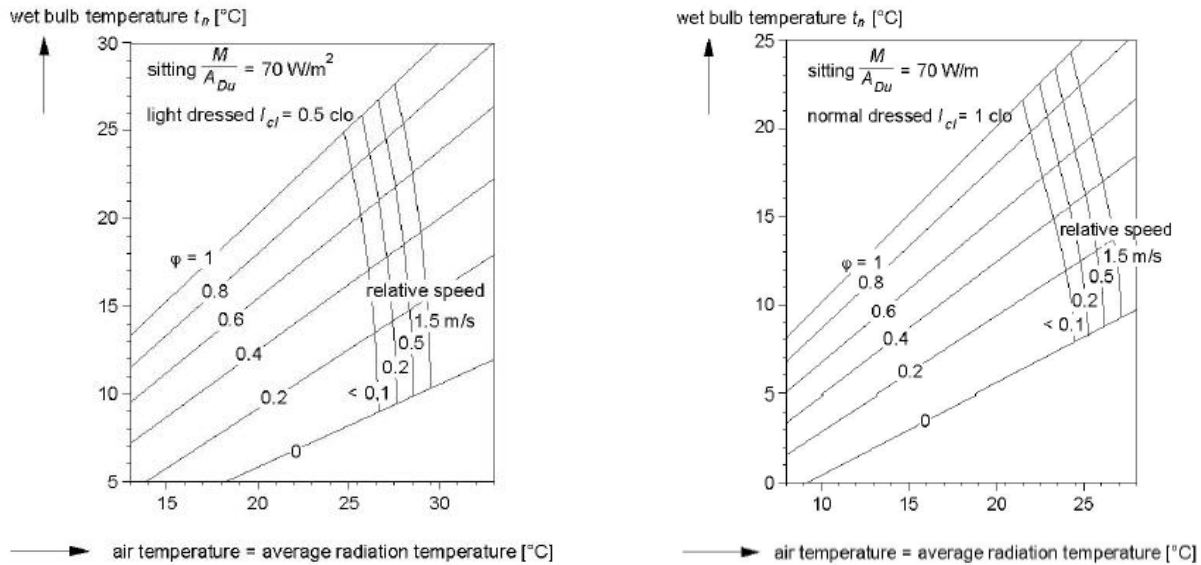


Figure 8: Diagrammes représentant l'effet de l'humidité sur la température de l'air d'une personne assise avec un métabolisme de 70 W/m^2 avec différents types d'habillement (Itard et al., 2004).

Le diagramme illustre l'effet de l'humidité sur la température de l'air. À une HR (humidité relative) de 100 % ($\phi = 1$) et une vitesse de l'air de 0.1 m/s , la température de confort est de 24.5°C . Cependant, si l'air est sec ($\phi = 0$), la température de confort s'élève à 26.5°C . On peut en conclure que l'air sec permet des températures plus élevées que l'air avec un taux d'humidité élevé. En ce qui concerne l'effet de la vitesse de l'air sur la température, dans le cas d'une humidité relative de 80 % ($\phi = 0.8$) et une vitesse de l'air de 0.1 m/s , la température de confort est de 26°C . Cependant, augmenter la vitesse de l'air à 1.5 m/s permet une température de confort allant jusqu'à 28.5°C . Cette observation souligne l'importance d'une utilisation rationnelle des courants d'air qui peuvent permettre des températures plus élevées et donc réduire la consommation en climatisation. Les deux figures mettent également en évidence l'importance de l'habillement pour assurer le confort. Pendant les périodes de chauffage, un habillement normal permet des températures de confort plus basses, ce qui permet d'économiser en chauffage, tandis qu'en période chaude, un habillement léger permet des températures plus élevées, réduisant ainsi la consommation en climatisation (M. A. Humphreys & Fergus Nicol, 2018).

La Figure 9 décrit l'effet de la vitesse de l'air et de l'activité métabolique sur la température de l'air. Pour l'axe des abscisses (axe des X), la température de l'air est égale à la température radiative moyenne. À une activité métabolique constante, les changements de la vitesse de l'air en dessous de 0.1 m/s n'auront aucun effet en raison de l'effet de l'échange convectif qui tend à

s'annuler en dessous de cette valeur. La figure souligne également l'importance de l'activité métabolique sur la température de l'air confortable. Une personne vêtue normalement avec un indice de vêtement (clo) de 1 et dans une position assise ($M = 70 \text{ W/m}^2$) dans un environnement où la vitesse de l'air est de 0,1 m/s se sentira confortable à une température de 23°C. Cependant, si cette personne change d'activité pour un travail léger qui implique 120 W/m^2 , la température de confort chutera à 15°C. C'est pourquoi plusieurs réglementations thermiques prescrivent des températures de confort intérieures en fonction de l'utilisation du bâtiment (salle de sport, hôpital, etc.).

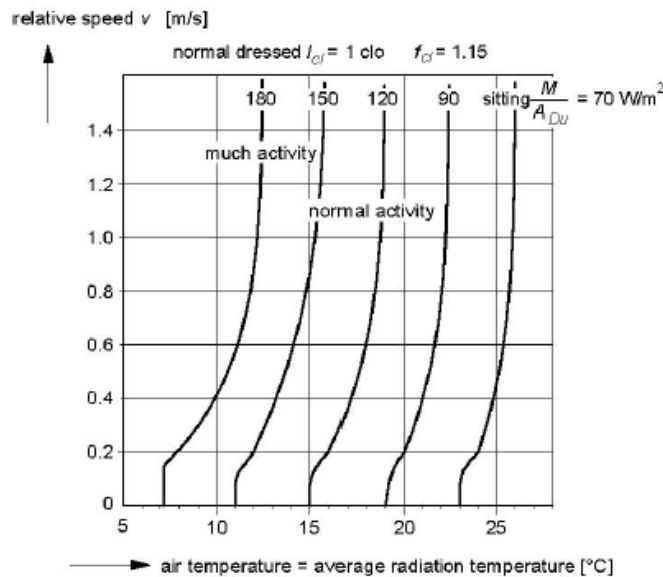


Figure 9: Effet de la vitesse de l'air et de l'activité métabolique sur la température de l'air (Itard et al., 2004)

En fixant la vitesse de l'air à 0,15 m/s, l'effet du niveau d'activité métabolique et du type d'habillement sur la température de l'air (T_a) et sur la température radiative moyenne (MRT) est représenté dans la figure x. La ligne « 3 » représente un habillement normal de $\text{Clo} = 1$ et une activité métabolique d'une personne assise de 70 W/m^2 , où MRT et T_a sont de 22°C , offrant un confort thermique. Cependant, si MRT diminue à 10°C (dans le cas de bâtiments mal isolés en hiver), la température nécessaire pour un confort thermique sera de 30°C , ce qui accentuera la consommation de chauffage. De même, en été, si MRT est de 30°C (dans le cas de bâtiments mal isolés en période chaude), l'occupant aura besoin d'une T_a de 17°C , ce qui augmentera considérablement la consommation de climatisation.

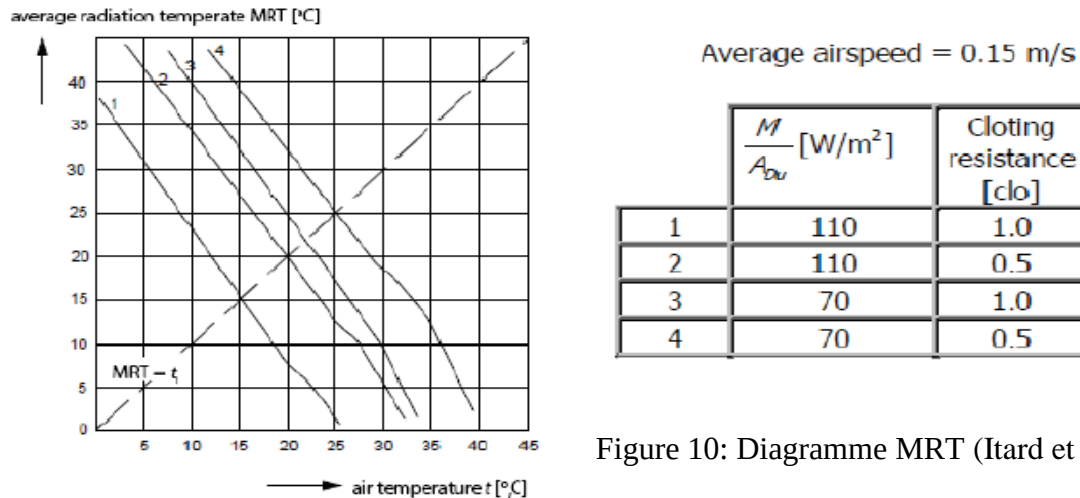


Figure 10: Diagramme MRT (Itard et al., 2004)

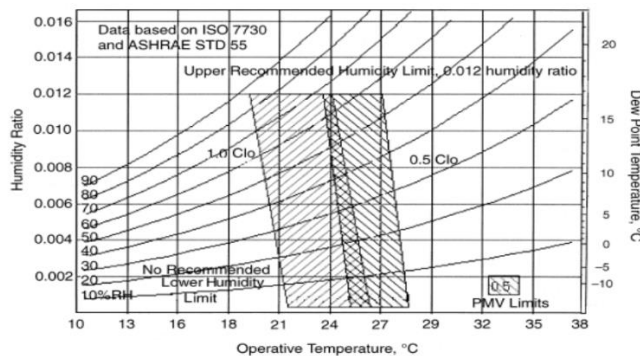


Figure 11 : Température opérative (Itard et al., 2004)

Il est possible aussi de créer plusieurs diagrammes en se basant sur des paramètres du confort comme il est aperçu dans la Figure 11 où l'axe des x est fourni en température opérative au lieu de la température de bulbe sec. Ce diagramme s'applique pour un taux métabolique de 1,0 à 1,3 MET et un niveau d'habillement de 0,5 à 1,0 CLO, avec une vitesse de l'air < 0,02 m/s.

1.3.1.3 Evaluation du confort thermique par les indices PMV -PPD

Après avoir effectué des expérimentations sur un large groupe d'individus en utilisant l'équation de la balance thermique TS, Fanger a lancé une investigation sur leur sensation thermique dans différents environnements (avec différents taux de vitesse de l'air, de température de l'air, de MRT et d'humidité relative), avec des degrés d'activité et d'habillement différents. Ces individus étaient en mesure de faire un rapport de leurs sensations thermiques sur une échelle de -3 à +3, allant de la sensation de trop froid à celle de trop chaud. (Sala, 2012)

Tableau 1: Echelle de la variation de la sensation thermique

Index	-3	-2	-1	0	1	2	3
Sensation	Froid	Frais	Légèrement Frais	Neutre	Légèrement Tiède	Tiède	Chaud

Les individus ont rapporté leur sensation thermique actuelle (TS actuel) qui était en corrélation avec l'équation de la balance thermique TS, ce qui a conduit à l'échelle de sensation de -3 à +3 devenue un indice du vote moyen prévisible (Predicted Mean Vote) PMV, qui prédit la sensation thermique moyenne d'un grand groupe de personnes. Il convient de noter que la sensation neutre zéro ne signifie pas toujours une satisfaction thermique avec l'environnement, car certains individus peuvent signaler une insatisfaction et souhaiter à ce moment ressentir de la fraîcheur ou de la chaleur. De même, un individu peut rapporter une sensation de fraîcheur à -3 sur l'échelle PMV, mais aimer cette sensation, il signalera alors une satisfaction.

Après avoir mené une étude sur un grand groupe, Fanger a créé un graphique en combinant les études de pourcentage de personnes insatisfaites avec les données du vote moyen prévisible comme il est présenté dans la Figure 12. Le résultat est une équation qui prédit le pourcentage de personnes insatisfaites par leur environnement thermique (PPD: Predicted Percentage of people Dissatisfied) (Standardization, 1984).

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

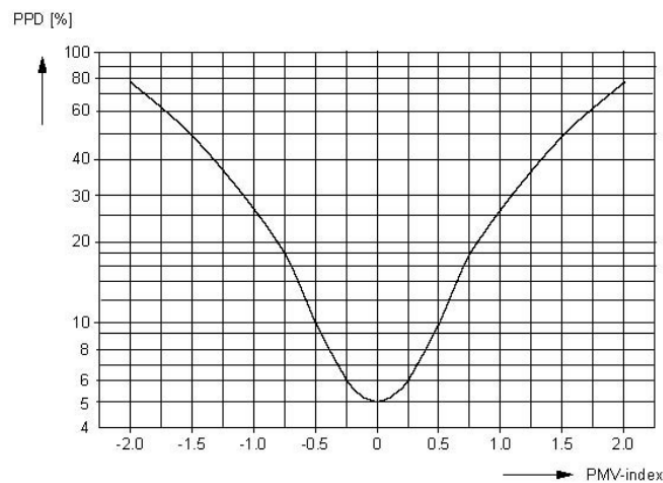


Figure 12: Le diagramme PMV et PPD (Itard et al., 2004)

1.3.2 L'inconfort thermique local

En utilisant les six paramètres de confort thermique dans l'équation, on peut déterminer le PMV. Le PMV combiné avec l'équation permettra d'obtenir le taux de PPD. Avec cette technique, il est possible de prédire le taux d'insatisfaction d'un grand groupe d'individus par rapport à leur environnement. Figure 12 montre que même dans des conditions neutres ($PMV = 0$), 5 % des personnes sont insatisfaites. De même, dans des conditions de trop de chaleur ou de trop de froideur (+2, -2), on peut constater que 80 % des personnes sont insatisfaites, ce qui conclut que 20 % des personnes sont toujours satisfaites. Dans le standard ISO 7730, un environnement est classé en catégorie A si le PPD est inférieur à 6 %, en catégorie B s'il est entre 6 et 10 %, et en catégorie C s'il est entre 10 et 15 %. Pour faciliter le calcul de toutes ces équations, des moteurs et des logiciels de calcul énergétiques ont été inclus, tels que les logiciels EnergyPlus, DOE, etc. Dans ces logiciels, les deux indices sont calculés automatiquement.

Toutefois, d'autres facteurs différents des six paramètres utilisés par Fanger peuvent influencer la sensation de confort thermique, tels que l'âge, le sexe, l'état de santé, les habitudes et le climat. (Fanger, 1970)

1.3.2.1 Courant et turbulence d'air

Les occupants ayant une activité sédentaire qui ressentent une sensation thermique neutre (proche du confort) peuvent être gênés par une vitesse de l'air partiellement élevée. Ce type d'inconfort est appelé en anglais "draught", courant d'air. En général, pour les bâtiments conditionnés, la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 0,25 m/s en été et 0,1 m/s en hiver.

L'inconfort peut également être causé par les turbulences d'air. L'intensité de la turbulence d'air (Tu) est définie comme le rapport entre l'écart-type de la vitesse de l'air et la vitesse de l'air moyenne. C'est une mesure du changement de la vitesse et de la direction de l'air.

Une équation a été établie par Fanger et al. Qui peut prédire le pourcentage de personnes insatisfaites par les courants d'air. Cette équation se nomme en anglais "draught rating index", l'index de l'évaluation du courant d'air. (Fountain & Arens, 1993)

$$DR = (34 - T_a)(\tilde{v} - 0.05)^{0.62}(3.14 + 0.37 \cdot Tu \cdot \tilde{v}) \text{ [%]}$$

Avec :

T_a : température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) (un intervalle limité à 17-29 $^{\circ}\text{C}$)

$Tu = 100 \cdot \sigma / \tilde{v}$ (l'intervalle limité en dessous de 60%)

σ = l'écart-type

\tilde{v} = la moyenne de la vitesse de l'air

La Figure 13 est obtenue par Fanger et Christensen (Fanger, 1970), suite à une enquête menée sur 150 sujets exposés à différentes vitesses d'air autour de leur cou. Cette représentation graphique met en évidence la relation entre la température de l'air, l'intensité de la turbulence et la vitesse moyenne de l'air, en considérant un taux de mécontentement de 15 % (DR = 15 %). Par exemple, pour une température de l'air de 22°C et une vitesse de l'air de 0,2 m/s, 15 % des personnes interrogées seront mécontentes. Si l'intensité de la turbulence augmente à 10 %, un nombre plus élevé de personnes exprimeront leur mécontentement.

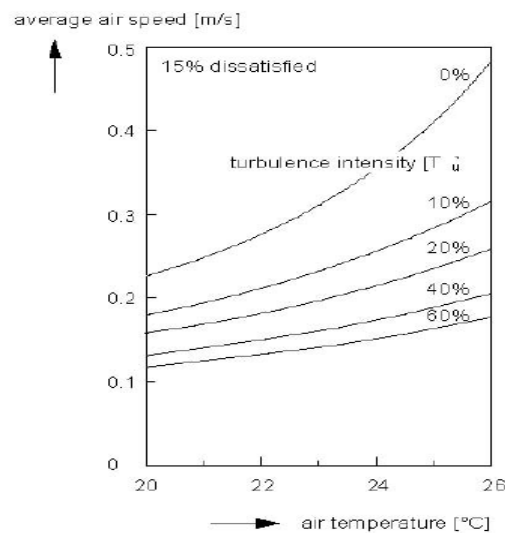


Figure 13: Fanger et Christensen (Itard et al., 2004)

1.3.2.2 Une grande asymétrie des radiations thermique

L'insatisfaction des individus concernant l'asymétrie des radiations thermiques est causée par une importante disparité de température entre les surfaces, même si la température radiative moyenne se situe dans la plage de confort. Ce phénomène peut se produire, par exemple, lorsque la température du plafond est trop élevée (en raison d'une mauvaise isolation thermique qui expose le plafond aux radiations solaires quotidiennes) ou lorsqu'une fenêtre présente une surface froide. La Figure 14 présente la relation entre le pourcentage de personnes insatisfaits et l'asymétrie radiative. L'asymétrie radiative peut être définie comme la différence de température entre les surfaces concernées et la surface opposée..(Fanger et al., 1985)

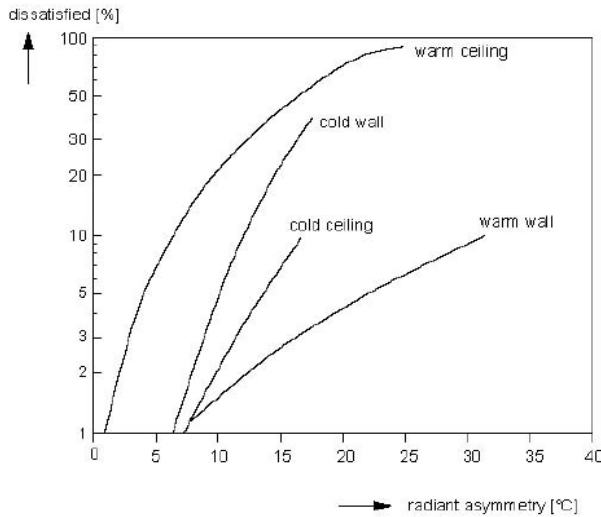


Figure 14: la relation entre le pourcentage de personnes insatisfaites et l'asymétrie radiative (Itard et al., 2004)

Pour l'inconfort local, le pourcentage d'insatisfaction (PD) est utilisé à la place de PPD, qui est réservé à l'équation du confort. Dans la norme ISO 7730, les valeurs maximales d'asymétrie radiative sont de 10 °C pour les murs froids et de 5 °C pour les plafonds chauds. Cela correspond à un mécontentement de 8 % des personnes.

Figure 15: l'asymétrie des radiations thermiques acceptable (source : ASHRAE 55-2004 (page7))

L'asymétrie des radiations thermiques C° (°F)			
Plafond chaud	Mur froid	Plafond froid	Mur chaud
<5 (9,0)	<10 (18,0)	<14 (25,2)	<23 (41,4)

1.3.2.3 Gradient vertical élevé de température de l'air

Les personnes peuvent ressentir une sensation désagréable si leur tête est exposée à de la chaleur ou leurs pieds à du froid (Möhlenkamp et al., 2019). Une limite de 3 °C/m entre la tête et les pieds pour les personnes assises est prescrite par les normes ASHRAE 55 et ISO 7730. Cependant, des preuves de plus en plus nombreuses suggèrent que cette limite est trop restrictive.

Afin d'évaluer l'impact du gradient de température vertical sur le confort thermique local, des tests en laboratoire ont été réalisés avec quatre gradients de température verticaux nominaux (0,4, 2,9, 5,9 et 8,4 °C/m). Quarante-vingt-dix-huit étudiants universitaires ont participé à une expérience en aveugle intra-sujet, alors qu'ils étaient assis. L'inconfort d'avoir les pieds froids a été noté plus fréquemment que l'inconfort d'avoir la tête chaude, à mesure que les gradients de température augmentaient (Liu et al., 2020).

La Figure 16 indique qu'une différence de 3 °C créera 5 % de personnes insatisfaites et si cette différence atteint 5 °C, 30 % des personnes seront presque insatisfaites.

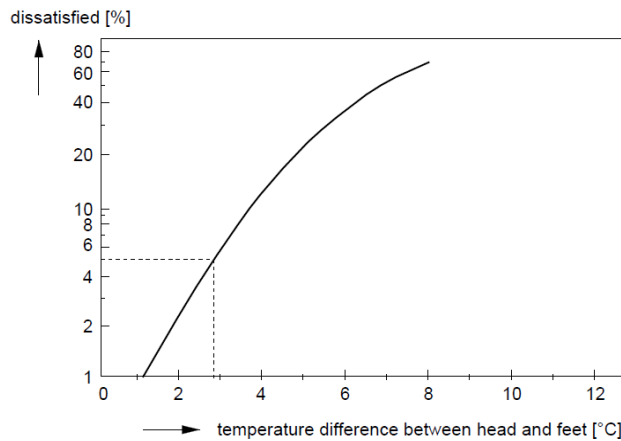


Figure 16: Illustration indiquant qu'une différence de 3°C créera 5 % de personnes insatisfaites (Itard et al., 2004)

1.3.2.4 Plancher trop chaud ou trop froid

Un inconfort local peut se créer à cause du contact des pieds avec le plancher. Un plancher avec une température trop élevée ou trop basse augmentera le transfert de chaleur entre les pieds et le plancher. Ce transfert dépend généralement de la capacité et de la conductivité thermique du matériau du plancher. La Figure 17 montre la relation entre le pourcentage des personnes insatisfaites et la température des planchers. Même si la température du plancher est de 24°C, 6% des personnes sont insatisfaites (Markov, 2002)

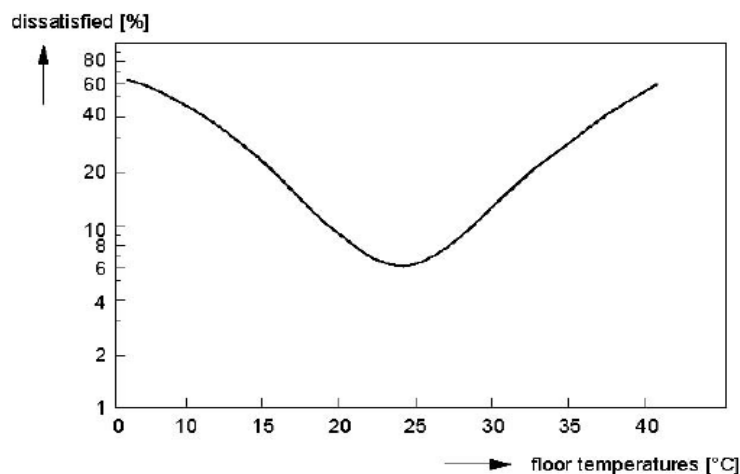


Figure 17: La relation entre le pourcentage des personnes insatisfaites et la température des planchers (Itard et al., 2004)

1.3.3 Théorie du confort adaptative

Le modèle de Fanger, avec ses six paramètres de confort, ne prend pas en compte les facteurs d'adaptation. En d'autres termes, l'approche de l'équilibre et de la neutralité thermique ne tient pas compte des actions que les occupants peuvent entreprendre pour assurer leur confort. (M. Humphreys & Nicol, 1998) ont calculé le PMV et le PPD dans des conditions stables, ce qui signifie que les mesures prises par Fanger ont été effectuées sur des personnes ayant des vêtements et des tâches spécifiques. Cependant, dans un contexte réel, les personnes peuvent agir lorsqu'elles ressentent un inconfort, par exemple en enlevant une veste, en ouvrant ou en fermant les fenêtres ou les stores, voire en changeant d'activité. En conclusion, si les personnes peuvent adapter leur confort à leur environnement, elles peuvent accepter des intervalles en dehors des modèles de conditions stables tels que le PMV et le PPD de Fanger. C'est pourquoi les personnes peuvent accepter des températures plus basses en hiver et des températures partiellement plus élevées en été dans un climat modéré. (Cena & de Dear, 2001) ont remarqué que les personnes utilisent la ventilation naturelle et peuvent accepter des intervalles de température plus larges que dans des bâtiments complètement climatisés.

1.3.3.1 Le model de la température opérative et le PMV

Dans la Figure 18, un modèle relie la température de confort opérative T_c avec la température moyenne extérieure des jours précédents $T_{mean,out}$ de manière linéaire : $T_c = a.T_{mean,out} + b$. Pour les bâtiments naturellement ventilés, l'équation proposée par la norme 55 d'ASHRAE est $T_c = 0,31T_{mean,out} + 17,8$. Cette température est appelée la température neutre, et cette équation a été obtenue en examinant des informations sur des centaines de bâtiments dans le monde.

En utilisant plusieurs cas d'études, les chercheurs ont pu établir une relation entre la température T_c et le modèle PMV-PPD. Sur le diagramme, les taux d'acceptation thermique de 80 % et 90 % correspondent à des taux de personnes insatisfaites de 20 % et 10 % dans le modèle PMV-PPD. Notamment, la température neutre correspond à un PMV autour de zéro. (Kontes et al., 2017)

La Figure 18 expose la relation entre la température opérative et la température moyenne extérieure. L'intervalle gris correspond à un taux de 10 % de personnes insatisfaites dans le modèle PMV-PPD, tandis que l'intervalle bleu correspond à un taux de 20 % de personnes insatisfaites.

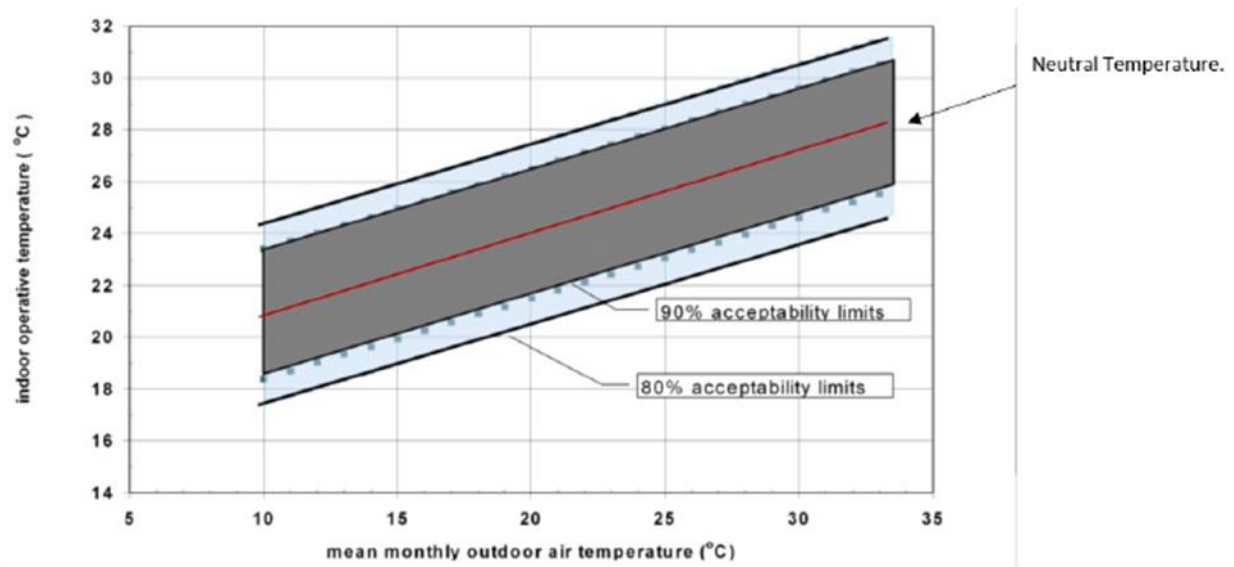


Figure 18: La relation entre la température opérative et la température moyenne extérieure.
(ASHRAE Std.55 :2004)

1.3.3.2 Modèle adaptif régional

Pour plus de précision, les constantes **a** et **b** dans l'équation $T_c = a \cdot T_{mean,out} + b$ peuvent être déterminées pour chaque zone climatique en prenant en compte les préférences régionales.

Par exemple, en Belgique et dans les pays environnants, Peeters et al. ont ajusté une équation d'après le concept précédent :

$$T_c = 0,06 \times T_{mean,out} + 20,4 \text{ pour } T_{mean,out} < 12,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c = 0,36 \times T_{mean,out} + 16,63 \text{ pour } T_{mean,out} \geq 12,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

où $T_{mean,out} = (T_{\text{aujourd'hui}} + 0,8 \times T_{\text{aujourd'hui-1}} + 0,4 \times T_{\text{aujourd'hui-2}} + 0,2 \times T_{\text{aujourd'hui-3}}) / 2,4$, avec $T_{\text{aujourd'hui}}$ qui représente la moyenne entre la température maximale et minimale extérieure en degrés Celsius, et $T_{\text{aujourd'hui-1}}$, $T_{\text{aujourd'hui-2}}$, $T_{\text{aujourd'hui-3}}$ qui représentent la moyenne entre la température maximale et minimale extérieure d'hier, d'avant-hier et du jour qui précède avant-hier successivement.

Les limites de température supérieure et inférieure acceptables sont définies dans les équations suivantes :

$$T_{sup} = T_c + w \times a$$

$$T_{inf} = \max(T_c - w \times (1 - a), 18)$$

Les valeurs de w pour 90 % d'acceptabilité sont de 5 °C et pour 80 % d'acceptabilité, 7 °C. (Zhao et al., 2021)

1.3.3.3 Limitation et extension de model adaptive

Le modèle adaptatif est limité aux bâtiments ventilés naturellement (la climatisation est exclue), où la température est régulée par l'ouverture et la fermeture des fenêtres et où les occupants doivent avoir une activité sédentaire entre 1 et 1,3 MET et peuvent librement changer de vêtements. La température extérieure se situe dans une plage de 10 à 33°C (Itard et al., 2004). Dans le but d'étendre le diagramme de confort adaptatif, une étude aux Pays-Bas a été réalisée en utilisant des capteurs de température extérieure. Toutes les températures entre la limite inférieure et supérieure sont acceptées par 90 % des occupants. La limite inférieure est de 20°C, cependant, la limite supérieure augmente avec l'augmentation de la température extérieure. Le diagramme révèle que les occupants peuvent accepter des températures plus élevées lorsqu'ils ont la possibilité de contrôler les fenêtres pour la ventilation naturelle. Prenons l'exemple d'une température extérieure de 28°C, dans un bâtiment adapté à une ventilation naturelle, 28°C est acceptable, contrairement à un bâtiment complètement climatisé où la température acceptable est de 25°C. (Itard et al., 2004)

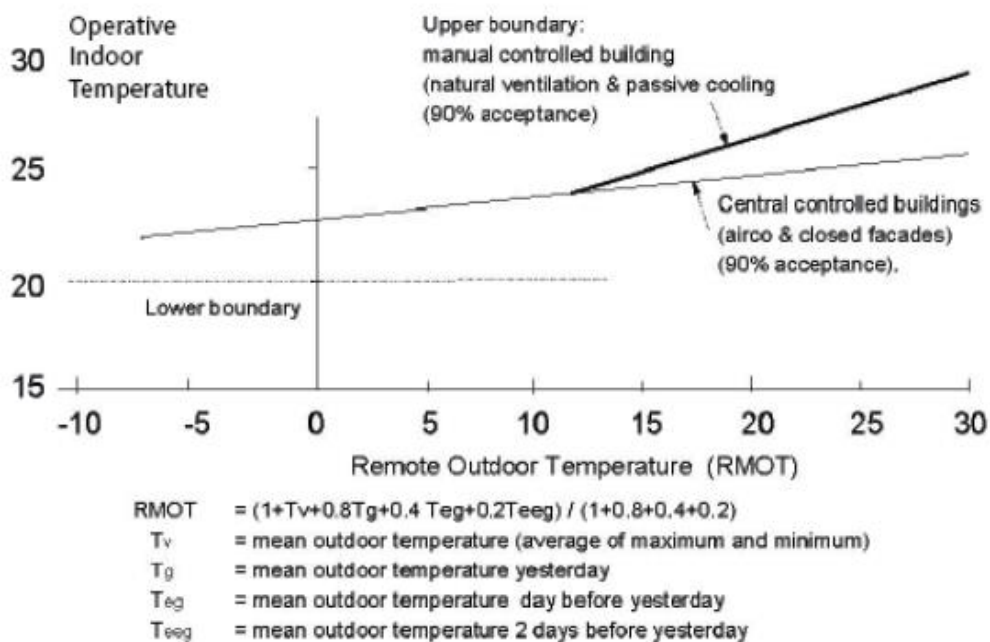


Figure 19: Illustration du model adaptive (Itard et al., 2004)

1.3.4 Modèle adaptative de la région chaude et aride en Algérie

Dans le but de développer un modèle de confort adaptatif pour la région chaude du sud de l'Algérie, une étude spécifique a été entreprise pour évaluer le confort thermique pendant la saison estivale. À cet effet, des bâtiments anciens en adobe situés à Adrar ont été sélectionnés comme cas d'étude, et les résultats obtenus ont permis de formuler deux équations représentant les limites supérieure et inférieure d'acceptabilité avec un niveau de confiance de 90% formuler deux équations représentant les limites supérieure et inférieure d'acceptabilité à 90%.

Les deux équations formulées sont les suivantes :

$$T\text{-neutre} = 0.33T_o + 22.46$$

$$T_n\text{- neutre} = 0.33T_o + 17.8$$

Effectivement, la première équation représente les limites supérieures de confort adaptatif, tandis que la deuxième équation représente les limites inférieures de confort adaptatif dans le modèle adaptatif. Ces équations permettent d'estimer la température de confort adaptatif en fonction de la température extérieure, en déterminant les valeurs maximales et minimales acceptables pour le confort thermique dans la région étudiée. (Bassoud et al., 2021) .

1.3.5 Indice Climatique Thermique Universel UTCI

Récemment, dans les domaines de l'urbanisme, de la bioclimatologie et du changement climatique, une grande ampleur a été observée dans les recherches concernant des outils efficaces pour l'évaluation du confort thermique dans les espaces extérieurs. L'évaluation thermique de l'environnement est le sujet principal de la recherche en bioclimatisme. Pour cela, plus de 100 indices simples d'évaluation thermique ont été développés pour faciliter cette tâche. Cependant, la plupart de ces indices ont montré des limites dans leur application et ne parviennent pas à exposer les impacts réels des conditions thermiques sur l'être humain. Tandis que les indices issus de la balance thermique de l'être humain ont prouvé une plus grande efficacité pour l'impact de l'environnement thermique sur les conditions de confort. (Krüger, 2021)

Dans le but de créer un indice thermique universel, la Société Internationale de Biométéorologie (ISB) a constitué une commission en 1999. Cette initiative s'est basée sur les recherches les plus avancées dans le domaine des modèles thermophysiques. À partir de 2005, ces efforts ont été renforcés par l'action 730 de COST (coopération scientifique et du développement scientifique),

une organisation européenne. Ces deux entités ont mobilisé des experts internationaux spécialisés en thermophysologie humaine, en modélisation physiologique, en météorologie et en climatologie afin de collaborer au développement de cet indice (Jendritzky et al., 2007, p. 730). En 2009, leurs travaux ont abouti à la création de l'indice climatique thermique universel, représentant une avancée majeure dans ce domaine.

En se basant sur l'équation de la balance thermique du corps humain avec son environnement, le processus de développement de l'indice a débuté en suivant le pionnier des modèles thermo physiologiques (Stolwijk, 1971). Après cela, plusieurs modèles ont été développés (Fiala et al., 1999; Huizenga et al., 2001; Jendritzky et al., 2002) Pour créer la base de l'UTCI, le modèle avancé multi-nodal de Fiala a été sélectionné et une validation extensive des modèles thermophysologiques a été effectuée. Ce modèle a été combiné avec un modèle d'habillement adaptatif qui prend en considération les habitudes et les changements d'habillement d'un large groupe de population urbaine suivant les variations de température de l'environnement.

L'UTCI a été développé conceptuellement en tant que température équivalente. Cela signifie que pour chaque combinaison de température, de vitesse de l'air, de radiation et d'humidité, l'UTCI est défini comme la température de l'air dans les conditions de référence qui provoquerait la même réponse dynamique du modèle physiologique. Le tableau ci-dessous décrit les différentes plages de l'Indice Climatique Thermique Universel (Union of Physiological Sciences-Thermal Commission, 2003).

Tableau 4: Plage UTCI catégorisé termes de stress thermique.

Plage UTCI (°C) Catégorie de stress	Plage UTCI (°C) Catégorie de stress
Au-dessus de +46 stress thermique extrême	Au-dessus de +46 stress thermique extrême
+38 à +46 stress thermique très élevé	+38 à +46 stress thermique très élevé
+32 à +38 stress thermique élevé	+32 à +38 stress thermique élevé
+26 à +32 stress thermique modéré	+26 à +32 stress thermique modéré

+9 à +26 aucun stress thermique	+9 à +26 aucun stress thermique
+9 à 0 stress léger dû au froid	+9 à 0 stress léger dû au froid
0 à -13 stress modéré dû au froid	0 à -13 stress modéré dû au froid
-13 à -27 stress élevé dû au froid	-13 à -27 stress élevé dû au froid
-27 à -40 stress très élevé dû au froid	-27 à -40 stress très élevé dû au froid
En dessous de -40 stress extrême dû au froid	En dessous de -40 stress extrême dû au froid

1.4 Le confort visuel

1.4.1 Introduction sur le confort visuel

Habituellement, l'être humain perçoit le plus grand nombre d'informations par le biais de la vue, c'est pourquoi la lumière joue un rôle crucial en permettant de discerner les formes, les couleurs et les perspectives des objets dans un environnement donné.

Par conséquent, pour assurer le bien-être visuel des occupants d'un environnement intérieur donné, l'éclairage doit remplir trois fonctions principales :

- Garantir la sécurité des personnes dans l'environnement.
- Favoriser la réalisation de tâches visuelles.
- Contribuer à la création d'un environnement visuel adéquat.

Ainsi, le confort visuel peut être défini comme l'état de bien-être subjectif résultant de l'environnement visuel (12665 2002). Cette définition suggère que, bien que le confort visuel soit une expérience subjective, certaines caractéristiques physiques de l'environnement visuel peuvent être utilisées pour l'évaluer de manière objective (Frontczak & Wargocki, 2011). Les principaux paramètres qui déterminent le confort visuel dans un environnement sont notamment la distribution de la luminance, l'éclairement et son uniformité, l'éblouissement, la couleur de la lumière, le rendu des couleurs, la fréquence de scintillement et la quantité de lumière naturelle (Carlucci et al., 2015).

De plus, confort visuel désigne une sensation personnelle de bien-être résultant de la quantité, la qualité et la répartition de la lumière dans l'environnement visuel. Un éclairage inadéquat, qu'il soit trop faible, trop fort, mal réparti ou mal adapté au spectre lumineux, peut causer de la fatigue, des troubles visuels, une sensation d'inconfort et réduire la performance visuelle. Le confort visuel dépend de divers paramètres physiques tels que l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux, mais également de caractéristiques environnementales et des tâches à accomplir. Le confort visuel est également influencé par des facteurs individuels tels que l'âge, l'acuité visuelle et la possibilité de regarder à l'extérieur. (Atzeri, 2017)

1.4.2 Paramètres qui influent le confort visuel

Dans la section suivante, plusieurs paramètres importants qui peuvent avoir une influence directe sur le confort visuel sont présentés.

1.4.2.1 Niveau d'éclairage

L'éclairage, quant à lui, est une grandeur qui permet de mesurer la quantité de lumière incidente reçue par une surface donnée. Cette mesure est exprimée en lux (lx), correspondant à un lumen par mètre carré de surface éclairée (ILV, 2020). L'éclairage est un paramètre essentiel à prendre en compte dans l'évaluation du confort visuel, car il influence directement la perception de l'environnement visuel par les individus. Une augmentation de l'éclairage entraîne généralement une meilleure visibilité et une réduction de la fatigue oculaire, favorisant ainsi le confort visuel. De plus, la quantité d'éclairage nécessaire peut varier en fonction des activités effectuées dans l'espace considéré, ainsi que des caractéristiques visuelles des individus.

Les normes britanniques (BREEAM, 2014) établissent des niveaux d'éclairage optimaux en fonction du type d'environnement (bureaux, écoles, hôpitaux, etc.) et de l'activité exercée à l'intérieur. Pour obtenir des niveaux d'éclairage adéquats de manière économe en énergie, l'utilisation de la lumière du jour est la solution la plus appropriée. Le niveau d'éclairage fourni par la lumière naturelle dépendra des propriétés physiques de l'environnement, comme le nombre, la conception et l'orientation des fenêtres, les coefficients de réflexion de la lumière, etc. Toutefois, dans certains cas, l'utilisation exclusive de la lumière naturelle ne permet pas d'atteindre le niveau d'éclairage optimal, et un éclairage artificiel est alors nécessaire (Kim & Kim, 2010).

1.4.2.2 Luminance

La luminance peut être définie comme la mesure de la luminosité perçue d'une surface donnée. Elle est quantifiée en termes de la quantité de lumière visible émise ou réfléchie par unité de surface et par unité d'angle solide dans une direction spécifique (ILV, 2020). La perception de la luminosité est étroitement liée à la sensibilité de l'œil humain à la lumière, qui est influencée par l'intensité lumineuse et la longueur d'onde de la lumière. Par conséquent, la luminance d'une surface dépend de plusieurs facteurs, tels que l'éclairage ambiant, la réflectance de la surface, la géométrie de la surface et l'angle de vision.

Dans la conception architecturale, il est essentiel de prendre en compte la luminance pour assurer un environnement visuel agréable et confortable. Des niveaux de luminance inappropriés peuvent entraîner une perception visuelle altérée, une fatigue oculaire accrue et un inconfort visuel pour les occupants. Ainsi, les concepteurs doivent viser à atteindre des niveaux de luminance adéquats en fonction des tâches visuelles requises dans chaque espace, ainsi que des besoins spécifiques des utilisateurs (Fakhari et al., 2021).

1.4.2.3 L'éblouissement

Le confort visuel peut être altéré par l'éblouissement, qui est caractérisé par une sensation de gêne ou une diminution de la capacité à voir les détails ou les objets. Cette situation est souvent causée par une mauvaise distribution ou une plage de luminance inadaptée, ou encore des contrastes très marqués. Bien qu'il existe plusieurs indices pour évaluer le confort visuel altéré par l'éblouissement, les plus couramment utilisés sont l'indice de notation unifié de l'éblouissement (UGR) et l'indice d'éblouissement diurne (DGI). (Sala et al., 1999)

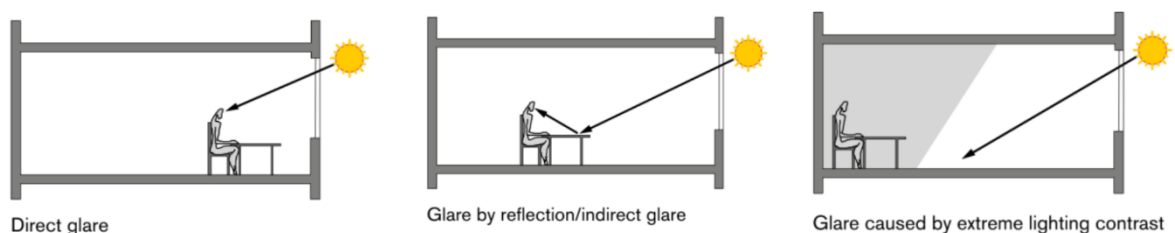


Figure 20: Types de l'éblouissement dans l'intérieur du bâtiment (Knaack & Koenders, 2018)

1.4.2.4 Le rendu des couleurs

Le rendu des couleurs est un aspect crucial du confort visuel, car il affecte la capacité de notre vision à percevoir les couleurs des objets et de la peau humaine dans un environnement donné. Pour évaluer la qualité de rendu des couleurs d'une source lumineuse, on utilise l'indice de rendu des couleurs (IRC), qui est une mesure quantitative allant de 0 à 100. Pour garantir un rendu de couleurs de qualité, il est recommandé d'utiliser des sources lumineuses avec un IRC supérieur à 80 dans les espaces intérieurs où les gens passent beaucoup de temps. L'utilisation de sources lumineuses avec un IRC inférieur à 80 peut causer une altération de la perception des couleurs et affecter négativement le confort visuel (Japanese Standards Association, 1990).

1.4.3 Les outils d'évaluation du confort visuel

1.4.3.1 Les instruments de mesure du confort visuel

Les appareils d'évaluation sont des outils de mesure qui permettent d'évaluer quantitativement différents aspects du confort visuel dans les bâtiments. Ces outils sont utilisés pour mesurer la qualité de la qualité de l'éclairage et pour vérifier que les normes de confort visuel sont respectées (Marty et al., 2003). Parmi les exemples d'appareils d'évaluation, on trouve :

Luxmètre : un instrument de mesure utilisé pour mesurer la quantité de lumière dans une zone donnée en unités de lux. Le luxmètre est souvent utilisé pour mesurer l'éclairement des surfaces éclairées artificiellement dans les bâtiments (McCluney, 2014).

Colorimètre : un instrument de mesure utilisé pour quantifier la couleur de la lumière, notamment la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs (IRC). Le colorimètre est souvent utilisé pour évaluer la qualité de la lumière dans les bâtiments, notamment pour s'assurer que la lumière est de la bonne couleur et que les couleurs des objets sont rendues de manière naturelle (Judd, 1950).

Photomètre : un instrument de mesure utilisé pour mesurer la quantité totale de lumière qui atteint une surface donnée, souvent utilisé pour évaluer l'éclairage extérieur. Le photomètre mesure la lumière dans toutes les directions autour d'un point donné, ce qui permet de calculer l'éclairement moyen sur une surface donnée (Draper, 1861).

Goniophotomètre : un instrument de mesure utilisé pour mesurer la distribution spatiale de la lumière d'une source lumineuse. Le goniophotomètre permet de mesurer la lumière dans toutes les

directions autour d'une source lumineuse, ce qui permet de caractériser précisément la distribution de la lumière dans l'espace (Marx, 1997).

Spectroradiomètre : un instrument de mesure utilisé pour mesurer la quantité de lumière émise par une source lumineuse à différentes longueurs d'onde. Le spectroradiomètre permet de caractériser précisément la couleur de la lumière et de mesurer l'efficacité énergétique des sources lumineuses (Schneider et al., 2022).



Figure 21 : Instruments d'évaluation de confort visuel (Source : Auteur)

1.4.3.2 Simulation numérique

La simulation numérique est une méthode de calcul informatique qui permet de simuler le comportement de la lumière dans un espace donné. Elle est de plus en plus utilisée pour évaluer le confort visuel et les performances énergétiques dans les bâtiments. Ces outils de simulation numérique permettent de prédire avec précision l'éclairage, le rendu visuel et la consommation énergétique d'un espace donné en fonction des caractéristiques de la source lumineuse, des matériaux et de l'agencement de l'espace.

Plusieurs logiciels spécialisés sont utilisés pour réaliser ces simulations. Radiance est utilisé afin de modéliser et simuler l'éclairage naturel et artificiel dans les bâtiments. Dialux permet à son tour de calculer la distribution de la lumière naturelle et artificielle dans une pièce ou un bâtiment. Relux, quant à lui, est un autre logiciel de simulation d'éclairage intérieur et extérieur qui permet de calculer la distribution de la lumière dans un espace donné en fonction des caractéristiques de

la source lumineuse, des matériaux et de l'agencement de l'espace. Enfin, AGi32 est un logiciel de simulation d'éclairage intérieur et extérieur permettant de modéliser l'éclairage naturel et artificiel dans les bâtiments (Ahmad et al., 2020).

EnergyPlus est un autre logiciel de simulation énergétique qui permet d'évaluer la performance thermique et visuelle d'un bâtiment en prenant en compte les systèmes de chauffage, de ventilation, de climatisation, d'éclairage et d'ombrage (Crawley et al., 2001) . DIVA-for-Rhino est un plug-in pour Rhino qui permet de simuler l'éclairage naturel et artificiel dans les bâtiments et d'évaluer la qualité visuelle et énergétique de l'espace. Ces logiciels sont couramment utilisés par les professionnels de l'éclairage, de l'architecture et de l'ingénierie pour évaluer le confort visuel et les performances énergétiques dans les bâtiments et optimiser leur conception (Ahmad et al., 2020). La figure ci-dessous illustre un exemple de diagramme d'un processus de simulation de la lumière du jour.

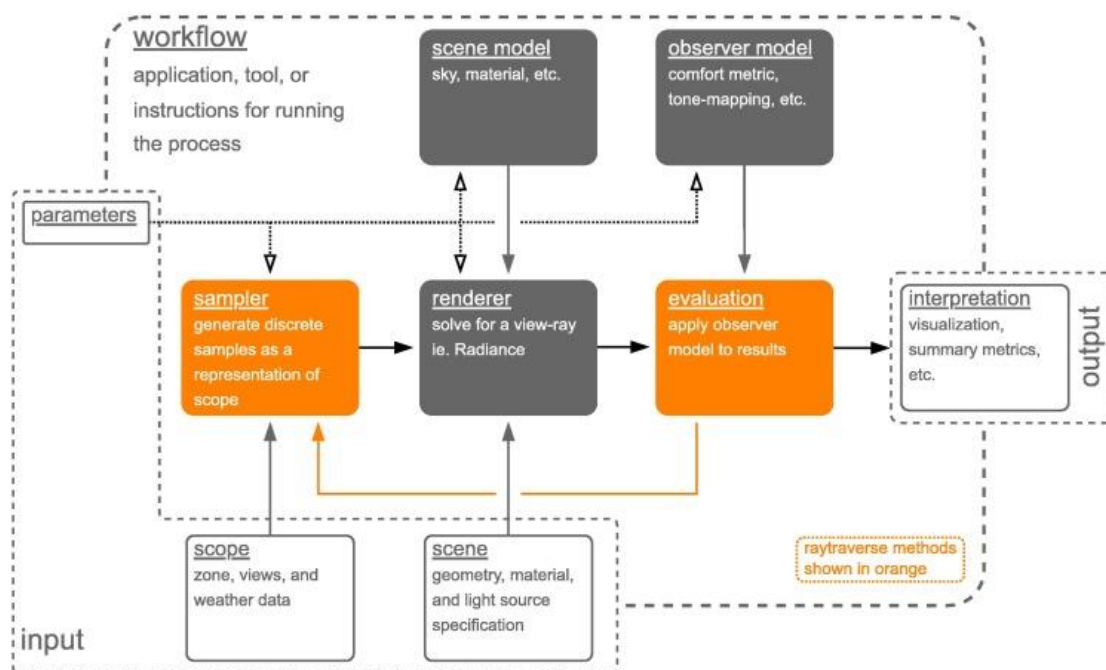


Figure 22 :Exemple de processus de simulation de la lumière du jour (Wasilewski et al., 2022)

1.4.4 Les normes internationales du confort visuel

En général, la majorité des recherches dans la littérature visent à créer une condition de confort visuel optimale en observant les niveaux d'éclairement recommandés par les normes internationales.

1.4.4.1 BREEAM

BREEAM, acronyme de Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology, est une méthode d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments. Il s'agit d'une norme britannique développée pour la première fois en 1990 par le Building Research Establishment, et qui s'est depuis étendue dans le monde entier (BREEAM - BRE Group, 2022). BREEAM est une norme très complète qui prend en compte de nombreux aspects de la construction et de l'exploitation des bâtiments. Elle couvre un éventail de catégories, y compris le confort visuel, qui comprend l'évaluation de l'éclairage naturel et de l'éclairage interne. Les critères BREEAM pour le confort visuel visent à garantir que les occupants des bâtiments ont accès à de bons niveaux de lumière naturelle et que l'éclairage artificiel est conçu pour minimiser la consommation d'énergie tout en fournissant des niveaux d'éclairage appropriés. L'évaluation prend en compte des facteurs tels que la taille et la position des fenêtres, l'utilisation de dispositifs d'ombrage et le contrôle de l'éclairage artificiel. En respectant les normes BREEAM pour le confort visuel, les concepteurs de bâtiments peuvent créer des espaces à la fois économes en énergie et confortables pour les occupants. Le tableau ci-dessus représente les niveaux d'éclairement requis par la norme BREEM pour les bâtiments résidentiels.

Tableau 5 : Niveaux d'éclairement requis par la norme BREEM (Giarma et al., 2017)

Type de zone	Surface minimale à respecter			Eclairement moyen de la lumière du jour (moyenné sur l'ensemble de l'espace)	Eclairement minimum de la lumière du jour au point le plus sombre
	Crédit 1	Crédit 2	Crédit 3		
Bâtiments multi-résidentiels					
Cuisines	50%	75%	100%	Au moins 100 lux pendant 3450 heures par an ou plus	Au moins 30 lux pendant 3450 heures par an ou plus

Salons, salles à manger, bureaux (y compris les bureaux à domicile)	40%	60%	80%	Au moins 100 lux pendant 3450 heures par an ou plus	Au moins 30 lux pendant 3450 heures par an ou plus
---------------------------------------------------------------------	-----	-----	-----	-----------------------------------------------------	----------------------------------------------------

1.4.4.2 LEED

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) est un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments largement utilisé, développé par le U.S. Green Building Council, couvre un large éventail de catégories, y compris l'éclairage naturel et artificiel. Les critères LEED pour l'éclairage visent à encourager la conception de bâtiments qui maximisent l'utilisation de la lumière naturelle et minimisent la consommation d'énergie liée à l'éclairage artificiel. L'évaluation prend en compte des facteurs tels que la conception des fenêtres, l'utilisation de dispositifs d'ombrage et le contrôle de l'éclairage artificiel. En respectant les normes LEED pour l'éclairage, les concepteurs de bâtiments peuvent créer des espaces qui sont à la fois économes en énergie, confortables pour les occupants et respectueux de l'environnement. Le tableau ci-dessous décrit les critères d'évaluation du LEED.

Tableau 6: Tableau des critères d'évaluation du confort visuel dans LEED. (Giarma et al., 2017)

Critères d'évaluation du confort visuel dans LEED	Axes principaux	Type de critères	Référence
Qualité de l'éclairage	Fourniture de contrôle de l'éclairage	Principalement descriptif, avec quelques éléments quantitatifs (par exemple, au moins trois niveaux d'éclairage, etc.)	Fenêtres et bureaux ; Une étude sur la performance des travailleurs de bureau et l'environnement intérieur
	Fourniture d'une qualité d'éclairage adéquate	Principalement quantitatif avec quelques éléments descriptifs (IRC des sources lumineuses, durée de vie nominale des sources lumineuses, réflectance de surface, etc.)	

1.4.5 Les indicateurs du confort visuel

Les indicateurs du confort visuel sont utilisés dans le domaine du bâtiment afin d'évaluer la performance de la lumière du jour dans un espace donné. Ils permettent de quantifier et d'analyser l'utilisation de la lumière naturelle dans la conception des bâtiments, en mettant un accent particulier sur le confort visuel des occupants. Ces métriques sont largement employées par les concepteurs de bâtiments afin d'évaluer et d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle dans les espaces intérieurs.

1.4.5.1 Eclairage du jour utile

L'UDI est une mesure de la disponibilité de la lumière du jour, correspondant au pourcentage de temps pendant lequel un point d'un espace atteint la plage cible d'éclairements par la lumière du jour. L'UDI est défini comme les éclairements compris entre 100 et 2000 lx (Nabil & Mardaljevic, 2006). La plage utilisée pour définir les limites de l'éclairage utile en lumière du jour est basée sur une revue complète des données issues d'études de terrain sur le comportement des occupants dans des conditions éclairées par la lumière du jour.

Dans une recherche de (Mardaljevic et al., 2009) a subdivisé L'UDI en plusieurs sous-catégories en fonction de différentes plages d'éclairage :

- UDI-fell-short (UDI-f) : L'éclairage est inférieur à 100 lux.
- UDI-supplémentaire (UDI-s) : L'éclairage est supérieur à 100 lux et inférieur à 300 lux.
- UDI-autonome (UDI-a) : L'éclairage est supérieur à 300 lux et inférieur à 3 000 lux.
- UDI-combiné (UDI-c) : L'éclairage est compris entre 100 lux et 3 000 lux.
- UDI-dépassé (UDI-e) : L'éclairage est supérieur à 3 000 lux.

Ces sous-catégories fournissent des informations détaillées sur la disponibilité de la lumière du jour dans un espace, permettant d'identifier les zones nécessitant un éclairage supplémentaire ou où la lumière du jour peut être excessive, causant des problèmes tels que l'éblouissement ou la surchauffe.

L'UDI est utilisé pour évaluer la disponibilité de la lumière du jour dans les bâtiments et pour concevoir des espaces qui maximisent son utilisation tout en minimisant les problèmes d'éblouissement et de surchauffe. Il peut être calculé à l'aide de logiciels de simulation énergétique tels qu'EnergyPlus™ ou à l'aide d'outils et de plugins comme Radiance.

1.4.5.2 L'autonomie en lumière du jour (DA)

L'autonomie de la lumière du jour en anglais « daylight autonomy » (DA) est une métrique de disponibilité de la lumière du jour qui correspond au pourcentage du temps occupé lorsque l'éclairement ciblé à un point dans un espace est atteint par la lumière du jour. Elle est représentée comme un pourcentage des heures diurnes annuelles où un point donné dans un espace est au-dessus d'un niveau d'éclairement spécifié. Elle prend en compte les informations météorologiques spécifiques à la localisation géographique sur une base annuelle. Elle a également le pouvoir de se rapporter aux économies d'énergie d'éclairage électrique si le l'appui de la fenêtre défini par l'utilisateur est fixé en fonction des critères d'éclairage électrique (Mardaljevic et al., 2009).

1.5 Conclusion

Le présent chapitre portant sur le confort thermique et visuel dans les bâtiments a abordé les aspects essentiels du confort thermique et visuel selon leurs différentes facettes. Les facteurs influençant le confort thermique, tels que le métabolisme, l'habillement, la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité relative et la température radiative moyenne, ont été examinés tout au long du chapitre. Les modèles d'évaluation du confort thermique, tels que les méthodes PMV/PPD et la théorie du confort adaptatif, ont été explorés. Également les modèles adaptatifs régionaux ont été abordés, notamment le modèle adaptatif régional de la région Adrar, qui peut être utilisé pour évaluer les performances thermiques dans les stratégies vernaculaires de la région des Ziban.

Le outre, une attention particulière a été portée au confort visuel, en analysant des notions tels que le niveau d'éclairement, la luminosité, l'éblouissement et le rendu des couleurs. Les outils d'évaluation du confort visuel, y compris les instruments de mesure et les simulations numériques, ainsi que les normes internationales telles que BREEM et LEED, ont été examinés. Par ailleurs, les indicateurs de confort visuel comme l'éclairement du jour utile et l'autonomie de la lumière du jour ont été présentés.

Un point essentiel est à souligner dans ce chapitre, celui de l'impact de l'ouverture sur le confort thermique et visuel du bâtiment. Il a été noté que l'incorporation d'ouvertures pour favoriser la pénétration de la lumière naturelle peut entraîner une augmentation des transferts de chaleur, compromettant ainsi le confort thermique des occupants. Toutefois, en ajustant la taille, la disposition et les caractéristiques de ces ouvertures, un équilibre satisfaisant peut être atteint.

Chapitre 2. STRATÉGIES ADAPTÉES AU CLIMAT CHAUD ET ARIDE

2.1 Introduction

Depuis des millénaires, l'adaptation de l'homme aux rigueurs de son environnement a été tentée à travers la création d'un habitat adapté à ses circonstances et l'application de différentes méthodes, depuis la construction de la hutte, née de la force du contexte de son environnement, jusqu'aux habitations fortifiées à multi-étages de la ville de Shibam au Yémen.

L'influence de l'environnement dans l'architecture vernaculaire ne se limite pas qu'au niveau architectural, mais aussi s'étend à l'échelle urbaine. Une synergie entre les dimensions urbaine et architecturale est créée, permettant ainsi la création d'un microclimat local à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, adapté aux différentes variations climatiques au cours de toute l'année.

Dans un climat chaud et aride où les radiations solaires sont extrêmes et l'humidité réduite, les températures peuvent excéder les 45°C durant la saison estivale. Dans ce contexte, l'architecture vernaculaire a été la réponse générée par les bâtisseurs locaux en voulant s'adapter à cet environnement hostile avec des moyens souvent rudimentaires. Les constructeurs de ces bâtiments ont tenté de répondre aux exigences extrêmes d'hiver et d'été, de jour comme de nuit, dans le but de créer un environnement intérieur assurant des conditions de confort thermique acceptable.

Ce chapitre explore différents types de climats chauds. Les stratégies de conception qui en découlent sont exposées, mettant en évidence les techniques et dispositifs utilisés.

2.2 Les zones chaudes et arides

Les zones chaudes et arides ou désertiques, où la végétation est rare et le sol est souvent salé, sont réparties dans le monde entier. 15 % de la population mondiale vit dans ces zones et un tiers de la masse terrestre est constitué de zones arides.

Selon la classification des climats la plus connue dans le monde, "The Köppen climate classification", publiée par le climatologue Wladimir Köppen, le climat chaud et aride est symbolisé par "Bh". La lettre B symbolise l'aridité en tant que climat principal (principaux climats), tandis que la lettre H symbolise la température du climat (température h : chaude et sèche). Ce climat se divise principalement en deux types : le désertique et le steppique (Laity, 2009). La Figure 23 indique la classification des types de climats dans le monde selon Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006) .

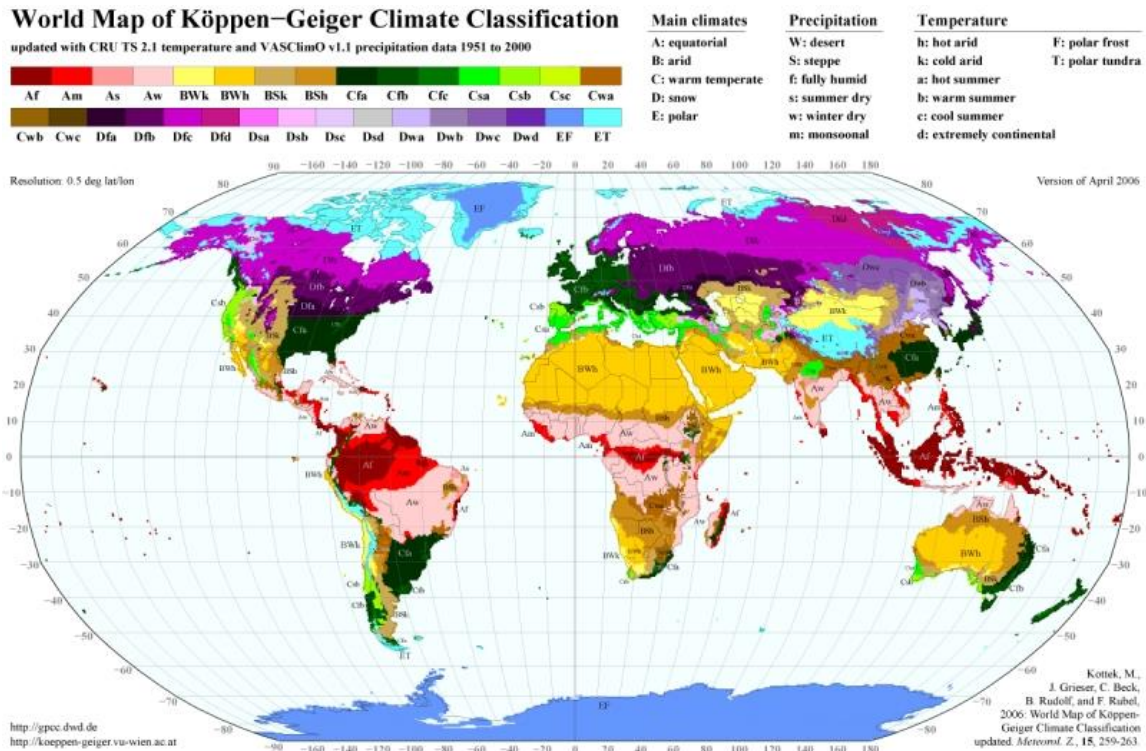


Figure 23: Carte mondiale de la classification climatique Koppen-Geiger (Source: Kottek et al., 2006) .

2.2.1 Le climat chaud aride désertique (Bhw)

Les zones désertiques sont des zones où la température est élevée la plupart de l'année et extrêmement chaude en été. La majeure partie de ces zones se situe généralement sous les latitudes subtropicales nord, entre 20 et 33 degrés. En raison de l'air stable et de la haute pression, des conditions chaudes et sèches se créent. Les régions dans le monde qui possèdent un climat chaud et aride désertique sont le nord de l'Afrique, le Moyen-Orient, le nord-est du sous-continent indien, l'intérieur de l'Australie, une petite partie des États-Unis et du Chili. La Figure 24 indique les zones chaudes et arides désertiques dans le monde. ('Desert Climate', 2019 ; Peel et al., 2007) .

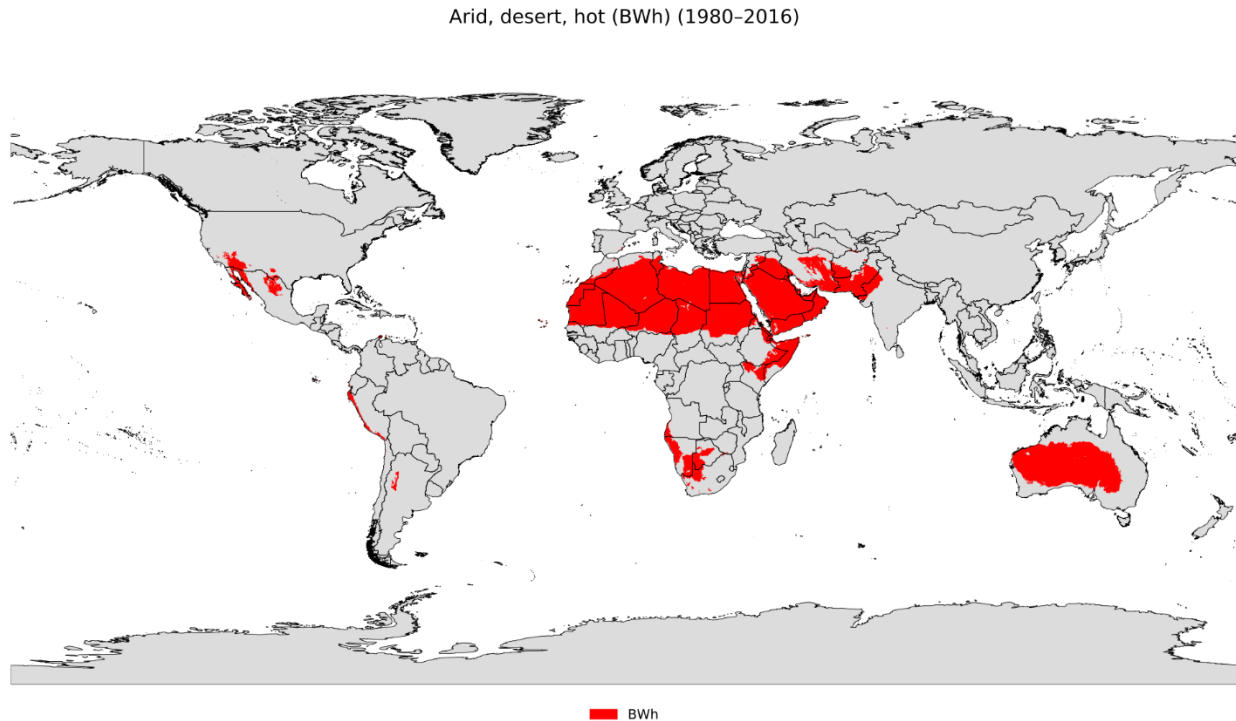


Figure 24: Régions chaudes et arides (désertiques) dans le monde entre 1980 et 2016 Source : (Beck et al., 2018)

2.2.2 Le climat chaud aride steppique ou chaude semi-aride (Bhs)

Le climat semi-aride, ou le climat chaud steppique, se trouve généralement aux limites des régions désertiques, généralement entre les latitudes 20 et 30 des tropiques et des subtropiques, à proximité des régions présentant des climats de savane tropicale, méditerranéenne et de désert chaud. Ces climats ont des étés chauds, parfois extrêmement chauds, et des hivers doux à frais, avec peu ou pas de précipitations. Il est généralement considéré comme une transition entre les climats secs et humides. Les zones chaudes et semi-arides se trouvent en Afrique, en Australie et dans le sud de l'Asie. Les zones chaudes semi-arides peuvent également se trouver en Europe, comme dans le sud de l'Espagne, et en Amérique, comme au Mexique et dans le sud des États-Unis. La Figure 25 indique les zones chaudes et semi-aride dans le monde (Beck et al., 2018; 'Semi-Arid Climate', 2023).

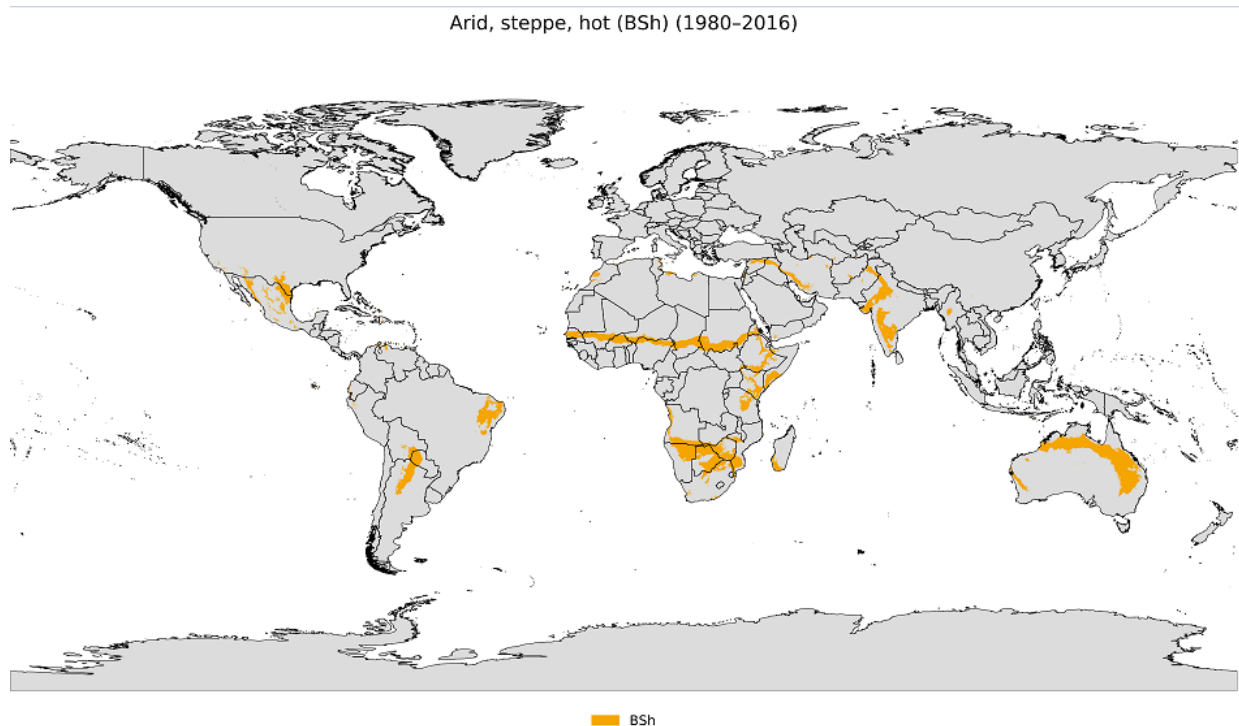


Figure 25 : Carte des régions semi arides Source : (Beck et al., 2018)

2.3 Stratégies architecturales et urbaines des zones chaudes et arides

En raison des défis climatiques uniques mentionnés précédemment, les stratégies vernaculaires passives architecturales et urbaines ont suscité un intérêt croissant dans le domaine de l'architecture durable. Elles offrent des solutions innovantes en exploitant les caractéristiques naturelles de ces environnements, telles que l'ombrage et la ventilation naturelle. Dans la suite de ce chapitre, ces stratégies seront présentées en détaillant leur mode de fonctionnement.

2.3.1 Stratégies Urbaines

Durant des millénaires, les habitants de différentes cultures vivant dans des zones climatiques similaires ont trouvé des solutions urbaines adaptées à leur environnement. Même si leurs constructions présentent des différences esthétiques, elles ont des similarités fonctionnelles et environnementales. Le climat joue un rôle crucial dans la composition des formes et des tissus urbains.

2.3.1.1 Ombrage

Comme mentionné précédemment, en plus des températures élevées en été, les zones chaudes et arides présentent un potentiel en radiation solaire gigantesque, ce qui conduit à l'accroissement de la température des surfaces extérieures et intérieures par l'effet de radiation thermique. Cela peut conduire à l'effet d'inconfort au niveau urbain et architectural. C'est pourquoi l'ombrage représente l'une des stratégies principales pour procurer le confort thermique dans ces zones chaudes et arides. Plusieurs études ont prouvé l'effet positif de l'ombrage sur le confort thermique des usagers dans les espaces urbains, ainsi que la préférence des usagers pour les espaces ombragés en été par rapport aux espaces exposés aux rayons solaires.

(Shashua-Bar et al., 2008) ont mené une expérimentation pour voir l'effet de l'ombrage sur le confort thermique dans la zone chaude et aride de Néguev. Ils ont comparé différents environnements selon plusieurs paramètres d'exposition aux rayons solaires. Les résultats ont prouvé que l'ombrage procuré par des éléments physiques comme la végétation ou le maillage d'ombrage peut réduire jusqu'à 50 % d'inconfort thermique pour les usagers de l'espace extérieur. (Bourbia & Awbi, 2004) ont travaillé sur deux types de rues dans la ville de l'Oued, qui représente une zone chaude et aride au sud de l'Algérie. Les deux types de rue (traditionnelle et contemporaine) ont été comparés pour savoir l'effet de l'ombrage créé par la configuration urbaine sur la température de surface. Le résultat a prouvé que la différence de température de surface entre les surfaces exposées et non exposées aux rayonnements solaires peut être jusqu'à 10 °C. Et vu que la température de l'air est influencée par les températures radiatives des façades voisines, l'ombrage mutuel des bâtiments créé par la configuration urbaine a une influence sur les températures de l'air qui peuvent baisser jusqu'à 6 °C. (Zhao et al., 2018) ont effectué une étude sur l'effet de l'ombrage des arbres sur la réduction de la température dans la zone chaude et aride de Tempe, Arizona, aux États-Unis, en comparant 10 densités de végétation différentes. Le résultat a prouvé qu'un seul arbre au sud d'un bâtiment peut réduire jusqu'à 2,3 °C la température de la façade, et que deux groupes d'arbres peuvent réduire jusqu'à 6,6 °C la température de refroidissement. (Johansson, 2006) a travaillé sur la zone chaude et aride de la ville de Fès en comparant deux types de ruelles avec une différence d'épaisseur. Le résultat a prouvé que les ruelles étroites peuvent procurer un meilleur microclimat en été, mais peuvent créer des sensations inconfortables en hiver à cause de la réduction d'accès aux rayons solaires. Toutes ces études

confirment l'effet remarquable de la stratégie vernaculaire passive de l'ombrage dans les régions chaudes et arides.

2.3.1.2 Réflectivité solaire

Dans les climats chauds et arides, où la réception de radiation solaire par les surfaces peut jouer un rôle crucial dans le confort thermique des usagers intérieurs et extérieurs, les constructeurs de l'architecture vernaculaire ont opté pour une stratégie consistant à choisir des matériaux avec une absorption réduite et une réflectivité plus ou moins importante, c'est-à-dire avec un albedo plus ou moins élevé. En général, cette stratégie permet de réduire la température radiante surfacique des surfaces exposées aux rayons solaires à l'extérieur du bâtiment, ainsi que de limiter la pénétration de ces radiations à l'intérieur du bâtiment.

(Alchapar & Correa, 2016) ont étudié l'effet de l'albedo sur les températures surfaciques horizontales et verticales, afin de déterminer la relation entre la réflectance des matériaux et la température de l'air. Cette étude a été menée dans la ville de Mendoza, en Argentine, en utilisant le logiciel de simulation ENVI-MET, et en simulant 18 scénarios différents en fonction de plusieurs paramètres : albedo, végétation et densité urbaine. Les résultats ont démontré que l'augmentation de l'albedo de 10% pourrait réduire la température de 0,75°C sur les surfaces horizontales. Pour illustrer les effets des surfaces sombres sur les températures, (Sharifi, 2018) ont conclu que, dans les centres urbains de certaines villes des États-Unis, les températures sont 4°C plus élevées pendant la journée et 12°C plus élevées la nuit par rapport aux zones rurales ou suburbaines. Tout cela est dû aux surfaces imperméables comme l'asphalte des rues, les trottoirs, les parkings et les toitures qui absorbent et stockent la chaleur. Ce phénomène augmente la consommation en refroidissement et réduit la qualité de vie.

De plus, pour explorer l'effet de l'albedo, (Hardin & Vanos, 2018) ont étudié l'effet du changement des types de surfaces urbaines sur l'absorption des radiations thermiques du corps humain. Cette étude a été menée pendant la période chaude dans un environnement urbain avec un facteur de vue du ciel élevé. Les résultats ont montré qu'un albedo élevé pourrait réduire l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Néanmoins, un albedo élevé pourrait ne pas améliorer le confort thermique en raison de l'augmentation de la réflectivité des surfaces, qui augmenterait les radiations réfléchies pouvant être absorbées par le corps humain. Ceci conclut l'effet des surfaces réfléchissantes urbaines pour réduire l'excès de radiation solaire dans les zones urbaines des climats chauds et arides, en tant que stratégie efficace utilisée dans l'architecture vernaculaire de ces régions. Ces études l'effet des

surfaces réfléchissantes urbaines pour réduire l'excès de radiation solaire dans les zones urbaines des climats chauds et arides, en tant que stratégie efficace utilisée dans l'architecture vernaculaire de ces régions.

2.3.1.3 Refroidissement par évaporation

L'une des stratégies urbaines qui peuvent atténuer les températures élevées dans les zones chaudes et arides est le refroidissement par évaporation. Pour réaliser cet effet physique, l'eau a besoin d'énergie qui est prélevée de l'environnement, ce qui réduit sa température. L'évaporation consiste à utiliser une chaleur latente absorbée par l'eau dans sa conversion de liquide en vapeur. Avec cette conversion, l'eau peut absorber jusqu'à 2 260 kJ/kg d'excès de chaleur. L'efficacité du refroidissement par évaporation dépend du potentiel de l'air à absorber l'humidité. Plus l'air est sec, plus cette stratégie est efficace. C'est pour cela qu'elle représente un grand potentiel dans les zones chaudes et arides. Le refroidissement par évaporation a souvent été utilisé dans les espaces extérieurs des zones chaudes et arides ou à travers la création d'une oasis à côté de l'espace urbain pour créer l'effet d'oasis (Potchter et al., 2008).

Pour explorer l'effet de l'évaporation sur l'environnement thermique des espaces extérieurs, (Vanos et al., 2022) ont mené une étude dans les espaces extérieurs de restaurants dans la ville d'Arizona, aux États-Unis. Cette étude a été construite en quatre scénarios en utilisant des brumisateurs évaporatifs. La température et la vitesse de l'air, l'humidité relative et la température du globe ont été mesurées. En complément, l'évaluation des facteurs tels que la température radiative moyenne (MRT), l'indice climatique thermique universel UTCI et la température équivalente physiologique (PET) ont été mesurés. Les résultats ont démontré que l'utilisation de l'évaporation a pu réduire la MRT de 7,6°C, ce qui signifie une réduction du PET de -6,5°C et une réduction de 4,4°C de l'UTCI. Ces réductions peuvent améliorer le confort thermique dans ces espaces extérieurs, ce qui a conduit à une meilleure rentabilité de ces restaurants. L'étude a conclu que l'utilisation de l'évaporation dans les zones chaudes et arides à une grande valeur.

Pour explorer l'effet de l'évaporation sur la réduction de la température de l'air dans les zones chaudes et arides, (Aimiwu, 1992) a mené une étude en utilisant un système de refroidissement évaporatif, construit à partir de céramique minérale cuite. Le résultat a démontré que le système évaporatif a pu réduire la température de 10,4°C en 2 heures. Cette étude souligne l'effet crucial de l'évaporation pour réduire les températures dans les zones chaudes et arides.

2.3.2 Stratégies architecturales

L'architecture vernaculaire dans les zones chaudes et arides a connu plusieurs inventions ingénieuses pour s'adapter au climat. Cette ingéniosité est issue de l'utilisation des lois de la physique du bâtiment dans le but de créer un équilibre thermique qui procure un environnement thermique plus ou moins confortable à l'utilisateur. Dans cette section, plusieurs stratégies architecturales issues de l'architecture vernaculaire seront exposées.

2.3.2.1 Inertie thermique

La plupart des zones chaudes et arides se caractérisent par des journées estivales chaudes avec des fluctuations de température, des journées avec des températures qui dépassent les 40 °C et des nuits fraîches avec des températures au-dessus de 30 °C. À la suite de ce phénomène, les constructeurs de l'architecture vernaculaire ont eu l'idée de retarder la pénétration de la chaleur jusqu'aux heures les plus froides. Ce concept a été appliqué par l'utilisation de matériaux avec une capacité thermique et une épaisseur élevée de manière à stocker cet excès de chaleur durant la journée et l'évacuer durant la nuit. Ce même concept peut procurer du confort durant les mois hivernaux par le stockage de la chaleur produite par les gains de chaleur internes. De nombreuses études ont essayé de cerner l'efficacité de l'inertie thermique dans les zones chaudes et arides. (Meir et al., 1995) ont fait une étude dans la région de Negev en comparant deux types de constructions, l'une avec une structure lourde (inertie thermique), et l'autre avec une structure légère. Le résultat a prouvé que le bâtiment avec une inertie thermique est plus efficace dans toutes les conditions climatiques. (Rais et al., 2019) ont conduit une étude dans le climat chaud et aride de la ville de Biskra, Algérie. En comparant la consommation énergétique de deux types de murs, le premier conventionnel et le deuxième avec une inertie thermique, le résultat a prouvé que le mur avec une inertie thermique peut réduire jusqu'à 12 % de la consommation en refroidissement. La Figure 26 du travail (Kamal, 2011) compare l'effet de l'inertie thermique d'un mur avec une masse thermique à celui d'un autre mur normal, le résultat montre clairement le déphasage que crée un mur avec une masse thermique.

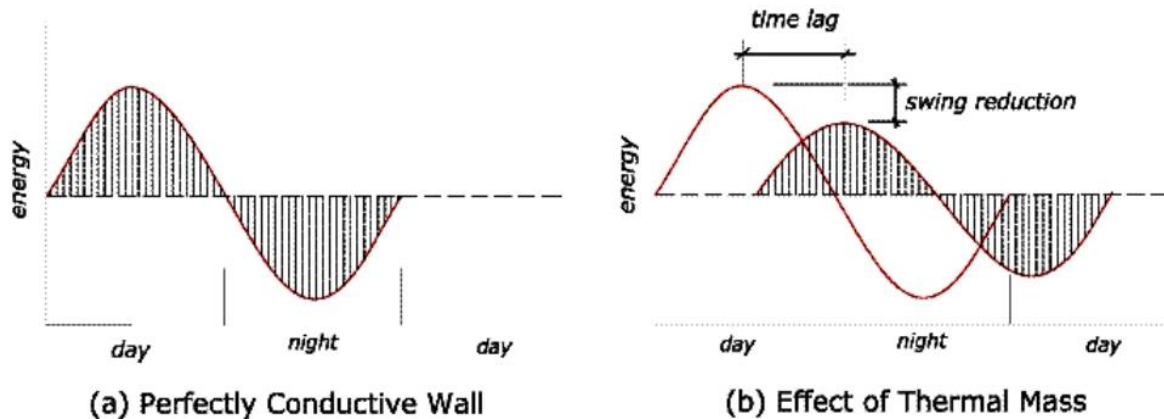


Figure 26: l'impact de l'inertie thermique source : (Kamal, 2011)

2.3.2.2 La ventilation

L'une des stratégies qui peuvent améliorer le confort thermique dans les zones chaudes et arides est la ventilation naturelle. Cette stratégie a été abondamment adoptée dans l'architecture vernaculaire de ces régions, et plusieurs techniques et dispositifs ont été créés pour l'accentuer. La ventilation nocturne permet de refroidir la structure et l'intérieur du bâtiment en dégageant l'énergie thermique stockée durant la journée par les radiations solaires et les températures élevées. La ventilation travaille en synergie avec la masse thermique qui a stocké et protégé de la chaleur journalière.

Dans le but d'explorer l'effet de la ventilation naturelle sur la sensation thermique des occupants, (Mousli, 2016) a conduit une étude dans le climat chaud et aride de la ville de Damas en Syrie. Plusieurs mesures thermiques ont été prises à l'intérieur et à l'extérieur dans la cour du bâtiment. En parallèle, un questionnaire a été administré pour évaluer la sensation de confort. Les résultats ont démontré qu'il y a une grande différence entre les espaces ventilés et non-ventilés naturellement par rapport à la sensation de confort. Les espaces ventilés disposent de 2 points de réduction en sensation thermique par rapport aux espaces non-ventilés. En été, les espaces ventilés ont 2°C de moins que les espaces non-ventilés. Cette étude souligne l'influence de la ventilation sur le confort de l'utilisateur et le microclimat des espaces.

Afin d'évaluer la ventilation comme stratégie passive dans les bâtiments résidentiels dans les climats chauds du Mexique, (Oropeza-Perez & Østergaard, 2014) ont conduit une simulation sur des modèles simplifiés de 27 logements, en comparant deux scénarios : sans et avec ventilation.

Les résultats ont démontré que les logements dans un climat chaud et aride, qui se déterminent par des matériaux avec une grande chaleur spécifique et utilisent la ventilation naturelle, ont les températures intérieures les plus basses. La ventilation naturelle peut réduire le besoin en refroidissement de 54 %. Ce qui prouve l'efficacité de cette stratégie dans un climat chaud et aride. La stratégie de ventilation dans les bâtiments, qui se base sur les lois de la physique, peut s'accomplir suivant plusieurs procédés. Le design architectural passif peut assurer la ventilation suivant deux principes :

- Le premier concerne les vents qui créent une différence de pression, résultant en un mouvement d'air entre la pression élevée et la pression faible.
- Le deuxième principe est celui de la flottabilité (buoyancy) de l'air : l'air chaud avec une densité faible remonte, ce qui est remplacé par de l'air frais. Un courant d'air frais est créé entre un espace chaud et une entrée d'air froid. La vitesse de l'air dans ce phénomène dépend de la différence de la hauteur entre les ouvertures. Le mouvement d'air augmente par l'accroissement de la hauteur entre les ouvertures. Ce phénomène physique est très utile lorsque la température extérieure est acceptable et que l'espace intérieur a besoin d'une ventilation. (Hughes & Cheuk-Ming, 2011)

2.3.2.2.1 Mouvement d'air par différence de pression

La cause principale de la création de différence de pression est l'effet Venturi, qui est basé sur le théorème de l'effet Bernoulli. Ce dernier décrit que la pression du mouvement d'un fluide se réduit dès que sa vitesse augmente. Un exemple de ce phénomène est représenté dans la Figure 27, qui montre un tube en forme d'entonnoir s'ouvrant sur un tube latéral. Lorsque l'air passe par l'entrée large, il accélère vers la partie la plus étroite avec le même volume d'air. Cette accélération de vitesse réduit la pression d'air au point A par rapport à la différence de pression au point B dans la partie inférieure du tube latéral. Ainsi, l'air est aspiré par le tube latéral grâce à la différence de pression proportionnelle au carré de la vitesse. Ce concept peut être utilisé dans les bâtiments pour produire un débit d'air constant pour la ventilation naturelle (Fathy, 1986).

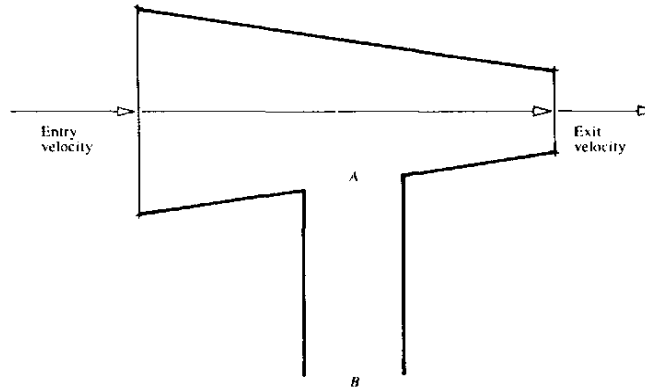


Figure 27 : Exemple de mouvement d'air par différence de pression source : (Fathy, 1986)

Dans les espaces intérieurs, le mouvement d'air causé par la différence de pression est généralement plus efficace. Ce mouvement d'air dépend davantage de la section où la pression est basse que de la section où la pression est haute. C'est pourquoi une ouverture dans une chambre ne crée pas de mouvement d'air, sauf s'il y a une sortie d'air quelque part. L'expérience a prouvé que le mouvement d'air est plus efficace si l'entrée d'air est plus petite que la sortie d'air. Ce phénomène peut être utilisé pour améliorer la ventilation dans les bâtiments. (Aflaki et al., 2015),

2.3.2.2.2 Mouvement d'air par poussé d'air (bouyancy) :

C'est un phénomène physique fondamental qui se produit lorsque la densité d'un fluide, comme l'air, varie en fonction de la température. Ce phénomène est causé par le comportement moléculaire de l'air, où les molécules d'air chaud ont plus d'énergie cinétique et se déplacent plus rapidement, écartant ainsi les molécules les unes des autres et les rendant moins densément emballées que les molécules d'air froid.

En conséquence, ce phénomène de poussée d'air peut induire un tirage thermique, qui est souvent utilisé pour créer une circulation d'air naturelle dans les bâtiments. Lorsqu'un bâtiment est conçu pour utiliser le tirage thermique, des ouvertures sont placées stratégiquement en haut et en bas de l'édifice pour permettre à l'air chaud de s'échapper par le haut, créant ainsi une dépression qui aspire de l'air frais par le bas. Cela permet de maintenir une température agréable et une bonne circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment (Hussain & Oosthuizen, 2012).

2.3.2.3 La protection solaire

Une grande partie des gains de chaleur provient des radiations solaires. Ces radiations ont le potentiel d'augmenter la température de l'air et la température radiative et peuvent même créer de l'éblouissement. Néanmoins, parfois ces radiations peuvent être bénéfiques surtout pendant les périodes froides. C'est pourquoi, dans les zones chaudes et arides, un ombrage adapté au climat doit être adéquat aux différents besoins des bâtiments au cours de l'année. De cette façon, on peut profiter des radiations solaires pendant les périodes de besoin de chaleur et réduire les effets négatifs de ces radiations pendant les périodes de besoin de refroidissement. L'ombrage peut être produit par la forme du bâtiment, une double façade ou des éléments attachés à la construction. L'étude de (Rais et al., 2019) a prouvé que les protections solaires traditionnelles peuvent réduire la consommation énergétique jusqu'à 3 % dans les zones chaudes et arides.

2.3.2.4 Refroidissement par évaporation

L'eau peut s'évaporer d'une surface humide si cette surface est exposée à une température de l'air plus élevée que la température de rosée. Le taux d'évaporation dépend généralement de la température de la surface, de l'humidité et de la vitesse de l'air environnant. Par conséquent, réduire l'humidité de l'air et/ou augmenter la vitesse de l'air peut accroître le taux d'évaporation.

Pour convertir l'eau en vapeur, l'eau a besoin d'énergie pour être transformée en vapeur. Cette énergie latente est prise à la surface humide, ce qui conduit à son refroidissement. Ce processus est appelé refroidissement adiabatique, car il n'implique pas le transfert de chaleur de l'air environnant. Par conséquent, l'air se refroidit lorsqu'il s'étend et se réchauffe lorsqu'il est comprimé, ce qui fait que la température, l'humidité et la pression de l'air changent sans que la quantité de chaleur dans l'air ne change. Ce processus est très efficace et largement utilisé dans différentes régions des zones chaudes et arides pour réduire la température et augmenter l'humidité de l'air, ce qui améliore la sensation de confort dans ces zones. (Hegger, 2011)

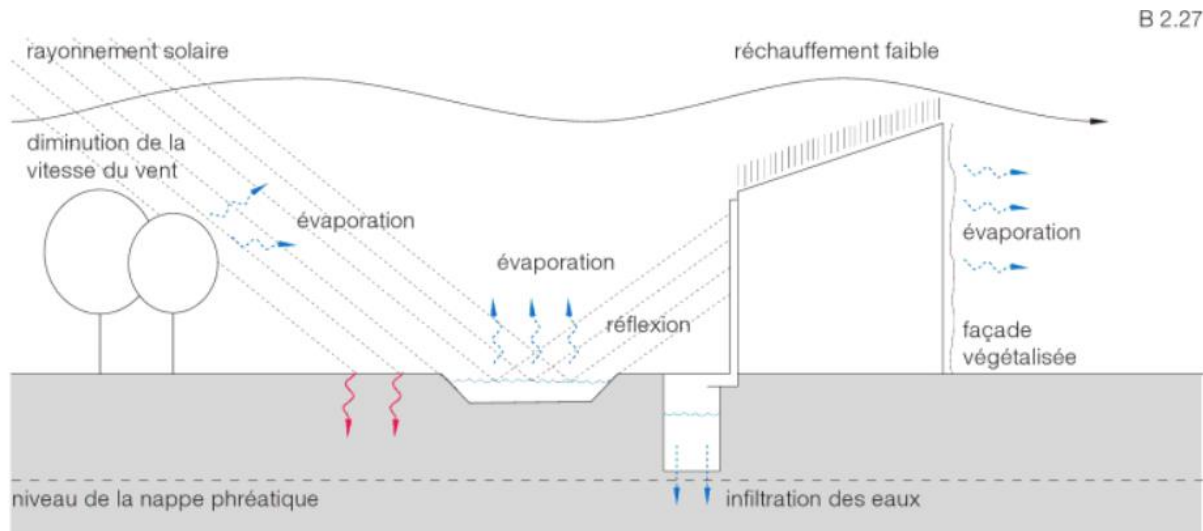


Figure 28: Eléments d'influence microclimatique et leurs effets sur les parties du bâtiment
source : (THE ENERGY BALANCE | LinkedIn, 2021)

2.3.2.5 Le nomadisme

Lorsqu'il s'agit de concevoir l'architecture en fonction des comportements des utilisateurs, les habitants de l'architecture vernaculaire adoptent l'utilisation d'espaces selon les saisons. Par exemple, des espaces protégés de la chaleur extérieure sont utilisés en été, tels que les caves, tandis que des espaces plus exposés aux radiations solaires pendant les périodes froides, tels que le premier étage, sont utilisés en hiver. Cette stratégie d'adaptation de l'agencement des espaces au niveau vertical ou horizontal du bâtiment est appelée nomadisme. Le concepteur peut l'utiliser de manière à concevoir un design répondant aux besoins fonctionnels de l'utilisateur tout en laissant l'occupant du bâtiment utiliser ses espaces à différentes périodes de l'année pour son confort (MESLI, 2017).

2.4 Techniques et dispositifs urbains

En raison du climat chaud et sec de la région, il est essentiel d'appliquer plusieurs stratégies urbaines pour concevoir un environnement adapté. Ces stratégies se traduisent naturellement en techniques et dispositifs de design urbain adaptés à ce climat. Pour atteindre cet objectif, les bâtisseurs de l'architecture vernaculaire ont suivi des principes fondamentaux : ils ont utilisé la topographie du terrain pour créer un design urbain passif, qui fonctionne toute l'année. Ils ont opté pour une orientation adéquate, qui réduit l'exposition aux rayons solaires en été. Ils ont favorisé la circulation de l'air pour assurer une ventilation efficace en été, tout en protégeant contre les vents

froids en hiver. Enfin, ils ont conçu des formes compactes pour créer de l'ombre et offrir une protection solaire.(Bodach et al., 2014),(Fathy, 1986).

2.4.1 Positionnement et configuration du terrain

Le positionnement et la topographie jouent un rôle clé dans l'amélioration du microclimat et du confort dans une zone urbaine. Ainsi, le concepteur urbain doit tenir compte de l'altitude topographique, de la géomorphologie du terrain et de l'orientation appropriée, en prenant en compte l'exposition solaire et les vents dominants dans la région chaude et aride. La conception urbaine doit être adaptée en fonction de l'emplacement sur des collines ou des pentes, dans des vallées ou sur des plaines, près ou loin des points d'eau.

2.4.1.1 Positionnement sur pentes, collines et vallées

En général, les sites en altitude sont préférables en raison de leur grande altitude qui se caractérise par une température plus basse grâce au phénomène adiabatique. En effet, chaque augmentation de 100 mètres d'altitude réduit la température d'environ 1°C, comme la montre la Figure 29 (Gut & Ackerknecht, 1993) .

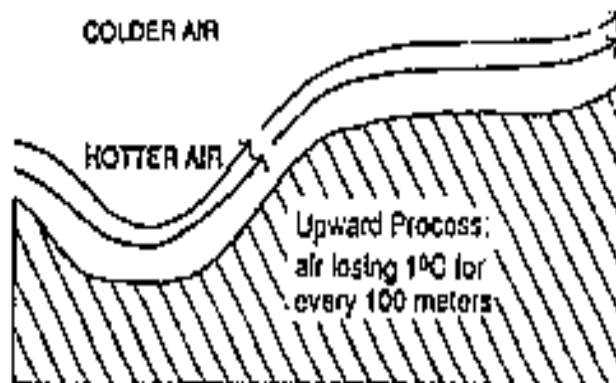


Figure 29: l'effet de l'altitude sur la température de l'air source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

2.4.1.2 Positionnement sur un terrain plat

Les zones urbaines compactes dans les régions plates ont généralement moins d'avantages que les terrains situés près de collines et de formations rocheuses, où la zone urbaine peut être intégrée pour créer un microclimat. Dans ce type de zone urbaine, Comme il est indiqué dans la Figure 30 l'introduction de la végétation est nécessaire pour refroidir l'air en passant par les zones ombragées par cette dernière (Gut & Ackerknecht, 1993). Le courant d'air est créé par le refroidissement de

l'air grâce à l'ombrage et à l'humidité des plantes ou des points d'eau. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet oasis.

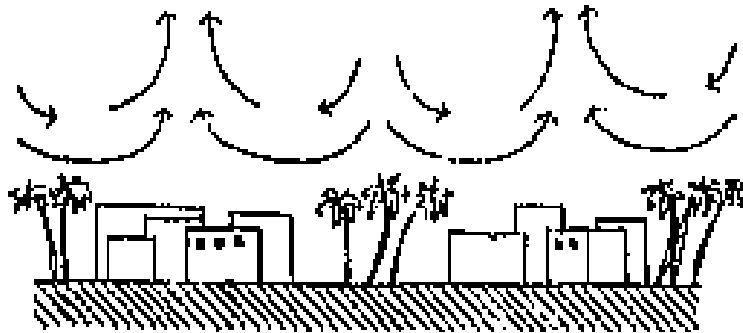


Figure 30: illustration du positionnement en terrain plat source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

2.4.1.3 Positionnement et Orientation par rapport au soleil

Les zones urbaines compactes bénéficient d'un placement stratégique à proximité de collines ombragées (au sud) pour éviter l'excès de rayonnement solaire en utilisant l'ombrage naturel (Figure 31-a) L'emplacement préféré dans un environnement chaud et aride est généralement : 1 - Nord, 2 - Est, 3 - Sud, 4 - Ouest. Cependant, ces préférences peuvent varier en fonction des conditions locales, de la topographie, de la végétation et de l'angle et de la durée d'exposition au soleil. Les fonds de vallée doivent généralement être évités (Figure 31-a b) en raison du rayonnement solaire réfléchi par les collines avoisinantes (Gut & Ackerknecht, 1993).

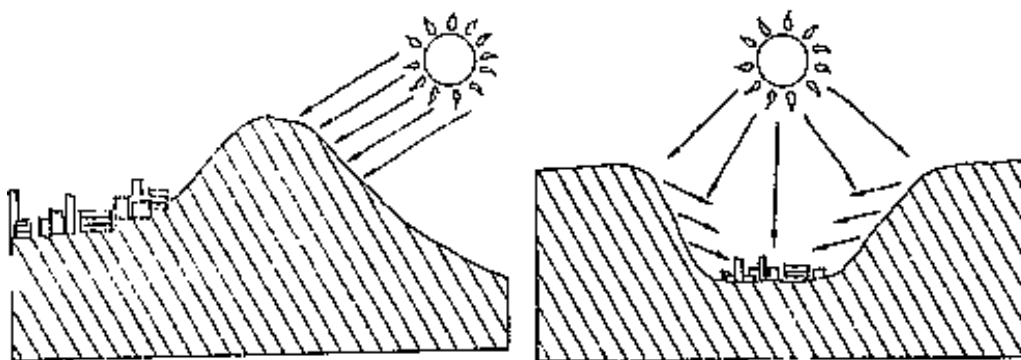


Figure 31: illustration de l'usage de l'ombrage naturel de la colline (a) Les fonds de vallée (b) source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

2.4.1.4 Positionnement et Orientation par rapport au vent

Les positionnements favorisés se trouvent dans les zones qui ont la possibilité d'utiliser et de contrôler l'air frais. C'est pourquoi les altitudes élevées et les emplacements avec une possibilité d'évaporation sont avantageux (Figure 32-a). Les zones urbaines doivent être orientées en considérant les vents dominants et généralement, les vents sont plus fréquents et frais à des altitudes élevées. De plus, si le vent passe par un point d'eau, leur température peut baisser de quelques degrés. En ce qui concerne le fond des vallées (Figure 32-b), la vitesse de l'air dans ces régions est généralement réduite, ce qui réduit le refroidissement par les vents (Gut & Ackerknecht, 1993).

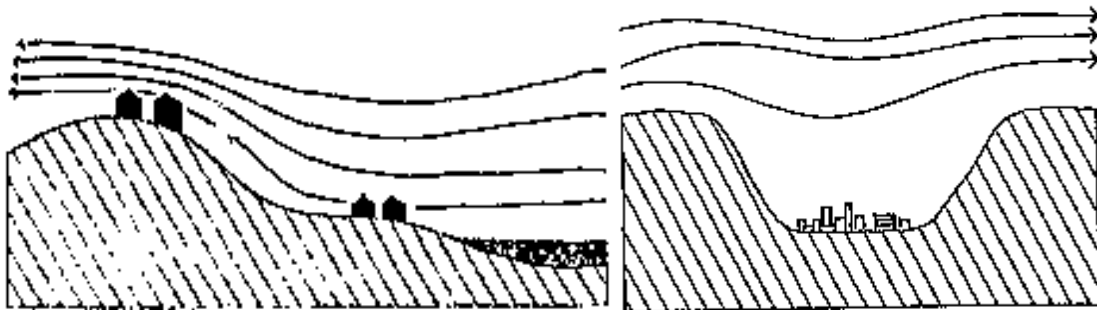


Figure 32: la disponibilité de l'air frais à des altitudes élevées (a) fond des vallées (b)
source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

2.4.1.5 Positionnement à côté des points d'eau et d'espace verts

Si possible, les zones urbaines devraient être placées à côté des grands points d'eau (lacs) (Figure 33) et des espaces verts. L'eau régule le climat car sa température est généralement proche de la température moyenne annuelle. En raison de la chaleur spécifique de l'eau, elle peut absorber l'excès de chaleur pendant la journée et réduire les chutes de température pendant la nuit. La différence de température entre la terre et le point d'eau permet de créer des courants d'air vers la terre pendant la journée et vers le point d'eau pendant la nuit. Tandis que les espaces verts ont l'avantage de se rafraîchir par l'évaporation et l'ombrage des surfaces exposées (Gut & Ackerknecht, 1993).

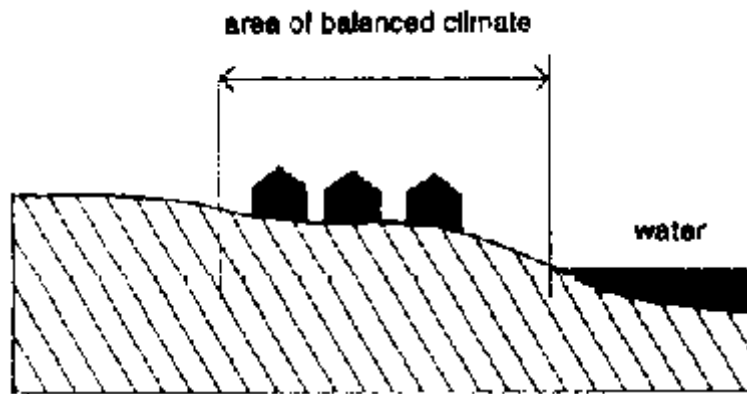


Figure 33: l'implantation des bâtiments à côté des points d'eau
source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

2.4.2 Morphologie urbaine

Les concepteurs d'un environnement urbain dans les zones chaudes et arides doivent prendre en compte les stratégies urbaines propres à ce climat qui peuvent améliorer le confort des occupants. Pour réduire les effets négatifs de ce type de climat, plusieurs stratégies peuvent être utilisées. Tout d'abord, il est important de fournir un maximum d'ombrage en été et une isolation adéquate en hiver. De plus, il est recommandé de minimiser la réflexion du rayonnement solaire indirect dans les rues et les espaces ouverts, et d'essayer de contrôler les effets des vents indésirables.

Pour créer un environnement urbain adapté au climat chaud et aride, il peut être utile de créer des rues et des ruelles étroites qui soient ombragées et relativement fraîches, tout en prenant en compte une ventilation et un éclairage adéquats. Il est également important de créer des formes de bâtiments adaptées au climat et d'éviter les grands espaces ouverts qui peuvent collecter la chaleur pendant la journée et qui sont propices aux vents de sable.

Pour améliorer le confort des occupants, il est recommandé de créer des espaces publics ombragés avec des couleurs claires et de la végétation pour rafraîchir l'air. L'introduction de points d'eau favorise également l'évaporation et réduit la température. En conclusion, l'application de ces stratégies peut créer un environnement urbain confortable et adapté au climat chaud et aride.

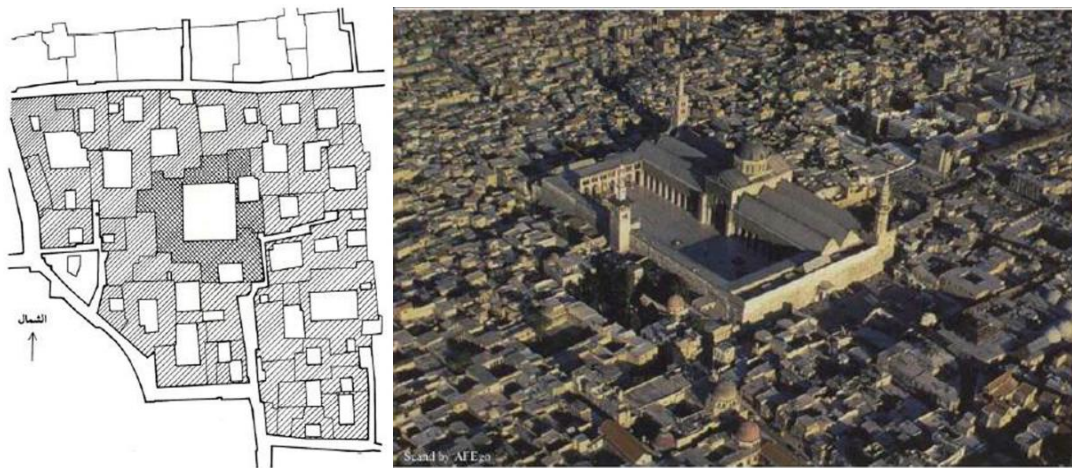
2.4.2.1 Forme urbaine et espace extérieurs

Afin de minimiser l'exposition solaire, la compacité et l'ombrage sont des principes cruciaux pour les bâtiments des zones chaudes et arides. C'est pourquoi une organisation compacte de groupes de bâtiments est requise, pour qu'ils puissent s'ombrager mutuellement et créer un réseau de rues et ruelles étroites et ombragées. En même temps, créer de petits espaces entre eux comme un patio

est également important. Les arcades, colonnades, bâtiments ou éléments de construction en porte-à-faux, membranes et petites cours fermées sont des réponses traditionnelles à ce climat. Même les larges espaces publics ouverts doivent être créés d'une manière introvertie et doivent être ombragés la plupart de la journée. Dans la conception urbaine, l'éclairage naturel et la ventilation doivent être pris en compte. Les rues et ruelles ombragées doivent permettre une circulation d'air ou même l'accentuer, et l'introduction de points d'eau et de végétation dans ces rues est déterminante.

2.4.2.2 La compacité des bâtiments

La forme optimale dans un climat chaud et aride est celle qui minimise les radiations solaires en été et maximise ces radiations en hiver. Pour cela, la forme compacte a souvent été choisie par les constructeurs de l'architecture vernaculaire afin de créer de l'ombrage mutuel dans les passages étroits comme il est indiqué dans la Figure 34. Généralement, les bâtiments avec une volumétrie large et allongée sont excellents pour l'hiver, tandis que les bâtiments compacts avec des formes cubiques sont efficaces en été. L'arrangement des bâtiments en groupe et la création de mitoyenneté d'une manière à profiter d'une volumétrie massive est une technique avantageuse pour créer du confort dans les zones extérieures dans ce type de climat.



(a)

(b)

Figure 34: (a) plans de masse (b) vue aérienne de Damas avec une configuration urbaine compacte source : (Haubold, 1994)

Afin d'explorer les effets de la forme compacte de l'architecture vernaculaire, (Alabsi et al., 2016) ont mené une étude dans cinq villes des zones chaudes et arides. Ils ont utilisé le logiciel Ecotect

pour comparer et simuler les effets des radiations solaires sur cinq quartiers des villes : Shibam Hadramout, Kadhimiya à Bagdad, le quartier ancien de Damas, l'ancienne ville de Sanaa et un village en Égypte. Les résultats ont démontré que l'utilisation de la forme urbaine compacte est une technique ingénieuse pour limiter les radiations solaires dans les zones chaudes et arides.

2.4.2.3 Configuration des rues (ratio Hauteur/Largeur)

L'un des indices les plus courants qui déterminent la configuration des rues dans un environnement urbain est le rapport hauteur/largeur (H/L) d'une rue Figure 35, (Rojas-Cortorreal et al., 2017). Ce facteur a la capacité de définir la configuration des rues et est en corrélation indirecte avec le facteur de visibilité du ciel. Le facteur de visibilité du ciel augmente si le rapport H/L diminue. C'est pourquoi, dans une zone chaude et aride où la réduction de l'exposition solaire est primordiale, le facteur H/L doit être choisi de manière à minimiser au maximum les radiations en été tout en créant un éclairage adéquat.

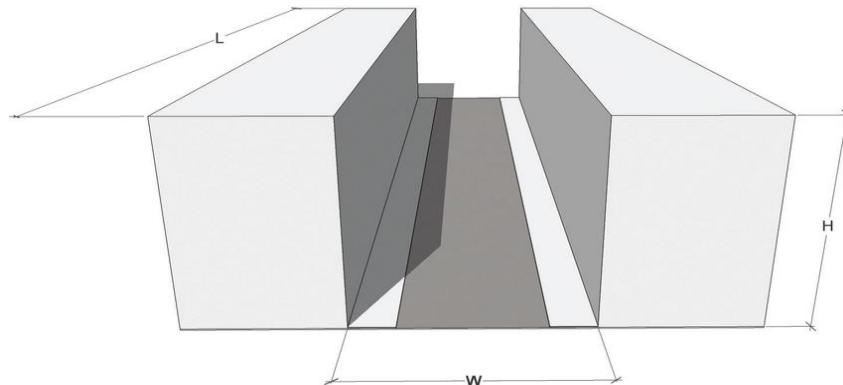


Figure 35: Illustration schématique du rapport H/L source : (Rojas-Cortorreal et al., 2017)

Afin d'étudier les effets du ratio H/L sur le confort thermique extérieur dans les zones chaudes et arides, (Zakhour, 2015) a mené une étude comparant deux types de tissus urbains dans la ville d'Alep en Syrie. L'expérimentation a bénéficié de deux types d'outils, à savoir des simulations et des mesures sur site. Les résultats ont montré que l'ancien tissu urbain d'Alep est plus confortable que le tissu urbain moderne. Les données ont également confirmé que les ruelles ayant un ratio H/L plus élevé et un FVC réduit peuvent offrir un plus grand confort. (Ali-Toudert & Mayer, 2006) ont tenté d'étudier l'influence de la configuration des ruelles sur le confort thermique des piétons dans les espaces extérieurs des zones chaudes et arides, dans le but de fournir des recommandations de conception pour la création de rues plus adaptées aux climats chauds et arides. L'étude a été

menée dans la ville de Ghardia en utilisant le logiciel de simulation Envi-met. Les résultats ont montré que la température de l'air diminue lorsque le ratio H/L augmente et qu'il est possible d'améliorer le confort thermique, mais qu'il est difficile d'atteindre le confort thermique par des stratégies passives dans les zones chaudes et arides.

2.4.3 Orientation et types des tissus urbains

La configuration des tissus urbains est influencée par divers facteurs physiques, fonctionnels, culturels et sociaux. Dans cette section, nous explorerons plusieurs modèles de tissus urbains de base présentés par (Gut & Ackerknecht, 1993), qui peuvent être adaptés au climat chaud et aride sont explorés :

2.4.3.1 Quadrillage diagonal avec une orientation est-ouest

Un quadrillage dans le tissu urbain maximise l'exposition aux rayons solaires dans les rues rectilignes, mais si les rues sont orientées par rapport à l'axe est-ouest, l'exposition au soleil et l'ombrage sont distribués de manière plus adéquate.

2.4.3.2 Ruelles étroites et en zigzag

Pour réduire les rayons solaires et les températures de sable, les ruelles étroites en zigzag ont le potentiel d'atteindre cet objectif tout en créant des espaces ombragés au cours de la journée qui peuvent fournir un microclimat confortable.

2.4.3.3 Rues et ruelles bloquées

Les vents chauds et les tempêtes de sable dans les zones chaudes et arides peuvent réduire la qualité de vie dans les zones urbaines. C'est pourquoi la typologie et l'orientation des bâtiments doivent être prises en compte. En créant des blocs de bâtiments avec des rues et ruelles bloquées, cet effet pourrait être considérablement atténué.

La Figure 36 présente les modèles de tissus urbains précédemment mentionnés, de droite à gauche : (a) Quadrillage diagonal avec une orientation est-ouest, (b) Ruelles étroites et en zigzag, (c) Rues et ruelles bloquées.

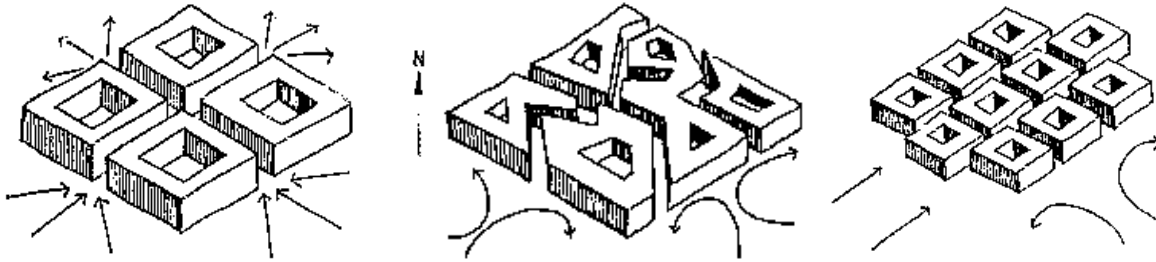


Figure 36: l'effet du model des tissus urbains sur la circulation des vents
source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

2.4.3.4 Espaces couverts

Comme mentionné précédemment, l'ombrage est l'une des stratégies essentielles dans les zones chaudes et arides. C'est pourquoi la création d'espaces ombragés pour les piétons au niveau urbain est l'une des techniques de conception les plus courantes dans ces régions. Ces espaces couverts peuvent prendre la forme de galeries, d'arcades, de colonnades, de bâtiments, etc.

La figure xx illustre la création d'ombrage dans plusieurs environnements urbains dans les zones chaudes et arides (de droite à gauche : (a) Ghadamès Libye - (Galuzzi, 2007) (b) Yazd Iran - (Hashemi, 2018))



Figure 37: différentes formes de couverture des ruelles

2.4.3.5 Végétation et l'effet oasis

L'utilisation de la végétation dans l'environnement urbain a un effet esthétique, fonctionnel et climatique. Grâce à ses propriétés physiques de surface, elle peut absorber les radiations solaires sans surchauffer tout en créant de l'ombrage. Associée à l'effet de l'évapotranspiration qui crée de l'humidité dans l'air, la végétation dans et autour d'un environnement urbain revêt une grande importance dans les zones chaudes et arides.

L'ombrage créé par la végétation est bénéfique pour les rues et les façades des bâtiments. Avec la plantation d'arbres à feuillage dense, les mouvements d'air chaud ou les tempêtes de sable ainsi que les radiations solaires excessives sont atténués. Comme il est illustré dans la Figure 39 cet ombrage réduit les températures journalières et l'émission thermique nocturne des surfaces, créant ainsi un environnement plus thermiquement équilibré (Gut & Ackerknecht, 1993).

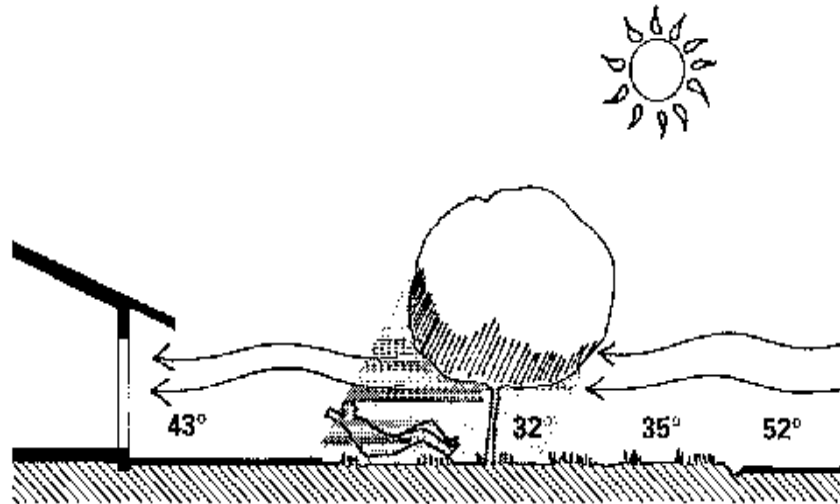


Figure 38: l'effet de la végétation sur les températures extérieures
source : (Gut & Ackerknecht, 1993).

L'effet oasis est la création d'un microclimat plus agréable que l'environnement chaud et aride qui entoure la zone urbaine. Cet effet est dû à l'évapotranspiration des plantes et à l'évaporation de l'eau qui réduisent les températures estivales. De plus, la végétation a un albédo plus élevé que le sol nu, ce qui augmente la réflexion des radiations solaires. L'effet de l'oasis est ainsi nommé parce qu'il se trouve généralement dans les déserts des zones chaudes et arides. Dans le développement urbain, l'effet de l'oasis crée des zones urbaines plus fraîches en atténuant l'effet d'îlot de chaleur. Généralement, les zones urbaines sont plus chaudes que les zones sub-urbaines ou rurales, c'est pourquoi le placement de plantes dans des endroits stratégiques dans et autour de la ville donnera à ces zones urbaines leurs propres effets d'oasis (Potchter et al., 2008). La présente l'humidification de l'air par l'effet oasis (Ahriz et al., 2017).

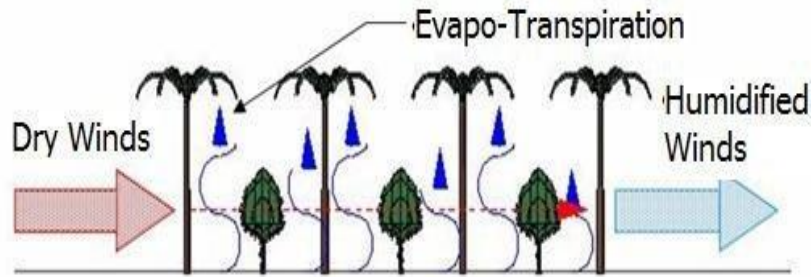


Figure 39: illustration de l'effet oasis source : (Ahriz et al., 2017).

2.5 Techniques et dispositifs architecturaux

2.5.1 Morphologie du Plan

Pour créer une compatibilité entre la forme urbaine et la forme architecturale compacte dans les zones chaudes et arides, la morphologie du plan est aménagée de manière compacte et introvertie afin de protéger les espaces intérieurs de la chaleur intense et des radiations solaires. Cette morphologie offre un minimum de rapport surface-volume, ce qui permettra un minimum d'échanges thermiques avec l'environnement extérieur. Généralement, pour atteindre cet objectif, les maisons avec patio et caves sont souvent utilisées (Gut & Ackerknecht, 1993).

2.5.2 Agencement des espaces (zoning)

L'agencement des espaces dépend généralement du type de bâtiment. Dans les zones chaudes et arides, les espaces qui génèrent de la chaleur doivent être séparés des autres espaces habitables et les espaces non habités doivent être placés comme protection et espace tampon dans la zone ouest. L'agencement des espaces doit prendre en compte l'évacuation de la chaleur, comme mentionné précédemment. Généralement, les maisons avec patios peuvent apporter une excellente contribution climatique à l'agencement des espaces dans ce type de climat. Les chambres doivent être placées du côté est et un espace extérieur pour dormir doit être pris en compte, généralement des terrasses à côté ou au-dessus du bâtiment sont faites pour cet objectif. Les salles de séjour doivent être placées du côté sud ou nord, tout en prenant en considération la profondeur de ces espaces pour bénéficier d'un éclairage adéquat (Gut & Ackerknecht, 1993).

2.5.3 La maison à patio

Issue de la stratégie de refroidissement par convection, le concept de la maison à patio est souvent utilisé comme technique architecturale pour améliorer le confort dans les zones chaudes et arides. Dans l'aridité du climat, les habitants de ces zones ont appris à fermer leurs maisons de l'extérieur et les ouvrir à l'intérieur. Ce concept peut réduire la température dans la journée et la nuit. Au cours des après-midis, l'air qui a été réchauffé par les radiations solaires du bâtiment et du patio commence à s'élever graduellement à cause de sa faible densité, de manière à être remplacé par l'air frais par l'effet de poussée d'air (Aguilar et al., 2014). Cet air frais est accumulé dans le patio en tant que couches laminaires, puis est distribué après dans les chambres qui entourent ce patio. Dans la matinée, l'air qui se trouve dans le patio est réchauffé de manière graduelle parce qu'il est protégé par le patio et les murs qui l'entourent. Cet air reste frais jusqu'à l'exposition du patio aux radiations solaires directes. De plus, le mouvement d'air chaud de la journée n'entre pas dans le patio à cause de l'effet de poussée d'air. C'est pour cela que le patio sert comme un réservoir de fraîcheur. Cette technique a été utilisée très couramment dans les zones chaudes arides d'Asie, d'Afrique jusqu'en Amérique, comme le présente le plan de maison dans Figure 40, (El-Shorbagy, 2010).

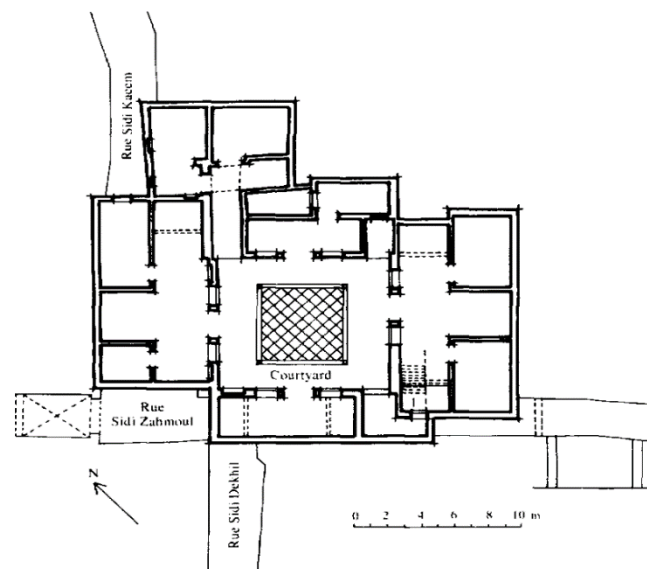


Figure 40: Plan de Dar Lajimi, maison à cour, Tunis. Source : (El-Shorbagy, 2010).

2.5.4 Le takhtabūsh

L'architecture vernaculaire des maisons arabes a essayé de développer la maison à patio pour créer un mouvement d'air par convection continue, d'où vient le concept de takhtabūsh. Similaire à une loggia, c'est un espace extérieur couvert entre le patio et le jardin, ouvert complètement sur le patio et protégé par un moucharabieh du côté du jardin. Son principe repose sur la largeur du jardin qui a tendance à se réchauffer plus que le patio, ce qui pousse à la création d'un mouvement d'air frais entre le patio et le jardin à travers le takhtabūsh. Cette technique architecturale a été souvent utilisée dans plusieurs pays arabes dans les zones chaudes et arides (Fathy, 1986), la Figure 41 illustre le positionnement du takhtabūsh dans un maison égyptienne.

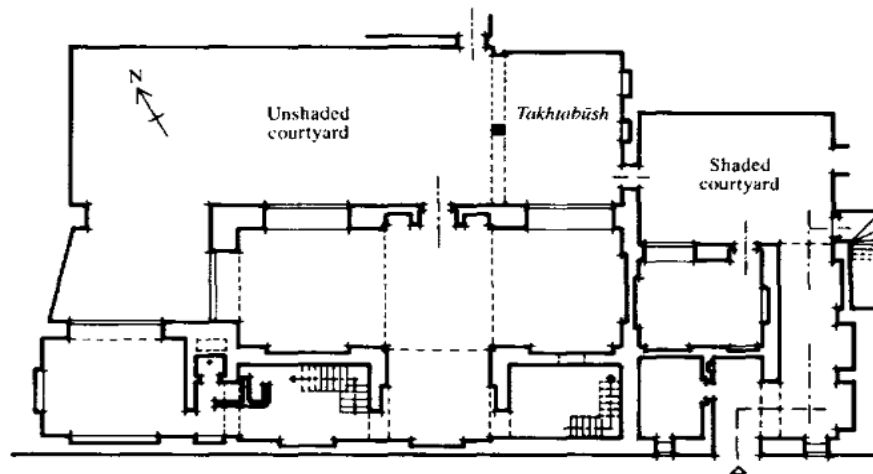


Figure 41: Plan du rez-de-chaussée du Qā'a de Muhib Ad-Din Ash-Shāf 'i Al-Muwaqqi à Darb Al-Usta, au Caire, montrant deux cours avec un takhtabūsh entre eux. Source : (Fathy, 1986),

2.5.5 Technique de construction des surfaces opaques de l'enveloppe

2.5.5.1 Les murs

Dans les zones chaudes et arides, des murs avec une chaleur spécifique élevée sont essentiels. Le principe de l'architecture vernaculaire est de se protéger des chaleurs intenses durant la journée jusqu'à ce que la température baisse la nuit, et que cette chaleur soit expulsée de l'enveloppe du bâtiment. Les briques de terre crue séchées au soleil sont l'un des matériaux les plus efficaces dans ces régions en raison de leur conductivité thermique moyennement réduite (ALI, 2012) et de leurs propriétés mécaniques faibles, ce qui nécessite un mur épais. Un mur épais en terre crue est une

solution plus ou moins adéquate pour retenir la chaleur durant la journée. Néanmoins, des calculs précis doivent être effectués pour trouver la meilleure épaisseur qui peut créer une latence de chaleur en rapport avec le climat local et la propriété de la terre crue utilisée.

2.5.5.2 Les Toitures

Si les températures extérieures sont plus élevées que les températures intérieures, la surface du toit commence à se réchauffer à cause des radiations solaires et du contact avec l'air chaud extérieur. Ce fait engendre la transmission de cette chaleur à travers le toit jusqu'à l'intérieur par le phénomène de conduction, et le réchauffement de l'air intérieur par le phénomène de convection.(Knaack & Koenders, 2018). C'est pour cela que le toit doit être conçu d'une manière à réfléchir et à ralentir ces radiations. Les constructeurs de l'architecture vernaculaire ont opté pour plusieurs solutions afin de créer des toitures qui optimisent le confort des espaces extérieurs. Le choix d'un matériau réfléchissant pour la couche extérieure de la toiture et l'utilisation d'un matériau avec une masse thermique élevée étaient des solutions adoptées par les constructeurs de cette architecture. De plus, plusieurs habitations ont été vêtues d'éléments qui créent de l'ombre pour protéger le toit des radiations solaires, comme la double toiture avec un espace d'air qui sépare les deux couches (Fathy, 1986).

Du fait que les températures nocturnes sont réduites par rapport aux températures diurnes, les constructeurs de cette architecture ont créé des éléments architecturaux à double fonction. Premièrement, créer de l'ombre pour le toit et, en second rôle, créer des espaces habitables durant les nuits. Cette solution innovante est en forme de loggia, galeries ouvertes et couverture légère de toiture. La forme du toit est aussi un paramètre qui peut être optimisé pour réduire l'exposition aux radiations solaires. La toiture plate reçoit une radiation continue qui augmente depuis la matinée et se réduit vers l'après-midi quand l'intensité et l'angle du soleil changent. C'est pourquoi incliner ou arquer le toit peut avoir plusieurs avantages : cette forme pourrait augmenter la hauteur du plafond, ce qui éloignera l'air chaud de l'espace et la chaleur transmise par le toit. La partie ombragée du toit créée par cette forme agira comme un radiateur qui absorbe et dégage la chaleur (Fathy, 1986). La Figure 42 illustre l'effet de l'inclinaison de la toiture sur l'écoulement d'air.

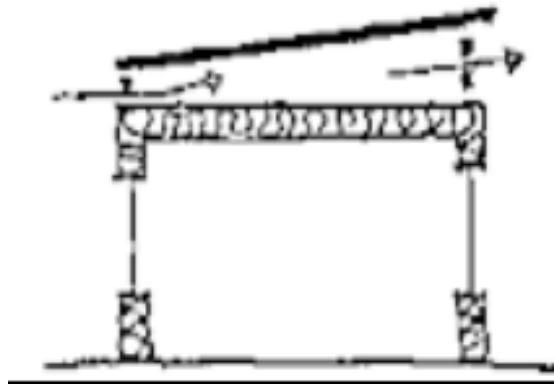


Figure 42: l'effet de la forme du toit sur la circulation de l'air source : (Fathy, 1986)

2.5.6 Technique de construction des surfaces non-opaques de l'enveloppes

2.5.6.1 Les ouvertures

Les ouvertures dans le bâtiment jouent un rôle d'éléments qui relie l'extérieur à l'intérieur, ce qui permet d'éclairer naturellement, de ventiler et de créer une vue sur le paysage extérieur. Dans les zones chaudes et arides où les températures sont extrêmes, la configuration des ouvertures est très importante pour minimiser les apports solaires en été et les maximiser en hiver, afin de réduire la consommation de chauffage et de climatisation tout en procurant du confort pendant les saisons de transition. Cette configuration doit également prendre en compte le potentiel d'éclairage naturel des espaces intérieurs afin de créer un bien-être psychologique et de réduire la consommation d'éclairage artificiel. La configuration des ouvertures peut être définie par des paramètres qui peuvent influencer leur performance, tels que la position, l'orientation, la taille et le type de vitrage (Alsehail & Almhafdy, 2020).

2.5.6.1.1 L'orientation des ouvertures

En raison des températures élevées prévalant la majeure partie de l'année, l'orientation nord est la plus avantageuse en raison de l'absence de rayons solaires directs. Cela permet d'éviter les problèmes de contrôle solaire, laissant ainsi place à d'autres paramètres visant à optimiser les ouvertures. Pour l'orientation sud, où les rayons solaires sont bas en hiver et élevés en été (dans les régions subtropicales de l'hémisphère nord), l'objectif est de créer des ouvertures qui permettent aux rayonnements solaires de pénétrer dans le bâtiment en hiver tout en les bloquant en été. Les orientations est et ouest sont caractérisées par des rayons solaires bas tout au long de l'année, ce qui rend le contrôle des rayonnements plus difficile en été. Toutefois, l'orientation ouest est la moins favorable en raison des difficultés supplémentaires de contrôle des rayonnements solaires ainsi que des températures élevées en après-midi. Pour faciliter la conception des ouvertures dans un climat chaud et aride, il est donc préférable de privilégier l'ordre suivant pour leur implantation: **nord, sud, est**, et d'éviter autant que possible **l'ouest**. (Rais, 2020)

2.5.6.1.2 La position des ouvertures

La position de l'ouverture doit être faite de manière à accentuer la ventilation transversale et l'éclairage naturel de l'espace habitable. (Rais et al., 2020) ont essayé de cerner les meilleures positions des ouvertures dans les zones chaudes et arides. Dans les zones chaudes aride les fenêtres sont de petite taille, situées en hauteur sur le mur, remplissent un rôle en fournissant à la fois de la lumière naturelle et une ventilation, tout en limitant la chaleur et l'irradiation solaire (Boumerzoug et al., 2022).

2.5.6.1.3 Les dimensions des ouvertures

Généralement, la dimension de la fenêtre est étudiée par rapport à la surface du mur ou du plancher de l'espace qu'elle éclaire. Dans le cas de la surface du mur, le ratio est appelé le rapport fenêtre sur le mur (window-to-wall ratio). Par contre, si l'on parle de la taille du plancher par rapport à la taille de la fenêtre, le ratio est le rapport fenêtre sur plancher. Plusieurs études ont tenté de déterminer les meilleures dimensions d'ouverture pour les bâtiments situés dans des climats chauds et arides (Alsehail & Almhafdy, 2020; Alwetaishi & Taki, 2020; NAHBRC, 2007). L'objectif primordial dans un tel environnement est de trouver un équilibre entre le confort thermique et

visuel en minimisant les gains de chaleur pendant l'été tout en créant un environnement visuel approprié.

2.5.7 Les attrapes vent (Malqaf et Badjir)

En raison de l'aridité du climat, la taille des ouvertures est restreinte pour éviter l'excès de chaleur et d'éblouissement (Boumerzoug et al., 2022), ce qui conduit à un besoin de ventilation. Les constructeurs de l'architecture vernaculaire dans ces zones ont ingénieusement développé un dispositif pour accentuer la ventilation, appelé l'attrape-vent ou "Malqaf" (Fathy, 1986). Depuis l'ancienne Égypte, cet élément architectural est construit au-dessus du bâtiment et orienté vers le nord pour saisir le courant d'air et l'orienter vers les espaces intérieurs. La forme du Malqaf permet de saisir le courant d'air qui pourrait être ralenti par les bâtiments tout en protégeant les espaces intérieurs de l'excès de poussière dans ces zones qui se diminue en hauteur.

La taille du Malqaf doit être très bien étudiée (S. Attia & De Herde, 2009). par rapport à la température de l'entrée de l'air afin de procurer aux espaces intérieurs une quantité et une qualité adéquates d'air. La règle générale mentionne que si la température de l'air est réduite, la taille de l'entrée d'air du Malqaf augmente, et si la température est élevée, la taille de l'entrée d'air du Malqaf doit être réduite. Par exemple, dans la région chaude de l'Irak, où les températures peuvent excéder 45 °C, l'entrée de l'air du Malqaf est construite avec une taille réduite qui permet de refroidir l'air avant qu'il n'atteigne les espaces intérieurs. Dans certains cas, le dispositif du Malqaf est optimisé par l'addition d'un humidificateur, afin que l'air saisi soit refroidi. Cette méthode est appliquée en utilisant des tapis humidifiants qui permettent d'augmenter la taille de l'entrée d'air du Malqaf, ce qui conduit à plus de ventilation tout en profitant d'un air frais (Chohan & Awad, 2022).

L'architecture moderne a essayé d'adopter ce dispositif architectural de ventilation, comme on peut le voir dans la Figure 43 qui se trouve au le département d'architecture de l'université de Yale.



Figure 43: Un projet pilote visant à tester l'énergie éolienne a été installé sur le toit du Becton Engineering and Applied Science Center en mars 2009. Source : (Energy | Yale Sustainability, 2023.)

Dans les régions chaudes du Moyen-Orient et de l'Iran, un autre dispositif architectural, avec le même principe que le Malqaf, a été développé. Nommé "Badgir" (Movahed, 2016), cet élément peut avoir jusqu'à 4 ouvertures au sommet (généralement disposé de deux ouvertures), et permet de saisir le courant d'air et de le diriger vers un espace de nuit pour dormir. Dans la zone chaude de Dubaï, aux Émirats arabes unis, le Badgir est utilisé aussi comme un élément architectural décoratif. En plus de la ventilation, il a la possibilité d'être utilisé comme refroidisseur des réservoirs d'eaux souterrains. Le plus grand potentiel du Malqaf et du Badgir est de saisir le courant d'air qui peut être bloqué par l'environnement local (block de bâtiments).

Ces dispositifs doivent être conçus en tenant compte de l'agencement des espaces intérieurs, de manière à programmer leur aérodynamique en fonction de la structure du bâtiment, afin de profiter de la différence de pression entre l'entrée d'air et la façade opposée. (Suleiman & Himmo, 2012)

2.5.8 Fontaines

Dans les zones chaudes et arides, l'eau joue un rôle crucial dans l'atténuation de l'excès de chaleur. En tenant compte de ce facteur, l'architecture vernaculaire arabe a utilisé la fontaine, un élément architectural humidificateur qui est posé au milieu de la cour en face d'un espace semi-ouvert. Elle est dotée d'un bassin d'eau de manière à profiter de l'effet visuel du mouvement de l'eau et de la réflexion du ciel sur ce dernier, ce qui ajoute un confort psychologique au confort thermique (BEN AMEUR, 2016).

2.5.9 Salsabil

Dans les espaces où la pression ne permettait pas une quantité adéquate d'éjection d'eau de la fontaine, les architectes anciens ont remplacé la fontaine par une Salsabil. C'est une plaque de marbre décorée de formes ondulées placée dans un angle d'un espace de séjour. Cet élément architectural permet à l'eau de passer au-dessus du marbre pour faciliter son évaporation et augmenter l'humidité dans tout l'espace alentour. Parfois, l'eau passe par une chaîne de plaques de marbre jusqu'à la fontaine. La salsabil peut être interprétée comme la transposition du principe de la fontaine sur toute une surface, ce qui indique l'ingéniosité des dispositifs de l'architecture vernaculaire qui ont utilisé des éléments naturels tels que l'eau pour augmenter le confort des espaces intérieurs tout en créant une variété d'éléments architecturaux adaptés à cette tâche (Fathy, 1986).

2.5.10 Les caves et niveaux enterrés

Comme mentionné précédemment, le dispositif des caves souterraines est utilisé comme stratégie de nomadisme dans les régions chaudes et arides. Les caves sont des espaces créés depuis des millénaires par les constructeurs pour profiter de la grande masse thermique du sol où les températures sont généralement stables et proches de la température annuelle moyenne. Ces espaces surprotégés de l'effet de l'environnement extérieur ne sont pas affectés par l'excès de chaleur de ces régions chaudes durant les journées chaudes de l'été et créent des espaces agréables au cours des nuits plus ou moins froides de l'hiver (Khalili & Amindeldar, 2014).



Figure 44: La cave dans la maison Akhavan-sigari, Yazd
source : (Azizi-Bondarabadi & Haji Sadeghi, 2022)

2.5.11 Coupoles

Afin de mieux réduire les radiations solaires incidentes sur les toitures, l'architecture vernaculaire a opté pour le changement de la forme d'une partie de la toiture en créant des voûtes

hémisphériques à profil semi-circulaire (pouvant aussi avoir une forme elliptique ou polygonale). Le potentiel de la forme réside dans la création d'ombre portée sur le quart de la sphère derrière la surface exposée de la coupole comme il est aperçu dans la Figure 45. Avec l'introduction d'ouvertures dans la coupole, cela peut accentuer la ventilation soit par l'effet de la cheminée solaire, soit par l'accélération des vents sur sa forme grâce à l'effet Bernoulli.

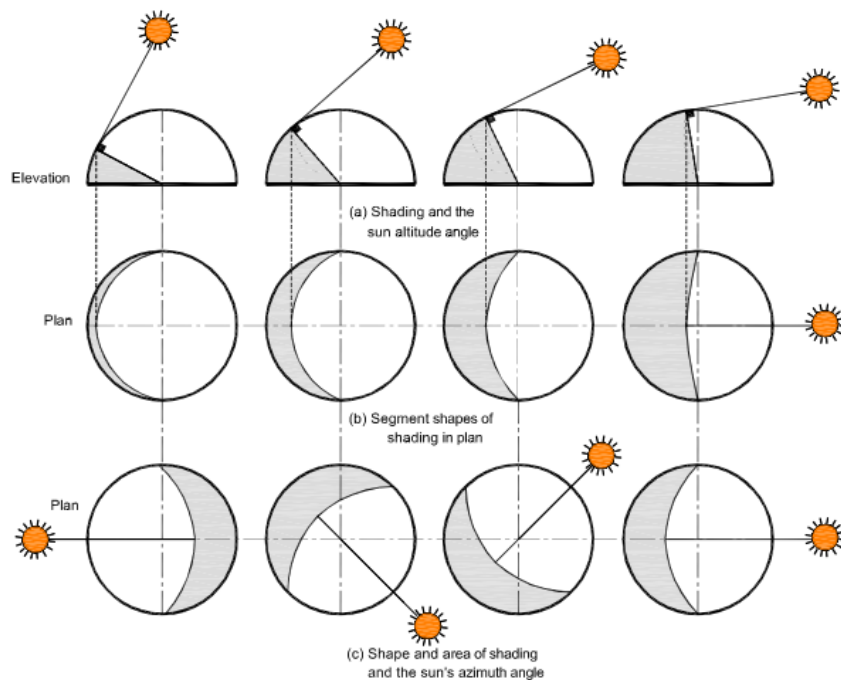


Figure 45: Performance de l'ombrage du dôme semi-sphérique
source :.(Muhaisen, 2011.)

2.5.12 Claustres

Dans les zones chaudes et arides, l'utilisation de petits trous plutôt que de nombreuses ouvertures est plus efficace pour créer davantage de confort et d'intimité. C'est pourquoi l'architecture vernaculaire a adopté les claustres, des dispositifs architecturaux en plâtre perforé qui sont généralement installés dans la partie haute des murs, afin de créer une uniformité en matière de ventilation et de lumière tout en protégeant contre l'excès de radiations solaires. Le potentiel des claustres réside dans l'évacuation de l'air chaud collecté dans la partie supérieure des espaces, ce qui crée deux avantages : le premier est de créer du confort thermique dans l'espace et le deuxième est de refroidir le plafond si le toit est utilisé comme espace de nuit. Les claustres sont également utilisés dans l'architecture vernaculaire comme élément décoratif, avec la création de différents

modèles et formes selon la région et la culture des habitants.(Achenza et al., 2014; Fathy, 2010; Nguyen et al., 2019). La Figure 46 illustre les claustras dans l'architecture vernaculaire



Figure 46: illustration des habitations à Balat intégrant des claustras dans les l'enveloppe extérieure (Omar, 2014)

2.5.13 Moucharabieh

Le nom "moucharabieh" est dérivé du verbe arabe "boire" (يشرب-يأشرب), c'est-à-dire l'espace où l'on peut boire, c'est pourquoi un jar en terre était généralement placé derrière cet élément architectural. Ce dispositif architectural est une cloison en bois perforé permettant de créer une ventilation forcée et de réduire l'effet des radiations solaires (Ashour, 2018) . Pour accentuer le confort, des éléments humidificateurs peuvent être ajoutés, tels que des jars, des bassins, etc. L'emplacement de ces éléments peut rafraîchir l'air qui passe par le moucharabieh. On peut citer plusieurs fonctions élaborées par ce dispositif : 1) contrôler le passage de la lumière, 2) contrôler le passage du vent, 3) réduire la température de l'air, 4) accroître l'humidité de l'air, 5) créer de l'intimité. Pour profiter au maximum de l'efficacité de ce dispositif architectural, l'orientation et la taille du moucharabieh ainsi que ses orifices doivent être bien étudiées. Il faut créer un modèle adapté à l'orientation des radiations solaires et à leurs degrés d'inclinaison afin d'accentuer la ventilation, d'obtenir une lumière adéquate pour l'espace et enfin, d'éviter l'effet d'éblouissement causé par le contraste entre les parties pleines et vides du moucharabieh.(Fathy, 1986).

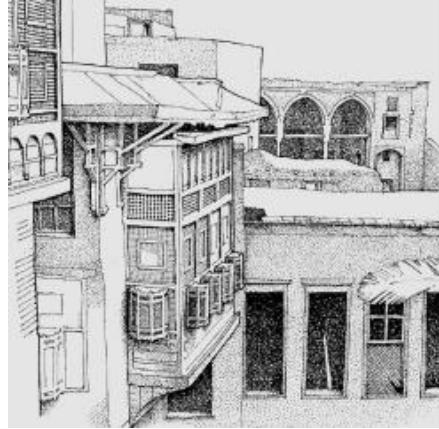


Figure 47: Détails de Moucharabieh traditionnel en élévation et en coupe. source : (Ragette, 2003)

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux stratégies de l'architecture vernaculaire adaptées aux climats chauds et arides, différentes approches ont été explorées en vue de concevoir des bâtiments et des environnements urbains offrant un confort dans de telles conditions climatiques. Les spécificités des stratégies urbaines et architecturales liées aux climats chauds et arides ont été examinées en mettant en lumière leur fonctionnement en relation avec les caractéristiques physiques des bâtiments et leur interaction avec le climat aride. Par la suite, les dispositifs urbains et architecturaux qui découlent logiquement de ces stratégies ont été présentés, illustrant ainsi l'ingéniosité inhérente aux stratégies vernaculaires adaptées au climat.

Ce chapitre souligne l'importance de prendre en compte les particularités des climats chauds et arides lors de la conception urbaine et architecturale, en s'alignant sur les principes de l'architecture vernaculaire. Les stratégies présentées offrent des solutions pratiques pour améliorer le confort thermique des bâtiments et des espaces extérieurs, tout en minimisant les effets néfastes de la chaleur et en favorisant la ventilation naturelle et le refroidissement par évaporation. Ce chapitre sert de référence comparative ultérieurement pour les stratégies vernaculaires adaptées au climat de la région des Ziban.

Chapitre 3. ARCHITECTURE ET URBANISME DE LA REGION DES ZIBAN

3.1 Introduction

Afin de mieux appréhender les stratégies adaptatives propres au climat chaud et aride employées dans la région des Ziban, ce chapitre se concentre sur l'architecture et l'urbanisme produits spontanément par les bâtisseurs locaux dans ce contexte spécifique. L'objectif principal de cette partie est de parvenir à une familiarisation avec la région d'étude et de permettre une compréhension du contexte dans lequel les stratégies passives traditionnelles ont été élaborées. En examinant de près les différents sites et en se basant sur des études préalables portant sur l'architecture vernaculaire de la région des Ziban, les éléments constitutifs de l'architecture vernaculaire de cette région seront identifiés et classés. Ce processus permettra ultérieurement de traiter et de reconnaître ces éléments comme un héritage des stratégies vernaculaires passives propres à cette région.

3.2 Historique

La région des Ziban était habitée depuis l'époque romaine, par l'établissement de nombreux camps militaires. Selon les récits des chercheurs, les villages ou ksour de cette région ont émergé suite à la sédentarisation des nomades dans les anciens villages romains. Ainsi, des vestiges de ces anciennes cités romaines sont souvent retrouvés au sein de ces villages et dans leurs environs (Hammoudi, 2014).

L'appellation "Ziban", qui est le pluriel de "Zab", n'est apparue qu'au 19^{ème} siècle pour désigner les multiples villages regroupés près de l'Aurès. Cependant, dans le contexte du Sahara, le terme "ksour" est utilisé pour désigner les regroupements de villages (Meouak, 2017). Les écrits d'Ibn Khaldoun témoignent du vaste territoire du Zab, comprenant de nombreux villages relativement proches les uns des autres, chacun étant appelé un "Zab". Parmi ces Zab, six principales entités sont mentionnées, à savoir Zab Doucen, Tolga, Mlili, Biskra, Thouda et Bades.

Au 19^{ème} siècle, des chercheurs tels qu'Ismael Urbain ont apporté leur contribution en fournissant des informations statistiques, historiques, militaires et politiques sur la région des Ziban. Ismael Urbain mentionne également que les Ziban se divisent en trois parties distinctes selon leur orientation géographique : le Zab Nord (Dahraoui), le Zab Sud (Guebli) et le Zab Est (Chergui). Les récits de voyages, comme celui du Dr Guyon décrivant son ouvrage intitulé "Voyage d'Alger aux Ziban", ont également permis de recueillir des informations précieuses sur cette région. Ces

réécits mettent en évidence la division territoriale des Ziban, révélant l'existence de villages distincts au sein de chaque sous-région (Guyon, 1852). Chacun de ces villages, tels qu'El Amri, El Bordj, Foughala, Tolga, Farfar, Zaatcha, Lichana et Bouchagroun, possède des caractéristiques architecturales et urbanistiques qui lui sont propres. Les travaux de Lyon Gilbert ont également contribué à la documentation des différents villages des Ziban, en mettant en évidence le Zab du Nord, le Zab du Sud et le Zab de l'Est, qui regroupent chacun plusieurs oasis et villages spécifiques (Meouak, 2017). Afin de respecter l'usage couramment adopté par les chercheurs dans ce domaine, le terme "ksar" sera utilisé dans le contexte de cette étude pour désigner ces villages, en remplacement du terme "Zab".

3.3 Situation géographique

La région des Ziban est située au nord du bas Sahara algérien et au sud de la région des Aurès. Elle fait partie de la Wilaya de Biskra et s'étend d'est en ouest entre les monts du Zab au nord et la dépression du Chott Melrhir au sud. Sur le plan géographique, elle est comprise entre 34°38' et 35° 5' de latitude Nord et entre 4° 56' et 5°35' de longitude Est. En ce qui concerne ses limites administratives, elle est bordée au sud par la commune de Still de la Wilaya d'El Oued, à l'est par les communes de Ain Naga et El Haouch, au nord par Loutaya et Branis, et à l'ouest par les communes de Zerziyr et Ouled Slimane de la Wilaya de Msila (Hammoudi, 2014).

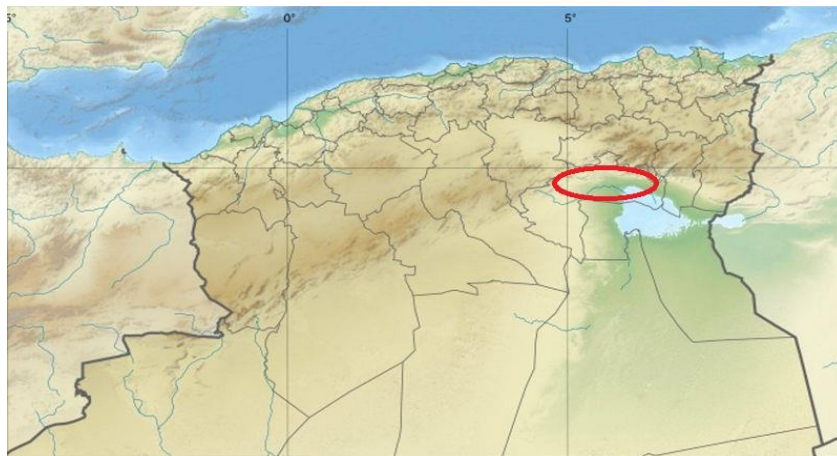


Figure 48: Situation géographique de la région des Ziban en Algérie source : (Waran18, 2020)

3.4 Composition territoriale

Selon la revue de la littérature, la composition exacte de la région des Ziban a toujours été un sujet de controverse (Meouak, 2017). Néanmoins, la plupart des auteurs la divisent en trois grandes

zones : le Zab Elgharbi ou Zab occidental, le Zab Chergui également appelé Zab oriental, et enfin la Zab centrale, où se trouve la ville de Biskra, qui joue le rôle de capitale régionale. Chaque zone de la région des Ziban englobe plusieurs regroupements d'habitations vernaculaires sous forme de ksour (fig. 50). Selon plusieurs travaux menés sur la région des Ziban (Alkama & Tacherift, 2001; Hammoudi, 2014; Meouak, 2017), le tableau suivant et un essai qui résume l'emplacement des différents ksour par rapport à leurs zones dans les Ziban. Le tableau ci-dessous présente les zones des Ziban.

Tableau 7: La composition territoriale de la région des Ziban

Le Zab el Gharbi (Ouest de Biskra)		Le Zab el Chergui (Est de Biskra)
l'axe nord de l'oasis	l'axe sud de l'oasis	/
<ul style="list-style-type: none"> - Oumeche - Mlili - Ourelal - Mekhadema - Lioua 	<ul style="list-style-type: none"> Tolga -El Ghrous -Bordj Ben Azouz - Lichana - Bouchegroune - Foughala - El Hadjeb 	<ul style="list-style-type: none"> - Sidi Okba - Chetma , - plamerai de Thouda - Seriana - Garta

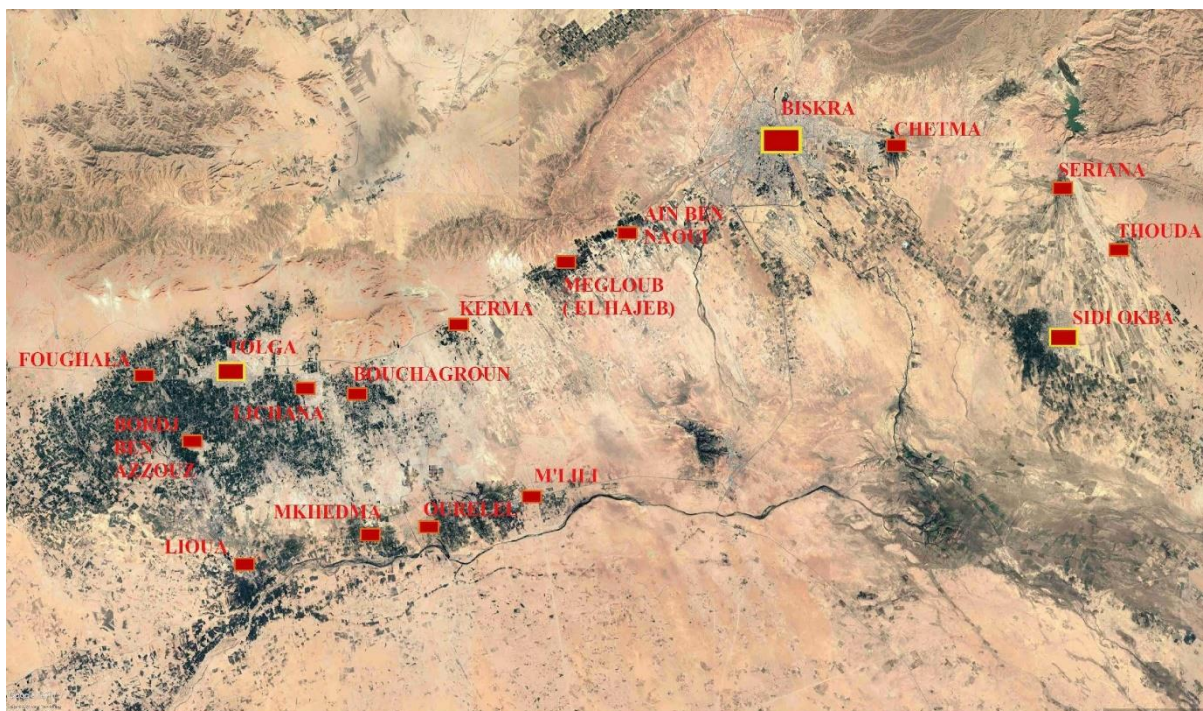


Figure 49: Illustration cartographique de la composition territoriale des Ziban source : Auteur

3.5 Données climatiques

3.5.1 Classification climatique des Ziban

Les Ziban se situent dans une région caractérisée par un climat chaud et sec qui représente la majeure partie du pays, soit 89 % selon la classification climatique de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006). Ce type de climat se caractérise par des étés très chauds et des hivers doux. La région des Ziban, qui se trouve dans la province de Biskra (Figure 50), est l'une des zones chaudes et arides de cette région. Elle est située au nord-est de l'Algérie, sur le bord nord du désert du Sahara, avec une élévation de 88.1 m au-dessus du niveau de la mer. Les données recueillies entre 1943 et 2021 révèlent une température annuelle moyenne de 22.1 °C. Les températures les plus élevées, atteignant 41.0 °C, se produisent dans 99% des cas, tandis que les températures les plus froides, descendantes jusqu'à 5.5 °C, sont observées dans seulement 1% des cas. En ce qui concerne le rayonnement solaire horizontal cumulatif annuel, il s'élève à 2012.97 Wh/m² (Betti et al., 2022; Ji, 2023).

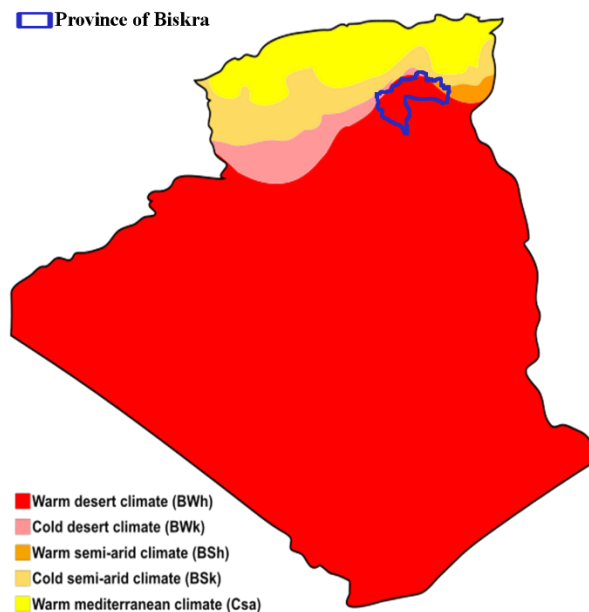


Figure 50: la classification climatique de la région des Ziban selon le Köppen-Geiger

3.5.2 Les données de température

La région de Biskra en Algérie se situe dans une zone chaude et aride, ce qui se traduit par des températures élevées tout au long de l'année. Les données de température de cette région révèlent des pics de chaleur en été pouvant atteindre jusqu'à 45 °C. En se référant au modèle de confort thermique adaptatif mentionné dans la section 1.3.3 et appliqué aux températures horaires annuelles, on constate dans la Figure 51 que de novembre à février, les heures de confort sont pratiquement absentes et que la température moyenne quotidienne dépasse l'intervalle de confort du modèle. En revanche, pour les mois estivaux, la température moyenne quotidienne se situe en dessous de l'intervalle de confort du modèle adaptatif. Pour les mois de transition entre l'été et l'hiver, ainsi que vice versa, les températures se rapprochent de la zone de confort du modèle adaptatif.

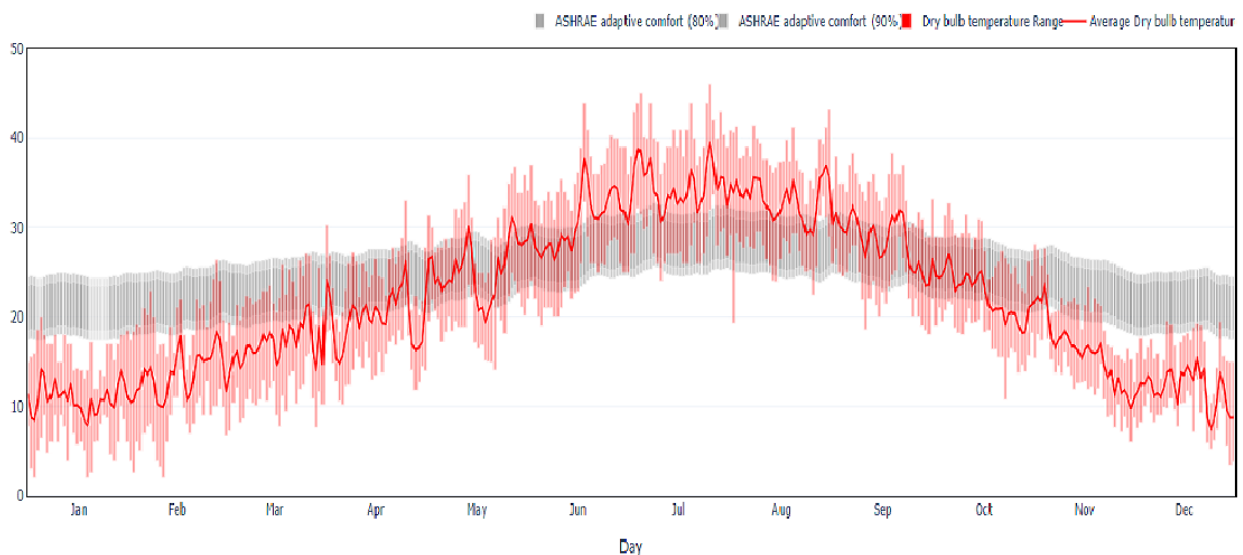


Figure 51: Graphique des températures horaires durant toute l'année

3.5.3 Les données d'humidité

La région de Biskra en Algérie est caractérisée par un climat sec et aride, avec une faible humidité tout au long de l'année. Les données d'humidité de cette région dans la Figure 52 montrent des taux d'humidité relativement bas, oscillant généralement entre 20% et 40%. Cependant, pendant les mois d'hiver, lorsque les températures sont plus fraîches, l'humidité peut atteindre des niveaux plus élevés, atteignant parfois près de 80%.

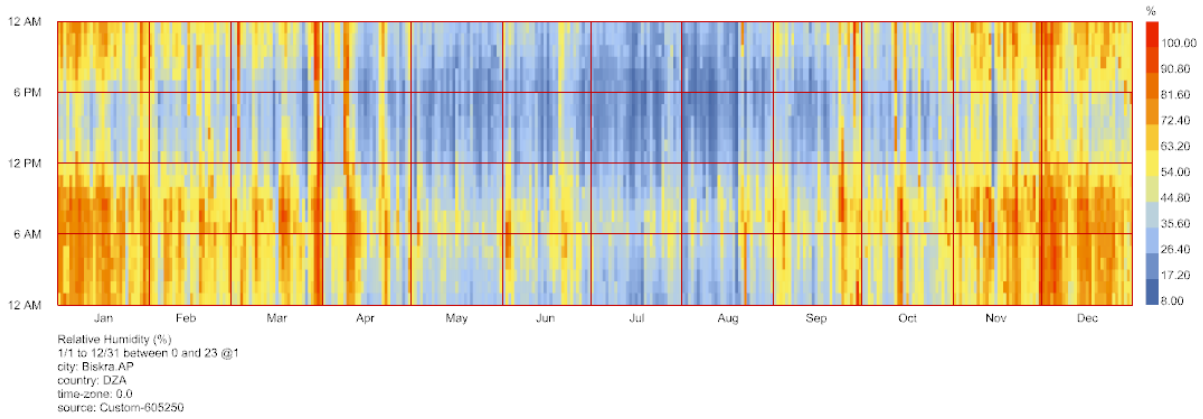
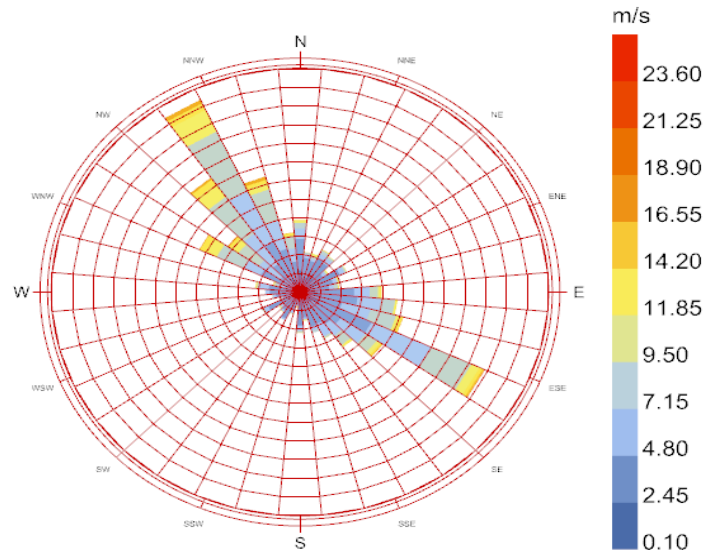


Figure 52: Graphique horaire de l'humidité source : Auteur

3.5.4 Les données des vents

La région de Biskra en Algérie est soumise à des vents dominants qui varient en intensité et en direction tout au long de l'année. Les données de vent de cette région montrent que les vents les plus forts se produisent généralement au printemps et en été, avec des vitesses atteignant parfois 20 m/s. Les vents dominants dans cette région viennent du nord-ouest et sud-est, mais d'autres directions peuvent également être observées en fonction des conditions météorologiques.



Wind Speed (m/s)
 city: Biskra.AP
 country: DZA
 time-zone: 0.0
 source: Custom-605250
 period: 1/1 to 12/31 between 0 and 23 @1
 Calm for 33.47% of the time = 2932 hours.
 Each closed polyline shows frequency of 0.9% = 50 hours.

Figure 53: Rose des vents de la région de Biskra source : Auteur

3.6 Les Ksour des Ziban

3.6.1 Le Ksar

Le ksar (au singulier ksour ou ksars) peut être défini comme un modèle architectural original de village vernaculaire fortifié, composé de maisons attachées avec des ruelles étroites. Tout le ksar est construit avec des matériaux traditionnels tels que le l'adobe (tob), et est marqué par un mur extérieur avec une seule ou peu d'entrées. Le Ksar a deux fonctions essentielles : la première est l'adaptation au climat et la seconde est l'auto-protection. En raison de l'hostilité de ces régions au Moyen Âge et pour se protéger de l'insécurité des tribus ennemies extérieures, les habitants ont été poussés à créer des groupements agglomérés d'habitat dans les grandes vallées cultivées de palmiers (Hammoudi, 2014; Meouak, 2017). Notamment pour protéger des rayonnements solaires en été, des remparts avec mitoyenneté des édifices ont été créés afin de cultiver de l'ombre portée. Tout cela a fondé la typologie actuelle des ksour de la région des Ziban. Les ksour des Ziban s'étendent sur l'ensemble de la wilaya de Biskra.

3.6.2 L'état actuelle des Ksour

Actuellement, la plupart de ces établissements humains ont été abandonnés, laissés à l'abandon ou détruits. Ces transformations ont entraîné l'apparition de nouvelles conceptions architecturales et urbaines qui ne sont pas adaptées à la réalité locale en termes d'architecture et de paysage.

L'inadéquation des ksour aux besoins de la vie moderne en termes d'équipements, de services, d'infrastructures et de moyens de communication accélère la décadence de ces noyaux de civilisation ancienne. Selon (Hammoudi, 2014), les ksour connaissent quatre types de changements : lotissement, tache d'huile, linéaire et dispersé.

Les ksour des Ziban ont été abandonnés en partie ou en totalité en raison de l'absence d'infrastructures telles que l'électricité. Les nomades sédentarisés ont remplacé les ksour.

En somme, l'abandon et la décadence des ksour des Ziban illustrés dans la Figure 54 sont dus à leur inadéquation aux besoins modernes, notamment en matière d'infrastructures et de services. Ce qui a entraîné leur mutation et leur déclin, ainsi que l'émergence de transformations dans leur architecture (Hammoudi, 2014).



*Figure 54: Illustration de l'état actuelle de la plupart des Ksour(exemple Ksar Oumech)
source : Auteur*

3.6.3 Les différents Ksour de la région des Ziban

Dans la section suivante, les différents ksour de la région des Ziban sont présentés en fonction de leur catégorisation dans la composition territoriale.

3.6.3.1 Capitale des Ksour – Biskra

Biskra est la capitale de la région des Ziban, située au nord de tous les ksour. Selon des travaux antérieurs, elle comptait plusieurs ksour (Alkama, 1995). Cependant, ces derniers temps, l'apparition de nouvelles conceptions architecturales et urbaines inadaptées à la réalité locale ont entraîné la disparition de ces ksour.

3.6.3.1.1 Zab el Gharbi

Cette région, dont Tolga est le pôle central, constitue l'une des plus grandes oasis de la région, comprenant les ksour d'El Hadjeb, Bouchagroun, Lichana, Foughala, Bourdj Ben Azzouz, Lioua, Ourelal, Mlili et Oucmache. Cette observation fait écho à la thèse de (Hammoudi, 2014) sur le patrimoine Ksourien.

3.6.3.1.2 Ksar de Tolga

Tolga est la capitale locale du Zab el Gharbi, située à 34 km au sud de la ville de Biskra. Selon Mohamed Meouak (2017), les premières mentions de la ville remontent au X^{ème} siècle. Le ksar, construit sur les traces d'anciennes ruines romaines et entouré d'une palmeraie, offrait une parfaite harmonie avec son environnement. Actuellement, il subit une forte mutation et une décadence urbaine vers une architecture et des formes hybrides qui rompent avec l'ancienne tradition des ksour. En parallèle, il connaît un développement d'habitat linéaire en raison de l'impact de la route qui encourage l'abandon du mode de vie de la palmeraie en faveur d'une urbanisation à caractère commercial (Hammoudi, 2014). La Figure 55 illustre la mutation urbaine du ksar de Tolga entre octobre 2005 (côté droit) et décembre 2020 (côté gauche).



Figure 55: la mutation urbaine du ksar de Tolga entre octobre 2005 et décembre 2020

3.6.3.2 Le Ksar de Lichana

Le Ksar de Lichana se trouve à 5 km de Tolga. Ce Ksar a été abandonné par ses habitants à la suite de fortes pluies diluviennes à la fin des années 60 et a connu un abandon total en raison de la construction de nouveaux quartiers en périphérie de la palmeraie comme il est indiqué dans la Figure 56 , où se trouve actuellement la nouvelle cité de Lichana (en rouge). Depuis cette période, le Ksar (en jaune) a commencé à tomber en ruine comme c'est illustré dans la Figure 57.

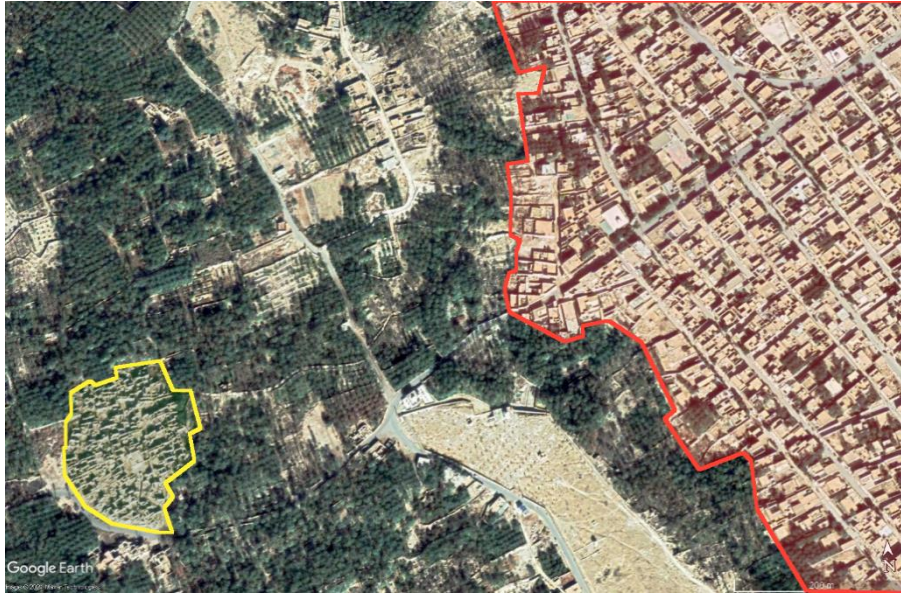


Figure 56: illustration cartographique du Ksar de Lichina



Figure 57: Des vues prises depuis le Ksar de Lichana (source : auteur)

3.6.3.2.1 Le Ksar de Farfar

Farfar est le ksar situé à l'est de Tolga. Selon les sources arabes, il aurait autrefois été une forteresse, tandis que les récits des habitants locaux mentionnent qu'il a été abandonné en raison des fortes pluies. De nos jours, il subit une importante détérioration comme il est indiqué dans les Figure 58 et Figure 59. De plus, il est occupé par des familles défavorisées qui se trouvent dans l'incapacité d'accéder à d'autres logement



Figure 58: illustration cartographique du Ksar de Farfar



Figure 59: Des vues prises depuis le Ksar de Farfar (source : auteur)

3.6.3.2.2 Le Ksar d'Ourlal

Le ksar d'Ourlal (Figure 60) a été bâti sur un site d'origine romaine. On y observe une importante présence de pierres taillées, ainsi que des vestiges de murs construits avec des matériaux similaires, comme l'a mentionné le docteur Guyon (Guyon, 1852). L'état de dégradation du ksar d'Ourlal est comparable à celui des autres ksours, comme en témoigne la Figure 61.



Figure 60: illustration cartographique du Ksar d'ourelal



Figure 61: Des vues prises depuis le Ksar d'Ourelal source : Auteur

3.6.3.2.3 Le Ksar d'Oumache

Selon les récits, Oumache est en partie entouré de marais et de lacs qui donnent à l'oasis un caractère unique (Meouak, 2017; Pease, 1893). Le ksar est perché sur une colline autour de laquelle se développent encore aujourd'hui les fossés d'eau stagnante qui servaient autrefois à sa défense. Une porte d'entrée est percée dans la muraille de terre. Comme dans tous les ksour sahariens, il y a un marché avec tout autour des boutiques à portes excessivement basses qui conservent la fraîcheur et le mystère. De-ci de-là, on peut remarquer des frontons de portes, dès l'appui de la fenêtres de pierre et des ruines de toute sorte, trace évidente de la civilisation romaine (Hurabielle, 1899; Meouak, 2017). A l'heure actuelle le ksar de Omache n'est plus que vestige comme il est exposé dans la Figure 62.



Figure 62: Des vues prises depuis le Ksar d'Oumache source : Auteur

3.6.3.3 Zab el Chergui

Zab el Chergui est une région située à l'est de la ville de Biskra, dans la région de Sidi Okba qui est considérée comme la plus grande cité de la région. Elle comprend les communes de Chetma, Seriana et Tehouda, ainsi que d'anciens ksour.

3.6.3.3.1 Sidi-Okba

Sidi-Okba tire son nom du grand général musulman Okba ibn Naffa el Fihri, conquérant de l'Afrique du Nord. Comme Biskra était la capitale économique et politique, Sidi-Okba était la capitale religieuse de la région. Selon Ibn Khaldoun, la cité de Sidi-Okba ne comprenait que le mausolée d'Okba, mais en raison des visites animées sur ce site, un noyau s'est créé petit à petit jusqu'à la ville actuelle de Sidi-Okba (Meouak, 2017).



Figure 63: illustration cartographique du Ksar de Sidi Okba

3.6.3.3.2 Le ksar Chetma

La Figure 64 présente Le ksar de Chetma qui se situe dans le Zab chergui (oriental), à l'est de la ville de Biskra dans la basse-vallée de l'Oued Abiod, dans le piémont de l'Aurès. De plus, Chetma est une oasis où le ksar était habité par la communauté noire des H'chachna, principaux cultivateurs de palmiers qui ont été déplacés à « Citi3 », à la périphérie du nouveau tissu urbain de Chetma (Meouak, 2017).



Figure 64: Des vues prises depuis le Ksar de Chetma source : Auteur

3.6.3.3.3 Tehouda

Tehouda, située à 5 km au nord de la cité de Sidi-Okba, est un important centre du Zab Elchergi. Elle a une histoire qui remonte à l'époque de l'Empire romain et son nom est mentionné à plusieurs reprises dans les textes anciens (Meouak, 2017). Actuellement, son état (est similaire à celui d'Oumache comme il est indiqué dans la Figure 66.



Figure 65: Le Ksar de la région Tehouda source : Auteur

3.6.3.3.4 Autres Ksour

Dans son ouvrage intitulé « Les Ziban entre Aurès et Sahara: Une géographie historique de Biskra et de ses oasis du Moyen Âge à la fin de l'époque moderne » (Meouak, 2017), l'auteur mentionne une liste de 14 ksour basée sur les travaux de Louis Rinn. Parmi les ksour évoqués qui n'ont pas été présentés dans la partie précédente, on retrouve Badès, Ben-Tious, El-Bourdj, Filiache, Liana, Lichana, Lioua, Ouled-Djellal, Zeribet Ahmed et Zribet el Oued. De plus les ksour de M'khadma, El Ghrouss, Bouchagroun et Seriana font également partie de cette région et témoignent de l'architecture ancienne des ksour Zibannien. Malheureusement, certains de ces ksour sont en ruines et d'autres sont inconnus car l'auteur n'a pas pu les localiser ou n'a pas eu l'opportunité de les visiter.

3.6.4 La typologie des Ksour des Ziban

L'approche typologique nous permet de classer et d'ordonner les différents éléments architecturaux de l'architecture vernaculaire des Ziban selon des types bien précis en fonction de leur contexte spatial spécifique (Jacoby, 2015). Cette méthode nous aide à comprendre comment ces éléments ont évolué au fil du temps et comment ils ont été adaptés aux besoins locaux. En utilisant cette approche, nous pouvons mieux comprendre l'histoire et la culture de cette région, ainsi que les facteurs qui ont influencé le développement de son architecture vernaculaire.

3.6.5 La morphologie urbaine

Les ksour de Biskra sont des groupements dispersés qui suivent le tracé des seguias comme régulateur (Alkama, 1995). Les autres ksour de la région de Ziban ont des formes compactes et des tracés irréguliers, avec des rues sinueuses qui se forment par la disposition des habitations de part et d'autre comme il est illustré dans la Figure 66 (Ouamane & Saker, 1991).

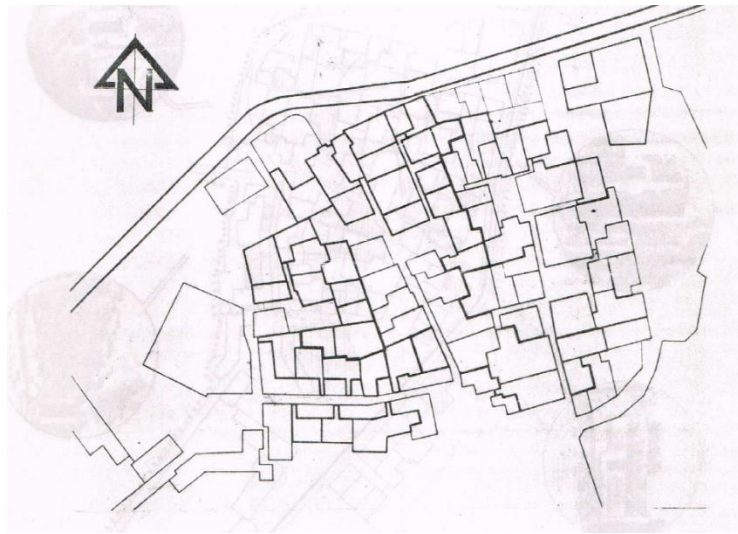


Figure 66: Exemple de plan de masse du ksar d'Ourelal source : (Ouamane & Saker, 1991)

L'agglomération est dense, ce qui rend la forme de la parcelle complexe car elle doit répondre à deux obligations : l'accès à l'espace commun de distribution et l'organisation de l'espace privé autour de la cour. De plus, Pour des raisons d'assainissement, les rues étroites du ksar étaient en pente vers l'extérieur comme il est indiqué dans la Figure 67 (Ouamane & Saker, 1991).

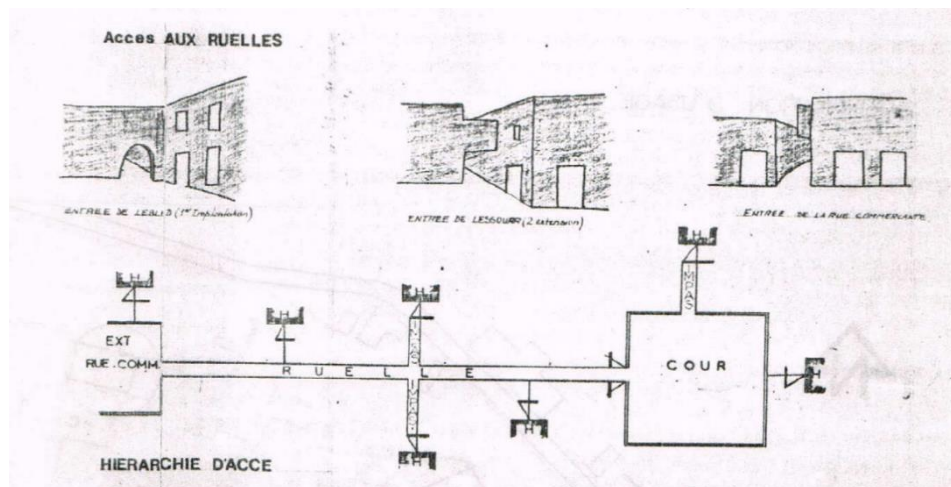


Figure 67: illustration schématique de l'accès aux ruelles et la hiérarchie d'accès source : (Ouamane & Saker, 1991)

Cette typologie urbaine est adaptée au climat chaud et sec de la région de Ziban. Les ksour sont conçus pour fournir une protection contre la chaleur, le vent et les tempêtes de sable. Les rues étroites et sinueuses créent des zones d'ombre et de ventilation naturelle, tandis que les murs épais en adobe (terre crue) et les toits en terrasse offrent une isolation thermique efficace.

L'architecture vernaculaire de la région de Ziban est donc étroitement liée à son environnement naturel et à son mode de vie traditionnel. Cette typologie urbaine, avec ses rues sinueuses, ses maisons en terre crue et ses toits en terrasse, est le résultat de siècles d'adaptation aux conditions climatiques difficiles de la région. Elle témoigne de la capacité des habitants de la région à créer des formes architecturales adaptées à leur environnement, tout en exprimant leur culture et leur identité locale.

3.6.6 L'habitation Ksourienne

3.6.6.1 Aperçu historique et évolution de la construction

Les habitats isolés dans la palmeraie sont à l'origine de plusieurs changements socio-politiques et socio-économiques dans la région de Ziban. Tout d'abord, la sédentarisation des nomades dans les années 1950 a conduit à la création d'habitats isolés après la perte de leurs techniques de transport dues à la construction de chemins de fer. De même, la colonisation a entraîné la création d'habitats isolés près des lieux de travail pour les zaabi, qui ont préféré vivre seuls plutôt qu'en groupements. Ces habitats représentent une rupture dans la tradition du ksar, où les habitants étaient réunis en fonction de leur appartenance sociale (propriétaires ou khamass).

En 1969, une pluie torrentielle s'est abattue sur l'Algérie et la Tunisie pendant un mois et demi, causant des dégâts considérables dans la région de Ziban. Les matériaux de construction utilisés, principalement la brique de terre, ont été fortement endommagés, parfois de manière irréversible. Les toits en terrasse, faits de madriers et de treillis en palmes recouverts de couches de terre, ont été particulièrement touchés. Dès les premières pluies, les toits se sont gorgés d'eau, risquant de s'écrouler.

Après cette catastrophe de 1969, il y a eu un besoin urgent de reconstruction, mais l'artisanat local de construction n'a pas permis de satisfaire ce besoin. Cette situation a entraîné une évolution dans la manière de construire, avec l'introduction de nouveaux matériaux et techniques de construction plus résistants aux intempéries. Toutefois, cette évolution a également conduit à la perte de certaines traditions de construction vernaculaires et de l'identité culturelle associée.

3.6.6.2 La typologie de l'habitat

L'habitation ksourienne, en plus d'être introvertie à l'échelle urbaine, se caractérise également par une introversion de son organisation spatiale architecturale (Figure 68) (Ouamane & Saker, 1991).

Cette introversion se traduit par une disposition des espaces intérieurs autour d'une cour centrale. Les chambres, les salles de séjour et autres espaces domestiques sont orientés vers cette cour, créant ainsi un environnement intime et sécurisé. De plus, les espaces ouverts tels que les terrasses, les skifas et les ghorfas sont également conçus de manière à offrir une intimité visuelle tout en permettant une ventilation et une illumination modérée. Cette introversion est donc une caractéristique fondamentale de l'habitat ksourien, reflétant à la fois les besoins culturels et les conditions environnementales des communautés qui l'ont développé.

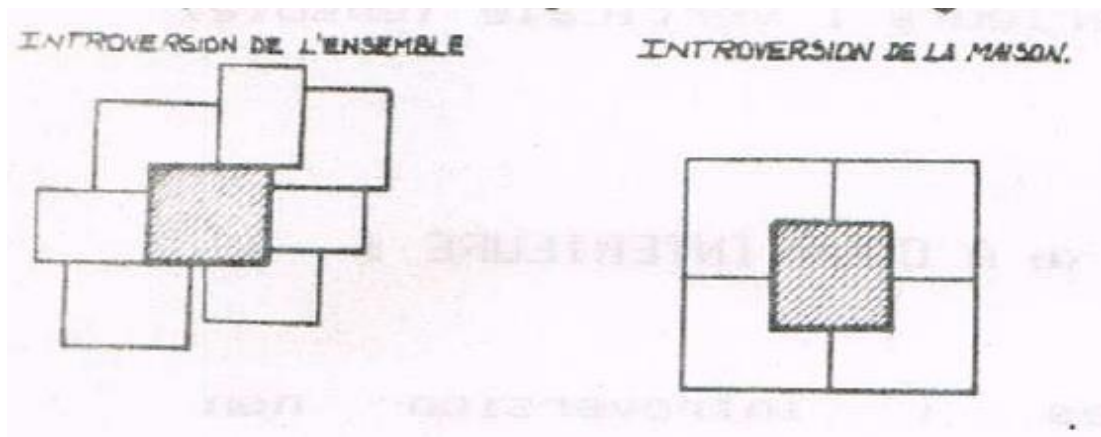


Figure 68: introversion urbaine et architecturale de l'habitation Ksourienne
source : (Ouamane & Saker, 1991)

3.6.6.2.1 Skifa

La skifa est un espace de transition entre l'extérieur et l'intérieur de la maison, de dimension réduite allant de 4 à 10 m². Sa fonction principale est de servir d'interface entre l'environnement extérieur et la cour intérieure. L'aération y est assurée par la circulation de l'air froid de l'extérieur qui chasse l'air chaud de l'intérieur par la cour. Ce petit espace est généralement situé à un angle de la maison, en contact direct avec l'extérieur et en relation directe avec la cour intérieure (Gouzli et al., 1991).

3.6.6.2.2 West-dar

West-dar est un espace essentiel dans l'organisation et la distribution de la maison. Sa forme carrée, rectangulaire ou en lui permet de s'adapter facilement au reste de la maison. En effet, c'est un espace polyvalent qui remplit plusieurs fonctions telles que l'organisation, l'aération et l'éclairage de l'ensemble de la maison.

L'aération et l'éclairage de West-dar est assurée par l'escalier non couvert et l'ouverture sur terrasse (Raouzna) (2019, ماضوي), ce qui permet une bonne circulation de l'air et de la lumière naturelle à l'intérieur de la maison. De plus, situé en tant qu'espace de distribution et d'organisation, West-dar

constitue le noyau de la maison. Sa localisation centrale permet une circulation fluide à travers les différents espaces de la maison. En somme, West-dar est un espace clé de la maison qui contribue grandement à son bon fonctionnement (Gouzli et al., 1991).

3.6.6.2.3 Chambres, Beyt, Ghorfa

Les chambres, beyt et ghorfa, sont des espaces polyvalents de petite taille, d'une superficie allant de 6 à 10 m², qui s'ouvrent sur la cour intérieure ou sur la terrasse. Ils sont multifonctionnels et peuvent servir de lieu de réception, de salle à manger ou de séjour. L'aération est assurée par l'évacuation de l'air des chambres vers la terrasse ou par la cour intérieure. L'éclairage est directement assuré sur la terrasse et indirectement sur le RDC. Ces espaces sont situés en périphérie de l'espace de distribution, de la cour et de la terrasse, offrant une certaine intimité (Gouzli et al., 1991; Ouamane & Saker, 1991).

3.6.6.2.4 Terrasse Stah

La Terrasse Stah est un espace extérieur situé au premier étage de la maison, délimité par une murette qui sert de séparation avec les espaces de stockage et de dépôt. Cet espace est entièrement ouvert sur la verticalité, ce qui permet une aération complète et une vue dégagée sur l'environnement extérieur. L'éclairage de la terrasse est assuré par la lumière naturelle, offrant une grande surface ensoleillée. La Terrasse Stah est accessible depuis l'intérieur de la maison par une superposition imposée par les murs porteurs du rez-de-chaussée (Gouzli et al., 1991).

3.6.6.2.5 Depot Makhzen

Le Makhzen, espace de stockage, est un élément de l'habitat ksourien dont les dimensions sont basées sur le module intérieur de la chambre au rez-de-chaussée. Sa fonction est de stocker des dattes et des produits alimentaires divers. L'aération y est assurée de l'intérieur vers l'extérieur par des ouvertures sur la terrasse. L'éclairage est assuré de la même façon que pour les chambres de l'étage. Le Makhzen est situé à l'étage et accessible à partir de la terrasse, implanté à la périphérie de l'habitat. Cet espace de stockage est donc stratégiquement placé pour faciliter l'accès aux éléments alimentaires tout en les protégeant des intempéries et de la chaleur (Gouzli et al., 1991; Ouamane & Saker, 1991).

3.6.6.2.6 Chambre d'invité

La chambre d'invité est un espace qui présente une forme similaire aux autres chambres de la maison. Sa fonction principale est d'accueillir des personnes qui ne peuvent pas être admises à

l'intérieur de la maison. Comme pour les autres chambres, l'aération et l'éclairage de cet espace sont similaires, se faisant par la cour intérieure ou la terrasse (Gouzli et al., 1991).

La localisation de la chambre d'invité est proche de l'extérieur et de la skifa, espace de transition entre l'extérieur et l'intérieur de la maison. Sa proximité avec la skifa permet aux invités d'accéder facilement à leur chambre sans avoir à traverser l'intérieur de la maison. (Gouzli et al., 1991 ; Ouamane & Saker, 1991).

3.6.6.2.7 Knif-WC

Le Knif-wc est un élément architectural présent dans l'habitat ksourien. Il est composé de deux espaces très réduits, superposés et reliés par une petite ouverture. Sa fonction principale est de répondre aux besoins naturels des habitants. L'aération y est assurée de manière naturelle grâce à la terrasse qui permet une circulation de l'air frais. L'éclairage est direct et assuré par une baie sans porte. Cet espace est situé à l'étage dans un endroit intime, offrant ainsi une certaine intimité aux occupants (Gouzli et al., 1991).

3.6.6.2.8 La cuisine

La cuisine dans l'architecture ksourienne n'est pas conçue comme un espace spécifique à part entière. En effet, elle est simplement située à une distance des chambres.

La Figure 69 schématise la disposition spatiale d'une habitation dans la région des Ziban (Gouzli et al., 1991).

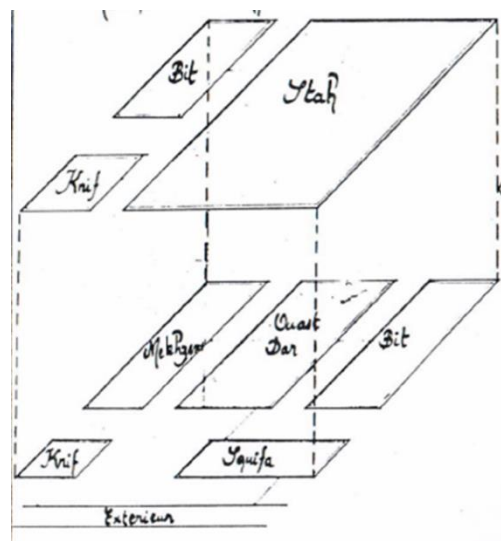


Figure 69 Disposition spatiale d'une habitation Ksourienne source : (Gouzli et al., 1991).

3.6.7 Les Éléments architecturaux et matériaux de construction

L'habitation Ksourienne des Ziban se caractérise par l'utilisation de matériaux de construction locaux tels que la brique de terre et le mortier de terre pour les murs, et le soubassement en pierre pour assurer la stabilité de la structure. Les Tobe en terre crue, de dimensions standardisées, sont utilisés pour construire les murs en superposition comme il est illustré dans la Figure 70 du travail de (Ouamane & Saker, 1991)..

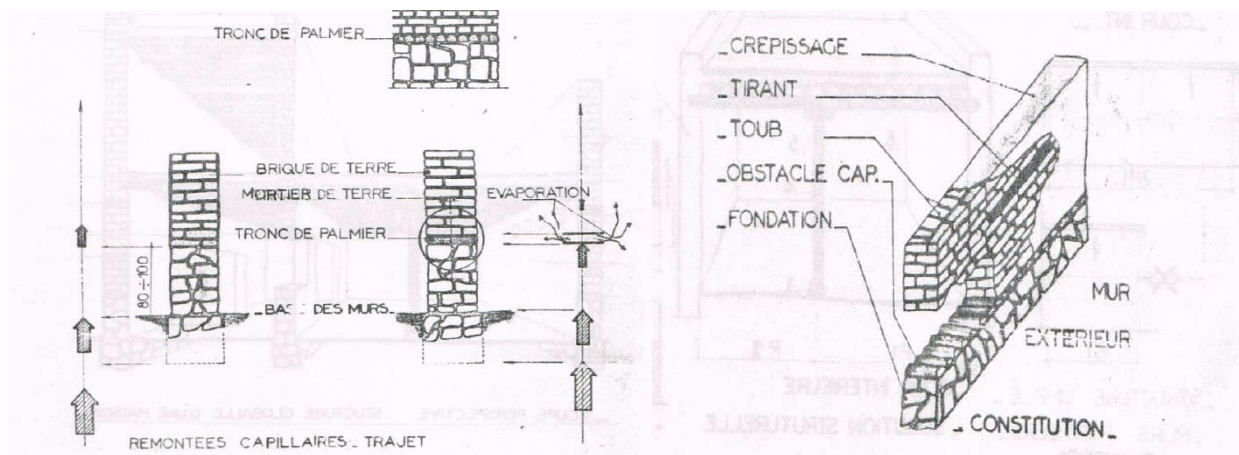


Figure 70: illustration de la construction des murs source : (Ouamane & Saker, 1991).

Les dalles en tronc de palmier sont également utilisées pour la construction des planchers, tandis que les colonnes en palmier soutiennent les toits en terrasse (Ouamane & Saker, 1991).

La construction d'une maison ksourienne suit un processus méthodique (Figure 71) qui commence par la construction du soubassement en pierre, suivi par l'élévation des murs en brique de terre et tubes en terre cuite. Les poutres en bois sont ensuite fixées aux murs pour soutenir les dalles en tronc de palmier qui forment le plancher. Les colonnes en palmier sont ensuite ajoutées pour soutenir le toit en terrasse.

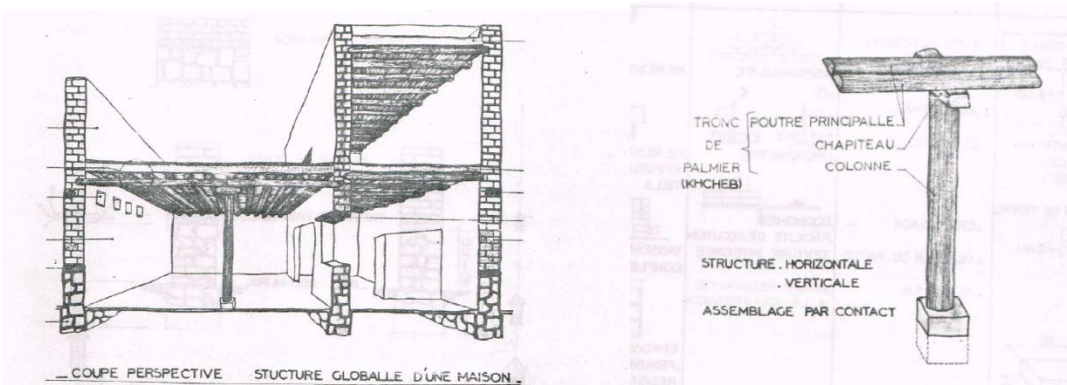


Figure 71: illustration de la construction de la dalle - source : (Ouamane & Saker, 1991).

En utilisant des matériaux locaux et en suivant des techniques de construction éprouvées, les habitants de la région ont développé une architecture unique qui s'adapte parfaitement à l'environnement naturel tout en répondant aux besoins fonctionnels et esthétiques de la vie quotidienne. L'habitation Ksourienne est ainsi le résultat d'un savoir-faire local et d'une adaptation progressive aux conditions climatiques et culturelles de la région.

3.7 Conclusion

Ce chapitre, intitulé "Architecture et urbanisme de la région du Ziban", met en évidence l'importance historique et culturelle de cette région en Algérie. Les éléments architecturaux emblématiques de cette région sont les ksour, des villages fortifiés.

L'histoire des ksour remonte à plusieurs siècles, jouant un rôle essentiel dans la protection des habitants contre les conditions climatiques et hostiles difficiles.

La région du Ziban se situe dans une zone caractérisée par un climat désertique chaud, avec des températures élevées tout au long de l'année, une faible humidité et des vents fréquents, comme le montrent les données climatiques. Cette réalité climatique a influencé la conception et la construction des ksour, qui offrent une protection contre les conditions environnementales.

En examinant les différents ksour de la région, tels que Farfar, Ourelal, Oumache, Sidi-Okba, Chetma et Tehouda, on peut observer des caractéristiques architecturales communes à ces agglomérations. La typologie urbaine des ksour du Ziban se caractérise par des rues étroites, des maisons adossées les unes aux autres et une disposition compacte favorisant la protection et la vie communautaire. Les ksour sont construits à partir de matériaux locaux tels que l'argile, la pierre et le palmier. Les maisons ksouriennes sont généralement édifiées selon des techniques traditionnelles et avec des matériaux locaux, ce qui contribue à l'unicité architecturale de la région.

Ce chapitre constitue une introduction à l'étude des stratégies passives vernaculaires des ksour du Ziban, visant à se familiariser avec la région d'étude et à comprendre le contexte dans lequel ces anciennes stratégies passives ont été développées.

Chapitre 4.

ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT EPISTEMOLOGIQUE

4.1 Introduction

Ce chapitre joue le rôle de transition entre les deux parties théorique et pratique de l'étude. Son but est de présenter les avancées de connaissances dans le domaine de l'identification et l'intégration des stratégies architecturales vernaculaires dans l'architecture contemporaine. Ainsi, cette partie de la recherche permettra d'investiguer les recherches les plus pertinentes qui ont porté sur l'identification des stratégies vernaculaire architecturales passives dans les climats chauds et arides à travers les méthodes utilisées pour étudier les dispositifs et techniques passifs (Chapitre 2) ainsi que l'évaluation de leurs performances thermique et visuelle (Chapitre 1). Les travaux qui ont porté sur l'optimisation de ces stratégies et leur intégration dans l'architecture contemporaine sont également explorés.

4.2 Etat de l'art

4.2.1 L'architecture vernaculaire - Un intérêt émergent

Il est de plus en plus fréquent de voir une augmentation de l'intérêt pour l'évaluation et l'analyse de l'architecture vernaculaire dans les domaines de la recherche architecturale et de la construction de projets (Nguyen et al., 2019; Pardo, 2023). Selon une étude de (Nguyen et al., 2019), il y a eu un grand intérêt pour la recherche sur l'architecture vernaculaire au sein de la communauté scientifique au cours des dernières décennies, avec une tendance à l'augmentation de l'intérêt observée en Asie et en Europe.

Les motivations pour étudier cette thématique peuvent inclure les progrès en modélisation computationnelle et la nécessité de répondre aux exigences de la conception de bâtiments durables, y compris les systèmes de labellisation des bâtiments verts. L'étude en question a examiné un échantillon de 127 articles sur l'architecture vernaculaire, à partir desquelles des évaluations et des orientations ont été tirées.

Les résultats ont montré une répartition géographique et climatique inégale des études, avec la Chine, l'Iran, la Malaisie, la Turquie et l'Inde, se distinguant comme centres de recherche en architecture vernaculaire, tandis que la Russie, l'Asie centrale, l'Afrique, l'Amérique et l'Australie manquent encore d'études dans ce domaine. Au final, les auteurs de l'étude sont convaincus que les enseignements de l'architecture vernaculaire deviendront bientôt des données utiles dans la conception et la construction des bâtiments contemporains en raison de sa pertinence en termes de

respect de l'environnement et d'adaptation aux contextes locaux. Par ailleurs, les données scientifiques démontrent que l'utilisation de matériaux locaux et de techniques de construction vernaculaires ont un impact positif sur les performances thermiques et énergétique des bâtiments (Berghout & Forgues, 2019; Rais et al., 2019b).

4.2.2 Études comparatives entre l'architecture vernaculaire et l'architecture contemporaine

De nombreuses études ont été menées pour évaluer et comparer les performances de l'architecture vernaculaire et de l'architecture moderne en termes de confort thermique, efficacité énergétique, confort visuel et qualité de vie. Ces études ont utilisé des méthodes scientifiques pour mesurer les performances des bâtiments de différents types d'architecture pour ensuite les comparer (Rais et al., 2019; Taleghani et al., 2010; Widera, 2021). Les résultats de ces études ont contribué à une meilleure compréhension des avantages et des inconvénients de ce type d'architecture, et ont aidé à orienter les décisions de conception vers des solutions plus durables et efficaces.

Ainsi, l'objectif de l'étude de (Widera, 2021), était d'évaluer les conditions de confort thermique dans les habitations vernaculaires dans l'ouest de l'Afrique subsaharienne. L'article identifie six typologies de bâtiments vernaculaires et peu coûteux spécifiques pour certains pays. Une analyse comparative du confort des utilisateurs et des performances thermiques de cas d'étude représentatifs de chaque typologie a été effectuée en vue d'une architecture climatique, durable et bioclimatique dans la région d'investigation. Les mesures de température, d'humidité relative, de qualité de l'air intérieur et de la luminosité ainsi que le sondage de satisfaction des utilisateurs ont été effectués en février 2019 et répétés en août 2019. Il a été déterminé qu'au cours de la saison chaude et sèche, les températures intérieures de 26 à 30 degrés Celsius ont été atteintes dans les habitations traditionnelles (typologies I à IV) et acceptées par 60 à 70 % des habitants, alors que dans les "maisons modernes" (typologies VL2 et VI), le niveau de confort thermique des utilisateurs était significativement plus faible (seulement 20 % se sentaient à l'aise). Au cours de la saison plus froide et humide, 90 % des utilisateurs se sentaient à l'aise dans les habitations vernaculaires et seulement 50 % dans les "maisons modernes". Des concentrations élevées de CO₂ ont été détectées dans les habitations avec des enveloppes étanches (1800 à 1900 ppm) en raison de l'absence de ventilation adéquate. Pour trouver une solution, différents taux d'échange d'air ont été examinés pour vérifier leur conformité avec la perception de confort thermique des utilisateurs.

Il a été constaté que la ventilation optimale devrait fournir un taux d'échange d'air de 0,5 VR/h, ce qui permet de satisfaire les exigences minimales des normes ISO et ASHRAE. L'étude a établi des bases pour un modèle de logement durable, bioclimatique et abordable pour l'ouest de l'Afrique subsaharienne. Selon (Mirshojaeian Hosseini et al., 2020), l'amélioration de l'efficacité des façades des maisons contemporaines de Mashhad en utilisant les enseignements tirés des bâtiments traditionnels a été étudiée. L'étude examine le rôle des façades de bâtiments dans l'optimisation de la consommation d'énergie en comparant la performance de façades de bâtiments traditionnelles et modernes de la ville de Mashhad en termes de conditions climatiques. Les résultats de l'étude montrent que les bâtiments traditionnels-indigènes ont un ratio façade-fenêtre plus faible et des façades plus épaisses que les bâtiments modernes, et ils ont également une résistance thermique plus élevée, ce qui entraîne une dissipation thermique moins importante et une consommation d'énergie plus optimisée. L'étude suggère que l'intégration d'éléments de façades de bâtiments traditionnels dans la construction moderne pourrait contribuer à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels. Selon (Pandit et al., 2019), Il est démontré que les mécanismes de refroidissement naturels présents dans les bâtiments anciens ont un impact significatif sur le confort thermique intérieur. Ces mécanismes sont souvent ignorés lors de la conception de nouvelles structures, entraînant des niveaux de consommation d'énergie plus élevés pour atteindre le même confort thermique. Les facteurs affectant le confort thermique incluent l'humidité, la température intérieure, les températures de surface moyennes, le rapport de variation de l'air et l'éclairage. Les matériaux de construction modernes tels que le ciment et l'acier sont durables mais peu écoénergétiques. Il est donc important de trouver un équilibre entre l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments. Cet article examine les mécanismes de refroidissement dans les bâtiments anciens et compare leur confort thermique à celui des bâtiments modernes. Il est clair que les bâtiments anciens sont plus confortables thermiquement que les bâtiments modernes pour les mêmes conditions extérieures. La température intérieure est généralement plus élevée dans les bâtiments modernes que dans les bâtiments anciens pour les mêmes températures extérieures. Les différences de température sont attribuées au phénomène de refroidissement par évaporation présent dans les bâtiments traditionnels à base de mortier de boue, ainsi qu'à la faible conductivité thermique et aux murs et toits plus minces des bâtiments modernes en béton.

4.2.3 Les performances environnementales des stratégies passives vernaculaires

Les comparaisons des performances entre **l'architecture vernaculaire et l'architecture moderne ont poussé les chercheurs à s'intéresser aux stratégies passives d'architecture vernaculaire**, (Chandel et al., 2016) ont réalisé une revue bibliographique approfondie de l'état actuel de la recherche en architecture vernaculaire dans le but de déterminer les caractéristiques efficaces en termes d'économie d'énergie qui ont un impact sur les conditions de confort thermique intérieur. Ils ont identifié plusieurs caractéristiques clés, notamment la conception de la masse construite, l'orientation par rapport au soleil, la planification de l'espace, les ouvertures, la mise à disposition de *sunspace*, les techniques de construction et les matériaux de construction et de toiture. La terre, en raison de ses propriétés d'isolation thermique, un matériau de construction vernaculaire largement utilisé.

4.2.4 L'architecture vernaculaire dans les zones chaudes et arides

Les régions chaudes et arides, caractérisées par des températures élevées et des précipitations limitées, présentent des défis uniques pour la conception écologique des bâtiments. Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'architecture vernaculaire de ces régions pour comprendre les méthodes utilisées pour relever ces défis, en étudiant les stratégies qui ont été testées et éprouvées au fil des siècles pour améliorer le confort thermique et la durabilité des bâtiments dans ces climats difficiles. Selon l'analyse bibliographique de (Nguyen et al., 2019), l'architecture vernaculaire dans les régions chaudes et désertiques a suscité un intérêt particulier par rapport aux autres régions du monde. . D'après (Lavafpour & Surat, 2011), Il est possible de concevoir des bâtiments qui consomment moins d'énergie en utilisant des stratégies passives, inspirées de l'architecture vernaculaire, dans les climats chauds et secs. Les études montrent que ces stratégies, telles que l'utilisation de dispositifs d'ombrage pour réduire les rayons du soleil, la mise en place de systèmes de ventilation naturelle et l'utilisation de matériaux locaux pour favoriser l'isolation thermique, peuvent considérablement améliorer les performances énergétiques des bâtiments. Les architectes traditionnels de ces climats ont développé des méthodes efficaces pour garantir le confort thermique des résidents. Ainsi, il est important d'étudier ces méthodes pour pouvoir les intégrer dans les projets de construction contemporains, avec un objectif de réduire les coûts énergétiques

et de préserver l'environnement. Ces solutions traditionnelles peuvent également être combinées avec des technologies modernes pour améliorer encore plus les performances énergétiques.

Les chercheurs ont examiné les détails de l'architecture vernaculaire dans les régions chaudes et arides, en analysant les méthodes éprouvées au fil des siècles pour relever les défis climatiques uniques de ces zones. L'étude de (Taleghani et al., 2010) explore les stratégies de conception écoénergétique de l'architecture traditionnelle dans les régions arides et chaudes de l'Iran, en se concentrant sur Kashan. Les auteurs ont identifié plusieurs stratégies de design climatique telles que l'orientation de l'aménagement, la distance entre les bâtiments, la forme et l'enveloppe du bâtiment, les éléments climatiques tels que les porches, les capteurs de vent et les cours centrales, qui ont été classées en trois niveaux : macro, moyen et micro. Ils ont également comparé les maisons modernes et traditionnelles en termes de critères de conception. Les résultats de cette étude montrent que ces stratégies sont efficaces pour réduire la consommation d'énergie dans les régions arides et chaudes de l'Iran et les auteurs recommandent leur utilisation dans la conception de logements durables à l'avenir. D'après (Sahebzadeh et al., 2017) L'architecture vernaculaire iranienne a maîtrisé l'art de s'adapter au contexte en développant différentes architectures dans différentes régions du pays. Malgré leurs apparences différentes, ces architectures suivent la même logique en esprit : une adaptation durable au contexte. Ce travail de recherche original étudie cette logique dans deux régions, l'une chaude et aride et l'autre chaude, aride et venteuse, en Iran (représentée par la ville de Yazd et la région de Sistan, respectivement) à travers une étude comparative. Ce document étudie différents éléments et techniques de durabilité dans ces zones, les raisons de leur existence et les facteurs qui les ont façonnés de la manière spécifique qu'ils sont. Les principaux éléments étudiés lors de cette enquête comprennent : le tissu et l'orientation, les trottoirs, les façades, les matériaux, les entrées, les cours, les sous-sols et les caves, les porches, les toits, les capteurs de vent et les ouvertures. En conclusion, les liens qui relient les différentes spécifications de contexte aux différents aspects de la construction sont découverts et leur rôle dans la caractéristique globale de l'architecture des deux régions est illustré dans un tableau qui résumé toutes les stratégies, de sorte qu'ils puissent être utilisés comme lignes directrices pour les futurs projets et constructions.

(Mashhadi, 2012) a comparé les architectures traditionnelles iraniennes et turques dans les climats chauds et secs dans sa thèse de doctorat. L'étude a examiné les différences et similitudes dans les caractéristiques de conception des maisons traditionnelles et des textures urbaines entre les régions

de Yazd et Diyarbakir en Iran et en Turquie. La méthodologie utilisée était une analyse documentaire pour établir le cadre théorique et l'observation pour la collecte de données, en se concentrant sur les aspects liés à la ventilation naturelle et à la protection contre les rayons du soleil, ainsi que sur les aspects socio-culturels. Les résultats de l'étude ont montré que les différences dans les styles traditionnels et la disponibilité des matériaux étaient les principales raisons des différences entre les régions, tandis que le climat similaire et la culture islamique dominante étaient les principales raisons des similitudes. L'étude de (Rezazadeh Ardebili & Shafiei, 2016) examine les stratégies vernaculaires de durabilité dans la conception et la construction des maisons traditionnelles Qajari en Iran. Les auteurs ont analysé cinq paramètres clés, tels que l'orientation du bâtiment en fonction du soleil, les matériaux de construction, la compatibilité avec les sources d'eau et la puissance du vent, et l'organisation structurelle, dans deux bâtiments situés dans une région climatique chaude de l'Iran. Les données ont été collectées à travers la recherche en bibliothèque et l'cas d'étude empirique. Les résultats de l'étude montrent que les designs et constructions des bâtiments analysés sont une réponse efficace à leur situation climatique et sont compatibles avec leur contexte. Les stratégies vernaculaires utilisées dans ces bâtiments traditionnels ont permis de réduire l'impact environnemental tout en maintenant un haut niveau de confort pour les habitants. Les auteurs concluent que ces stratégies peuvent être utilisées pour améliorer la durabilité et la résilience des bâtiments actuels dans les régions chaudes. (S. G. M. Attia & De Herde, 2009), ont examiné les stratégies de conception utilisées dans les régions climatiques chaudes sèches, chaudes modérées et chaudes humides d'Egypte, en se basant sur l'analyse de bâtiments vernaculaires existants dans ces régions. Ils ont constaté que ces bâtiments incluent des stratégies qui sont techniquement, environnementalement, socialement et économiquement valides. Cependant, ces dernières années, les bâtiments modernes ont dépendu de prix énergétiques fortement subventionnés, ce qui a entraîné une architecture énergétique et environnementale dégradante. L'objectif de cette étude est donc de permettre aux architectes de comprendre à nouveau les leçons de la tradition pour créer une architecture bioclimatique. Les auteurs présentent un ensemble de principes bioclimatiques qui abordent les morphologies urbaines, l'architecture des bâtiments et les composants architecturaux vernaculaires. Ils ont également développé une matrice comparative pour soutenir les architectes dans la conception bioclimatique. (Almusaed & Almssad, 2006), ont travaillé sur les anciens constructeurs de la région de Basrah, et ils ont constaté que les anciens constructeurs ont mis beaucoup d'efforts pour

créer des maisons bioclimatiques passives qui correspondent aux effets négatifs du macroclimat de Basrah. Le patio est l'espace central et dominant dans la planification de la maison, avec un accès direct aux espaces de vie. Les maisons de la ville sont compactes avec des cours intérieures ; les rues sont sinueuses et passent à travers les volumes des maisons. La cour ombragée a pour effet que les pièces ne communiquent pas directement avec l'air surchauffé à l'extérieur, mais à travers des espaces tampons intermédiaires. En même temps, entre la cour et la rue, au moins un mur ou un bâtiment est toujours interposé. Le plan de la maison avait une forme endomorphe (forme d'arbre ouvert). Les volumes étaient conçus pour créer de l'ombre qui aide à déplacer l'air par mouvement naturel vers le côté supérieur, ce qui peut être réalisé à travers des trous spéciaux. Les éléments architecturaux sont fortement décorés, reproduisant des typologies spéciales et des maisons traditionnelles. Les espaces ouverts, couverts par de grandes toitures, sont intéressants en raison du mélange de lumière diffuse et d'ombre qui sont un facteur esthétique essentiel dans ces bâtiments. D'après (Biradar & Mama, 2017), l'architecture vernaculaire dans la région de Kalaburagi en Inde a été analysée pour comprendre les principes et les stratégies de durabilité. La méthodologie adoptée dans cette étude était la documentation de l'architecture existante et son analyse en fonction des aspects environnementaux, socioculturels, socioéconomiques, de planification et de conservation de l'énergie. Il a été conclu que les principes de l'architecture vernaculaire peuvent être intégrés dans la société actuelle pour atteindre une durabilité accrue. Dans l'étude de (Shahran et al., 2017) pour examiner les aspects de confort thermique et d'adaptabilité dans les maisons unifamiliales vernaculaires en Libye. Les résultats montrent que les maisons traditionnelles sont plus adaptées au climat et permettent d'atteindre des aspects d'adaptabilité de confort thermique. Les cours intérieures sont une caractéristique commune de l'architecture traditionnelle libyenne, à la fois dans les zones rurales et urbaines, et offrent une façon efficace de construire une maison tout en créant un environnement intérieur favorable. Les auteurs concluent que les résultats de cette étude seraient bénéfiques pour les architectes dans la conception de bâtiments qui promeuvent le confort humain, la durabilité sociale et culturelle et les préférences des occupants tout en minimisant la consommation d'énergie en utilisant des stratégies de conception passive apprises de l'architecture vernaculaire. En conclusion, les résultats de cette étude pourraient être utilisés pour améliorer la conception écologique des bâtiments en prenant en compte les préférences des occupants, le confort thermique et la durabilité sociale et culturelle, tout en réduisant la consommation d'énergie grâce aux stratégies de conception passive dérivées

de l'architecture vernaculaire. Suivant (Maghsoudi Nia et al., 2015), les stratégies d'éclairage naturel et leur contrôle jouent un rôle important dans l'efficacité énergétique et le confort visuel dans les bâtiments. Cette étude a mené une revue de la littérature et une observation dans une région chaude et sèche de l'Iran afin d'enquêter sur les stratégies d'éclairage naturel et leur contrôle par des dispositifs d'ombrage dans les bâtiments résidentiels vernaculaires. Les résultats montrent que l'éclairage naturel dans les pièces vernaculaires était fourni par la porte, la fenêtre, Rozan, Moshabak et Goljam. Ces composants étaient équipés de dispositifs d'ombrage verticaux et horizontaux tels que Orsi, Sarsayeh, Tabeshband et Kharakpoush pour contrôler la lumière du soleil. La stratégie d'éclairage vernaculaire était en réponse à l'efficacité énergétique et au confort visuel. Les concepts et schémas vernaculaires peuvent encore être adoptés et réutilisés par les architectes et les développeurs. L'étude recommande des schémas d'éclairage naturel et des dispositifs d'ombrage appropriés lors de la phase de conception pour atteindre l'efficacité énergétique dans les nouveaux bâtiments résidentiels.

4.2.5 Les méthodes d'analyse des stratégies vernaculaires

Les recherches récentes dans le domaine de l'architecture ont mis en évidence l'importance de **l'analyse quantitative des stratégies d'architecture vernaculaire**. En utilisant des méthodologies scientifiques rigoureuses, ces études visent à évaluer l'efficacité des pratiques traditionnelles en termes de confort thermique, de consommation d'énergie et de durabilité. Une recherche menée par (Zhai & Previtali, 2010) a mis en évidence l'importance de considérer les architectures vernaculaires dans la révolution nécessaire pour réduire l'impact environnemental des bâtiments. En utilisant des modélisations informatiques pour évaluer les performances énergétiques de caractéristiques architecturales vernaculaires anciennes, ils ont montré que ces architectures, construites en s'appuyant sur les traditions culturelles locales, sont des exemples pertinents pour promouvoir des technologies de construction passives adaptées aux climats spécifiques. Les résultats de leur étude indiquent qu'il est possible d'optimiser les constructions en utilisant les techniques de construction vernaculaires, tout en garantissant le confort des utilisateurs et en réduisant la consommation d'énergie. Dans leur étude sur le microclimat dans une maison traditionnelle chinoise, (Du et al., 2014) ont apporté des éléments de clarification quant à la définition du microclimat dans les bâtiments non climatisés et sa relation avec le confort thermique pendant la saison estivale. Des mesures in situ ont été effectuées afin d'étudier le microclimat de

la maison traditionnelle, et les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus à partir de simulations thermiques dynamiques ainsi qu'à des simulations de calcul des écoulements en fluides (CFD). Les résultats ont mis en évidence la présence d'un microclimat indépendant dans la maison traditionnelle chinoise, et ont montré une concordance satisfaisante entre les mesures in situ et les résultats de simulation. Selon ces dernières, une température confortable a pu être maintenue pendant la majeure partie de la nuit, tandis que pendant la journée, la température opérationnelle a été supérieure à celle considérée comme confortable pour un tiers de la saison estivale. Les résultats ont également mis en évidence l'influence positive de la vitesse du vent sur le confort thermique dans les espaces semi-extérieurs et extérieurs. Cette étude souligne la nécessité de prendre en compte l'ensemble du microclimat d'un bâtiment pour garantir des conditions de confort thermique optimales pour les occupants, ainsi que la pertinence des simulations pour prédire le microclimat d'un bâtiment. Dans une étude menée par, (Kaihoul et al., 2021) ont examiné le rôle des stratégies passives inspirées de l'architecture traditionnelle dans le climat sec et chaud sur la demande en énergie (charges de refroidissement et de chauffage) en Algérie. Les auteurs ont analysé un cas d'étude typique de l'habitation El-Miniawy à Ouled Djellal avec des stratégies passives adaptées grâce à l'évaluation du diagramme psychrométrique, aux campagnes de mesures sur site et aux simulations dynamiques avec EnergyPlus. Ils ont étudié l'impact de sept scénarios différents avec des stratégies passives et des paramètres modifiés sur le comportement thermique et la demande en énergie de l'habitation. Les résultats montrent que les températures de conception actuelles lors des journées les plus chaudes sont comprises entre 30,1 °C et 35,4 °C, alors que la température extérieure atteint 47 °C. De plus, le bâtiment consomme 10,43 kWh/m² et 19,87 kWh/m² respectivement pour les demandes de refroidissement et de chauffage. L'étude menée par (Alrashed et al., 2017) a révélé que les régions désertiques chaudes comme l'Arabie saoudite posent des défis importants en matière de consommation d'énergie des bâtiments. Le secteur de l'habitat joue un rôle crucial dans la consommation électrique nationale, représentant environ la moitié de la consommation totale. Le but de cette étude était de déterminer le rôle de techniques de construction traditionnelles locales, telles que les cours, les mushrabiya et les constructions en adobe, dans le développement de maisons à énergie zéro (ZEH) dans les cinq principales zones climatiques saoudiennes. Pour cela, une maison de base a été conçue, modélisée et comparée aux valeurs électriques mesurées. Les résultats ont montré que l'utilisation de mushrabiya et d'adobe peut réduire considérablement la demande électrique annuelle et la demande de puissance

maximale, respectivement de 4% et 3% pour les mushrabiyaahs et 6% et 19% pour l'adobe. Les cours ne semblent pas être utiles en termes d'économie d'énergie. La recherche de (Hao et al., 2019) a mis en évidence les défis liés à l'obtention d'un confort thermique adéquat dans les zones climatiques à fortes amplitudes de températures saisonnières (HSCW), caractérisées par des températures élevées en été et relativement plus fraîches en hiver. Pour étudier les effets des cours sur les performances thermiques des maisons vernaculaires dans ces zones, l'équipe de recherche a utilisé des mesures sur le terrain et des modèles de dynamique des fluides computationnels (CFD). Les résultats ont révélé que les cours ont joué un rôle actif en tant que tampon climatique, réduisant considérablement les températures maximales en été. Cependant, en hiver, les cours ont empêché les pièces adjacentes de bénéficier des rayons directs du soleil, agissant ainsi comme une barrière thermique. De plus, l'analyse de la masse thermique a montré que celle-ci joue un rôle limité dans les zones HSCW, en raison de l'insuffisance de la radiation solaire en hiver. Les mécanismes de ventilation naturelle des maisons à cours dans les zones HSCW ont également été étudiés à travers des simulations CFD, révélant que la ventilation naturelle des cours était bénéfique grâce à des ouvertures appropriées au niveau du sol.

Plusieurs chercheurs dans le domaine de l'architecture et de la performance énergétique des bâtiments ont utilisé l'appareil de mesure **Testo 480 pour analyser la performance thermique des constructions**. Ce dispositif de mesure précis et fiable permet une analyse détaillée de la température intérieure et extérieure, de l'humidité et de la qualité de l'air, offrant ainsi une image complète de la performance climatique des bâtiments. En utilisant Testo 480, les chercheurs peuvent identifier les stratégies les plus efficaces pour améliorer le confort thermique des habitations tout en réduisant la consommation d'énergie. Selon une étude récente menée par (Berbouche et al., 2023) qui concerne les constructions vernaculaires dans la région des Aures en Algérie sont particulièrement efficaces pour faire face aux conditions climatiques difficiles de la région. En utilisant des techniques de mesure de la performance thermique avec l'appareil Test480, les chercheurs ont découvert que les maisons traditionnelles étaient plus fraîches et plus humides à l'intérieur en été, par rapport aux maisons modernes. Les résultats de l'étude montrent que les stratégies vernaculaires utilisées dans les constructions rurales de la région des Aures peuvent être considérées comme une référence pour les bâtiments contemporains afin d'améliorer le confort thermique intérieur tout en réduisant la demande énergétique. (Rahmani et al., 2022), a présentée dans cet l'étude l'utilisation de l'appareil de mesure Testo 480 pour analyser le comportement

thermique de différents matériaux de construction de murs, tels que la maçonnerie en terre cuite, les blocs creux en béton et les briques creuses, dans un bâtiment résidentiel en zone aride, à Biskra en Algérie. Les résultats ont montré que le comportement thermique des matériaux utilisés pour l'enveloppe du bâtiment est crucial pour définir leur performance énergétique, en particulier en termes d'effusivité et de diffusivité thermique. L'étude a également identifié la terre cuite comme étant le matériau le plus efficace en termes de consommation d'énergie et d'impact environnemental, en utilisant des ressources locales disponibles. L'utilisation de l'appareil Testo 480 a donc joué un rôle crucial dans l'analyse de ces performances énergétiques et dans la prise de décisions pour améliorer la durabilité des bâtiments en zone aride. Dans leur étude, (Su & Chang, 2018) ont mis en évidence l'importance de l'environnement venteux dans le design de l'architecture vernaculaire. Pour garantir des mesures précises, les auteurs ont utilisé des instruments de mesure du climat intérieur Testo 480, pour évaluer la vitesse d'écoulement, la température et l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment Fuyu. Les résultats de l'étude ont révélé que la performance de ventilation naturelle de ce bâtiment était remarquable grâce à sa forme adaptée à la topographie et au paysage, ainsi qu'à sa conception de l'entrée principale et des cours qui assurent une ventilation croisée et une dissipation de chaleur efficaces. Les auteurs ont également souligné que le microclimat auto-régulé à l'intérieur du bâtiment contribue à améliorer le cyclage interne de la ventilation naturelle fournie par le champ de vent, en évitant la stagnation de l'air et en atténuant ainsi le malaise ressenti par les occupants. Cette étude fournit des données scientifiques solides sur l'importance de la prise en compte de l'environnement venteux dans la conception de l'architecture vernaculaire, en utilisant des méthodes de mesure avancées pour évaluer la performance de ventilation naturelle. L'analyse du confort thermique dans les logements à faible revenu de Mumbai, en Inde, révèle des défis uniques pour les occupants vivant dans un climat chaud et humide. Dans travail de (Malik & Bardhan, 2023) La technique de mesure utilisée conforme au protocole de classe II de l'ASHRAE, avec Testo 480 pour mesurer l'environnement thermique, a permis de développer un modèle de confort adaptatif pour ces occupants. L'approche modifiée de Griffith utilisée pour estimer la sensibilité thermique a donné une température de confort moyenne de 28,5 °C, qui est applicable pour des températures extérieures allant de 23,1 °C à 31,4 °C. Les résultats montrent que les conditions d'humidité élevée ont tendance à réduire la bande de confort en raison de l'inefficacité des mécanismes d'adaptation. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour élaborer des normes de confort thermique contextualisées pour les

logements à faible revenu en Inde. Selon (Laouni & Mazouz, 2021), il est possible de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments en utilisant des matériaux de construction durables tels que les briques d'argile comprimées et stabilisées (CSEB). En utilisant ces matériaux, les chercheurs ont réussi à améliorer les performances thermiques des murs et à améliorer le confort thermique intérieur en réduisant la température de surface de 7°C, influençant ainsi la chaleur stockée et le flux de chaleur transféré à l'intérieur, abaissant la température interne à 6°C et, par conséquent, abaissant la température ambiante de 5°C. Il est important de noter que la technique de mesure utilisée dans cette étude est l'utilisation de l'appareil de mesure Testo 480. Les résultats de la simulation numérique ont montré que la maîtrise des éléments de construction, tels que le matériau, a un impact direct sur l'efficacité énergétique de la construction. L'optimisation d'un seul paramètre (température ambiante) est insuffisante et nécessite l'amélioration de quelques paramètres (ventilation et humidité relative). En résumé, les briques d'argile comprimées et stabilisées sont une option appropriée de matériaux de construction durables et à faible coût pour réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation, éviter l'effet de mur chaud en été et garantir un confort thermique adéquat. Cette étude montre l'importance de la prise en compte de plusieurs paramètres en conjonction avec l'utilisation de matériaux écologiques pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

4.2.6 Exemples contemporains d'application des stratégies vernaculaires en architecture

De nombreuses études scientifiques ont été menées pour **évaluer les performances des stratégies d'architecture vernaculaire dans les contextes modernes** de construction. Ces études ont visé à comprendre comment les principes traditionnels de l'architecture vernaculaire peuvent être appliqués pour améliorer la durabilité énergétique, le confort thermique et la qualité de vie des occupants dans les bâtiments contemporains. D'après l'étude de (Berghout & Forgues, 2019), il est important de réduire la consommation d'énergie dans la construction et sur la durée de vie des bâtiments, en particulier dans les zones arides, où il est difficile de concilier les besoins énergétiques du présent et ceux des générations futures. Pour atteindre cet objectif, ils ont proposé un processus d'assistance à la conception de logements qui vise à optimiser l'intégration de dispositifs et de stratégies vernaculaires afin de maximiser les économies d'énergie tout en

garantissant le confort des occupants. Dans leur cas d'étude à Biskra, en Algérie, ils ont réussi à réduire le ratio énergétique de 25,11% grâce à cette approche. L'étude (Goudarzi & Mostafaeipour, 2017) a évalué l'effet de quatre systèmes passifs, y compris les toits verts, les bassins de toit, les atrapes-vent et les maisons souterraines, sur l'économie d'énergie d'une maison témoin construite dans la région chaude et sèche d'Iran. L'objectif est poursuivi en évaluant l'impact de chaque système sur une maison résidentielle de dimensions 13,16 m × 11,11 m × 2,8 m, située à Kerman, en Iran. Cette étude est menée pendant une période de 138 jours de mai à octobre, pendant laquelle l'utilisation de l'énergie de refroidissement est considérée comme nécessaire. Le coût sur la durée de vie (LCC) comprenant les coûts initiaux, de fonctionnement et d'entretien et le potentiel d'économie d'énergie de refroidissement de chaque système sur une période de 20 ans est évalué. Les résultats montrent que l'atrape-vent est le système le plus efficace pour économiser l'énergie de refroidissement et que les toits verts, les bassins de toit et les maisons souterraines viennent ensuite en termes de cet aspect. De plus, l'atrape-vent est capable de réduire la demande en énergie de refroidissement de mai à octobre, tandis que l'utilisation d'autres techniques passives réduit la perte d'énergie totale à travers l'enveloppe du bâtiment. L'analyse économique montre que l'atrape-vent et les bassins de toit sont les approches les plus économiques. (Foruzanmehr & Nicol, 2008) ont étudié l'intégration des systèmes de refroidissement passifs vernaculaires (VPCS) dans les bâtiments modernes dans les climats chauds et secs d'Iran. Les auteurs ont utilisé une méthodologie de recherche pour déterminer la faisabilité et l'utilisation de ces systèmes VPCS et l'impact qu'ils pourraient avoir sur la réduction de la dépendance à la climatisation. Les résultats de l'étude ont montré que l'intégration de ces systèmes VPCS dans les bâtiments modernes peut améliorer leur performance, réduire leur consommation d'énergie et les adapter aux changements climatiques. Selon (Abdulkareem, 2012), les bâtiments contemporains dans les villes du Kurdistan ont des performances climatiques et sociales insuffisantes. Pour remédier à cela, il a été proposé d'adapter les stratégies architecturales vernaculaires pour l'architecture contemporaine. Pour cela, l'cas d'étude de la citadelle d'Erbil a été utilisée, en utilisant une approche qualitative pour analyser les exemples. Les stratégies vernaculaires identifiées pour améliorer les performances climatique et sociale incluent l'utilisation de ruelles étroites, de cours centrales, de hautes pièces, de murs épais et de tours de vent. En outre, pour améliorer l'esthétique, des matériaux locaux et des motifs vernaculaires seraient utilisés pour orner les bâtiments, renforçant ainsi l'identité architecturale de la région. Ainsi, un projet de design de logements a été développé en adaptant les stratégies

vernaculaires tirées de l'cas d'étude et de la revue de la littérature à l'architecture contemporaine. D'après l'étude de (Lavafpour & Surat, 2011), l'architecture vernaculaire en Iran, également connue sous le nom de Perse, a une forte relation avec l'environnement et les principes de conception traditionnels étaient basés sur les conditions climatiques. Cependant, ces dernières années, la plupart des bâtiments en Iran et dans les pays en développement sont construits indépendamment des conditions climatiques et sans respect pour l'environnement. Ce style de construction de bâtiments entraîne une utilisation importante de systèmes de refroidissement et de chauffage mécaniques. Dans cette étude, une approche innovante pour intégrer les systèmes de refroidissement vernaculaires passifs persans dans l'architecture contemporaine dans le climat chaud et sec de l'Iran a été mise en œuvre. Les résultats montrent que les critères de conception utilisés dans l'architecture persane vernaculaire étaient climatiquement responsables et des lignes directrices de stratégies de conception écoénergétique ont été proposées pour améliorer l'énergie et la durabilité. Cette recherche tente de révéler les méthodes appliquées. Selon l'étude de (Amraoui et al., 2021), l'utilisation combinée de mesures in situ et de simulations informatiques a démontré que les bâtiments néo-vernaculaires ont une meilleure réponse aux contraintes climatiques locales, offrant ainsi des conditions de confort thermique supérieures. Les résultats ont montré que les améliorations de la performance thermique en renforçant l'enveloppe du bâtiment sont significatives, avec une réduction de la température maximale de l'air intérieure de 45,50°C à 36,10°C en été. Ces résultats soutiennent l'idée que l'intégration de stratégies climatiquement réactives développées dans les bâtiments vernaculaires est non seulement possible dans les constructions contemporaines, mais également efficace. En outre, ils suggèrent que la prise en compte des traditions architecturales vernaculaires anciennes peut conduire à une adaptation optimale des bâtiments contemporains au climat et à l'environnement, en proposant des solutions alternatives pour réduire la consommation d'énergie tout en maintenant un bon niveau de confort pour les occupants.

4.2.7 Amélioration des stratégies passives vernaculaires

Plusieurs études ont cherché à **améliorer les stratégies passives vernaculaires** en utilisant des outils de simulation pour évaluer les performances énergétiques des bâtiments. Les meilleures pratiques ont été identifiées et adaptées à l'architecture contemporaine pour optimiser l'efficacité de ces stratégies dans les bâtiments modernes (Juffle et al., 2023). Selon une étude de (Dabaieh et

al., 2015), il est estimé que dans les climats chauds et secs, une grande partie de la consommation d'énergie en ville est utilisée pour la climatisation en été. Comme le taux d'urbanisation augmente rapidement dans les pays en développement, cela entraîne une augmentation de la pression sur les ressources énergétiques pour satisfaire les besoins en confort intérieur des habitants. Pour réduire cette demande, l'utilisation de toits passifs frais est proposée comme solution. Une matrice algorithmique hybride a été utilisée pour simuler différentes possibilités de conception de toit, en alternant la forme, le matériau et la construction. Les résultats montrent que l'utilisation d'un toit en voûte avec un revêtement à haut albédo peut réduire de 53% les heures d'inconfort et économiser jusqu'à 826 kWh pendant la saison estivale par rapport à un toit plat non isolé classique. Il est recommandé de combiner cette solution avec la ventilation naturelle pour améliorer le confort intérieur et des stratégies de chauffage passif pour compenser l'augmentation des heures de chauffage. Cette application est particulièrement adaptée aux bâtiments résidentiels à faible coût dans des climats chauds et secs. Tandis que l'étude de (Awad & Abd-Rabo, 2020), a proposé une méthodologie pour les bâtiments adaptatifs dans les climats chauds et secs, mettant en avant l'utilisation d'une enveloppe transparente adéquate. Cette méthodologie intègre les approches de l'architecture bioclimatique passive vernaculaire et les stratégies d'éclairage naturel en utilisant des matériaux intelligents pour maximiser la redirection de l'éclairage naturel et de l'ombrage, dans le but d'atteindre les objectifs d'énergie durable, de confort thermique et visuel et d'éclairage naturel. Cette méthodologie a été mise en pratique à travers l'cas d'étude de la recherche sur le "Student HUB" de l'Université d'Ajman aux Émirats Arabes Unis. En utilisant des outils de simulation de performance de bâtiment, l'étude a analysé les solutions pour améliorer les performances d'éclairage naturel et réduire la radiation solaire, les problèmes d'éblouissement et les problèmes liés au confort thermique liés à l'efficacité énergétique. Les résultats montrent que l'optimisation de la performance de bâtiment par l'utilisation de cette méthodologie peut permettre aux architectes de prédire les performances énergétiques optimales et les stratégies d'éclairage naturel en créant des options de conception climatique appropriées. L'étude innovante de (Zhang et al., 2022) a utilisé un modèle de réseau neuronal de propagation arrière (BP) pour optimiser les paramètres de conception passive d'un bâtiment en terre. Les simulations réalisées sur des journées représentatives des conditions climatiques les plus extrêmes ont mis en évidence que les paramètres de conception tels que l'orientation du bâtiment, le coefficient d'occupation de la fenêtre, le facteur de projection de l'ombrage des fenêtres et l'épaisseur des murs extérieurs ont un

impact déterminant sur l'environnement thermique intérieur. En utilisant une technique d'analyse intensive, les auteurs ont déterminé les paramètres passifs les plus adaptés pour créer un environnement thermique intérieur optimal en hiver et en été. Les résultats montrent que l'immeuble construit selon ces paramètres passifs optimaux offre des performances thermiques nettement supérieures à celles de l'immeuble de base. Cette étude constitue une approche novatrice pour améliorer les performances énergétiques et thermiques des bâtiments en utilisant des techniques d'apprentissage automatique.

L'étude de (Manu & Rysanek, 2021), avait pour objectif d'optimiser génétiquement un écran en treillis simplifié en modifiant son rapport de perforation pour améliorer la performance d'éclairage naturel. Les métriques de performance utilisées étaient la surface d'éclairage direct (SDA) et l'éclairement apparent (ASE). La méthodologie impliquait la création d'une géométrie de pièce dans Rhino 6, la modélisation d'un écran en treillis paramétrique à travers Grasshopper (GH) et l'utilisation d'un logiciel d'optimisation pour analyser l'éclairage naturel. Le processus d'optimisation a abouti à six solutions uniques sur la frontière de Pareto. La solution 4 a été choisie comme la meilleure option car elle a entraîné la plus haute SDA (89%) et la plus faible ASE (8,2%) tout en respectant les exigences LEED v4 pour les crédits d'éclairage naturel. Le rapport de perforation pour cette configuration était de 19,6%. Il a été conclu que l'utilisation de l'optimisation génétique pour ajuster le rapport de perforation d'un écran en treillis pouvait entraîner une amélioration significative de la performance d'éclairage naturel dans une pièce spécifique, en respectant en même temps les normes d'éclairage durable.

4.3 Positionnement épistémologique et méthodologie de recherche

Comme mentionné précédemment, malgré l'intérêt croissant pour l'architecture vernaculaire et les performances des stratégies vernaculaires dans le monde, qui répondent aux exigences de la conception de bâtiments durables (Chandel et al., 2016), l'étude de l'architecture vernaculaire dans d'Afrique demeure un domaine largement sous-exploré et suscite une meilleure prise en charge de la part des chercheurs (Nguyen et al., 2019).

Cependant, en raison de la croissance de la demande énergétique de l'Algérie (Ministère de l'Energie et des Mines, 2019), qui est le plus vaste pays d'Afrique, et compte tenu du climat

prédominant dans ce pays, caractérisé par des conditions chaudes et arides, ainsi que de la wilaya de Biskra, qui englobe la région des Ziban et est considérée comme la wilaya la plus densément peuplée de la région aride de l'Algérie (ONS, 2008) ; une attention a été accordée à l'architecture de la région des Ziban, grâce aux travaux de chercheurs qui se sont penchés sur les spécificités architecturales de cette zone (Alkama & Tacherift, 2013; Sriti & Tabet-Aoul, 2014; Haoui & Chergui, 2016). Plus précisément, ces études ont mis en lumière les stratégies vernaculaires utilisées dans cette architecture (Sriti & Tabet-Aoul, 2014; Haoui & Chergui, 2016).

Néanmoins, les recherches sur l'analyse et l'optimisation de ces stratégies spécifiques dans cette région sont insuffisantes. La présente étude s'engage donc à combler cette lacune et à approfondir la compréhension des stratégies de conception passive développées dans les Ziban en s'appuyant sur les spécificités de son architecture vernaculaire.

L'objectif principal est de mener une analyse approfondie des stratégies de conception passive utilisées dans les Ziban, en mettant l'accent sur leur efficacité en termes de confort visuel et performance thermique. Cette étude se concentre notamment sur l'adaptation et l'optimisation de ces stratégies aux conditions climatiques spécifiques de la région, marquées par des températures extrêmement élevées typiques au climat chaud et aride.

4.4 Méthodes de recherche

Pour atteindre ces objectifs, l'étude s'appuie sur des méthodes qualitatives et quantitatives. Elle a pour but d'identifier les stratégies architecturales vernaculaires adaptées aux climats chauds et secs, d'évaluer leur efficacité et d'optimiser leur mise en œuvre.

4.4.1 Méthodes qualitatives

Étant donné que les stratégies vernaculaires passives relèvent de concepts architecturaux non mesurables, leur identification repose sur une recherche qualitative sur le terrain. Cette approche implique un contact direct avec l'architecture vernaculaire de la région des Ziban, comme cela a été réalisé dans le Chapitre 3 de cette étude. L'objectif principal étant d'observer attentivement les dispositifs architecturaux spécifiques à cette région et de les comparer aux dispositifs utilisés dans des zones chaudes et arides ailleurs dans le monde, tels qu'ils ont été présentés dans les sections 2.4 et 2.5 , et identifiés par les chercheurs dans la partie 4.2.4.

La démarche consiste donc à identifier ces dispositifs en se basant sur l'état des connaissances existant, ensuite, une analyse qualitative descriptive sera réalisée afin de classer les stratégies architecturales propres à la région et les comparées aux stratégies et dispositifs vernaculaires utilisés à travers le monde dans les régions chaudes et arides.

4.4.2 Méthodes quantitatives

4.4.2.1 Evaluation des stratégies vernaculaires

Après avoir identifié les stratégies vernaculaires dans la région des Ziban par observation in situ, il est essentiel de procéder leur évaluation quantitative afin de saisir leurs avantages et limites, et ainsi pouvoir les optimiser et les intégrer dans l'architecture contemporaine.

Dans cette optique, il convient de noter que ces performances sont généralement de nature physique et mesurable. Par conséquent, une recherche quantitative est nécessaire pour évaluer ces performances. Cette recherche implique une expérimentation provoquée sur terrain pour mesurer les performances thermiques et visuelles des dispositifs architecturaux vernaculaires, tel que démontré par les chercheurs dans la partie 4.2.4. L'objectif de cette expérimentation est de quantifier la relation de cause à effet entre les dispositifs architecturaux et les performances thermiques et visuelles. Ainsi, le schème expérimental vise à déterminer la relation entre les variables indépendantes, à savoir les dispositifs et stratégies vernaculaires de la région des Ziban, et les performances thermiques et visuelles, comme illustré dans la figure ci-dessous.

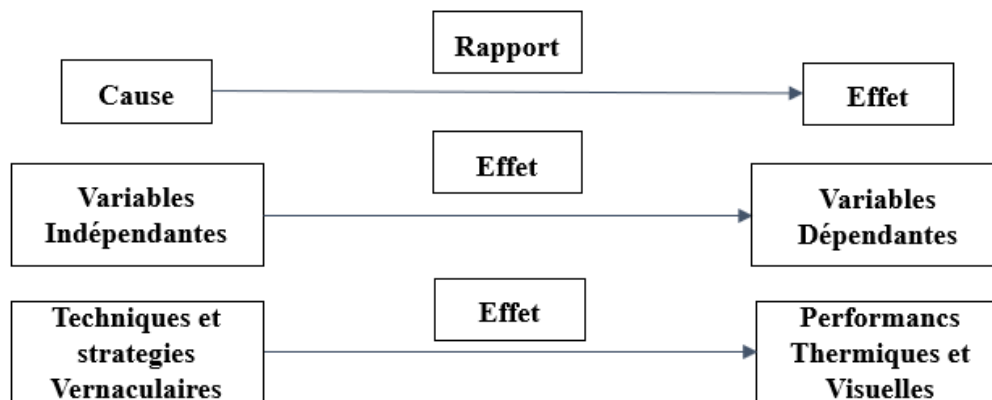


Figure 72: Schème expérimental de l'évaluation des techniques et stratégies architecturales de la région des Ziban

4.4.2.2 Optimisation des stratégies vernaculaires

Une fois les dispositifs et les stratégies passives identifiés et évalués, l'étape suivante consiste à tester et améliorer les dispositifs les plus importants qui peuvent être facilement intégrés dans l'architecture contemporaine, afin de renforcer leurs avantages et de réduire leurs inconvénients. L'une des méthodes de recherche quantitative qui permet de tester des hypothèses sous forme de scénarios et de réaliser des expérimentations virtuelles est la simulation numérique. La simulation numérique facilite l'étude de plusieurs scénarios possibles en permettant une exploration rapide de différentes solutions. De plus, étant donné que les stratégies passives travaillent en synergie (Boumerzoug et al., 2022), l'amélioration doit être globale et simultanée. L'une des méthodes les plus utilisées pour cela est l'optimisation paramétrique par le biais de la simulation numérique (Lakhdari et al., 2021). Cette méthode présente l'avantage d'améliorer les performances, de découvrir des relations complexes, de prendre en compte les interactions entre les paramètres et de trouver des solutions adaptées à différentes conditions. Tous ces avantages inhérents à la méthode correspondent aux objectifs de cette étape. Le schéma expérimental qui décrit la relation cause-effet de l'optimisation paramétrique des stratégies vernaculaires de la région des Ziban est présenté dans la figure ci-dessous.

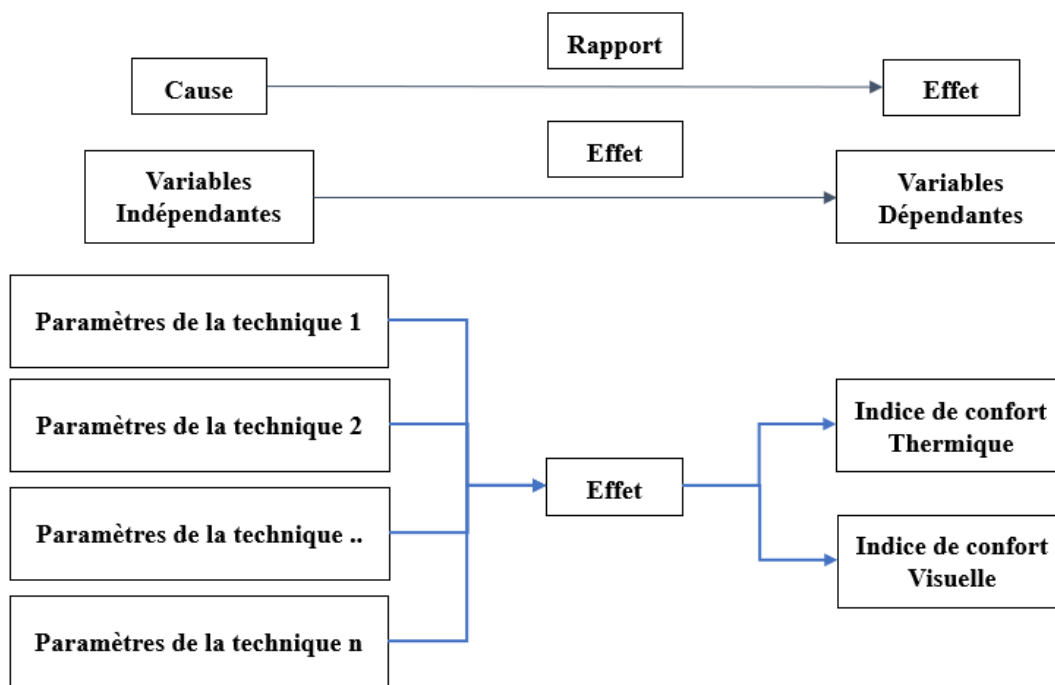


Figure 73 : schème expérimental de l'optimisation paramétrique des techniques vernaculaire

4.4.2.3 Application des stratégies vernaculaires

Une fois les stratégies vernaculaires passives de la région des Ziban optimisées, il est nécessaire de les appliquer à un cas réel afin de quantifier réellement la validité de cette méthode et de ces dispositifs. Dans le domaine de la recherche utilisant la simulation numérique, l'une des méthodes largement utilisées pour tester les résultats sur des cas réels est la méthode de calibration et de validation. Cette méthode consiste simplement à modéliser numériquement un cas d'étude et à calibrer ses paramètres de manière à ce que le modèle numérique reproduise thermiquement le comportement du bâtiment réel. Ainsi, les conclusions tirées des résultats de la simulation du modèle validé peuvent être généralisées au modèle réel. Après avoir effectué la calibration du modèle, les stratégies optimisées mentionnées précédemment seront appliquées sur le modèle réel afin d'évaluer leurs performances.

4.5 Conclusion

À travers une revue bibliographique narrative, plusieurs aspects clés ont été explorés. En premier lieu, ce chapitre met en évidence l'intérêt croissant pour l'architecture vernaculaire, stimulé par sa capacité intrinsèque à proposer des solutions durables et adaptées à l'environnement. Des études comparatives ont été présentées, analysant les différences et les similitudes entre l'architecture vernaculaire et l'architecture contemporaine, mettant en exergue la supériorité de l'architecture vernaculaire dans de nombreux aspects.

Par la suite, les recherches portant sur les performances des stratégies de l'architecture vernaculaire ont été exposées. Une importance a été accordée à l'application de ces stratégies dans les zones chaudes et arides, où elles se révélèrent particulièrement adaptées aux défis climatiques spécifiques de ces régions. Parallèlement, les méthodes d'analyse des stratégies vernaculaires ont été examinées, permettant ainsi une compréhension des mécanismes d'évaluation des performances de ces stratégies. Cette partie a facilité ultérieurement la sélection des approches les plus appropriées pour le contexte spécifique de la recherche. En complément, l'exploration de l'application des stratégies vernaculaires en architecture contemporaine a révélé leur intégration novatrice au sein des pratiques architecturales actuelles, favorisant ainsi l'amélioration des performances thermiques et visuelles des bâtiments. Enfin, la méthodologie de recherche adoptée dans cette étude fondée sur les approches qualitative et quantitative a été arrêtée et décrite.

Chapitre 5.

LES STRATEGIES

VERNACULAIRES

ADAPTATIVES DES ZIBAN

5.1 Introduction

Après avoir utilisé les méthodes d'observation et de comparaison pour décrire les ksour de la région des Ziban, tel que présenté dans le Chapitre 3, le présent chapitre se consacre à l'identification des stratégies et dispositifs passifs vernaculaires de cette région, en se basant sur les similitudes qu'ils pourraient entretenir avec les stratégies et dispositifs vernaculaires propres aux régions chaudes et arides à travers le monde et mises en exergue dans le Chapitre 2. L'objectif est d'extraire les stratégies propres à cette région tout en les comparant aux stratégies vernaculaires à l'échelle mondiale. De plus, à l'aide des méthodes de recherche présentées dans le Chapitre 4 et en se basant sur les paramètres physiques de performance thermique et visuelle décrits précédemment, cette partie vise à évaluer les stratégies propres à cette région afin d'obtenir une compréhension précise de leur potentiel et de leurs limites.

5.2 Les stratégies et techniques adaptatives des Ziban

La présentation des stratégies et dispositifs observés lors des visites et investigations sur site dans les agglomérations et ksour des Ziban sera analogue à celle adoptée pour étudier les stratégies et techniques adaptatives des zones chaudes et arides dans le monde exposé dans la partie 2.3. Ainsi, ces stratégies et dispositifs sont présentés à différentes échelles, allant de l'échelle urbaine à l'échelle architecturale, dans les sections suivantes.

5.2.1 Site, et environnement naturel

Dans l'environnement naturel de la région Ziban, tel qu'illustré dans la Figure 74, l'effet oasis, abordé dans la partie 2.4.3.5, est obtenu grâce à la présence de végétation, notamment les palmeraies, ainsi que l'utilisation de conduites à ciel ouvert appelées "sagia". Cet effet joue un rôle prépondérant dans l'amélioration du confort thermique des habitants de la région en humidifiant l'air, ce qui entraîne une baisse de la température ambiante.

L'effet oasis, en tant que critère d'adaptabilité climatique à l'échelle urbaine englobe trois stratégies passives permettant d'atténuer l'îlot de chaleur urbain dans le contexte moderne. De plus, l'effet oasis repose sur deux paramètres principaux qui contribuent spécifiquement au rafraîchissement de l'air ambiant. Premièrement, la présence des oasis entourant les Ksour de Ziban, où la végétation fournit de l'ombre, contribue à réduire les températures de surface. De plus, la végétation participe à la réduction des températures de l'air par évapotranspiration, un processus par lequel les plantes libèrent de l'eau dans l'air environnant, dissipant ainsi la chaleur ambiante.

Le deuxième paramètre est la valeur d'albédo des surfaces urbaines, qui joue un rôle dans la réflexion du rayonnement solaire et, par conséquent, dans la réduction de la température des surfaces urbaines.



Figure 74: L'effet du site et environnement naturel des Ziban (Source : Auteur)

5.2.2 Morphologie urbaine

5.2.2.1 Continuité des bâtiments (absence d'ilots)

La continuité des bâtiments est une technique clé de l'urbanisme des Ksour de Ziban, favorisant une masse compacte et continue sans créer d'ilots indépendants. Cette configuration permet de réduire les espaces vides et les zones exposées au soleil, contribuant ainsi à la stratégie d'ombrage.

5.2.2.2 Compacité urbaine

L'urbanisme vernaculaire de la région des Ziban se distingue par une compacité marquée, comme illustré dans la Figure 75. Cette compacité revêt un rôle dans la réduction de l'exposition directe des bâtiments au rayonnement solaire, contribuant ainsi à la mise en place d'une stratégie d'ombrage efficace. En effet, la forte densité des bâtiments réduit la surface exposée au soleil, limitant ainsi l'absorption de chaleur par les surfaces urbaines et contribuant à maintenir une température intérieure urbaines plus fraîche.

L'architecture traditionnelle de la région se concentre sur la compacité des volumes de bâtiments, qui se traduit une forte densité urbaine, avec un ratio surface/volume (Sa/Vol) élevé. Cette compacité urbaine permet de réduire l'exposition des bâtiments au rayonnement solaire direct et de diminuer le flux de chaleur pénétrant dans les espaces urbains. C'est donc une pratique efficace pour la conception de villes contemporaine dans les régions arides.



Figure 75: Illustration de la compacité urbaine. Exemple Ksar de Farfar (Source : Auteur)

5.2.2.3 Ombrage urbain et couverture des ruelles

Les rues étroites des anciens ksour de Ziban se caractérisent par un rapport hauteur sur largeur (H/L) réduit, comme illustré dans la Figure 76. Dans certains cas, la largeur des rues ne dépasse pas les 2 mètres. Cette configuration morphologique des rues présente l'avantage de réduire l'exposition directe des bâtiments au rayonnement solaire, offrant une protection aux habitations en créant des zones ombragées. De plus, la couverture des rues par des « skifas » offre une protection supplémentaire contre les rayons du soleil et permet d'accentuer la stratégie d'ombrage comme il est observable dans la Figure 77 et la Figure 78.

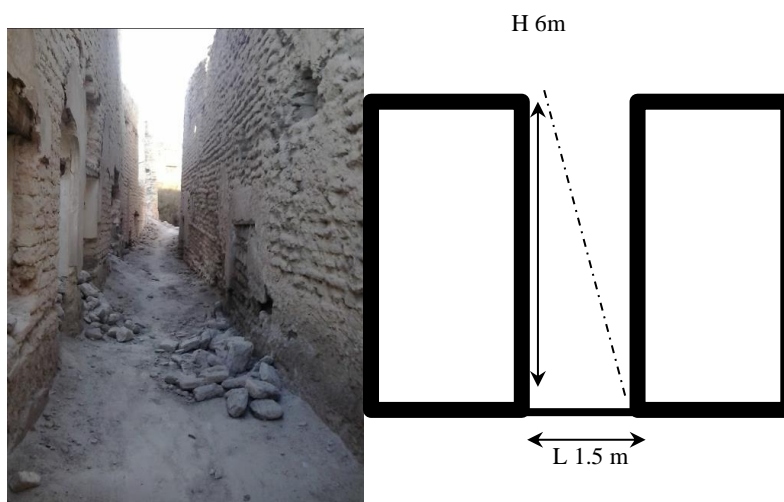


Figure 76: Proportion de hauteur sur la largeur (H/L) d'une ruelle typique dans les Ksour de Zibane (exemple Ksar à Chetma) (Source : Auteur)



Figure 77: Exemple de Skifa urbaine dans le Ksar de Lichana (Source : Auteur)



Figure 78: Exemple de Skifa urbaine dans le Ksar de Farfar (Source : Auteur)

5.2.3 Traitement des surfaces extérieures (réflectivité solaire)

Dans la région de Ziban, l'atténuation de l'îlot de chaleur est aussi favorisée par la stratégie de réflectivité solaire, caractérisée par l'utilisation d'un matériau local à l'albédo relativement élevé. Plus précisément, la chaux naturelle est utilisée comme revêtement mural pour la construction des bâtiments, contribuant ainsi à minimiser l'absorption de chaleur solaire et à réduire les effets de l'îlot de chaleur.

5.2.4 Volume construit, forme et enveloppe

La compacité des volumes des bâtiments des Ksour de Ziban, caractérisée par un faible ratio de surface au volume, qui accentue la stratégie de protection solaire. Comme il est indiqué dans la Figure 79, les formes simples et principalement cubiques des habitations, associées à la rugosité des murs qui créent des zones d'ombre sur certaines parties, permettent de réduire l'exposition directe au rayonnement solaire, minimisant ainsi les gains de chaleur solaire.



Figure 79: bâtiment des Ksour de Ziban. Exemple d'une maison à Oumech (Source : Auteur)

5.2.5 Disposition spatiale/ organisation intérieure

La distribution spatiale des ksour de Ziban se caractérise par une organisation introvertie mettant en avant une cour centrale comme il est indiqué dans la Figure 80. Cette configuration particulière présente plusieurs avantages en termes de promotion des stratégies de protection solaire et de ventilation. En effet, la cour centrale offre une protection contre l'exposition solaire excessive tout en permettant de l'éclairage naturel. De plus, elle favorise une ventilation naturelle grâce à un système passif astucieux qui utilise efficacement la force d'élévation de l'air chaud pour aspirer l'air chaud de l'intérieur des habitations. L'agencement introverti des ksour de Ziban représente donc une réponse ingénieuse aux contraintes climatiques de la région, tout en offrant un confort thermique et visuel appréciable.

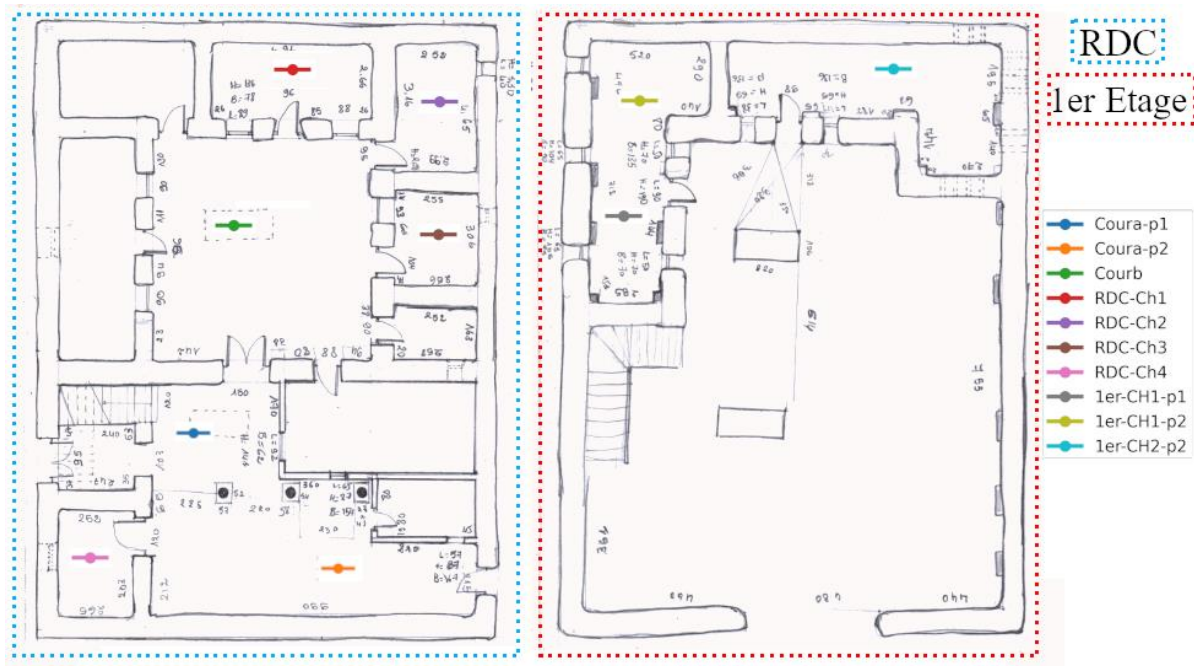


Figure 80: Plan d'une habitation vernaculaire dans les Ziban (Source : Auteur)

5.2.6 Matériaux et techniques de construction

Les ksour de Ziban ont été érigés en utilisant des matériaux locaux tels que la terre pour les murs porteurs et la toiture comme il est indiqué dans les Figure 81 et Figure 82. Le choix de ces matériaux s'est basé sur leur disponibilité dans la région ainsi que sur leur adaptabilité aux conditions climatiques locales. De plus, la largeur des murs et des toitures contribue de manière significative à optimiser la stratégie d'inertie thermique. La présence de cette masse thermique assure une résistance thermique et permet un déphasage thermique constant. Cette caractéristique se révèle particulièrement bénéfique pour atténuer les pics de température diurnes, offrant ainsi un environnement intérieur plus stable et confortable.



Figure 81: illustration des matériaux utilisés des murs et de Toit. Exemple Maison à Ourel

(Source : Auteur)

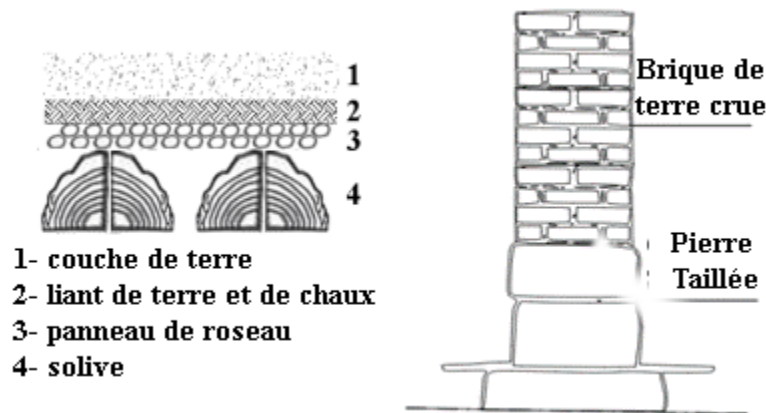


Figure 82: Coupes de détail sur la technique de constructions pour les toits et les murs

5.2.7 Ouvertures

La disposition des ouvertures dans l'architecture vernaculaire de la région de Ziban est conçue afin de répondre aux stratégies de ventilation et de protection solaire, minimisant ainsi la pénétration de la chaleur et des rayonnements solaires. Les fenêtres ou claustras, généralement de dimensions réduites, sont positionnées en hauteur sur les murs pour éviter les rayons directs du soleil et favoriser l'effet de poussée de l'air chaud. Cette configuration permet une circulation efficace de l'air à travers les espaces intérieurs, favorisant ainsi une ventilation naturelle et contribuant à maintenir des conditions thermiques agréables à l'intérieur des habitations.



Figure 83: la configuration des ouvertures dans les maisons Zibanaises (Source : Auteur)

De plus, la Raouzna, une ouverture horizontale située au milieu du toit de la West-dar, joue également un rôle essentiel dans l'optimisation de la stratégie de ventilation. Elle permet l'évacuation de l'air chaud en exploitant l'effet de cheminée, tout en offrant à la fois une ventilation naturelle et une source de lumière naturelle. Il convient de souligner que West-dar et la Raouzna sont deux caractéristiques distinctives de l'architecture vernaculaire du sud de l'Algérie, comme illustré dans la Figure 84, (2019, ماضوي). En effet, dans l'archétype de la maison arabo-musulmane, la cour constitue généralement un espace extérieur ouvert vers le ciel, souvent entourée d'une galerie donnant sur un jardin verdoyant agrémenté d'une fontaine.



Figure 84: Illustration de la Raouzna. Exemple maison à Farfar (Source : Auteur)

5.3 Analyse comparative des pratiques architecturales vernaculaires d'adaptabilité climatique dans les régions arides avec celles des Ziban

Dans cette section, une comparaison est établie entre les stratégies et les dispositifs urbains et architecturaux vernaculaires qui ont été présentés dans le Chapitre 2, et ceux qui sont spécifiques à la région vernaculaire de Ziban présenté dans la partie précédente. L'objectif de cette analyse consiste à identifier les particularités inhérentes à cette dernière et à mettre en évidence les différences et les similitudes observées dans les pratiques architecturales et urbaines, permettant ainsi d'acquérir une compréhension plus approfondie de l'architecture et de l'urbanisme vernaculaires de la région de Ziban.

5.3.1 Analyse comparative des stratégies urbaines vernaculaires à l'échelle urbaine

Le Tableau 8 récapitulatif compare trois stratégies urbaines couramment utilisées dans l'architecture vernaculaire dans les zones chaudes et arides pour améliorer le confort thermique dans les bâtiments et les environnements urbains : l'ombrage, la réflectivité solaire et le refroidissement par évaporation. Pour déterminer les spécificités de l'architecture vernaculaire de la région des Ziban en matière de stratégies urbaines, le tableau indique si ces stratégies sont présentes, rarement utilisée ou absente dans l'architecture vernaculaire de la région.

On peut constater que la stratégie de l'ombrage est largement utilisée, ce qui s'explique par le besoin de réduire l'impact des rayons solaires dans une région où les températures peuvent être très élevées. Cette stratégie consiste à créer des rues étroites, des bâtiments connectés et continus qui offrent de l'ombre et participent à la régulation thermique de l'environnement bâti.

En revanche, la stratégie de la réflectivité solaire est peu couramment utilisée dans l'architecture vernaculaire de la région des Ziban, car les matériaux utilisés pour la construction, tels que la terre, ne possèdent pas nécessairement des propriétés réfléchissantes pour réduire la chaleur.

Enfin, la stratégie du refroidissement par évaporation est largement utilisée, en particulier à travers l'effet oasis, qui consiste à cultiver de la végétation, en particulier des palmiers, et à utiliser des conduites à ciel ouvert appelées sagias pour l'irrigation. Cette stratégie permet de rafraîchir l'air ambiant en profitant du phénomène de l'évapotranspiration.

En conclusion, cette comparaison entre les stratégies urbaines mondiales des zones chaudes et arides et celles utilisées dans l'architecture vernaculaire de la région des Ziban nous permettent de déterminer les spécificités de cette architecture. L'ombrage et le refroidissement par évaporation sont largement utilisés, tandis que la réflectivité solaire n'est pas couramment utilisée. Ces adaptations de l'architecture vernaculaire de la région des Ziban aux conditions climatiques locales chaudes et sèches peuvent fournir des pistes pour la conception de bâtiments durables et économes en énergie dans d'autres régions aux conditions similaires.

Tableau 8: Analyse comparative des stratégies urbaines vernaculaire

Architecture vernaculaire des zones arides		Architecture vernaculaire mondiale de la région des Ziban	
Stratégies urbaine	Description	Présence ou Absence dans	Spécification d'application
Ombrage	Consiste à réduire l'impact des rayons solaires en créant des rues étroites, et des habitations compactes.	Présent	Les habitations des ksour forment des masses de bâtiments connectés et continus.
Réflectivité solaire	Utilisation de matériaux réfléchissants pour réduire l'absorption de chaleur	Rarement utilisée	L'architecture vernaculaire de la région des Ziban utilise des matériaux naturels notamment la terre pour la construction qui n'ont pas nécessairement de propriétés réfléchissantes pour réduire la chaleur.
Refroidissement par évaporation	Utilisation de phénomène de l'évapotranspiration et l'évaporation pour rafraîchir l'air	Présent	L'effet oasis est exploité dans la région des Ziban grâce à la culture des palmiers et à l'utilisation de conduites à ciel ouvert appelées sagias pour l'irrigation.

5.3.2 Analyse comparative des stratégies architecturales vernaculaires à l'échelle architecturale

Le *Tableau 9* compare les stratégies architecturales utilisées dans l'architecture vernaculaire des régions arides, avec celle de la région des Ziban. Les cinq stratégies énumérées sont l'inertie thermique, la ventilation (divisée en deux types), la protection solaire, le refroidissement par évaporation et le nomadisme. La première stratégie, l'inertie thermique, est utilisée dans

l'architecture vernaculaire de la région des Ziban pour stocker la chaleur dans les matériaux et la restituer progressivement. La deuxième stratégie, la ventilation, est également utilisée, sous les deux formes mentionnées dans le tableau : le mouvement d'air provoqué par une différence de pression entre deux espaces, et le mouvement d'air provoqué par la différence de densité de l'air chaud et de l'air froid. La troisième stratégie, la protection solaire, est également présente, qui vise à protéger les bâtiments contre le rayonnement solaire direct pour éviter la surchauffe. En revanche, la quatrième stratégie, le refroidissement par évaporation au niveau architecturale, n'est pas présente dans l'architecture vernaculaire de la région des Ziban. Enfin, la cinquième stratégie, le nomadisme, est rarement utilisée ou jamais utilisée dans l'architecture de la région des Ziban. En conclusion, certaines des stratégies architecturales utilisées dans l'architecture vernaculaire des régions arides sont également présentes dans l'architecture vernaculaire de la région des Ziban, tandis que d'autres sont absentes ou rarement utilisées.

Tableau 9 : Analyse comparative des stratégies architecturales vernaculaire

Architecture vernaculaire des zones arides		Architecture vernaculaire de la région des Ziban
Stratégies architecturales	Description	Présence ou absence dans l'urbanisme
Inertie thermique	Capacité des matériaux à stocker de la chaleur et à la restituer progressivement	Présente
La ventilation	Mouvement d'air provoqué par une différence de pression entre deux espaces, dont l'ouverture de l'entrée d'air est plus petite que la sortie d'air.	Présente
	Mouvement d'air provoqué par la différence de densité de l'air chaud et de l'air froid	Présente
La protection solaire	Protection contre le rayonnement solaire direct pour éviter la surchauffe des bâtiments	Présente
Refroidissement par évaporation	Utilisation de l'évaporation de l'eau pour abaisser la température de l'air	Absente
Le nomadisme	Mode de vie caractérisé par le déplacement régulier d'un lieu à l'autre	Absente

5.3.3 Analyse comparative des techniques et dispositifs urbains

Le Tableau 10 comparatif met en évidence les différences entre l'urbanisme vernaculaire des zones arides et celle de la région des Ziban, afin de comprendre comment les stratégies ont évolué en réponse aux contraintes environnementales propres à la région des Ziban.

Dans les zones arides, les techniques et dispositifs urbains ont été développés pour répondre aux conditions climatiques difficiles, en prenant en compte la topographie naturelle de la région (positionnement sur des pentes, collines et vallées, terrain plat), l'orientation par rapport au soleil et au vent, une morphologie urbaine compacte et ombragée, une configuration des rues prenant en compte le ratio hauteur/largeur, un quadrillage diagonal avec une orientation est-ouest, des ruelles étroites et en zigzag, des rues bloquées (impasse) et des espaces extérieurs ombragés sous forme de galeries, arcades, colonnades et bâtiments. La végétation à travers l'effet oasis sont également utilisés pour faire face aux conditions climatiques difficiles dans l'architecture vernaculaire des zones arides.

En comparant les techniques générales de l'urbanisme vernaculaire des zones arides avec celles des Ziban, on remarque que certaines techniques et dispositifs urbains sont communs, mais il y a également des différences significatives dans les applications spécifiques de ces stratégies. Ces techniques et dispositifs comprenant le choix de l'implantation des ksour toujours dans un terrain plat au sein des oasis. La compacité des bâtiments est également utilisée pour réduire l'impact du soleil. Les rues étroites et denses des anciens ksour des Ziban présentent une proportion de hauteur sur la largeur (H/L) réduite pour minimiser les radiations solaires. De plus, la couverture des rues par des galeries urbaines appelées Skifa et l'intégration de la végétation, en particulier des palmiers, ainsi que l'irrigation des cultures effectuée par des canaux à ciel ouvert appelés sagias sont des stratégies propres à la région des Ziban pour faire face aux conditions climatiques difficiles.

Tableau 10: Analyse comparative des techniques et dispositifs urbains

Techniques et dispositifs urbains des zones arides			Techniques et dispositifs urbains des Ziban		
Techniques et dispositifs		Description	Présence ou absence dans l'urbanisme	Spécification d'application	
Choix du terrain en fonction de	Positionnement sur pentes,	Les sites en altitude sont préférables en raison de leur grande altitude qui	Absente	/	

sa topographie naturelle	collines et vallées	se caractérise par une température plus basse		
	Positionnement sur un terrain plat	Dans ce type de zone urbaine, l'introduction de la végétation est nécessaire pour refroidir l'air	Présente	Les ksour des Ziban sont toujours implantés au sein les oasis.
	Positionnement et Orientation par rapport au soleil	Choix de l'orientation des bâtiments en fonction de la course du soleil	Présente	L'inclinaison d'au moins 15 degrés Parr port l'axe est-ouest du bâtiment
	Positionnement et Orientation par rapport au vent	Choix de l'orientation des bâtiments en fonction de la direction des vents dominants	Absente	/
Morphologie urbaine compacte et ombrée	Forme urbaine et espace extérieurs	Afin de minimiser l'exposition solaire, l'ombrage à travers la compacité et la continuité des bâtiments et sont des principes cruciaux pour les bâtiments des zones chaudes et arides.	Présente	-Morphologie urbaine compacte et continue. -Une organisation compacte de groupes de bâtiments
	Configuration des rues (ratio Hauteur/Largeur)	Le facteur réduit H/L des rues doivent être choisi de manière à minimiser au maximum les radiations	Présente	Les rues étroites et denses des anciens ksour Ziban présentent une proportion de hauteur sur la largeur (H/L) réduite
Orientation et Model des tissus urbains	Quadrillage diagonal avec une orientation est-ouest	Un quadrillage dans le tissu urbain maximise l'exposition aux rayons solaires dans les rues rectilignes, mais si les rues sont orientées par rapport à l'axe est-ouest	Absente	Absence de quadrillage diagonal mais l'inclinaison des bâtiments est d'au moins 15 degrés Parr port l'axe est-ouest du bâtiment
	Ruelles étroites et en zigzag	Configuration du tissu urbain en forme de ruelles étroites et sinueuses pour réduire les rayons solaires et les températures de sable	Absence	/
	Rues et ruelles bloquées (Impasse)	Choix de bloquer certaines rues ou ruelles pour limiter Les vents	Présente	Impasse sous forme d'une petite cour urbaine qui englobe

		chauds et les tempêtes de sable		l'entrée de plusieurs bâtiments
	Espaces couverts	Des espaces ombragées qui peuvent prendre la forme de galeries, d'arcades, de colonnades, de bâtiments, etc.	Présente	Couverture des rues par des galeries urbaine appelé Skifa
	Végétation et l'effet oasis	Intégration de la végétation dans l'espace urbain pour créer un microclimat plus agréable que l'environnement chaud et aride qui entoure la zone urbaine. Cet effet est dû à l'évapotranspiration des plantes et à l'évaporation de l'eau qui réduisent les températures estivales	Présente	Cette technique est présente grâce à la végétation des palmiers, ainsi qu'à l'irrigation des cultures effectuée par des canaux à ciel ouvert appelés Sgias.

5.3.4 Analyse comparative des techniques et dispositifs architecturaux

Le tableau comparatif ci-dessous met en évidence les différences entre les techniques et dispositifs utilisés dans l'architecture vernaculaire de la région des Ziban et ceux utilisés dans l'architecture vernaculaire des régions chaudes et arides.

Dans les zones arides, les techniques et dispositifs architecturaux comprennent la morphologie du plan compacte et introverti, l'agencement des espaces (zoning), la cour centrale, configuration des ouvertures, mure et toiture l'inertie thermique, les fontaines, les salsabiles, les caves, les claustra et le takhtabüsh.

Dans la région des Ziban, on remarque la présence de la morphologie du plan compacte et introverti qui vise à protéger les espaces intérieurs de la chaleur intense et des radiations solaires.

La maison à patio est également présente dans les deux types d'architecture, avec une cour centrale ouverte qui permet une bonne aération et une meilleure luminosité à l'intérieur. Toutefois, une spécificité de la maison à patio dans la région des Ziban est la présence d'une couverture de la cour

et d'une ouverture appelée "Raouzna". En outre, le takhtabüsh, les salsabils, les caves, coupoles et les attrape vents sont absents de l'architecture vernaculaire de la région des Ziban.

Tableau 11: Analyse comparative des techniques et dispositifs architecturaux

Techniques et dispositifs architecturaux des zones arides		Techniques et dispositifs architecturaux des Ziban	
Techniques et dispositifs	Description	Présence ou absence dans l'urbanisme	Spécification d'application
Morphologie du Plan compacte et introverti	La morphologie du plan est aménagée de manière compacte et introvertie afin de protéger les espaces intérieurs de la chaleur intense et des radiations solaires	Présent	/
Agencement des espaces (zoning)	Dans les zones chaudes et arides, l'agencement des espaces doit prendre en compte la séparation des espaces générant de la chaleur des espaces habitables et la protection contre la chaleur.	Absent	Absence de cette technique des ksour comme il est indiqué dans l'espace de La cuisine.
La maison à patio	Maison traditionnelle avec une cour centrale ouverte	Présent	La cour de la maison vernaculaire est couverte et comporte une ouverture appelée "Raouzna".
Le takhtabüsh	Similaire à une loggia, c'est un espace extérieur couvert entre le patio et le jardin, ouvert complètement sur le patio et protégé par un moucharabieh du côté du jardin.	Absent	/
Fontaines	Les fontaines sont des éléments qui permettent de rafraîchir l'espace intérieur en créant de l'humidité et en réduisant la température de l'air. Elles sont généralement dotées d'un bassin d'eau placé au centre de la cour	Absent	/
Salsabil	Cet élément architectural permet à l'eau de passer au-dessus du marbre pour faciliter son évaporation et augmenter l'humidité dans tout l'espace alentour	Absent	/

Caves	Le dispositif des caves souterraines est utilisé comme stratégie de nomadisme dans les régions chaudes et arides.	Absent	/
-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------	---

5.3.5 Technique de construction des éléments de l'enveloppe

Le Tableau 12 présente une synthèse des différences et des similitudes concernant les techniques de construction de l'enveloppe entre l'architecture vernaculaire des zones chaudes et arides à travers le monde et celle de la région des Ziban. Dans la région des Ziban, les ouvertures sont de petite taille et placées en hauteur sur les murs pour éviter les rayons directs du soleil et pour favoriser la circulation d'air frais. De plus, toutes les fenêtres sont orientées vers la cour intérieure pour maximiser la ventilation naturelle tout en minimisant la chaleur. Les claustras et les moucharabiehs sont présents dans la région des Ziban, mais les moucharabiehs sont rarement utilisés car toutes les ouvertures sont orientées vers la cour centrale. La différence de techniques et de dispositifs utilisés dans la construction des surfaces de l'enveloppe dans la région des Ziban par rapport à ceux de l'architecture vernaculaire des régions chaudes et arides est due à la spécificité des conditions sociales, climatiques, et environnementale de la région des Ziban.

Tableau 12: Technique de construction des éléments l'enveloppes

Technique de construction des surfaces non-opaques de l'enveloppes dans les zones arides		Technique de construction des surfaces non-opaques de l'enveloppes dans la région de Ziban	
Techniques et dispositifs	Description	Présence ou absence	Spécification d'application
Ouvertures	Les dimensions, la position et l'orientation des ouvertures dans les zones chaudes et arides doivent être conçues de manière à permettre la ventilation et la lumière naturelle dans l'espace intérieur tout en minimisant la chaleur.	Présent	Les fenêtres sont généralement de petite taille et placées en hauteur sur les murs pour éviter les rayons directs du soleil et pour favoriser la circulation d'air frais. De plus, elles sont toutes orientées vers la cour intérieure. La Raouzna est une ouverture horizontale placée dans le toit de la West-dar .

Attrapes vent et (malqaf et Badjir)	Le Malqaf est un dispositif permet de capturer le courant d'air et le diriger vers les espaces intérieurs.	Absent	/
Cheminée solaire	Une cheminée solaire est un dispositif qui utilise la chaleur solaire pour créer un courant d'air naturel dans l'espace intérieur.	Absent	/
Coupoles	Le potentiel de la forme réside dans la création d'ombre portée sur le quart de la sphère derrière la surface exposée de la coupole.	Absent	/
Claustras	Le potentiel des claustras réside dans l'évacuation de l'air chaud collecté dans la partie supérieure des espaces.	Présent	Des petites ouvertures de formes variées, notamment triangulaires et carrées, sont placées en hauteur sur les murs pour permettre la circulation d'air frais tout en évitant les rayons directs du soleil.
Moucharabieh	Le moucharabieh est un élément de l'enveloppe qui permet de filtrer la lumière et de contrôler la ventilation tout en offrant une intimité partielle.	Rarement utilisé	Le moucharabieh est rarement utilisé car toutes les ouvertures sont orientées vers la cour centrale.

5.4 Evaluation thermique et visuel de l'architecture des Ziban

Dans le but d'évaluer les performances thermiques des stratégies vernaculaires de la région des Ziban, deux maisons ont été sélectionnées : l'une située dans un ksar traditionnel et l'autre dans un environnement urbain ayant subi des modifications. Malgré ces différences, les deux maisons sont construites avec des matériaux traditionnels et intègrent les mêmes dispositifs architecturaux vernaculaires. Cette évaluation et comparaison permettent de mieux comprendre le potentiel ainsi que les limites des stratégies passives vernaculaires des Ziban, tant sur le plan thermique que visuel.

5.4.1 Présentation des cas d'études

5.4.1.1 Maison à Mcid

Le premier cas d'étude porte sur une grande habitation individuelle située dans le quartier de Mcid, Figure 86. Le bâtiment est entouré d'un tissu urbain altéré, entre le style vernaculaire et contemporain.



Figure 85: Caractéristiques urbaines de la maison du Mcid ; une vue d'une construction en cours à côté de la maison vernaculaire de Mcid

Les principaux éléments architecturaux vernaculaires de cette maison comprennent un mur porteur épais construit en matériau local (brique de terre), une disposition spatiale représentée par une cour intérieure couverte, entourée de chambres avec des fenêtres donnant sur celle-ci (**West-dar**), des fenêtres en position haute comme il est indiqué dans le

Tableau 13: Les stratégies utilisées dans la maison du quartier Mcid, et une « Raouzna », qui se présente comme une fenêtre horizontale au milieu de la cour.

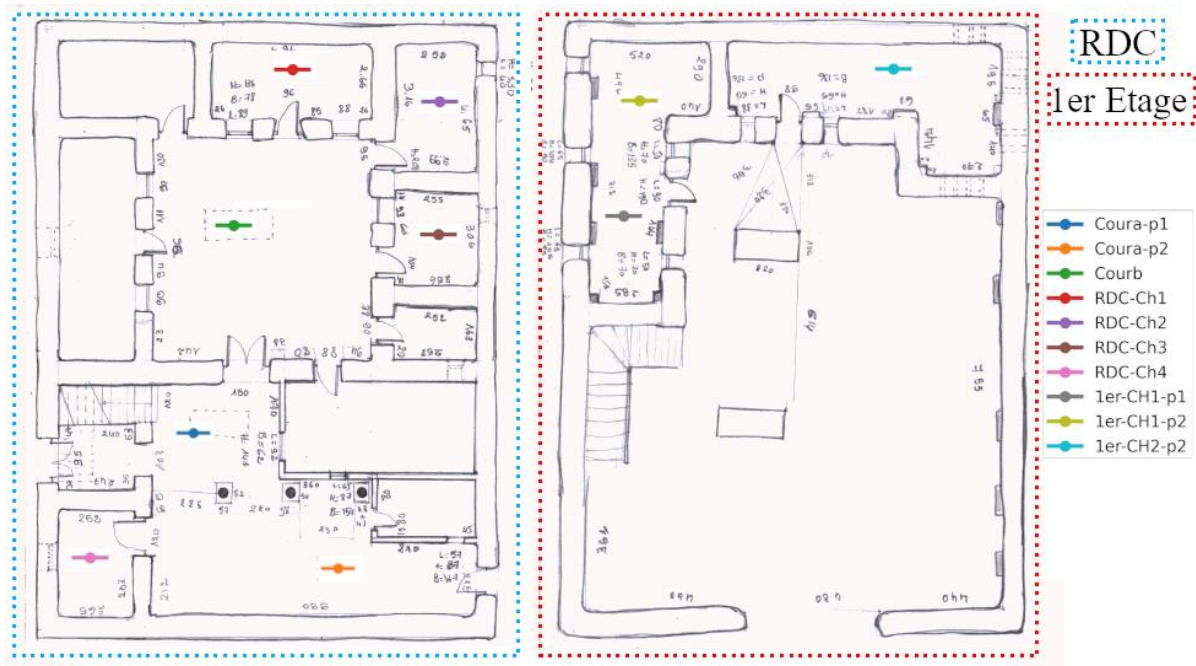




Figure 86: Les plans de la maison du quartier Mqid

Tableau 13: Les stratégies utilisées dans la maison du quartier Mqid

Stratégies vernaculaires	Image	Description
<p>Mur épais en terre</p>		<p>La maison de Mqid est construite avec un mur porteur épais fait de matériaux locaux tels que la brique d'argile.</p>
<p>Cour intérieure couverte (West-eddar)</p>		<p>La cour intérieure de la maison de Mqid est entourée de pièces avec des fenêtres donnant sur la cour.</p>

<p>Ouvertures</p>		<p>La maison de Mcid comporte des fenêtres situées en hauteur ainsi des ouvertures orientées vers la cour et le terrasse</p>
<p>Ouvertures horizontale "Raouzna"</p>		<p>Ouverture horizontale appelée "Raouzna" qui permet de la ventilation et l'entrée de la lumière naturelle.</p>

5.4.1.2 Maison à Farfar

Le deuxième cas d'étude porte sur une petite habitation individuelle située dans le Ksar de Farfar à Tolga – Biskra. Le plan de cette habitation est illustré dans la Figure 88. Elle présente les mêmes éléments architecturaux que la maison précédente, notamment une cour intérieure centrale, un mur porteur en briques de terre crue, des fenêtres positionnées en hauteur et un Raouzna comme indiqué dans le Tableau 14. Cependant, il existe quelques distinctions entre les deux habitations. La première différence réside dans le fait que la maison Mcid est située dans un environnement urbain en cours de transformation ; en conséquence, la construction d'un bâtiment contemporain adjacent a définitivement obstrué certaines de ses ouvertures, comme cela est illustré dans la troisième figure de haut en bas de la partie des ouvertures dans le

Tableau 13: Les stratégies utilisées dans la maison du quartier Mcid. En revanche, la maison Farfar est située dans un tissu urbain vernaculaire authentique du ksar de Farfar Figure 87, qui conserve toutes les fenêtres positionnées en hauteur ouvertes. La deuxième différence est que la maison Farfar est située dans un ksar inoccupé, de sorte que ses portes sont constamment ouvertes, contrairement à la maison MCID, dont les portes sont toujours fermées.



Figure 87: Illustration de l'état actuel des aspects urbains et architecturaux de l'habitation dans le quartier de Farfar

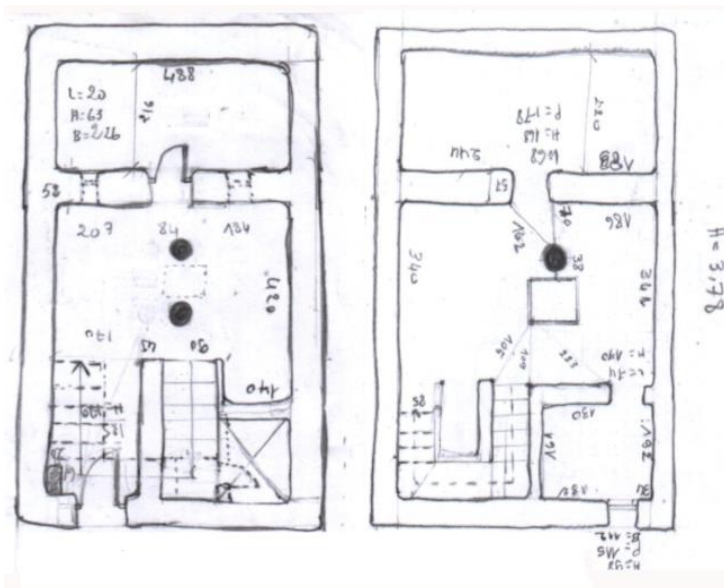





Figure 88: Plan RDC et 1er étage de l'habitation de Farfar

Tableau 14 : Les stratégies utilisées dans la maison du Ksar Farfar

Stratégies vernaculaires	Image	Description
<p>Mur épais en terre</p>		<p>La maison de FarFar est construite avec un mur épais fait de matériaux locaux « la terre.</p>

<p>Cour intérieure couverte (West-eddar)</p>		<p>La cour intérieure de la maison de Farfar est entourée de pièces avec des petites fenêtres en hauteur donnant sur la cour.</p>
<p>Ouvertures</p>		<p>La maison de Mcid comporte des fenêtres situées en hauteur ainsi des ouvertures orientées vers la cour et la terrasse</p>
<p>Ouvertures horizontale "Raouzna"</p>		<p>Ouverture horizontale appelée "Raouzna" qui permet de la ventilation et de la lumière naturelle.</p>

5.4.2 Protocole de mesure

Dans le cadre de cette étude, des mesures hygrothermiques et de l'éclairage ont été réalisées dans la maison de Mcid et Farfar afin d'évaluer les conditions de température, d'humidité et d'éclairage naturel dans différents endroits de la maison. Les plans du rez-de-chaussée et du premier étage de la maison, présentés sur les Figure 89 et Figure 90 figure, indiquent les emplacements exacts où les mesures ont été effectuées, permettant ainsi d'avoir une vue d'ensemble sur les variations de ces paramètres thermiques et visuelle. Cette approche permet de mieux comprendre l'efficacité des stratégies vernaculaires appliqué dans l'habitation en question.

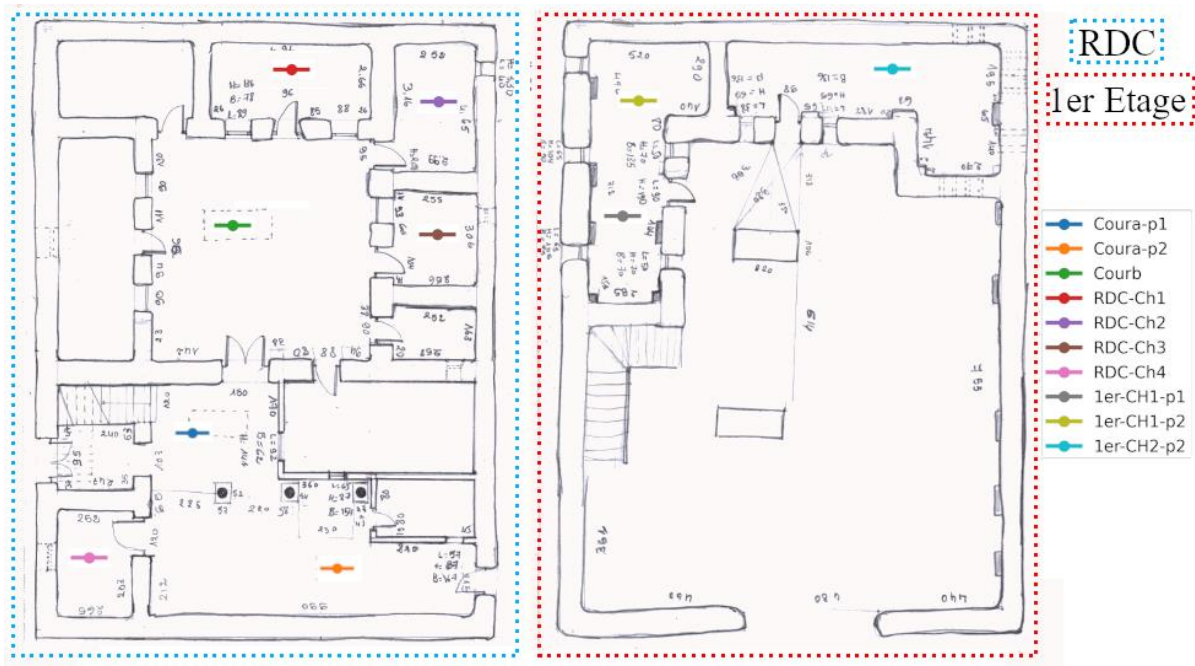


Figure 89: Plans Maison Mqid qui présent les endroits des prises de mesures

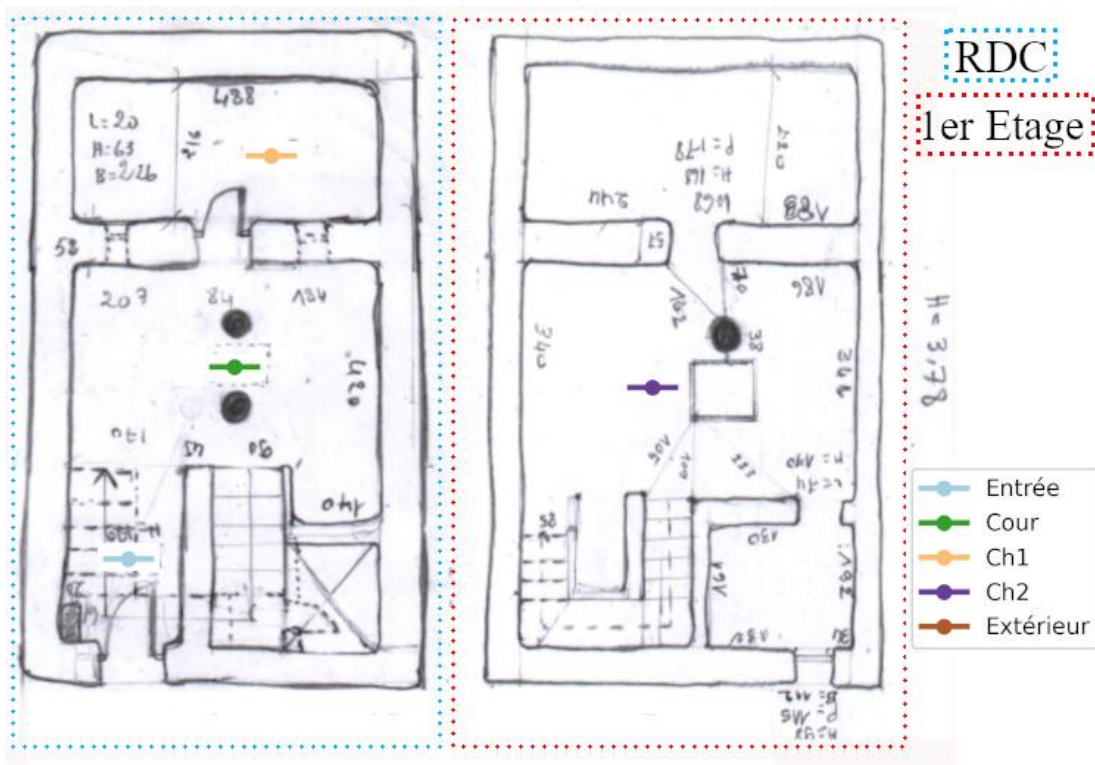




Figure 90: Plans Maison Farfar qui présent les endroits des prises de mesures

Pour la campagne de mesures hygrothermiques et visuelle, l'appareil "Testo 480" a été utilisée afin de collecter les performances thermiques et visuelle des deux maisons présentées dans les figures 3 et 5. De plus, les paramètres physiques environnementaux ont été collectés au centre de chaque zone, à une hauteur de 1,5 mètre au-dessus du niveau du sol. Le tableau 1 affiche l'exactitude des sondes utilisées ainsi que celle du Testo "480".

Tableau 15 : les sondes hygrothermiques utilisées du Testo "480

Image	Paramètre	Instrument	Précision
	Humidité relative (%)	Sonde d'humidité et de température Ø 12 mm, mesure d'humidité hautement précise avec une précision de 1%*	$\pm(1.0 \%HR + 0.7 \% \text{ de la valeur mesurée})$ (0 à 90 % HR)
	Température (°C)		$\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (+15 à +30 °C) $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Plage restante)

De plus, pour la mesure de l'éclaircement, la sonde lux a été utilisé. L'étendu des mesures et les normes utilisée pour la normalisation de la présiion de la sonde sont présenté dans le tableau Figure 91: Tableau d'information de là son « Lux »

Caractéristique	Valeur	
Norme de précision	DIN EN 13032-1	
Classe de précision	Classe C (DIN 5032-7)	
Etendu de mesure	0 – 100000 Lux	

Compte tenu de la distance de 35 kilomètres séparant les deux sites de mesure, les relevés ont été effectués à différentes dates, mais durant la même période estivale de l'année. .Pour le premier cas d'étude l'habitation du Mcid, les mesures ont été prises sur trois jours, du 22 au 24 août 2018, entre 8 heures et 16 heures, avec un intervalle de 2 heures. Pour le deuxième cas d'étude les mesures ont été effectuées du 10 au 12 août, entre 9 heures et 17 heures, sur un intervalle d'une heure, pour la maison Farfar.

Cependant, seules les données enregistrées le 14 août 2018 pour la maison Farfar et le 24 août 2018 pour la maison Mcid ont été prises en compte en raison de leur qualité. En raison de la différence de période de mesure entre les deux maisons, elles ont été placées dans deux groupes expérimentaux distincts. Cependant, en procédant à la comparaison des variations thermiques de chaque maison en fonction de leur température extérieure, une analyse et une interprétation comparatives peuvent être réalisées.

5.4.3 Présentation des résultats

La section suivante est consacrée à l'analyse des résultats des mesures sur site pour les deux cas d'étude. Dans un premier temps, les résultats de l'habitation Mcid seront examinés, suivis de ceux de l'habitation Farfar. Les résultats seront présentés de manière ordonnée, en abordant les aspects de la température, de l'humidité relative et de l'éclairement. **Il faut noter que les valeurs d'éclairement sont présentées et interprétées par rapport à l'indice de confort visuelle « Eclairement du jour utile » présenté dans la partie 1.4.5.1** Enfin, une discussion approfondie et une interprétation globale des résultats seront effectuées, mettant en évidence les observations les plus significatives.

5.4.3.1 Résultats maison Mcid

Les résultats sont regroupés en trois catégories distinctes : les prise de mesure du rez-de-chaussée, comprenant 7 points de mesure pour les différents espaces du rez-de-chaussée ; le deuxième groupe qui concerne les 3 espaces du premier étage ; et enfin, le dernier point de mesure qui correspond à l'extérieur, comme il est indiqué dans la Figure 89: Plans Maison Mcid qui présent les endroits des prises de mesures

5.4.3.1.1 Résultats de la prise de température

Les résultats de température dans l'habitation du Mcid tel 'illustrés dans le Figure 92 montrent que les températures du rez-de-chaussée restent relativement stables par rapport aux températures extérieures grâce à la présence d'un étage protecteur et l'inertie thermique des murs.

En revanche, les températures du premier étage présentent une variation par rapport aux du rez-de-chaussée. Cette variation est due à l'exposition directe de cette partie de la maison à l'environnement extérieur et l'exposition directe de parties d'espaces du premier étage

Néanmoins, il a été observé que la masse thermique de l'enveloppe a permis de retarder le pic de température de 14 heures observé à l'extérieur.

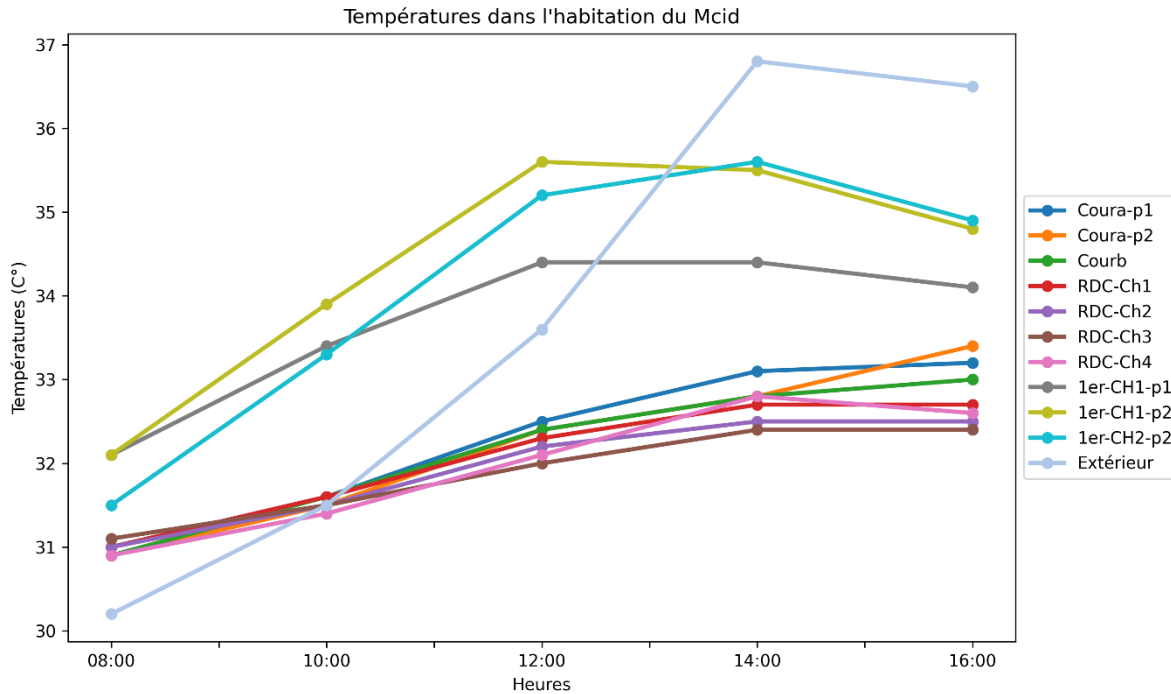


Figure 92: Résultats de mesures des températures dans l'habitation du Mcid

5.4.3.1.2 Résultats de la prise de l'humidité relative

D'après les résultats de l'humidité relative présentés dans la Figure 93, on peut observer que l'humidité varie en fonction des zones de l'habitation. Le premier groupe qui concerne l'humidité du rez-de-chaussée, les résultats montrent que l'humidité dans toutes les zones commence à partir d'une valeur approximative au-dessus de la valeur de l'humidité à l'extérieure de l'habitation.

Le deuxième groupe de mesures concerne l'humidité du premier étage et on peut constater que les valeurs d'humidité sont plus basses que celles du rez-de-chaussée. De plus, il y a une chute drastique des valeurs d'humidité dans les espaces exposés au premier étage, alors que dans les espaces protégés du rez-de-chaussée, la chute est partielle. Il est également remarqué que l'humidité relative au premier étage est plus basse que celle du rez-de-chaussée en raison de l'exposition directe à l'environnement extérieur, comme mentionné précédemment.

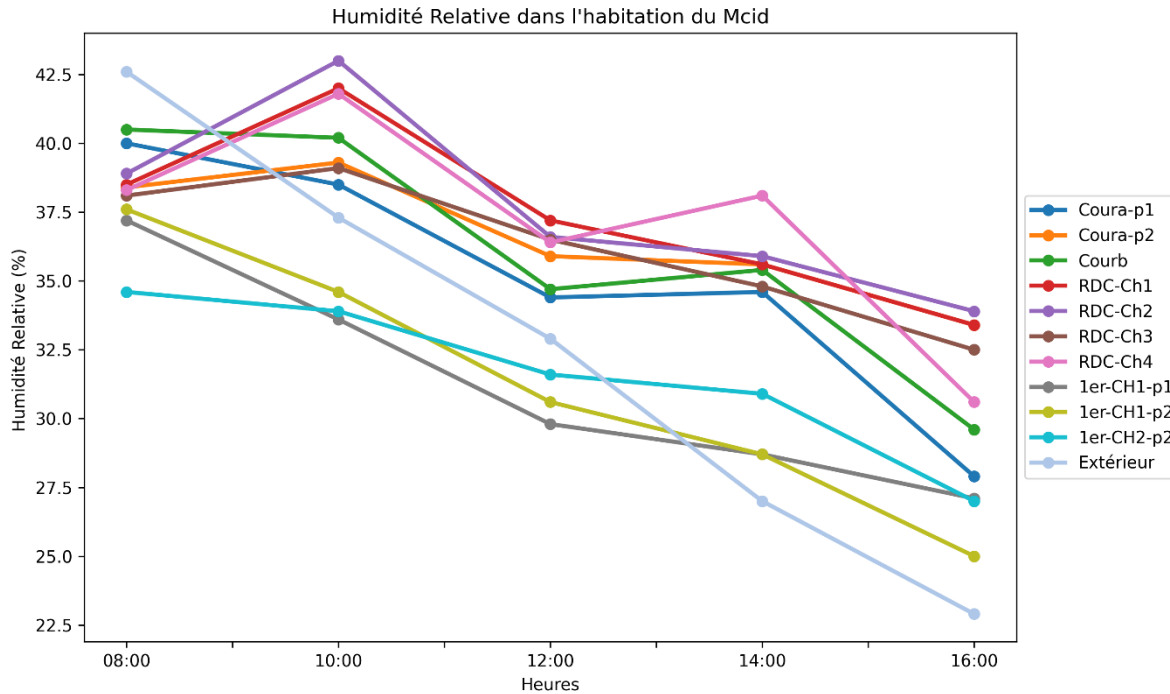


Figure 93: Résultats de mesures de l'humidité dans l'habitation du Mcid

5.4.3.1.3 Résultats de la prise des valeurs d'éclairément

D'après les résultats présentés dans la Figure 94 extérieur, les données d'éclairément ont permis de classer les espaces en trois groupes distincts. Le premier groupe concerne les chambres du rez-de-chaussée, le deuxième groupe concerne les cours du rez-de-chaussée et les chambres du 1er étage, et enfin le dernier groupe concerne la prise de mesure à l'extérieur de l'habitation.

On constate que certaines pièces situées au rez-de-chaussée, qui n'ont qu'une seule exposition à la cour, présentent un éclairément utile du jour insuffisant, avec des valeurs inférieures à 100 lux. Cette situation est due à l'absence totale d'exposition au ciel et à la fermeture de certaines fenêtres. En revanche, les espaces situés sous la Raouzna ou dans les chambres de l'étage supérieur bénéficient d'un éclairément diurne utile dans la plage normale (100-2000 lux), ce qui démontre que la Raouzna peut contribuer à augmenter les valeurs d'éclairément.

Enfin, pour l'étage supérieur, le taux d'éclairément est acceptable en raison des ouvertures abondantes dans les façades opposées, sauf dans la chambre 1 du 1er étage où la fenêtre fermée ne permet pas d'avoir un niveau d'éclairément adéquat.

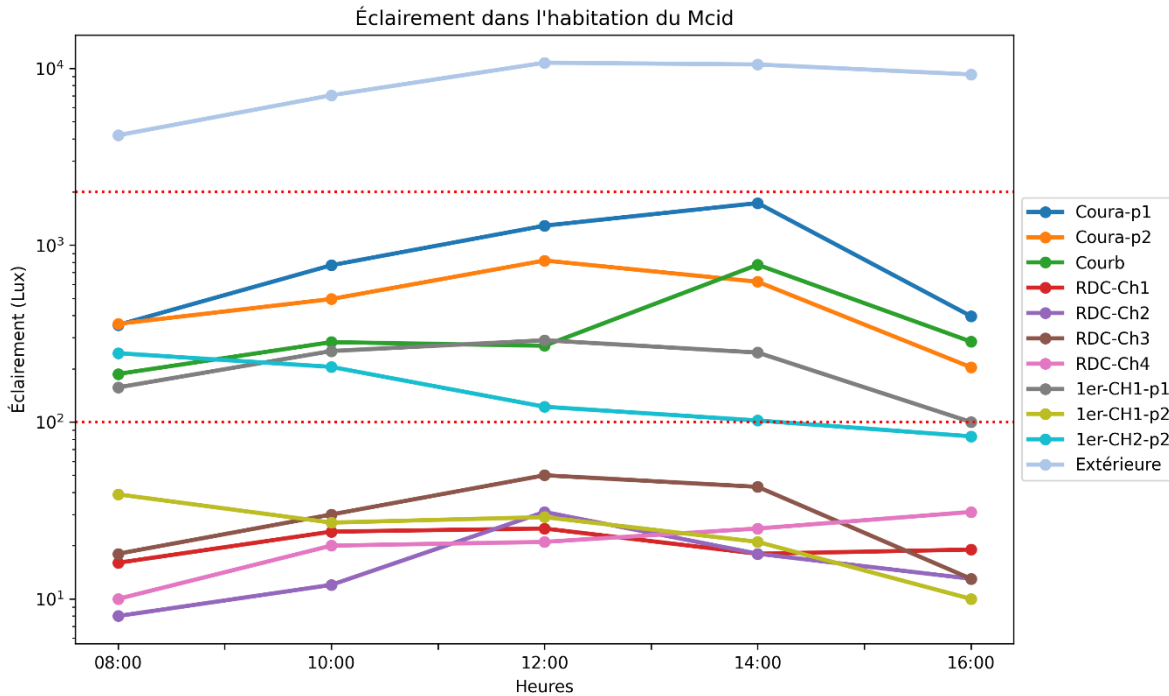


Figure 94: Résultats de mesures de l'éclairage dans l'habitation du Mcid

5.4.3.1 Résultats l'habitation Farfar

Concernant l'habitation de Farfar, les résultats de température et d'humidité relative permettent de classer les espaces en deux groupes distincts : un groupe pour les mesures effectuées à l'intérieur de l'habitation et un autre groupe pour les mesures prises à l'extérieur. En ce qui concerne les mesures d'éclairage, les résultats divisent les espaces en trois groupes distincts. Dans les sections suivantes, ces résultats seront présentés en détail.

5.4.3.1.1 Résultats de la prise de température

Les résultats de la prise de mesure de température dans l'habitation de Farfar, présentés dans la Figure 95, mettent en évidence la stabilité des températures intérieures tout au long de la journée, en particulier au rez-de-chaussée. De plus, les températures intérieures demeurent inférieures aux températures extérieures tout au long de la journée, malgré une variation de 7 degrés entre le matin et le pic de température à l'extérieur. Cette observation témoigne de l'efficacité de la stratégie d'inertie thermique mise en place, qui a le potentiel de retarder l'élévation des températures extérieures. Ces résultats confirment ainsi l'impact positif de la conception architecturale vernaculaire dans la régulation thermique de l'habitation de Farfar.

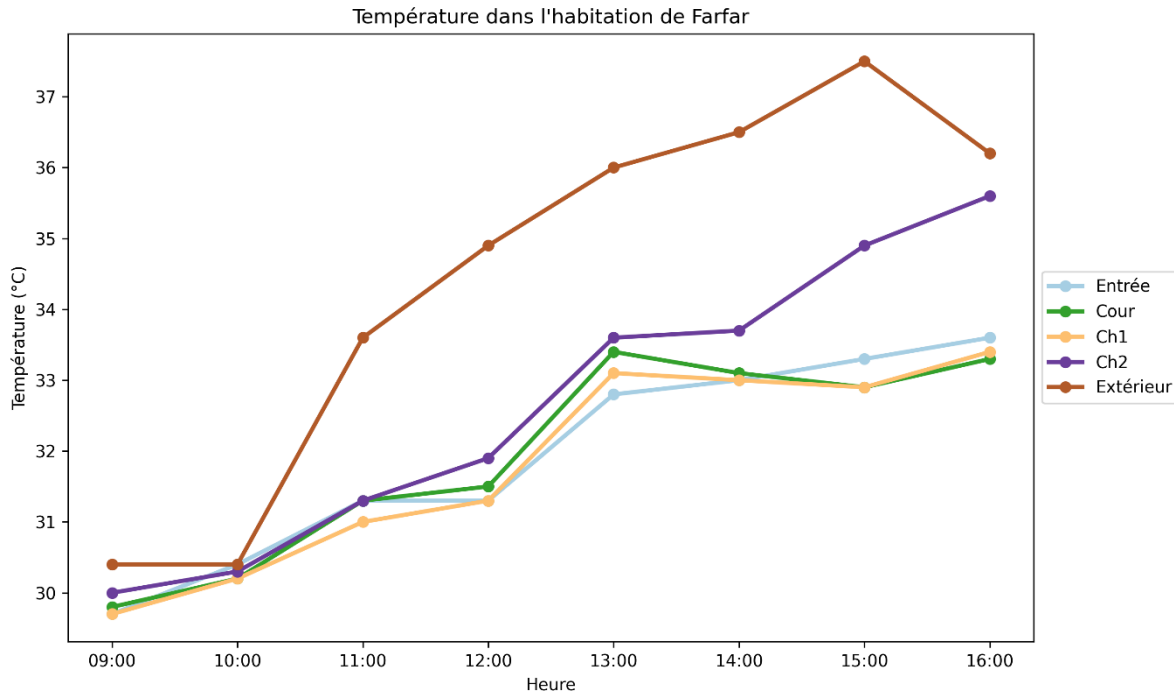


Figure 95: Résultats de mesures des températures dans l'habitation de Farfar

Selon les résultats de prise de mesure d'humidité relative présentés dans la Figure 96, des variations significatives sont observées après la première heure de mesure. Les valeurs d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur connaissent des changements, avec une baisse plus prononcée à l'extérieur et une baisse partielle à l'intérieur. Par ailleurs, il est remarqué que les valeurs d'humidité relative des espaces intérieurs sont constamment supérieures à celles mesurées à l'extérieur tout au long de la journée. De plus, lors des périodes où l'humidité relative extérieure est particulièrement basse, les espaces intérieurs bénéficient de valeurs d'humidité relative supérieures de plus de 10 %. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de la conception architecturale vernaculaire de l'habitation pour maintenir des niveaux d'humidité relative plus favorables à un confort optimal à l'intérieur.

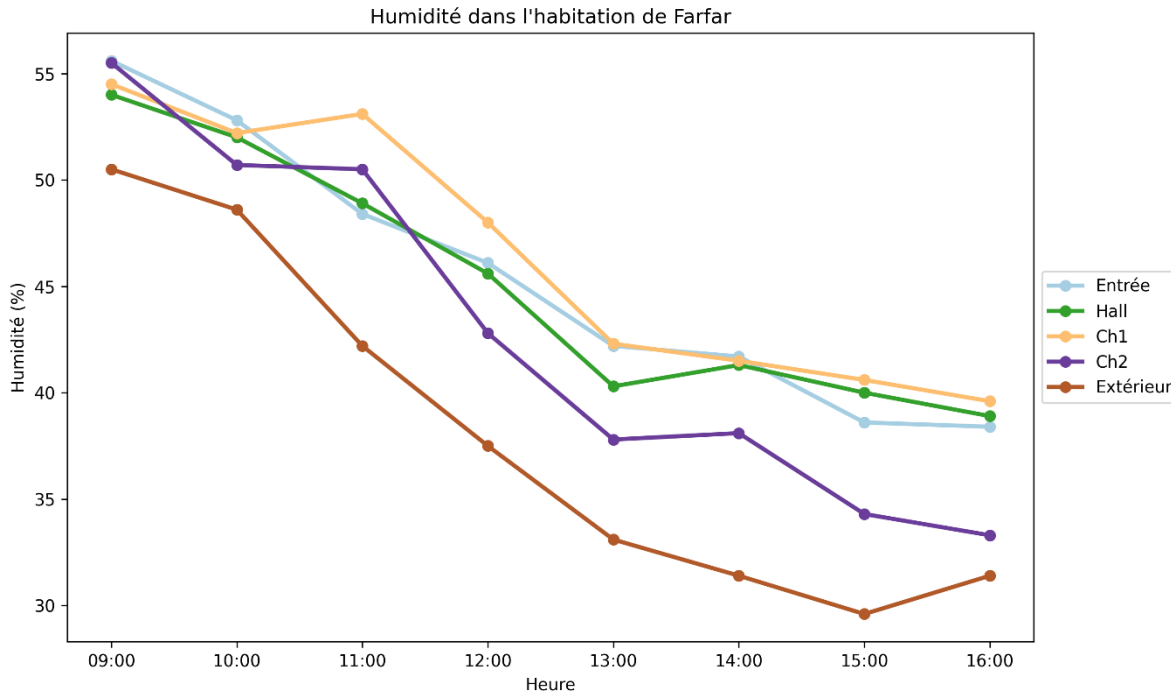


Figure 96: Résultats de mesures de l'humidité dans l'habitation de Farfar

Les résultats de prise de mesure d'éclairement dans l'habitation de Farfar, présentés dans Figure 97, ont permis de classer les points de mesure en trois catégories distinctes. La première catégorie concerne la chambre 1, où l'éclairement est très faible, en dessous de 10 lux, la majeure partie de la journée. Cela est dû à l'absence d'ouvertures, à l'exception de quelques claustras qui donnent sur l'espace cour. La deuxième catégorie regroupe les espaces dont les valeurs d'éclairement se situent dans la limite inférieure de la plage de l'indice d'éclairement utile du jour, c'est-à-dire autour de 100 lux. La cause de ces valeurs faibles est due à l'emplacement de l'habitation à l'intérieur du ksar, à proximité d'une Skifa urbaine comme il est observable Figure 78, ce qui entraîne une exposition quasi nulle au ciel Enfin, la troisième catégorie concerne l'éclairement mesuré à l'extérieur de l'habitation.

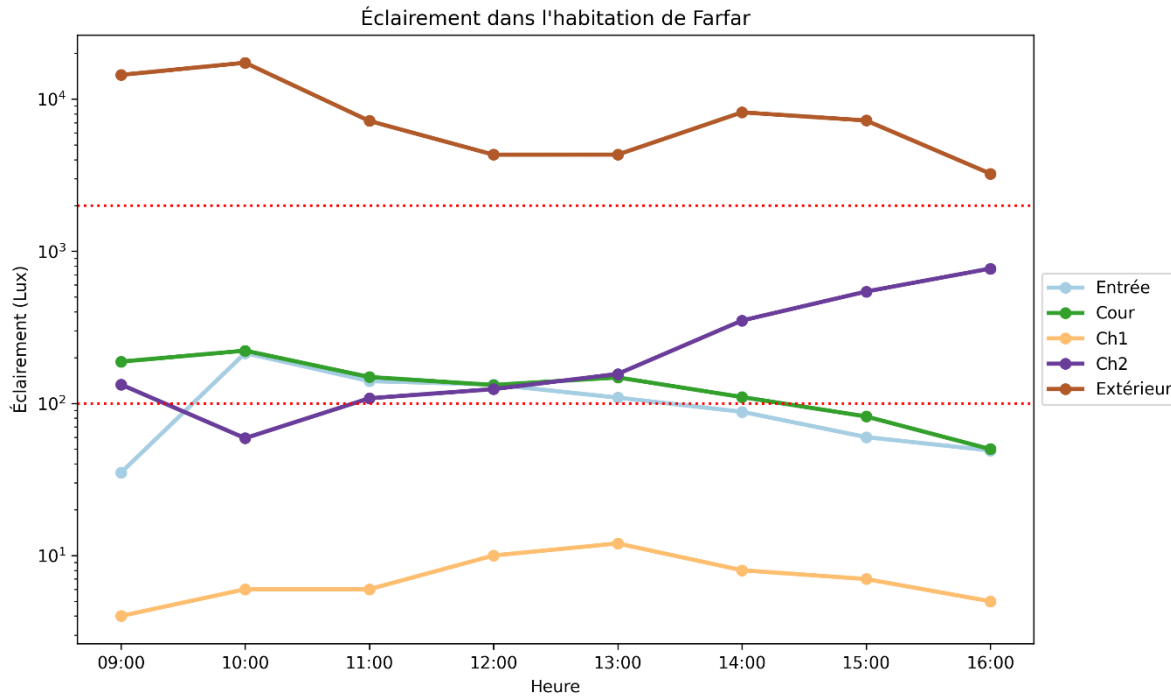


Figure 97: Résultats de mesures de l'éclairage dans l'habitation de Farfar

5.4.4 Discussion des résultats

Suite à l'évaluation hygrothermique et d'éclairage des deux cas d'étude dans les habitations de Mcid et Farfar, on peut observer les différences de configuration et d'emplacement qui se traduisent par des différences d'activation des stratégies et de l'environnement urbain, et leur effet direct sur les performances thermiques et visuelles des habitations vernaculaires.

Tout d'abord, il est remarqué que les habitations de Mcid et Farfar maintiennent des valeurs d'humidité et de température stables par rapport à l'extérieur dans les espaces qui ne sont pas directement exposés à l'environnement extérieur, grâce à la stratégie d'inertie thermique. Néanmoins, l'habitation de Farfar présente de meilleures performances en raison de températures journalières plus stables et plus basses, ainsi que des valeurs d'humidité relative plus élevées par rapport à l'extérieur, comparées à l'habitation de Mcid.

Ces différences sont dues à plusieurs stratégies urbaines et architecturales actives dans l'habitation de Farfar, qui sont absentes ou inactives dans l'habitation de Mcid. Les stratégies urbaines disponibles à Farfar incluent l'ombrage, le refroidissement par évaporation grâce aux techniques de compacité urbaine, la skifa urbaine et l'effet oasis. Étant donné que Farfar est située dans

l'ancien ksar, son environnement urbain n'a pas été altéré par rapport à celui de Mcid, où plusieurs changements ont été observés, comme la montre la Figure 85. L'absence de tissu urbain compact à Mcid a entraîné des températures plus élevées et une humidité plus basse. En ce qui concerne l'humidité relative, l'effet oasis, qui est plus prononcé à Farfar, a donné des valeurs d'humidité plus élevées que celles de Mcid.

En ce qui concerne les stratégies architecturales qui ont conduit à la différence entre l'habitation de Mcid et de Farfar, l'une des stratégies les plus importantes est la ventilation. Étant donné que l'environnement urbain de l'habitation de Mcid est en cours de changement (Figure 85), les ouvertures placées en hauteur et donnant sur les habitations avoisinantes ont été fermées en raison des travaux. Avec les ouvertures toujours ouvertes à Farfar grâce à l'abondance du ksar, cela a entraîné une surchauffe à l'intérieur de l'habitation de Mcid en raison de l'absence de ventilation nocturne, ce qui explique les températures plus élevées lors de la première heure de mesure par rapport à l'habitation de Farfar.

En ce qui concerne les résultats de l'éclairage, il est remarqué que les espaces du rez-de-chaussée dans les deux habitations ne présentent pas des conditions visuelles adéquates, avec des valeurs d'éclairage diurne utile en dessous de la plage acceptable. Il est également observé que les cours situés sous la Raouzna bénéficient d'un éclairage diurne utile acceptable, dans la limite inférieure de l'indice. Cela prouve l'efficacité du dispositif de la Raouzna pour améliorer le confort visuel dans les habitations vernaculaires de la région des Ziban.

5.5 Conclusion

L'objectif du présent chapitre est d'inventorier les stratégies vernaculaires employées dans la région des Ziban et, ensuite, d'évaluer leurs performances thermiques et visuelles. De ce fait, les stratégies et techniques architecturales et urbaines spécifiques à la région des Ziban ont été présentées en détail, mettant en évidence leur mode de fonctionnement. Par la suite, ces stratégies et dispositifs ont été comparés aux stratégies et dispositifs vernaculaires utilisés dans les régions chaudes et arides à travers le monde. La comparaison a révélé que les stratégies et dispositifs urbains de la région des Ziban sont similaires à ceux des régions vernaculaires chaudes et arides du monde, à l'exception de la stratégie de réflectivité solaire qui est partiellement utilisée. En ce qui concerne les dispositifs et techniques urbains issus de ces stratégies, plusieurs différences ont

été observées, mais en général, la plupart des techniques et dispositifs présents dans la région des Ziban sont comparables à ceux utilisés ailleurs dans le monde

Lors de la comparaison des stratégies architecturales de la région des Ziban avec celles du reste du monde, trois stratégies essentielles ont été identifiées : l'inertie thermique, la ventilation et la protection solaire. En revanche, deux autres stratégies, telles que le refroidissement par évaporation ou le nomadisme, sont rares ou absentes. En ce qui concerne les dispositifs et techniques architecturaux de la région des Ziban, on observe une relative pauvreté par rapport aux autres régions du monde, avec seulement deux stratégies présentes par rapport à sept dans le reste du monde. Cette différence s'explique par des facteurs historiques et culturels propres à la région des Ziban, qui n'a pas connu l'épanouissement de civilisations riches et diversifiées, contrairement à d'autres régions aux conditions climatiques similaires dans le monde (Meouak, 2017; Sparks, 1931).

Pour ce qui concerne les résultats de l'évaluation des performances thermiques des stratégies vernaculaires dans la région des Ziban, il a été constaté que l'habitation du ksar de Farfar présente de meilleures performances thermiques par rapport à celle du quartier du Mcid. La principale différence entre ces deux habitations réside dans leur environnement urbain, la première étant située dans l'ancien ksar des Ziban et l'autre dans un environnement urbain en mutation. Cela démontre que les performances thermiques de la région des Ziban dépendent de la synergie entre les stratégies urbaines et architecturales. L'absence ou l'inactivité d'une stratégie peut avoir un effet négatif sur les autres et réduire les performances thermiques de l'habitation.

Pour ce qui a trait aux performances visuelles, il a été remarqué que la présence de la Raouzna améliore les performances visuelles à l'intérieur des habitations des Ziban. Toutefois, les performances visuelles des habitations des Ziban sont généralement réduites, ce qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci, on peut citer les objectifs des anciens habitants et constructeurs qui privilégiaient l'intimité (TRIKI, 2015), les besoins et les tâches des anciens habitants des ksour (Hammoudi, 2014; Meouak, 2017), ainsi que la manière d'utiliser l'espace de la maison (Sriti & Tabet-Aoul, 2004).

Chapitre 6.

OPTIMISATION DES STRATEGIES ADAPTIVES DES ZIBAN

6.1 Introduction

A l'issue de l'identification des stratégies vernaculaires passives d'adaptabilité climatiques propres à la région des Ziban, le présent chapitre vise principalement à améliorer l'intégration des techniques et dispositifs issus de ces stratégies vernaculaires au sein des bâtiments contemporains. Dans une perspective de durabilité, il est crucial que l'amélioration et l'application de ces stratégies se fasse après avoir identifié les types d'habitations les plus couramment utilisés, les formes d'îlots les plus courants et les tailles de parcelles les plus répandues, afin de les prendre en compte ces critères lors de la mise en œuvre pratique. Afin de formuler des directives générales permettant de maximiser les résultats de l'intégration de ces stratégies dans l'architecture contemporaine et de les utiliser efficacement à l'avenir, il est nécessaire d'améliorer ces stratégies en tenant compte des changements climatiques. La modélisation et la simulation énergétique numérique, associées à l'utilisation de programmes informatiques performants, représentent des outils d'expérimentation quantitative permettant d'atteindre ces objectifs. A l'aide de ces outils, les stratégies vernaculaires passives identifiées vont être améliorées en termes de confort thermique et visuelle, bien que ces deux facteurs soient considérés comme contradictoires et antagonistes pour le cas des zones chaude et arides. Dans ce chapitre, plusieurs méthodes numériques ont été utilisées pour assurer l'intégration et l'adaptation des stratégies passives propres à la région des Ziban dans la production architecturale contemporaine.

6.2 Paramètres du modèle hypothétique

Comme précédemment mentionné, afin d'obtenir des directives générales sur l'intégration des dispositifs et techniques passifs issus des stratégies vernaculaires dans l'architecture contemporaine, l'utilisation d'un modèle hypothétique numérique est nécessaire. Ce modèle hypothétique doit se référer à une habitation contemporaine typique de la région des Ziban. Dans cette étude, le modèle hypothétique a été généré en suivant plusieurs étapes. Tout d'abord, le type d'habitation le plus courant dans la région a été identifié. Ensuite, la forme d'îlot la plus fréquente a été prise en compte pour modéliser le type d'habitation étudié dans le contexte urbain le plus couramment utilisé. De plus, une analyse des surfaces des parcelles des habitations individuelles à Biskra a été réalisée afin de déterminer les dimensions et les ratios de parcelles les plus répandus. Ces informations ont été exploitées pour définir les dimensions générales du modèle hypothétique, en respectant les contraintes urbaines typiques de la région.

6.2.1 Le type d'habitation récurrente

En se référant aux données officielles de l'Office National des Statistiques (ONS, 2017), on peut établir une base solide pour déterminer le type d'habitation le plus fréquent dans la wilaya de Biskra. Les résultats de la répartition des logements habités par des ménages ordinaires et collectifs, présentés dans la Figure 98, indiquent que le nombre total d'habitations dans la wilaya est de 105 292, dont 79 838 (représentées en rouge) correspondent à des habitations individuelles. Ainsi, on constate que plus de 75% des habitations dans la wilaya de Biskra sont de nature individuelle. Ces chiffres confirment donc que les habitations individuelles sont le type d'habitation le plus répandu dans la région. Par conséquent, il est justifié d'utiliser un modèle hypothétique basé sur ce type d'habitation dans le cadre de cette étude.

Wilaya	Type de construction						Total
	Immeuble habitation	Maison individuelle	Maison traditionnelle	Autres ordinaires	Constructions précaires	Non déclaré	
Adrar	108	32 479	29 532	137	6 215	50	68 521
Chlef	14 072	73 792	28 792	14 808	5 908	3 218	140 590
Laghouat	7 313	31 018	17 512	401	3 513	2 933	62 690
Oum El Bouaghi	18 304	64 433	15 407	399	1 060	1 152	100 755
Batna	24 523	126 009	15 235	693	1 405	1 674	169 539
Béjaïa	23 625	104 822	11 353	769	1 256	3 033	144 858
Biskra	10 772	79 838	11 717	413	1 797	755	105 292
Bechar	6 181	31 376	2 240	217	703	28	40 745
Blida	38 314	83 840	16 681	756	6 398	3 778	149 767
Bouira	17 766	61 111	12 713	866	2 603	2 377	97 436
Tamanrasset	354	10 206	18 562	66	607	1 002	30 797
Tébessa	15 928	66 321	18 637	323	1 489	916	103 614
Tlemcen	20 063	133 092	8 090	924	4 348	148	166 665
Tiaret	19 355	76 272	25 042	683	3 966	63	125 381

Figure 98: Répartition des logements habités des ménages ordinaires et collectifs par wilaya

6.2.2 La Parcelle du modèle

Suite à l'identification de l'habitat individuel comme le type d'habitation le plus courant, une analyse des parcelles d'habitations individuelles est essentielle pour déterminer les caractéristiques typiques en termes de taille et de forme. Cette analyse vise à produire un modèle hypothétique contemporain qui soit représentatif. Dans cette optique, une analyse a été réalisée sur la surface des parcelles et le rapport entre la largeur et la hauteur dans les quartiers d'habitation contemporains majeurs de la ville de Biskra. Ces informations permettent de mieux comprendre les caractéristiques des parcelles dans ces quartiers, pour la conception d'un modèle hypothétique d'habitation individuelle contemporaine. Les facteurs pris en compte comprennent la superficie des parcelles, le rapport entre la largeur et la hauteur, ainsi que leur représentativité numérique

dans la ville de Biskra. Ces résultats contribuent à définir les caractéristiques typiques des parcelles dans les quartiers d'habitation contemporains, offrant ainsi une base solide pour la création du modèle hypothétique.

6.2.2.1 Détermination de la surface de la parcelle de référence

Une analyse a été réalisée afin de déterminer la surface moyenne des parcelles des habitations individuelles les plus courantes. Cette analyse a été effectuée en utilisant la programmation informatique avec le langage Python et la bibliothèque open source "Open Computer Vision Library (Bradski & Kaehler, 2008) sur cinq quartiers de la ville de Biskra en tant que capitale des Ziban. Les cinq quartiers ont été soigneusement sélectionnés pour leur caractère spécifique d'habitats individuels planifiés (Latreche, 2019). Ces quartiers se distinguent des autres par leurs planification gouvernementale et leur construction postérieure à 1995 (Alkama, 1995) un sixième quartier, Chetma, a été ajouté à l'étude en raison de son étendue et de sa nature en tant que zone d'habitation individuelle planifiée, en vue d'une future conurbation avec Biskra (Dechaicha & Alkama, 2020). La Figure 99 illustre les six quartiers choisis pour l'étude des taille et formes de parcelles.



Figure 99 : Les six quartiers sélectionnés pour l'analyse des parcelles

L'analyse a été basée sur la programmation informatique qui a permis d'automatiser l'identification et la mesure des tailles de parcelles dans les quartiers, comme illustré dans la Figure 100. Cependant, l'utilisation des techniques de traitement d'images et de détection de contours

fournies par la bibliothèque "Open Computer Vision Library" a entraîné un échantillonnage aléatoire des parcelles en raison des caractéristiques des images et de la nature du code utilisé, comme cela est observable dans l'Annexe-C-II.



Figure 100: Des images satellitaires de différents quartiers illustrant la détection de contours des parcelles (Source : auteur)

Les résultats de l'analyse des surfaces des parcelles des habitations individuelles à Biskra sont illustrés dans la Figure 101 qui présente une distribution des tailles de parcelles, montrant que la plupart des parcelles se situent dans une fourchette de 200 à 220 m². Cependant, la Figure 102 offre une précision supplémentaire en mettant en évidence que la surface la plus courante parmi ces parcelles est d'environ 203 m².

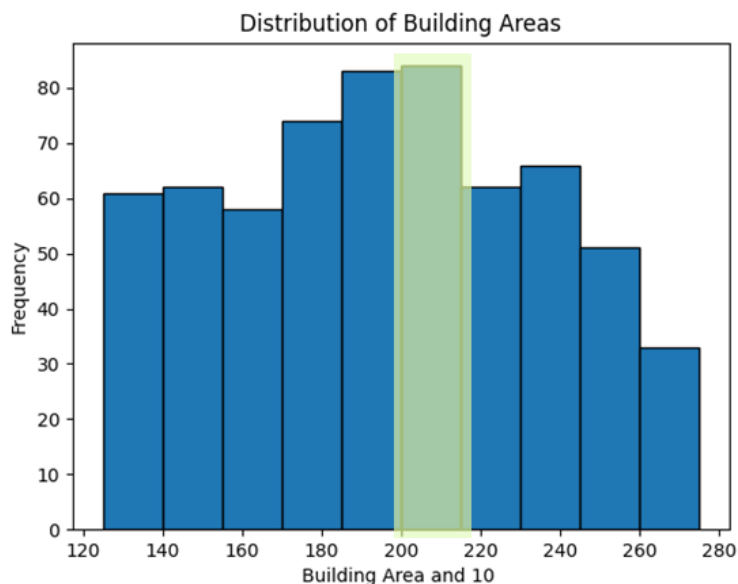


Figure 101: Répartition générale des parcelles dans la ville de Biskra en fonction de leur taille.

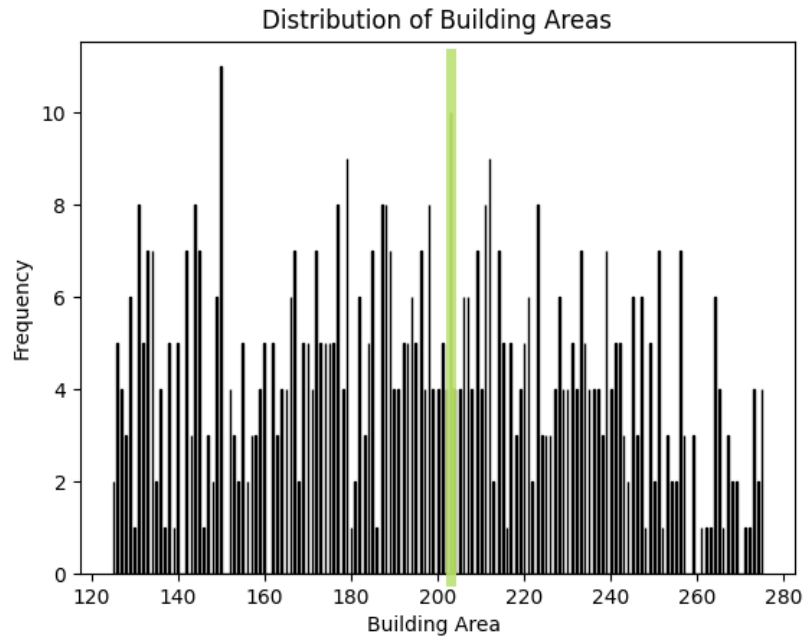


Figure 102: La taille la plus répandue parmi ces parcelles est de 203 m²

6.2.2.2 Le ratio de parcelle le plus courant

Dans le cadre de la création d'un modèle hypothétique typique et en continuant sur la même démarche analytique, il est nécessaire de réaliser une analyse des ratios de parcelles les plus courants. Ce ratio représente la relation entre la largeur et la hauteur (L/H) de la parcelle.

À partir des résultats obtenus lors de l'analyse des tailles de parcelles réalisées précédemment, une analyse a été effectuée pour déterminer les relations L/H les plus fréquentes, comme illustré dans la *Figure 103*. Le résultat de l'analyse montre que les ratios L/H les plus fréquents sont 1.3 et 1.29, cela signifie que là plus par des ratios L/H les plus utilisée dans les divisions des ilots urbain et dans les environs de 1.3.

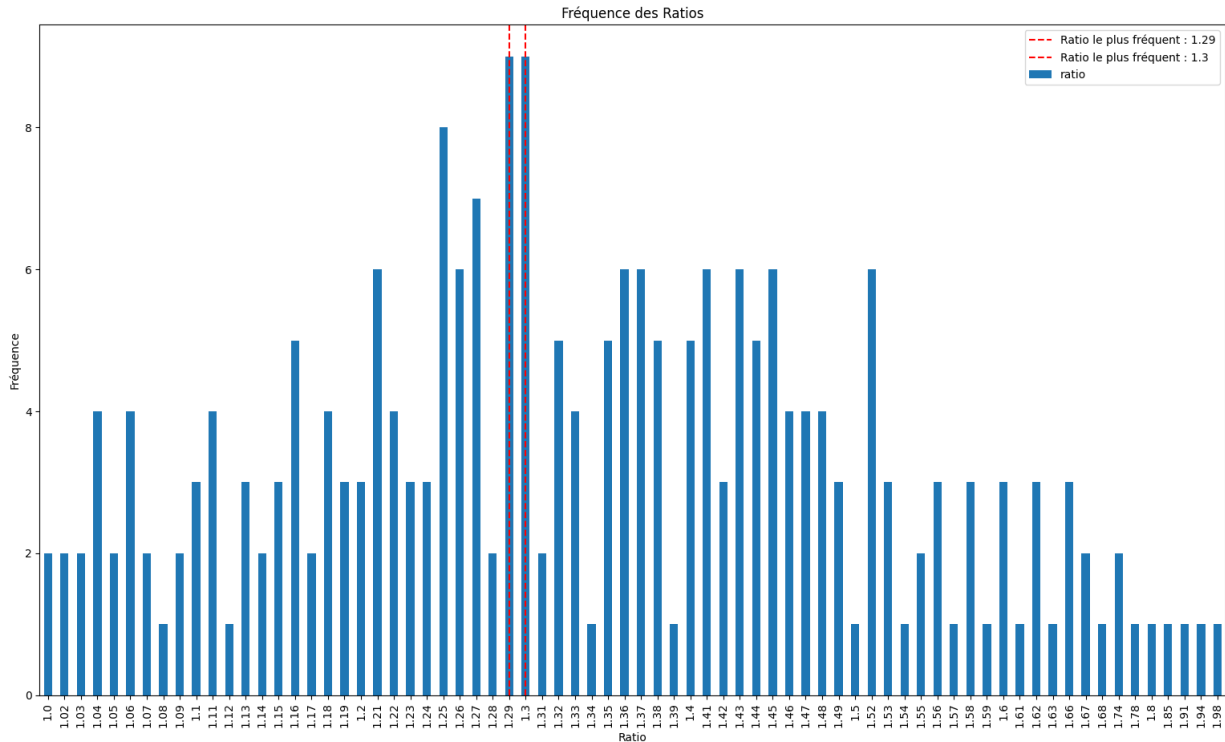


Figure 103: Analyse de la relation entre largeur et hauteur des parcelles

6.2.2.3 La taille de parcelle du modèle hypothétique

D'après les résultats de l'analyse des quartiers planifiés d'habitations individuelles, il a été constaté que la taille de parcelle la plus courante est d'environ 203 m². De plus, le ratio le plus fréquent entre la largeur et la hauteur des parcelles est de 1.3, ce qui signifie que la largeur est égale à 1.3 fois la hauteur. En se basant sur ce ratio, la parcelle du modèle hypothétique aura une largeur de 16.25 mètres et une hauteur de 12.5 mètres.

6.2.2.4 Configuration du modèle hypothétique

Dans le but de déterminer la configuration du modèle hypothétique, ce travail s'est basé sur les résultats de l'étude menée par (LATRECHE, 2019). L'étude a réalisé une analyse typomorphologique sur 115 habitations planifiées dans le quartier N5 de ce travail (Figure 98). Les résultats ont révélé que la plus grande proportion, soit 61,73 %, correspondait à des habitations de nature RDC+1, c'est-à-dire comprenant un rez-de-chaussée et un étage. De plus, le plus grand pourcentage de 82,6 % correspondait à des habitations de nature plain-pied.

Ces résultats ont été pris en compte pour déterminer la configuration du modèle hypothétique, qui sera un modèle RDC+1 de nature plain-pied.

6.2.3 L'îlot de la parcelle du modèle

Étant donné que l'environnement immédiat, c'est-à-dire les bâtiments environnants, peut avoir un impact considérable sur le comportement et les performances d'un bâtiment (Wong et al., 2011), y compris son comportement thermique et visuel, il est essentiel de prendre en compte l'environnement urbain immédiat lors de la modélisation du modèle hypothétique. Par conséquent, une analyse de l'environnement urbain immédiat des habitations individuelles doit être effectuée afin de sélectionner la forme et l'orientation appropriées pour l'îlot correspondant à la parcelle du modèle hypothétique. La section suivante présente le processus analytique suivi pour générer l'îlot urbain et l'environnement immédiat du modèle hypothétique qui permettra de prendre en compte les caractéristiques de l'environnement bâti environnant.

6.2.3.1 La forme d'îlot la plus courante

Dans la même optique de créer un modèle hypothétique représentatif de l'habitat le plus courant, il est essentiel de déterminer la forme d'îlot la plus fréquente. À cet effet, cinq quartiers ont été soigneusement sélectionnés des six quartiers précédemment mentionnés dans la partie de la sélection de la parcelle. Les quartiers choisis sont répartis à l'ouest et à l'est de la ville de Biskra, comme illustré dans la Figure 105.



Figure 104: Les quartiers choisis pour l'étude de la forme des îlots.

Et En se basant l'images issus de Google Earth sur ces cinq quartiers, la forme d'îlot la plus courante a été identifié à l'aide de l'observation directe come il est indiqué dans la Figure 105 et l'Annexe-C-I

Les résultats de cette analyse indiquent que la forme de barre est la plus fréquente parmi les différentes configurations d'îlots observées. La forme de barre se caractérise par une disposition allongée et linéaire des bâtiments, créant ainsi des alignements et des rues rectilignes. Cette configuration est souvent associée à une densité plus élevée de bâtiments et à une utilisation efficace de l'espace urbain.



Figure 105: Exemples des plans issus de Google Earth de différents quartiers (Source : auteur)

6.2.4 Règles d'implantation des parcelles (composition urbaine)

Dans la même optique de l'optimisation des stratégies vernaculaires dans la région des Ziban sur un modèle hypothétique contemporain, et dans le but d'utiliser ses stratégies optimisées comme lignes directrices pour la conception architecturale contemporaine. Pour cela les contraintes urbaines contemporaines ont été prises en compte pour la production des îlots du modèle hypothétique de l'habitation individuelle contemporaine, afin que les lignes directrices soient en accord avec le contexte contemporain.

L'implantation des parcelles dans l'îlot du modèle hypothétique a été déterminée en se basant sur les règles d'urbanisme régissant la composition urbaine, notamment les dispositions de l'article 21 du Décret exécutif n°91-175 du 28 mai 1991 (Mazouz, 2016).

Selon les règles en vigueur, il est spécifié que l'angle entre le rebord de la fenêtre d'un bâtiment et celui du bâtiment voisin ne doit pas dépasser les 45°, comme illustré dans la Figure 106.

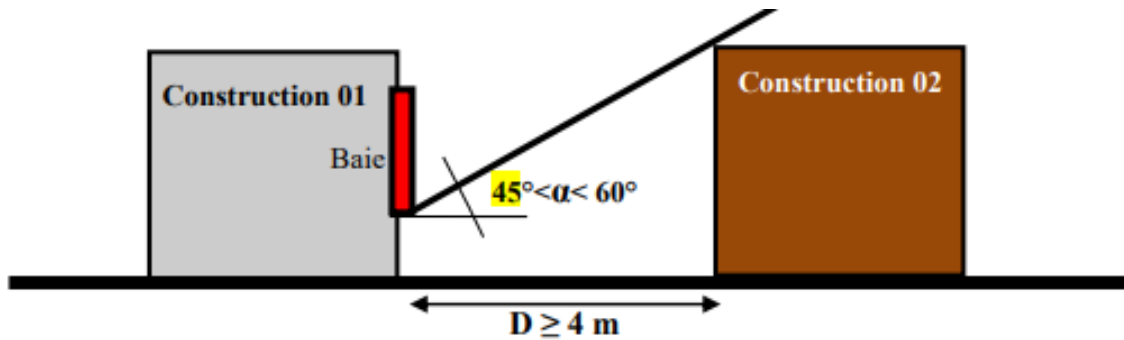


Figure 106: Illustration des règles d'implantation des parcelles

Cette disposition a pour objectif de garantir une distance suffisante afin que chaque bâtiment puisse bénéficier d'un éclairage adéquat.

En se conformant à ces règles, et compte tenu du fait que le modèle hypothétique sera un bâtiment RDC+1 avec un mur de terrasse, le modèle et les bâtiments adjacents auront une hauteur de 10 mètres. Etant donné que généralement la hauteur de la fenêtre au rez-de-chaussée est de 1 mètre, afin de respecter les règles d'urbanisme mentionnées, la distance entre les bâtiments doit être d'au moins **9 mètres** comme il est indiqué dans la Figure 107.

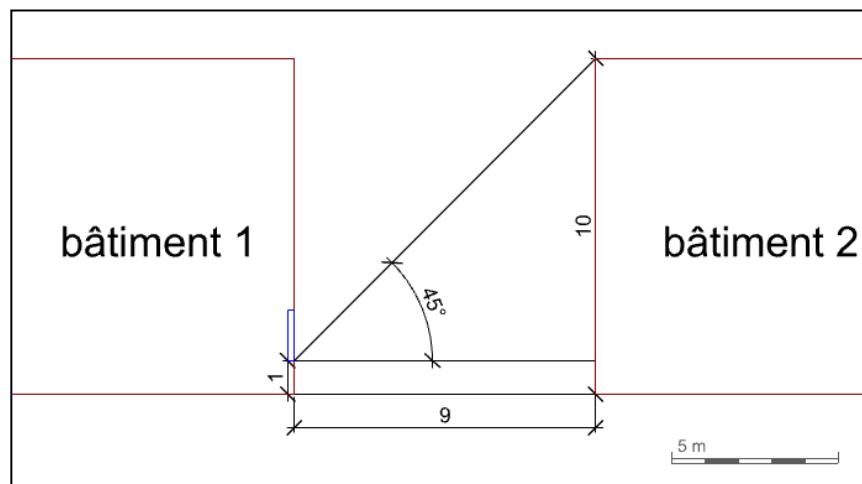


Figure 107 : Espacement entre les îlots considérant la règle d'implantation urbaine

6.2.4.1 Position et orientation de l'îlot

Concernant la position des îlots dans le modèle hypothétique, il est important de souligner que le design climatique des zones chaudes et arides privilégie généralement une densité urbaine plus

élevée, ce qui se traduit par une réduction des grandes voies urbaines, à moins qu'elles ne soient nécessaires. Cette réduction des grandes voies publiques favorise l'augmentation des îlots centraux, c'est-à-dire des îlots qui ne sont pas directement exposés aux grandes voies urbaines. Dans le cadre de cette étude, la position de l'îlot dans le modèle hypothétique sera basée sur l'approche la plus couramment utilisée dans les zones chaudes et arides, à savoir qu'il ne sera pas adjacent aux grandes voies urbaines et sera entouré d'autres îlots.

Suite à l'identification de la taille de parcelle la plus courante, de la forme et de la position de l'îlot la plus courante, et en appliquant les règles d'urbanisme précédemment mentionnées qui stipulent un espacement minimum de 9 mètres entre les îlots, un modèle hypothétique composé de plusieurs parcelles a été conçu comme illustré dans la Figure 108.

Suite à cela, une expérimentation simulée a été faite du but de trouver l'orientation optimale qui permettrait de réduire au minimum la radiation solaire annuelle non bénéfique, c'est-à-dire l'exposition aux radiations quand les températures extérieures sont en dehors de la zone de confort. De cette manière l'orientation de l'îlot optimale maximisera le confort thermique, en répondant aux besoins des zones chaudes et arides comme il est indiqué dans la Figure 108.

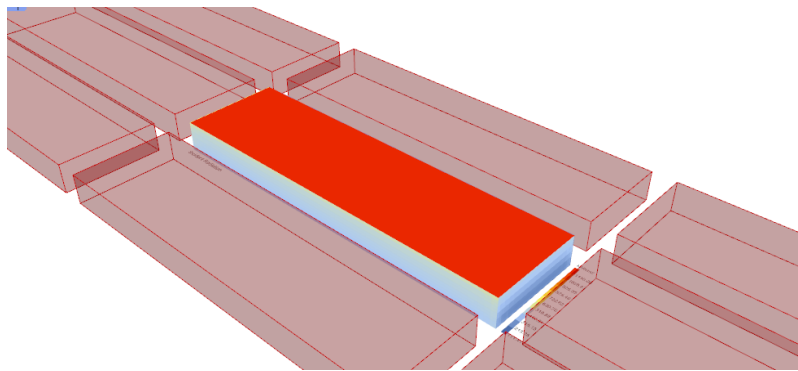


Figure 108: Analyse des radiations solaires annuelles de l'îlot de référence

L'expérimentation simulée a été réalisée afin d'analyser la quantité annuelle de radiation solaire atteignant l'îlot pour 12 orientations différentes, avec un écart de 15 degrés entre chaque orientation. Cette analyse a été effectuée pendant les heures où la température dépasse la zone de confort thermique, assurée à 28 degrés Celsius. Les données climatiques spécifiques à la région de Biskra ont été prises en compte lors de cette expérimentation.

Pour mener cette expérimentation, des outils de simulation ont été utilisés, notamment Ladybug-tools (Roudsari & Pak, 2013) pour la simulation de la radiation solaire, et Grasshopper 3D pour la modélisation des formes de blocs de bâtiments dans l'îlot (Fink & Koenig, 2019). Ces outils ont permis de simuler et de visualiser l'impact de différentes orientations sur l'exposition à la radiation solaire de l'îlot hypothétique.

Les résultats présentés dans la Figure 109 démontrent la quantité de radiation solaire atteignant l'îlot pour les 12 orientations simulées. L'orientation axe Nord-sud correspond à 0° et 180°, tandis que l'orientation Est-Ouest correspond à 90° et 270°. Les résultats mettent en évidence que les orientations optimales se situent autour de l'axe Est-Ouest. En effet, une orientation optimale de l'îlot avec une rotation de 90° dans l'axe Est-Ouest a été observée. Ces résultats sont en accord avec la revue de littérature dans la partie consacrée à l'« Orientation et types des tissus urbains ».

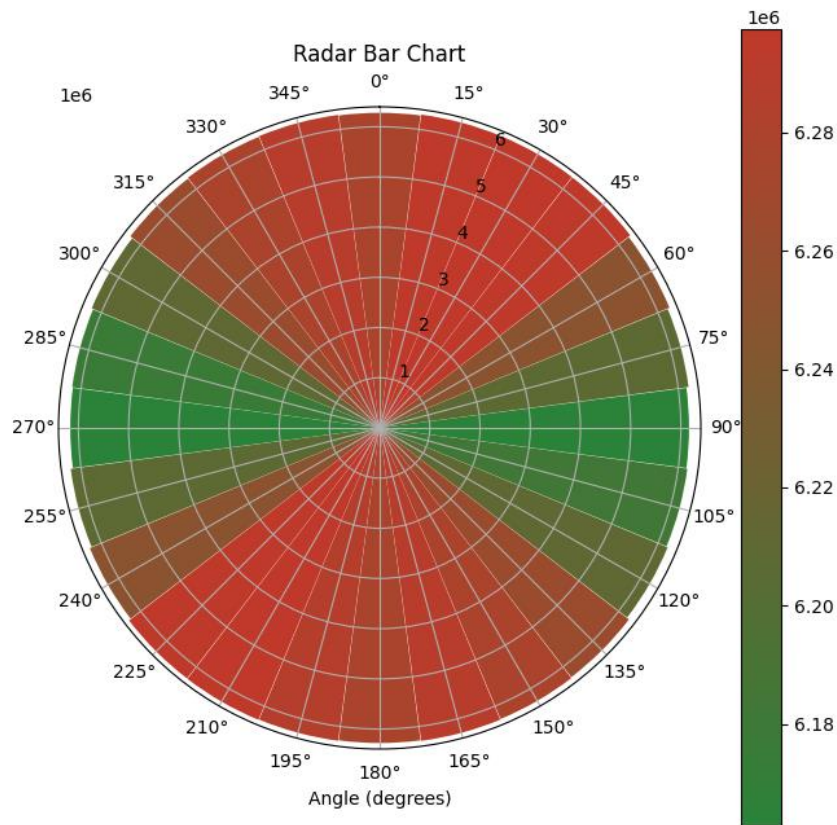


Figure 109: Résultats des radiations solaires qui atteignent l'îlot sous différentes orientations

6.3 Les modèles virtuels générés

Suite à l'analyse précédente des paramètres ayant contribué à la genèse du modèle hypothétique, et dans l'objectif de trouver des lignes directrices pour l'intégration des stratégies vernaculaires passives de la région des Ziban dans l'architecture des habitations individuelles, il est essentiel de tester tous les scénarios possibles concernant l'implantation des habitations dans l'îlot sélectionné précédemment.

Dans cette optique, trois types d'habitations individuelles ont été choisis, en prenant en compte les caractéristiques mentionnées précédemment (plain-pied, RDC+1). Ces trois habitations ont été sélectionnées car elles représentent les trois possibilités d'implantation des habitations individuelles dans le scénario le plus défavorable, c'est-à-dire des habitations orientées vers le sud dans l'îlot orienté est-ouest.

Les habitations sélectionnées occupent respectivement les deux angles et le centre de l'îlot. Une cage d'escalier proche de la façade principale de chaque modèle a été ajoutée, car il est courant que les maisons individuelles adoptent une configuration d'appartements superposé similaire dans chaque étage. Ainsi le modèle hypothétique représenté par les trois variantes permet de reproduire le comportement thermique et les ambiances visuelles des habitations dans des conditions proches de la réalité. Les résultats de cette sélection sont indiqués dans la Figure 110: Représentation des trois variantes du Modèle hypothétique.

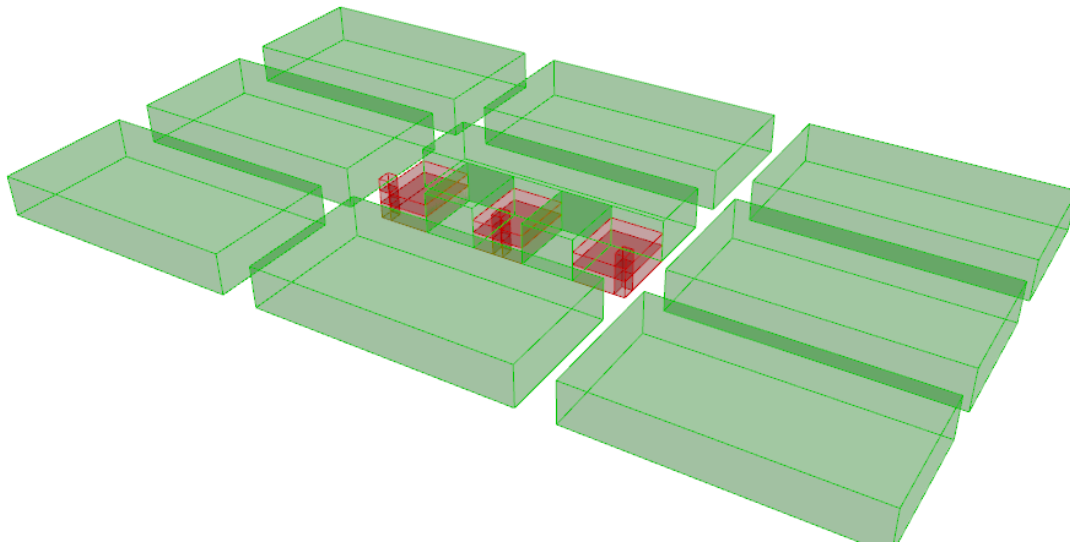


Figure 110: Représentation des trois variantes du Modèle hypothétique

Suite à la modélisation des variantes représentatives des habitations individuelles de la ville de Biskra, une Raouzna et des fenêtres ont été ajoutés à chaque modèle. En prenant en compte la taille du modèle et l'emplacement hypothétique des espaces, des ouvertures ont été disposées sur les murs extérieurs. La Figure 111 présente le résultat de la modélisation variantes représentatives générée à partir du modèle hypothétique de base. Les ouvertures (Raouzna + fenêtres) sont représentées en bleu, les murs extérieurs en jaune, le toit en rouge et l'environnement urbain immédiat en violet dans la figure gauche et ou rouge clair dans la figure droite.

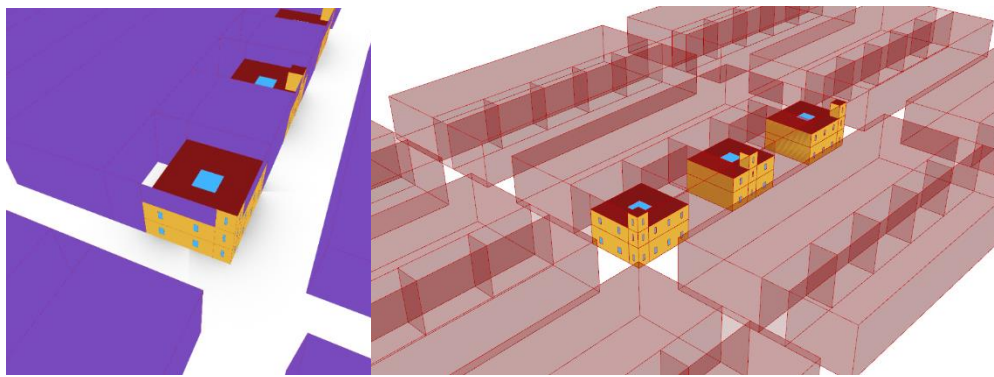


Figure 111: Modélisation des trois variantes représentant les habitations individuelles générées sur la base du Modèle hypothétique.

6.4 Optimisation des techniques vernaculaires de la région des Ziban

Compte tenu des résultats du chapitre précédent évoqués dans la Conclusion, il est évident que les techniques et dispositifs utilisés dans la région des Ziban ont été développés en fonction du contexte et des besoins des anciens habitants. Cela a donné lieu à des dispositifs et techniques présentant à la fois des avantages et des inconvénients pour l'architecture contemporaine. L'objectif de la section suivante est d'optimiser ces stratégies afin de renforcer leurs aspects positifs et de réduire leurs aspects négatifs.

6.4.1.1 Définition de l'optimisation paramétrique

L'optimisation paramétrique dans les bâtiments fait référence au processus d'utilisation de techniques de conception paramétrique et d'algorithmes informatiques pour optimiser différents aspects de la performance et de la conception des bâtiments. Cela implique de définir un ensemble

de paramètres de conception ou de variables qui peuvent être ajustés dans des plages prédéfinies pour atteindre des objectifs ou des critères de performance spécifiques (Chaturvedi et al., 2023).

Grâce à l'optimisation paramétrique, les chercheurs peuvent explorer et évaluer un large éventail d'options et d'itérations de conception en faisant varier systématiquement les paramètres d'entrée. Cette approche permet d'identifier les solutions de conception les plus optimales qui répondent aux critères souhaités, tels que les performances thermiques et visuelles (Lakhdari et al., 2021).

L'optimisation paramétrique utilise des outils informatiques et des algorithmes pour automatiser l'exploration des options de conception et l'évaluation des mesures de performance. Elle permet aux concepteurs d'évaluer rapidement l'impact des changements de conception sur la performance des bâtiments et de prendre des décisions éclairées basées sur des données quantitatives (Fink & Koenig, 2019; Roudsari & Pak, 2013).

Dans le cadre de cette recherche, les paramètres à optimiser sont les techniques vernaculaires issues des stratégies passives de la région des Ziban, par rapport aux performances visuelles et thermiques des modèles hypothétiques contemporains.

6.4.1.2 Sélection des paramètres à optimiser

Suite à l'identification des techniques vernaculaires issues des stratégies passives de la région des Ziban dans le chapitre 6, et étant donné les contraintes de l'architecture contemporaine au niveau urbain définies par les règlements d'urbanisme mentionnés auparavant, les techniques vernaculaires capables d'être optimisées ne sont que de nature architecturale. Dans le cadre de cette recherche, les techniques architecturales identifiées sont : la morphologie du plan dominée par la compacité et l'introversion, la maison à patio, l'emplacement en hauteur des ouvertures latérales, la taille réduite des ouvertures, les ouvertures zénithales au niveau de la toiture (raouzna) et les murs massifs.

Dans le cadre de cette étude, les dispositifs qui peuvent être améliorés et intégrés dans l'architecture contemporaine et les modèles hypothétiques générés sont : les caractéristiques du mur, les ouvertures latérales (taille et position) et la Raouzna. Pour ce qui est des techniques telles que la morphologie et l'introversion du plan, ou encore, la maison à patio, l'habitation contemporaine individuelle dans la région des Ziban a conservé le principe de la maison à west-dar (Sriti & Tabet-Aoul, 2004) ; un principe qui renvoie généralement à l'organisation spatiale centrée et à l'introversion.

6.4.1.2.1 Ouvertures

Dans la présente étude, il a été démontré que les ouvertures de la région des Ziban ne répondent pas aux exigences du confort visuel de l'architecture contemporaine. Les techniques de conception des ouvertures doivent donc être optimisées en tenant compte des spécificités du climat chaud et aride en vue de les adapter aux besoins contemporains. Pour l'optimisation des ouvertures, généralement les ouvertures sont représentées par le paramètre rapport fenêtre sur mur (en anglais window to wall ratio, WWR). Ce rapport permet de connaître la taille de l'ouverture par rapport au mur de son implantation.

Afin de trouver la combinaison adéquate de techniques vernaculaires de la région des Ziban, les ouvertures doivent être optimisées en termes de rapport WWR. Pour cela, il faut trouver un intervalle adéquat pour ce paramètre. De nombreuses études antérieures ont défini un intervalle approprié pour le climat chaud et aride. Parmi elles, on peut citer le travail de (Koenigsberger et al., 1971), connu sous le nom des Tables de Mahoney. Ce travail propose des tableaux fondés sur des données climatiques aisément disponibles et des calculs simples, qui fournissent des directives pour la conception. Pour les zones chaudes et arides, il suggère un rapport fenêtre/mur variant de 10% à 25%. La revue de la littérature de (Alsehail & Almhafdy, 2020) sur les recherches portant sur le rapport fenêtre/mur dans différents climats a montré que dans les climats arides, le meilleur rapport se situe entre 10% et 22%. Quant à l'étude de (Kaihoul et al., 2021), qui a analysé des habitations conçues selon les principes des stratégies vernaculaires dans les zones chaudes et arides, le résultat était un rapport fenêtre/mur inférieur à 20%.

Dans cette perspective et compte tenu des résultats des recherches antérieures qui tendent vers un rapport fenêtre/mur inférieur ou proche de 20%, et dans le but de déterminer un rapport adapté pour les performances thermique et visuelle dans les zones chaudes et arides où les ouvertures sont censées être minimales, l'intervalle du rapport mur/fenêtre sera compris entre 5% et 20%, avec des pas de 5%. Ce rapport et ses variations permettront d'intégrer le dispositif des claustras.

6.4.1.2.2 Raouzna

L'architecture vernaculaire des régions à climat méditerranéen chaud privilégie l'utilisation de vastes cours latérales. Dans les régions encore plus chaudes, une seule ouverture centrale dans le toit, appelée Raouzna (2019, ماضي), est souvent utilisée. Cette ouverture, fréquemment présente dans les zones chaudes et arides d'Algérie, est une adaptation de la cour centrale réduite en raison des conditions climatiques extrêmes. Selon une étude menée par (2019, ماضي), le ratio moyen de

la surface de Raouzna est d'environ 7% dans les maisons récentes, tandis que les maisons anciennes affichent généralement un ratio d'environ 10%. Afin d'optimiser ce dispositif vernaculaire, une plage de ratios allant de 7% à 10% est testée, avec des écarts de 1%, afin de déterminer la combinaison optimale entre la surface des ouvertures latérales et celle de la Raouzna.

6.4.1.2.3 Les matériaux utilisés pour les murs

La stratégie de l'inertie thermique, qui implique l'utilisation de murs massifs, est une caractéristique clé de l'architecture vernaculaire dans les zones chaudes et arides, y compris la région des Ziban. Cependant, les murs d'architecture vernaculaire présentent plusieurs inconvénients fonctionnels, tels que le problème de l'érosion (Brown & Clifton, 1978). Il est donc nécessaire d'optimiser ce dispositif afin qu'il puisse pleinement remplir son rôle d'inertie thermique tout en s'adaptant à l'architecture contemporaine. Dans cette section, plusieurs scénarios ont été suggérés afin de tester et d'optimiser cette stratégie en utilisant des matériaux adaptés à l'architecture contemporaine et au climat chaud et aride.

a) Murs en Béton de Terre Compressé et Stabilisée (BTCS).

Dans l'architecture contemporaine, la terre crue a été combinée à des matériaux contemporains afin d'améliorer les propriétés mécaniques de la terre (Reddy & Reddy, 2022). Cette technique, généralement utilisée sous forme de blocs de terre stabilisée, consiste à mélanger de la terre crue avec des stabilisants tels que le ciment ou d'autres matériaux, dans le but d'améliorer ses caractéristiques structurelles et sa durabilité (Holliday et al., 2016). L'utilisation de briques de terre stabilisée présente de nombreux avantages, notamment leur disponibilité locale, leur faible coût, leurs excellentes performances thermiques et leur faible impact environnemental.

Dans cette recherche, ce matériau est proposé comme une solution permettant d'optimiser le dispositif vernaculaire du mur massif. Etant donné que la combinaison des matériaux constituant le bloc de terre stabilisée peut avoir un impact significatif sur les propriétés thermiques et mécaniques du matériau (Teixeira et al., 2020). Cette recherche s'appuie sur des études antérieures afin de trouver une combinaison optimale qui maximise les performances thermiques tout en préservant une performance mécanique adéquate. Les résultats de ces études sont exposés dans la section suivante, mettant en évidence les différentes combinaisons de matériaux testées et les avantages obtenus en termes de performance thermique.

b) Propriété Thermo-physique du Béton de Terre Compressé et Stabilisée (BTCS).

Dans le but de maximiser les performances thermiques des BTCS tout en maintenant une performance mécanique adéquate, plusieurs études ont été menées pour tester différentes combinaisons de matériaux constituant le BTC, notamment le ciment et la terre. Ces études ont exploré différentes proportions et ratios de ces matériaux afin de déterminer l'impact sur les propriétés thermiques et mécaniques du matériau final.

L'étude menée par (Zhang et al., 2017) se concentre sur l'effet de la densité et de la teneur en ciment sur la conductivité thermique des blocs de terre stabilisés au ciment (BTCS). Les résultats expérimentaux ont révélé que la conductivité thermique est proportionnelle à la densité du matériau. Cependant, aucune relation linéaire évidente n'a été observée entre la conductivité thermique et la teneur en ciment des BTC. Ces résultats sont clairement illustrés dans la Figure 112, qui présente les variations de conductivité thermique en fonction de la densité et de la teneur en ciment des blocs de terre stabilisés.

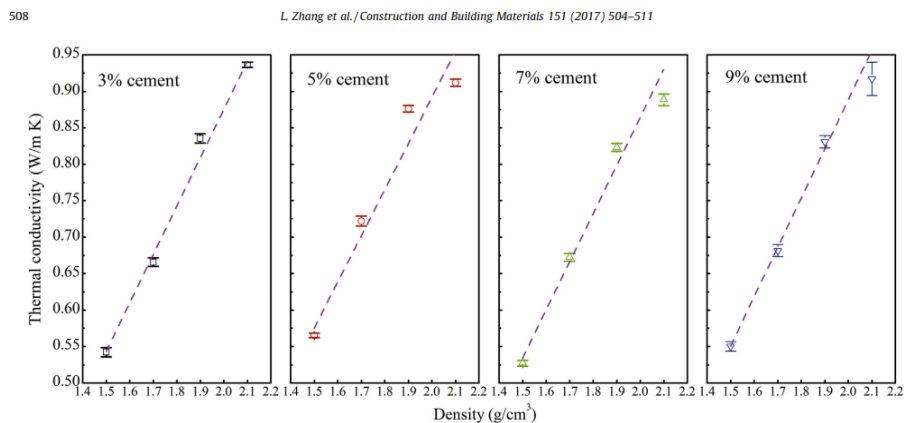


Fig. 7. Thermal conductivity vs. bulk density for different cement contents.

Figure 112 : Relation entre densité, teneur en ciment et conductivité thermique. (Zhang et al., 2017)

Également dans cette étude, il a été constaté une augmentation significative de la résistance à la compression des blocs de terre stabilisés (BTCS) suite à l'ajout de la teneur en ciment. Cela est illustré clairement dans la Figure 113, qui représente l'effet de la quantité de ciment et de la densité des blocs sur la résistance en compression.

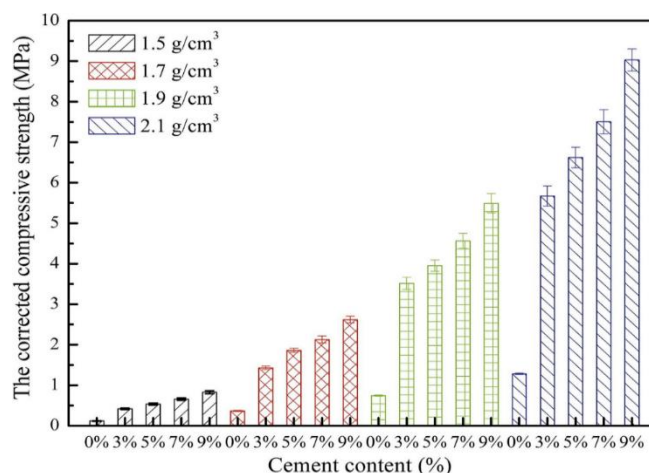


Figure 113: Relations entre quantité de ciment, densité et résistance à la compression (Zhang et al., 2017).

Étant donné que la résistance à la compression acceptable est de 2 MPa (Hode, 2015), et que la densité est proportionnelle à la conductivité thermique, le choix du type de blocs de terre stabilisée au ciment (BTCS) consistera à minimiser la conductivité thermique tout en préservant une résistance à la compression supérieure à 2 MPa. Cela signifie réduire au maximum la densité sans compromettre la résistance à la compression en dessous de 2 MPa. Étant donné que la résistance à la compression est proportionnelle à la teneur en ciment, et qu'il n'y a aucune relation entre la teneur en ciment et la conductivité thermique, le choix se porte logiquement sur les BTCS ayant la plus forte teneur en ciment. Cependant, d'après la Figure 113, les BTCS ayant une densité de 1,5 g/cm³ ont tous une résistance à la compression inférieure à 1 MPa, ce qui les rend inadaptés. Ce qui reste en considération, selon l'analyse précédemment mentionnée, ce sont les densités de 1,7 g/cm³, 1,9 g/cm³ et 2,1 g/cm³, comme indiqué dans le Tableau 16. Étant donné que les BTCS avec une densité de 1,7 g/cm³ présentent les meilleures performances thermiques, ils seront utilisés comme alternatives dans cette étude.

Tableau 16: Choix du type de BTCS avec des performances thermiques optimales

Densité (g/cm ³)	1.7	1.9	2.1
Conductivité (W/mC°)	0.68	0.83	0.91
Teneur en ciment (%)	9%	9%	9%
Résistance à la compression (MPa)	2.6	5.5	9.1

Pour la chaleur spécifique, Dans le travail de (Touré et al., 2017) la caractérisation thermique des briques de terre stabilisées compressées (BTCS) produites par huit briqueteries au Sénégal a donné une chaleur spécifique moyenne de $1040 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, avec un coefficient de variation de 8% et 7%, respectivement. Cette valeur a été choisie pour la simulation dans leur travail car elle représente la chaleur spécifique moyenne des BTCS testées et fournit une bonne estimation du comportement thermique de ces matériaux. D'après L'analyse et les études citées précédemment, le tableau suivant résume les propriétés thermiques du matériau BTCS utilisé dans cette étude.

Tableau 17:propriétés thermiques du BTCS utilisée dans l'étude

Propriétés thermiques	Valeurs
Densité	1700 kg/m ³
Conductivité thermique	0,68 W/m.°C
Chaleur spécifique	1070 J/kg.°C

c) Variantes des murs

Afin de tester un maximum de configurations de murs dans le cadre de l'optimisation de la stratégie de l'inertie thermique et dans le but de trouver une combinaison adéquate entre la technique de construction des murs et les techniques d'ouvertures et de Raouzna, plusieurs possibilités de combinaisons de murs ont été testées, allant des murs légers aux murs massifs, en utilisant des matériaux issus de l'architecture contemporaine.

Le Tableau 18 présente les différentes couches et épaisseurs de neuf variantes de murs utilisées pour l'optimisation paramétrique des stratégies vernaculaires passives dans le climat chaud et sec de la région de Ziban. Les murs sont nommés M1 à M9. Le mur M1 est une combinaison largement utilisée dans l'architecture contemporaine, composée d'un enduit de ciment, de briques creuses de 10 cm d'épaisseur, d'une lame d'air, de briques creuses de 15 cm et d'un enduit de plâtre. Les murs M2 à M9 sont constitués de différentes combinaisons, comprenant des couches de revêtement fixes telles que l'enduit de ciment et l'enduit en plâtre, ainsi que deux types d'isolants différents : lame d'air ou laine de roche, et des briques de terre stabilisée (BTCS) de différentes épaisseurs (14 cm ou 29 cm). Le choix des isolants a été fait en raison de leur large disponibilité sur le marché

algérien, et l'épaisseur des BTCS et de leurs couches a été déterminée en fonction des différentes combinaisons possibles lors de leur utilisation.

Tableau 18: Les différents couches utilisées pour les 9 variantes de murs

Nom de mur	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Couche 5
M1	Enduit ciment	Brique creuse 10	Lame d'air	Brique creuse	Enduit en plâtre
M2	Enduit ciment	BTCS 14 cm	Enduit en plâtre		
M3	Enduit ciment	BTCS 29 cm	Enduit en plâtre		
M4	Enduit ciment	BTCS 14 cm	Lame d'air	BTCS 14 cm	Enduit en plâtre
M5	Enduit ciment	BTCS 14 cm	Laine de Roche	BTCS 14 cm	Enduit en plâtre
M6	Enduit ciment	BTCS 29 cm	Lame d'air	BTCS 14 cm	Enduit en plâtre
M7	Enduit ciment	BTCS 29 cm	Laine de Roche	BTCS 14 cm	Enduit en plâtre
M8	Enduit ciment	BTCS 29 cm	Lame d'air	BTCS 29 cm	Enduit en plâtre
M9	Enduit ciment	BTCS 29 cm	Laine de Roche	BTCS 29 cm	Enduit en plâtre

6.4.1.2.4 Hauteurs des ouvertures du RDC

Dans cette étude, l'observation des fenêtres vernaculaires des Ziban a révélé qu'elles sont généralement de petite taille et sont positionnées en hauteur sur les murs du RDC. Afin de mieux appréhender leur positionnement et leur impact sur le confort thermique et visuel, trois variantes ont été sélectionnées en fonction du mur d'une hauteur de 4 mètres. La hauteur des fenêtres par rapport au plancher a été évaluée en utilisant trois valeurs : 1 mètre, 2 mètres et 3 mètres.

6.5 Récapitulatif de l'optimisation paramétrique

L'optimisation paramétrique des stratégies de la région des Ziban englobe trois techniques : les murs, les ouvertures et la Raouzna. La valeur de la Raouzna a été fixée entre 7 % et 10 % avec un écart de 1 %. La hauteur des fenêtres par rapport au plancher a été considérée selon trois valeurs : 1 mètre, 2 mètres et 3 mètres. La plage du rapport fenêtre/mur (WWR) a été définie entre 5 % et 20 % avec des écarts de 5 %. Le paramètre "Type de mur" concerne le matériau de construction

utilisé pour les murs extérieurs. Dans le cadre de cette étude, le matériau principal choisi est la BTCS (Brique de Terre Comprimée) avec différentes variantes, allant des murs légers aux murs conventionnels et massifs.

Les configurations et les variantes de chaque stratégie ont été élaborées dans le but de trouver l'approche optimale pour améliorer le confort thermique et visuel. Cette démarche permet d'optimiser les performances de chaque stratégie vernaculaire en prenant en compte simultanément tous les paramètres des autres stratégies.

6.6 Protocole de simulation

Le protocole de simulation est un ensemble de règles définies qui encadre la mise en œuvre de la simulation numérique. Il englobe la spécification des paramètres, des conditions initiales, des outils utilisés ainsi que des critères d'évaluation pour guider l'exécution de la simulation. La présente section expose en détail le protocole de simulation adopté dans cette étude.

6.6.1 Outils utilisés

Dans le cadre de l'optimisation, plusieurs outils ont été utilisés pour modéliser numériquement et le comportement du bâtiment. Ces outils ont été choisis pour leur flexibilité et leur capacité à gérer des tâches complexes simultanément. Les outils utilisés comprennent Rhino 3D, Grasshopper 3D, Python et EnergyPlus.

Rhino 3D est un logiciel de modélisation 3D prisé dans l'architecture et le design. Avec une interface conviviale, il permet de créer et de modifier des modèles 3D complexes grâce à ses fonctionnalités avancées (Fink & Koenig, 2019; 'Rhinoceros 3D', 2023). Compatible avec de nombreux plugins, comme **Grasshopper 3D**, il facilite la conception paramétrique et l'automatisation des processus. **Ladybug Tools** est un plugin largement utilisés qui exploitent la puissance paramétrique de Grasshopper pour intégrer les informations thermophysiques des éléments de construction et simplifier la modélisation et la simulation.

EnergyPlus™ est un logiciel de simulation énergétique de bâtiments utilisé par les professionnels de l'ingénierie, de l'architecture et de la recherche pour modéliser et simuler le comportement énergétique et visuel des bâtiments (Crawley et al., 2001) . Il permet notamment de simuler le

confort thermique et visuel à l'intérieur des bâtiments. Pour faciliter ces simulations, plusieurs outils et plugins sont utilisés en combinaison avec EnergyPlus, tels que Rhino Grasshopper et Ladybug Tools. Ces outils permettent de créer des modèles détaillés et d'intégrer les paramètres nécessaires à la simulation énergétique des bâtiments.

Python est un langage de programmation polyvalent et de haut niveau utilisé dans de nombreux domaines (Van Rossum, 2007), y compris l'architecture et la modélisation de bâtiments. Il est compatible avec des logiciels tels que Rhino3D, Grasshopper3D et Ladybug Tools, ce qui permet d'automatiser des tâches complexes. Dans le contexte de cette étude, des scripts Python sont utilisés pour contrôler les paramètres de simulation, exécuter les simulations et recueillir les résultats.

6.6.1.1 Processus d'utilisation des outils

Comme mentionné précédemment dans la description de la méthodologie, Rhino 3D, un logiciel de modélisation 3D, et Grasshopper 3D, un plugin offrant une interface visuelle pour la conception paramétrique, ont été utilisés pour modéliser le modèle hypothétique en incluant des informations sur la géométrie architecturale, les éléments d'ombrage et l'environnement urbain. Ensuite, avec l'aide du plugin Ladybug Tools, les informations sur les paramètres thermophysiques des éléments architecturaux ont été introduites et exportées dans un format compatible avec le logiciel EnergyPlus, connu sous le nom de fichier IDF (Input Data File). Python a été utilisé pour modifier le fichier IDF et créer des modèles avec des variations de techniques (Raouzna de 7 à 10 %, ouverture de 5 à 20 % et 9 variations de murs). Étant donné le grand nombre de fichiers IDF et le besoin de réaliser de nombreuses simulations, ces fichiers ont été exportés sur des serveurs puissants hébergés par Google Cloud pour accélérer le processus. Enfin, les résultats obtenus ont été traités à l'aide du langage de programmation Python et les bibliothèques de Ladybug-tools.

6.6.2 Les données climatiques de la simulation

CCWorldWeatherGen est un outil qui permet de créer des fichiers météorologiques pour différentes localisations dans le monde, afin de les utiliser dans des programmes de simulation des performances des bâtiments. Il utilise des données du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour modéliser les changements climatiques. L'outil transforme les fichiers météorologiques existants en prenant en compte ces changements, ce qui permet aux programmes de simulation de tenir compte des conditions météorologiques futures (Jentsch et al.,

2013). CCWorldWeatherGen est basé sur Microsoft Excel et peut générer des fichiers compatibles avec la plupart des programmes de simulation.

Dans le cadre de cette étude, CCWorldWeatherGen a été utilisé pour générer des fichiers climatiques pour l'année 2050 de la ville de Biskra. Ces fichiers climatiques ont ensuite été utilisés comme données de base pour l'optimisation des performances thermiques et visuelles des bâtiments. En utilisant ces fichiers, des directives spécifiques peuvent être développées et appliquées pour améliorer la conception et la performance des bâtiments dans un contexte climatique futur.

6.6.3 Indices d'évaluation du confort thermique et visuelle pour la simulation

Dans le cadre de l'évaluation de la performance des stratégies vernaculaires dans un modèle hypothétique contemporain, deux indices ont été utilisés. Le premier indice concerne les performances thermiques et repose sur le modèle adaptatif de confort thermique développé dans l'étude "Les ksour d'Adrar" (Bassoud et al., 2021) et présenté dans la section 1.3.4. Cette région se situe dans une zone chaude et aride, similaire à celle des Ziban.

Quant au second indice, il s'agit de l'indice d'éclairage du jour utile, présenté dans la section 1.4.5.1. Cet indice a été choisi en raison de son utilisation répandue dans le domaine du confort visuel. En effet, il englobe des aspects tels que la quantité d'éclairage adéquate, le degré d'éblouissement et la probabilité de surchauffe, le tout combiné dans un seul indice.

6.7 Résultats de l'optimisation paramétrique de l'intégration des stratégies vernaculaires des Ziban

Cette partie expose les résultats de la simulation de 432 modèles pour les trois bâtiments dans le cadre de l'étude paramétrique des techniques issues des stratégies vernaculaires de la région des Ziban, les résultats obtenus sont présentés dans la section suivante. Pour évaluer le confort thermique à l'aide d'un programme Python, les heures de confort ont été calculées en utilisant la température opérative et en se basant sur le modèle de confort thermique adaptatif mentionné précédemment. Quant au confort visuel, également à l'aide du langage de programmation Python,

le pourcentage d'heures annuelles a été calculé en fonction du pourcentage d'espace où l'éclairage se situe dans l'intervalle de confort.

6.7.1 Résultats du confort thermique

L'objectif principal de cette section est de réaliser une optimisation paramétrique et de déterminer la combinaison des techniques qui peuvent augmenter les heures de confort thermique en utilisant les types de murs, les ratios fenêtre sur mur, les ratios de Raouzna et les hauteurs de fenêtre mentionnées précédemment. La méthode utilisée consiste à évaluer différentes configurations de paramètres afin de déterminer leur impact sur les heures de confort. Dans cette partie, les résultats de la simulation seront analysés et une discussion détaillée ainsi qu'une interprétation seront fournies en se basant sur le tableau fourni et les figures de résultats.

6.7.1.1 Résultats du confort thermique - bâtiment n°1

La Figure 114 présente les résultats des simulations effectuées sur 432 modèles hypothétiques du Bâtiment 1, qui possède deux façades, l'une orientée vers le sud et l'autre orientée vers l'ouest. Les points en rouge représentent les 10 meilleurs modèles qui offrent le plus d'heures de confort élevées. Tandis que le Figure 115 montre une illustration plus claire sur leurs positionnements, Ces modèles ont été sélectionnés en fonction de leur performance optimale en termes de confort thermique.

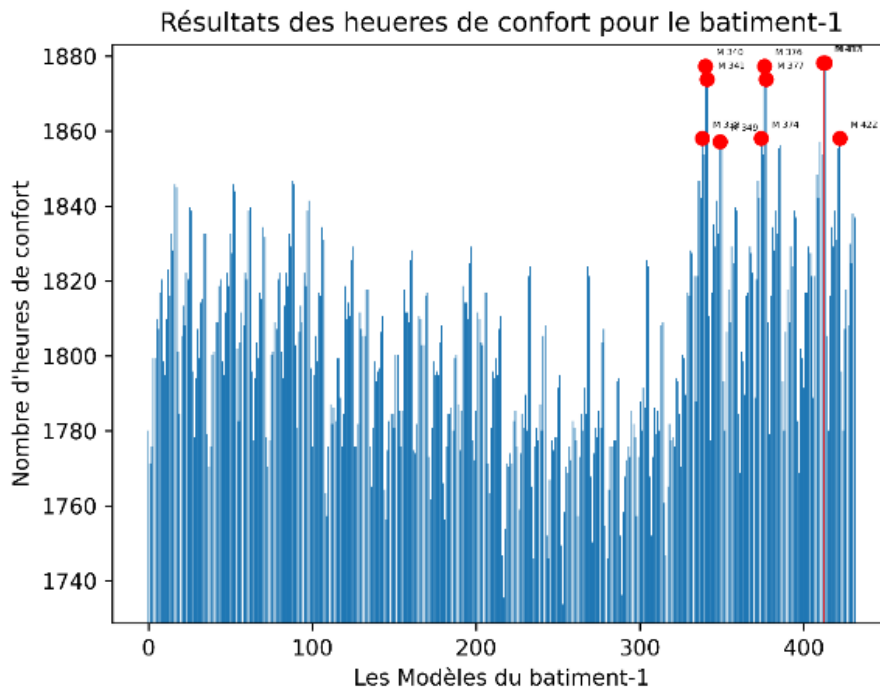


Figure 114: résultats des heures de confort pour le bâtiment n°1

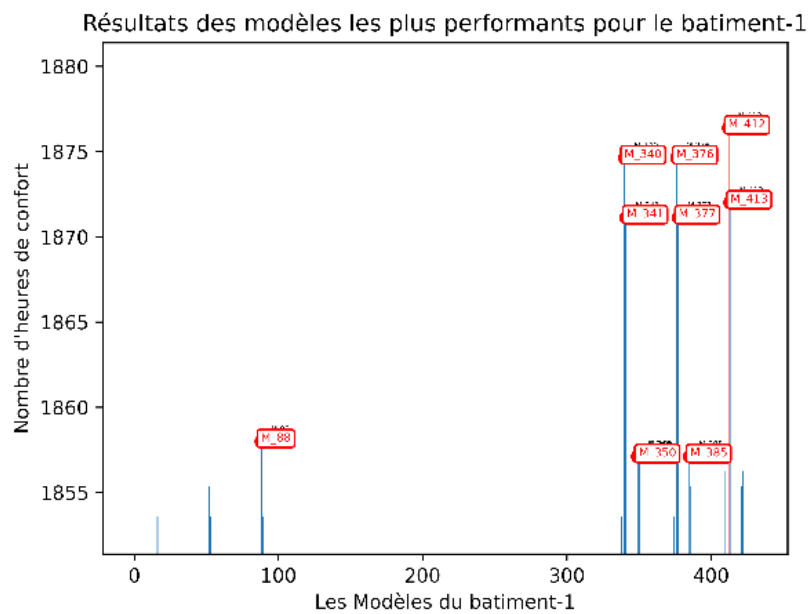


Figure 115: résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°1

Le Tableau 19 présente les 10 modèles les plus optimaux en termes de confort thermique. Les résultats indiquent que les stratégies, qui présentent toutes un ratio fenêtre sur mur de 5% et une

hauteur de fenêtre de 3 mètres, et une Raouzna de 7% ont obtenu les meilleures heures de confort thermique (1878 et 1877 respectivement).

En ce qui concerne le ratio Raouzna, les modèles avec un ratio de 7% ont généralement obtenu des heures de confort plus élevées que ceux avec un ratio de 8%. Cependant, les modèles M_349 et M_338 avec un ratio Raouzna de 8% ont tous deux obtenu des heures de confort de 1857, montrant que d'autres facteurs comme la hauteur de la fenêtre et le numéro de mur peuvent également influencer le confort thermique.

En ce qui concerne les différents types de murs, nous pouvons observer que les type M8 ou M9 qui sont des murs massives de plus 60 cm avec ou sans isolation thermique de ont également obtenu des heures de confort thermique similaire (1857).

En résumé, les meilleures stratégies pour améliorer le confort thermique dans ce contexte spécifique sont celles qui combinent un ratio fenêtre minimal de 5%, une hauteur de fenêtre maximal de 3 mètres et des murs massive tels que M8 et M9.

Tableau 19: Heures de confort thermique pour chaque stratégie du Ziban-bâtiment n°1

Bâtiment n°1					
Modèle	Ratio Fenêtre sur Mur (%)	Hauteur d'allège (m)	Ratio Raouzna (%)	Numéro de Mur	Heures de Confort
M_413	5	3	7	M9	1878
M_412	5	3	7	M8	1878
M_376	5	2	7	M8	1877
M_377	5	2	7	M9	1873
M_340	5	1	7	M8	1877
M_341	5	1	7	M9	1873
M_349	5	1	8	M8	1857
M_338	5	1	7	M6	1857
M_374	5	2	7	M6	1857
M_422	5	3	8	M9	1857

6.7.1.1 Résultats du confort thermique - bâtiment n°2

La Figure 116 illustre les résultats d'une simulation portant sur 432 modèles hypothétiques de du bâtiment N°2 qui est le bâtiment central a une seule façade qui donne sur la route. Dans le graph, les points en rouge représentent les 10 meilleurs modèles qui offrent des heures de confort thermique élevées. Tandis que La Figure 117 présente plus les 10 modèles sélectionnés, à savoir les modèles M17, M59, M88, M89, M340, M376, M377 et M412. Ces modèles ont été identifiés comme particulièrement performants en termes de confort thermique.

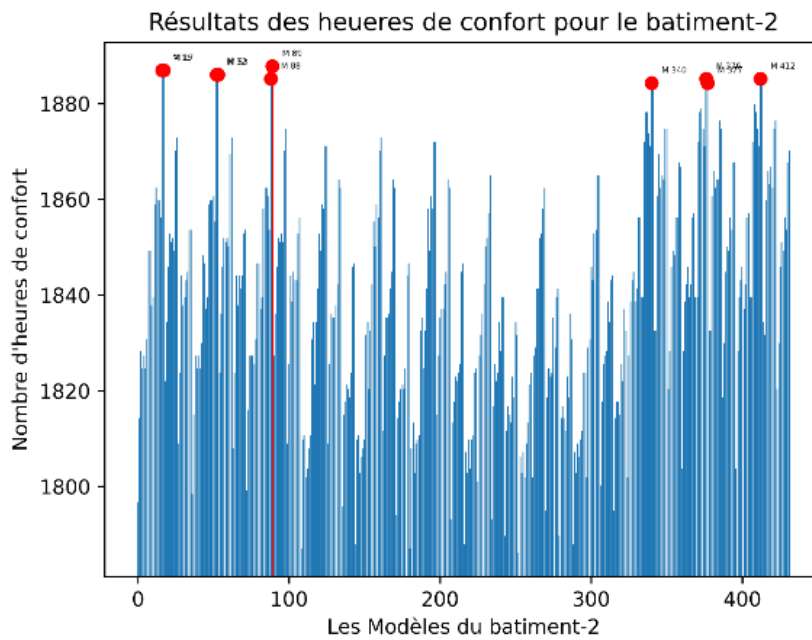


Figure 116: Résultats des heures de confort pour le bâtiment n°2

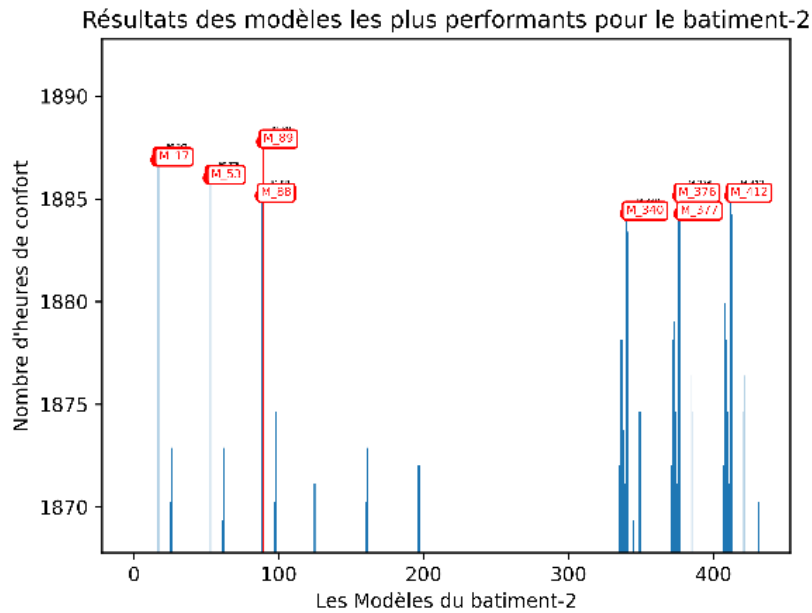


Figure 117: Résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°2

Les résultats du Tableau 20, exposant les caractéristiques des modèles les plus performants, révèlent des variations minimales entre les heures de confort. Il est noté que les configurations présentant un ratio fenêtre sur mur de 10% ont obtenu les meilleures performances en termes d'heures de confort. Pour ce qui est de la stratégie liée aux murs, les modèles intégrant des murs massifs se sont avérés être les plus performants. En revanche, tous les dix modèles présentant des heures de confort élevées ont un ratio minimal de 7% pour le paramètre du ratio de Raouzna. En ce qui concerne la hauteur de fenêtre, aucun effet direct sur les heures de confort n'a été observé. En revanche, les modèles présentant des ratios fenêtre/mur compris entre 5% et 10% ont démontré les meilleures performances.

En résumé, dans le contexte d'une habitation individuelle avec une seule façade, l'utilisation d'une combinaison de techniques de conception issues des stratégies vernaculaires passives de la région des Ziban, notamment l'intégration de murs passifs et un ratio de Raouzna minimal avec des ratios fenêtre/mur compris entre 5% et 10%, peut améliorer les heures de confort.

Tableau 20: Heures de confort thermique pour chaque stratégie vernaculaire cas bâtiment n°2

Bâtiment n°2					
Modèle	Ratio Fenêtre sur Mur (%)	Hauteur du Rebord (m)	Ratio Raouzna (%)	Numéro de Mur	Heures de Confort
M_89	10	3	7	M9	1887
M_16	10	1	7	M8	1886
M_17	10	1	7	M9	1886
M_52	10	2	7	M8	1886
M_53	10	2	7	M9	1886
M_88	10	3	7	M8	1885
M_376	5	2	7	M8	1885
M_412	5	3	7	M8	1885
M_340	5	1	7	M8	1884
M_377	5	2	7	M9	1884

6.7.1.1 Résultats du confort thermique - bâtiment n°3

La Figure 118 présente les résultats des simulations portant sur 432 modèles hypothétiques de du bâtiment N°3, qui s'agit du bâtiment avec deux façades avec une au sud et l'autre à l'est. Parmi ceux-ci, les 10 modèles les plus performants, représentés par des points rouges, se distinguent par leur capacité à offrir plus d'heures de confort.

Quant à la Figure 119, elle offre une illustration plus claire sur le positionnement des 10 modèles les plus performants, à savoir les modèles M88, M340, M341, M350, M385, M376, M377, M412 et M314. Ces modèles ont été identifiés comme étant particulièrement performants en termes de confort thermique.

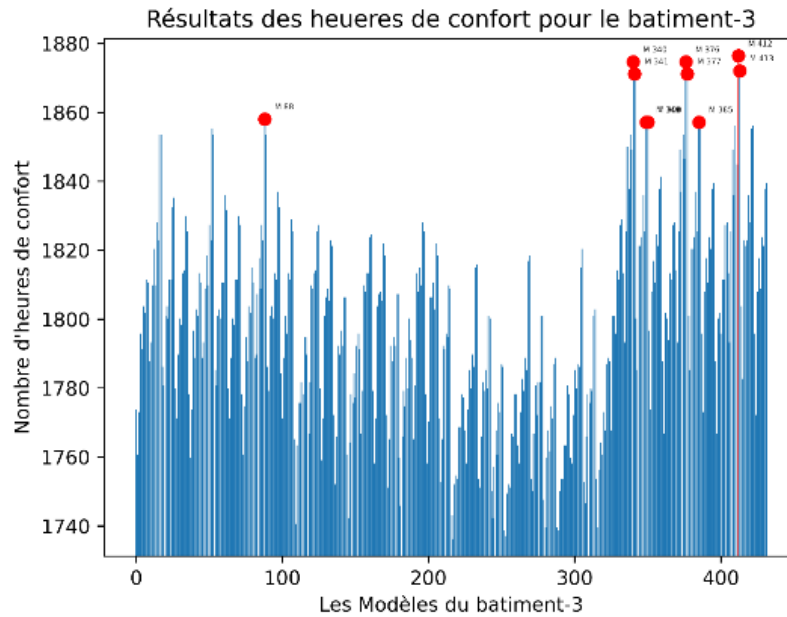


Figure 118: Résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°3

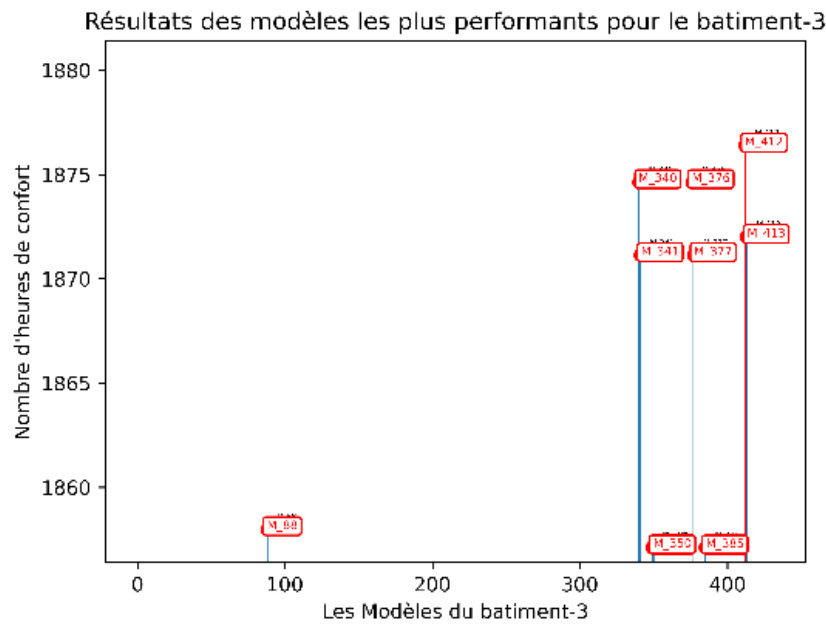


Figure 119: Résultats des modèles les plus performants pour le bâtiment n°3

Les résultats du Tableau 21, qui expose les caractéristiques des 10 modèles les plus performants, mettent en évidence plusieurs observations importantes. Tout d'abord, la présence de murs massifs (M8, M9) est constatée dans tous les modèles étudiés, que ce soit dans le bâtiment 1 ou dans le

bâtiment 2. Cette technique de murs massifs semble donc jouer un rôle crucial dans l'amélioration du confort thermique. En ce qui concerne le paramètre de la Raouzna, les modèles présentant un ratio minimal de Raouzna de 7% offrent un plus grand nombre d'heures de confort. La hauteur de fenêtre, quant à elle, présente une petite différence en termes d'heures de confort, avec une légère tendance en faveur des fenêtres situées à une hauteur plus élevée. En revanche, ce qui concerne le ratio fenêtre sur mur, les modèles avec un ratio minimal de 5% offrent davantage d'heures de confort.

En résumé, pour les habitations situées dans des zones chaudes et arides, l'application de techniques issues de l'architecture vernaculaire de la région des Ziban, telles qu'un ratio fenêtre sur mur de 5% et un ratio de Raouzna de 7%, associées à l'utilisation de murs massifs, permet d'améliorer les heures de confort thermique annuelles

Tableau 21 Heures de confort thermique pour chaque stratégie vernaculaire cas bâtiment n°3

Bâtiment n°3					
Modèle	Ratio Fenêtre sur Mur (%)	Hauteur du Rebord (m)	Ratio Raouzna (%)	Numéro de Mur	Heures de Confort
M_412	5	3	7	M8	1876
M_376	5	2	7	M8	1874
M_340	5	1	7	M8	1874
M_413	5	3	7	M9	1872
M_341	5	1	7	M9	1871
M_377	5	2	7	M9	1871
M_349	5	1	8	M8	1857
M_385	5	2	8	M8	1857
M_350	5	1	8	M9	1857
M_88	10	3	7	M8	1857

6.7.2 Discussion des résultats du confort thermique

Suite à l'analyse des résultats de la simulation du confort thermique à travers l'optimisation paramétrique, qui a conduit à la sélection de 10 modèles optimaux pour les trois bâtiments hypothétiques contemporains, certaines observations clés peuvent être tirées.

Tout d'abord, l'utilisation de murs massifs avec des matériaux contemporains, inspirée des stratégies vernaculaires passives des Ziban, se révèle être une technique majeure pour améliorer le confort thermique. En revanche, l'ajout d'isolants aux murs massifs n'a pas montré d'impact significatif, car aucune différence perceptible n'a été observée entre les modèles avec des murs massifs isolés et ceux sans isolation.

En ce qui concerne la technique de la Raouzna, il a été remarqué que la réduction de la taille de la Raouzna à des valeurs minimales améliore les heures de confort. Cela s'explique par la réduction de l'exposition aux rayonnements solaires directs dans l'espace intérieur de l'habitation.

Concernant le ratio des ouvertures, il a été observé que la réduction du ratio fenêtre sur mur à des valeurs minimales de 5% à 10% peut augmenter les heures de confort. Cependant, il est important de noter que la réduction du nombre de fenêtres peut également fournir une plus grande surface vitrée, comme cela a été constaté dans le modèle du bâtiment n°2 avec une seule façade par rapport aux deux autres modèles des bâtiments n°1 et n°3. Cette observation suggère que la réduction du ratio fenêtre sur mur à des valeurs minimales dans une habitation à une seule façade peut améliorer les heures de confort estivales, mais peut également augmenter les heures de confort hivernales. Toutefois, cette constatation doit être confirmée par une vérification des résultats horaires de confort hivernal et estivale du bâtiment N°2. Cependant, il est important de souligner que cette observation va au-delà du champ d'étude de la recherche.

En ce qui concerne la technique de la hauteur des fenêtres, il a été observé que cette stratégie présente une efficacité partielle dans le cas des bâtiments dotés d'une seconde façade orientée vers l'ouest, en plus de leurs façades sud, comme c'est le cas pour le bâtiment n°1. Cette constatation peut être expliquée par le fait que ce type de bâtiment présente un risque accru de surchauffe des façades, entraînant un effet de dépression et de poussée d'air. Toutefois, il convient de noter que cette observation doit être corroborée par des simulations de dynamique des fluides numériques (CFD) afin de mieux comprendre les flux d'air et les interactions thermiques spécifiques, Et cela dépasse la portée de la recherche. Néanmoins, il est à noter que cette constatation est exclue du cadre d'analyse de la recherche.

6.7.3 Résultats du confort visuel

La section suivante présente les résultats de 432 simulations pour les habitations hypothétiques des trois bâtiments précédemment mentionnés. Ces résultats sont représentés par le pourcentage d'heures annuelles calculé en fonction de la proportion d'espace où l'éclairage se situe dans l'intervalle de l'indice d'éclairage du jour utile.

6.7.3.1 Résultats du confort visuel - bâtiment n°1

Les Figure 120 présentent les résultats des simulations concernant l'éclairage du jour dans le bâtiment n°1. La figure illustre les 432 modèles étudiés pour cette habitation. Les 10 modèles les plus performants sont spécifiquement mis en évidence et sont représentés par des points de couleur rouge. Ces 10 modèles ont été identifiés comme étant ceux offrant les niveaux d'éclairage utile les plus élevés en lumière du jour dans le bâtiment n°1.

La Figure 121 se concentre exclusivement sur les résultats des 10 modèles les plus performants du bâtiment n°1. Elle permet une analyse plus détaillée des caractéristiques de ces modèles sélectionnés, mettant en évidence les aspects spécifiques de leur éclairage utile en lumière du jour.

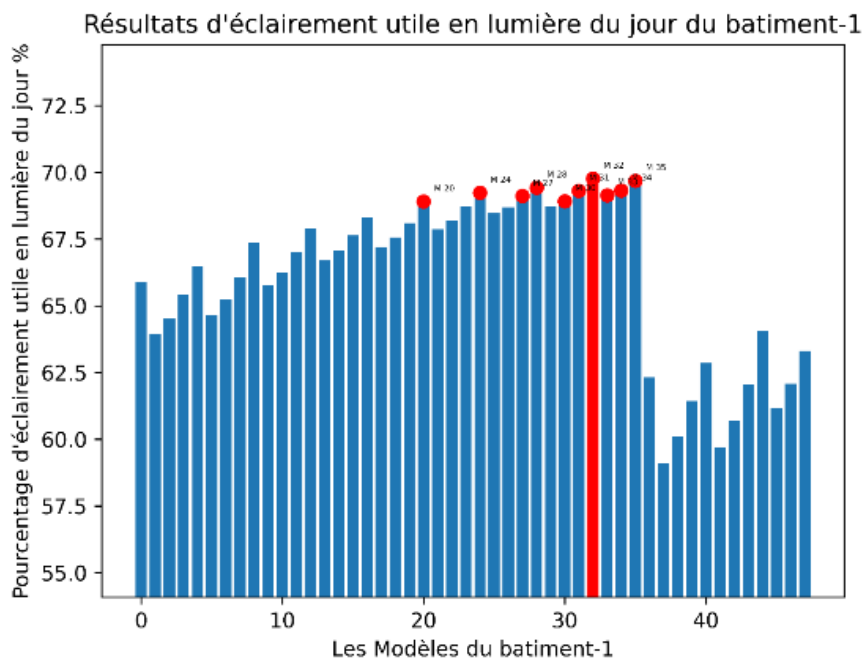


Figure 120: résultats d'éclairage utile en lumière du jour bâtiment n°1

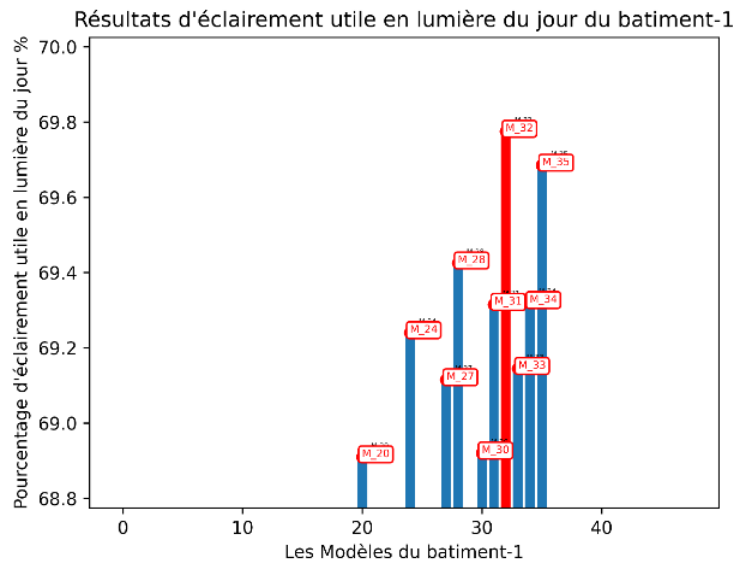


Figure 121: résultats d'éclairage des modèles les plus performant bâtiment n°1

Le Tableau 22 présente les résultats de la simulation numérique portant sur l'éclairage utile en lumière du jour dans le bâtiment n°1. Il est remarqué qu'il n'y a pas de grande différence dans les résultats entre les modèles en termes d'éclairage utile du jour. Les résultats indiquent que les 10 meilleurs modèles présentent tous un ratio fenêtre sur mur maximal de 20%. Concernant le ratio Raouzna, il a été observé que les modèles avec un ratio de 10% offrent de meilleurs résultats en termes d'éclairage utile du jour que ceux avec un ratio inférieur. De plus, les modèles avec des fenêtres de plus grande hauteur semblent être les plus performants en termes d'éclairage utile du jour. Cela suggère que l'élévation des fenêtres peut favoriser une meilleure pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment.

Tableau 22 : Pourcentage Éclairage du Jour Utile (%) pour les différents techniques- bâtiment n°1

bâtiment n°1				
Ratio Fenêtre sur Mur (%)	Hauteur d'allège (m)	Ratio Raouzna (%)	Pourcentage Éclairage du Jour Utile (%)	
20	3	10	69.77	
20	3	9	69.69	
20	2	10	69.42	
20	2	9	69.31	

20	3	8	69.32
20	1	10	69.24
20	3	7	69.14
20	1	9	69.12
15	3	10	68.91
20	2	8	68.92

6.7.3.2 Resultats du confort visuel - bâtiment n°2

Les Figure 122 présentent les résultats des simulations portant sur l'éclairage du jour utile dans le bâtiment n°2. Elles illustrent le 432 modèle étudié à travers la modélisation et la simulation pour cette habitation. Les 10 modèles les plus performants sont spécifiquement mis en évidence et représentés par des points de couleur rouge. Ces 10 modèles ont été identifiés comme étant ceux offrant les niveaux d'éclairage utile les plus élevés en lumière du jour dans le bâtiment n°1.

La Figure 123 présente une vue dédiée aux résultats d'éclairage des 10 modèles les plus performants du bâtiment n°2. Elle permet avec le Tableau 23 Une analyse plus détaillée des caractéristiques de ces modèles sélectionnés, mettant en évidence les aspects spécifiques de leur éclairage utile en lumière du jour. Cette figure permet de visualiser les variations et les différences d'éclairage entre ces modèles.

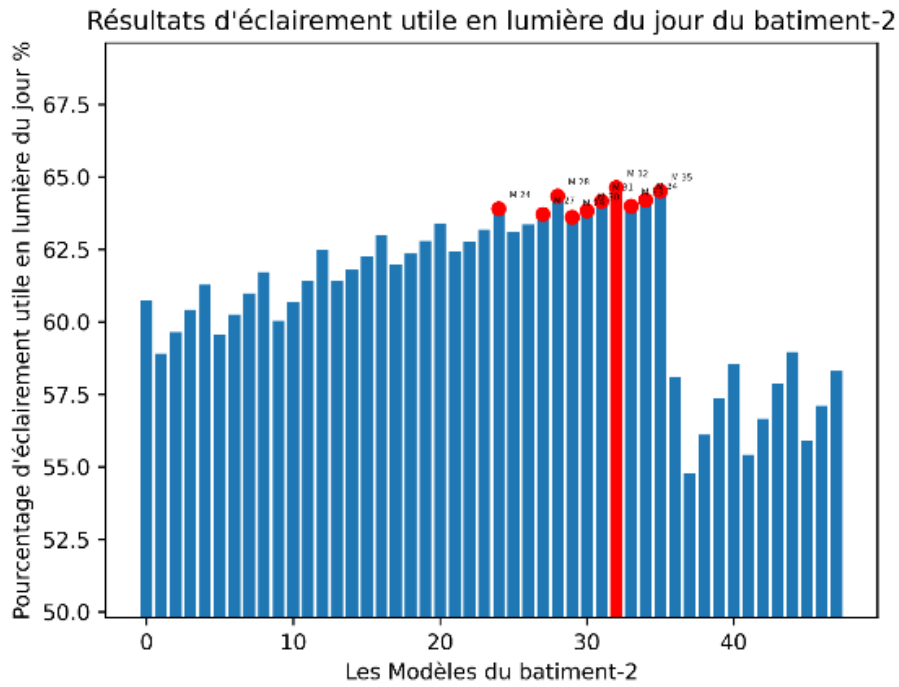


Figure 122 : résultats d'éclairage utile en lumière du jour bâtiment n°2

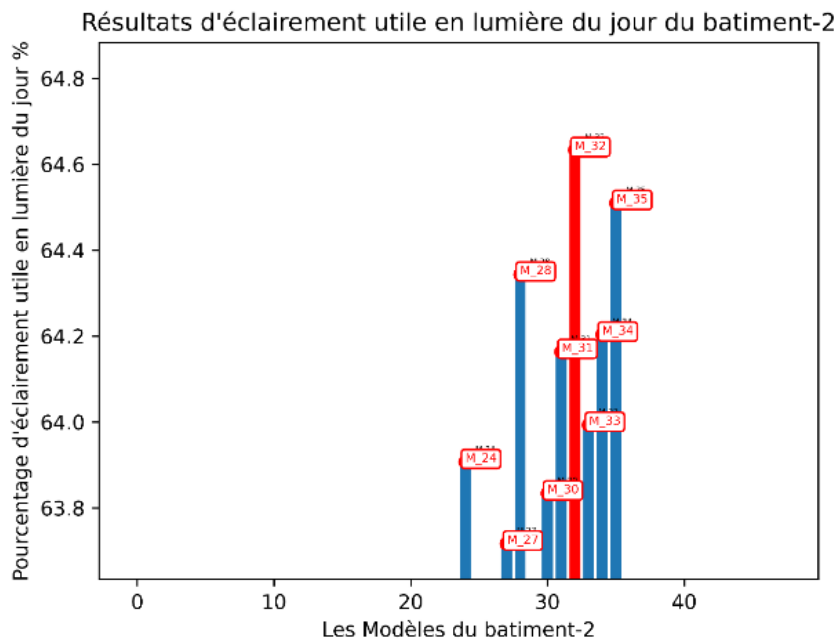


Figure 123: résultats d'éclairage des modèles les plus performant bâtiment n°2

Le Tableau 23 présente les résultats de simulations effectuées sur le bâtiment 2. Une analyse du tableau révèle des variations minimales du pourcentage d'éclairage du jour utile en fonction des différentes combinaisons de ces paramètres. Il convient de noter que le pourcentage d'éclairage du jour utile dans le bâtiment 2 est inférieur à celui du bâtiment 1, principalement en raison de sa configuration avec une seule façade. Concernant l'impact de la hauteur des fenêtres, les modèles présentant une hauteur de rebord de fenêtre de 3 mètres affichent généralement des pourcentages légèrement plus élevés d'éclairage du jour utile par rapport à ceux avec des hauteurs de 2 ou 1 mètre. Cette observation suggère qu'une plus grande distance entre le bas de la fenêtre et le sol extérieur favorise une meilleure pénétration de la lumière du jour à l'intérieur du bâtiment, améliorant ainsi le confort visuel. En ce qui concerne le ratio de Raouzna, une observation se dégage lorsqu'on compare les modèles avec différents ratios. Les ratios plus élevés (10% et 9%) sont associés à des pourcentages légèrement supérieurs d'éclairage du jour utile par rapport aux ratios plus bas (8% et 7%). Cette observation suggère qu'une plus grande ouverture horizontale dans le toit, par rapport à la surface totale du toit, favorise une meilleure pénétration de la lumière du jour, ce qui conduit à un meilleur confort visuel. Dans l'ensemble, les résultats indiquent que des hauteurs de fenêtres et des ratios fenêtre/mur plus élevés, ainsi qu'un ratio de Raouzna plus important, ont tendance à avoir un impact positif sur le pourcentage d'éclairage du jour utile dans le bâtiment 2.

Tableau 23 : Pourcentage d'éclairage du Jour Utile (%) pour les différents techniques- bâtiment n°2

bâtiment n°2			
Ratio Fenêtre sur Mur (%)	Hauteur du Rebord (m)	Ratio Raouzna (%)	Pourcentage Éclairage du Jour Utile (%)
20	3	10	64.63
20	3	9	64.51
20	2	10	64.34
20	3	8	64.20
20	2	9	64.16
20	3	7	63.99
20	1	10	63.91

20	2	8	63.83
20	1	9	63.72
20	2	7	63.61

6.7.3.3 Résultats du confort visuel - bâtiment n°3

Les Figure 124 présentent les résultats d'une simulation portant sur l'éclairage utile en lumière du jour dans le bâtiment n°3. Elle montre les résultats d'éclairage utile en lumière du jour pour les 432 modèles des habitations étudiés. Les 10 modèles les plus performants sont spécifiquement mis en évidence et représentés par des points de couleur rouge. Ces 10 modèles ont été identifiés comme étant ceux qui offrent les meilleurs niveaux d'éclairage utile en lumière du jour dans le bâtiment n°2. La Figure 125 se focalise exclusivement sur les résultats d'éclairage des 10 modèles les plus performants du bâtiment n°3.

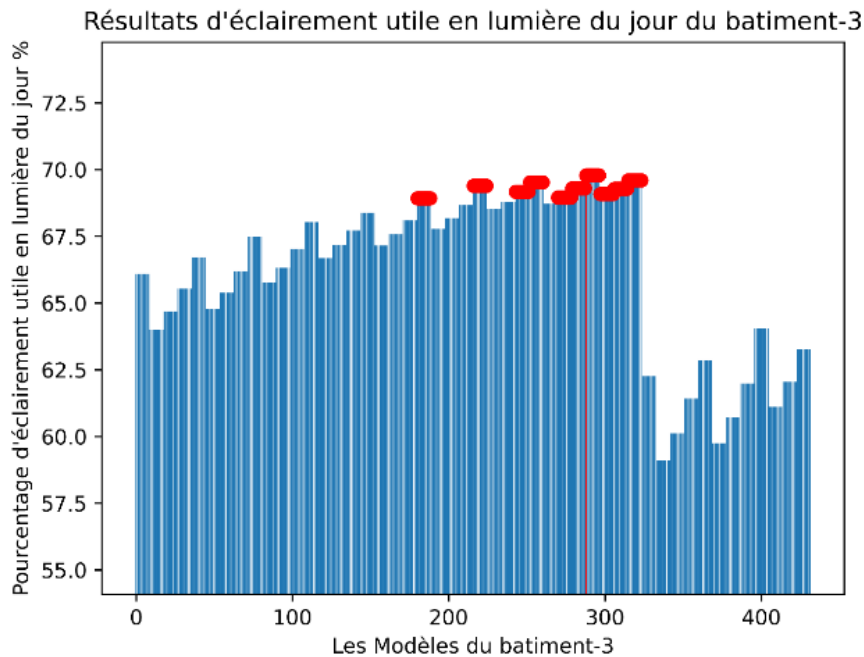


Figure 124: résultats d'éclairage utile en lumière du jour bâtiment n°3

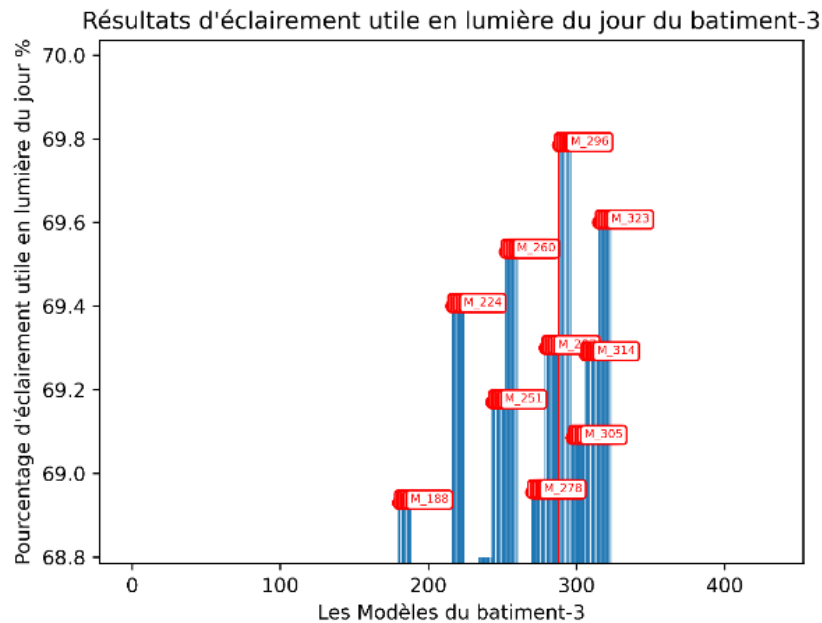


Figure 125 :résultats d'éclairage des modèles les plus performant bâtiment n°3

Le Tableau 24 présente les résultats d'une étude menée sur le bâtiment n°3, examinant les variations du pourcentage d'éclairage utile en lumière du jour en fonction de différents paramètres tels que le ratio fenêtre sur mur, la hauteur du rebord et le ratio Raouzna. Les résultats obtenus pour le bâtiment n°3 sont très proches de ceux du bâtiment n°1, ce qui permet de fournir une analyse comparative entre les deux bâtiments.

En ce qui concerne le ratio fenêtre sur mur, on constate que les deux bâtiments présentent des modèles avec un ratio de 20% qui offrent les pourcentages d'éclairage du jour utile les plus élevés. Cependant, dans le bâtiment n°3, un modèle avec un ratio de 15% est également observé, ce qui peut s'expliquer par certaines spécificités du design ou de l'orientation du bâtiment. En ce qui concerne la hauteur du rebord de fenêtre, les deux bâtiments montrent des tendances similaires. Les modèles avec une hauteur de 3 mètres présentent généralement des pourcentages légèrement plus élevés d'éclairage du jour utile par rapport à ceux avec des hauteurs de 2 ou 1 mètre.

Globalement, les deux bâtiments présentent des schémas similaires en termes de combinaison de paramètres conduisant à des pourcentages élevés d'éclairage du jour utile.

Tableau 24 : Pourcentage d'éclairage du Jour Utile (%) pour les différents techniques-bâtiment n°3

bâtiment n° 3			
Ratio Fenêtre sur Mur (%)	Hauteur du Rebord (m)	Ratio Raouzna (%)	Pourcentage Éclairage du Jour Utile (%)
20	3	10	69.78
20	3	9	69.6
20	1	10	69.4
20	2	9	69.3
20	3	8	69.28
20	1	9	69.17
20	2	8	68.95
20	3	7	69.08
20	2	10	69.53
15	3	10	68.93

6.7.4 Discussion des résultats de confort visuelle

La simulation de 432 modèles comparant les trois habitations individuelles hypothétiques a révélé des observations significatives. Il est intéressant de noter que les trois bâtiments présentent des schémas similaires en termes de combinaison de paramètres pour optimiser l'éclairage du jour utile. Un ratio fenêtre sur mur de 20% et un ratio de Raouzna de 10% semblent être des configurations efficaces pour favoriser un éclairage naturel optimal. De plus, une hauteur de rebord de fenêtre de 3 mètres s'avère bénéfique pour améliorer l'éclairage du jour utile dans chacun des trois bâtiments.

Par ailleurs, il est pertinent de souligner que l'ajout d'une façade avec des fenêtres supplémentaires peut accroître de 5% la surface du plancher bénéficiant d'un confort visuel adéquat. Dans le cas spécifique d'un bâtiment doté de deux façades, l'une orientée vers le sud et l'autre vers l'est, il est possible de réduire le ratio fenêtre sur mur tout en maintenant des ratios de Raouzna et une hauteur de fenêtre maximale. Cette configuration particulière permet d'obtenir des résultats satisfaisants en termes de confort visuel.

Cependant, il est essentiel de noter que l'optimisation du confort visuel en maximisant les ratios fenêtre sur mur et Raouzna peut entraîner des compromis en termes de confort thermique. Ainsi,

il est nécessaire de réaliser une évaluation conjointe du confort thermique et visuel pour une analyse complète. Une corrélation entre ces deux aspects a été réalisée dans une section ultérieure afin de permettre une comparaison approfondie des modèles.

6.8 Résultats de la corrélation entre confort thermique et visuel

Dans cette section, une corrélation entre le confort thermique et visuel a été réalisée afin de déterminer les modèles les plus performants en termes de confort global. Il convient de noter qu'une unification des unités a été effectuée pour faciliter la comparaison entre les paramètres. Les heures de confort ont été converties en pourcentage annuel de confort, en calculant le nombre d'heures de confort par rapport au nombre total d'heures annuelles. Cette approche permet d'obtenir une comparaison plus claire et significative à travers les graphiques.

Les graphiques présentent les données sur le pourcentage d'éclairage utile du jour (axe X) et le pourcentage d'heures de confort (axe Y) pour les trois bâtiments. Les modèles de confort équilibré sont représentés par des cercles rouges dans les graphiques, tandis que dans les tableaux, ils sont mis en évidence par une ligne rouge. Les modèles offrant le plus haut niveau de confort visuel sont représentés par des cercles jaunes et sont soulignés en jaune dans les tableaux. De même, les modèles offrant le plus haut niveau de confort thermique sont représentés par des cercles verts et sont également soulignés en vert dans les tableaux. Ces représentations visuelles permettent une compréhension claire des performances des différents modèles en termes de confort visuel et thermique, mettant en évidence les modèles équilibrés ainsi que ceux qui se démarquent dans chaque catégorie.

Dans le cadre de cette étude, l'identification des configurations optimales en termes de confort thermique, de confort visuel ou d'un équilibre entre les deux a été réalisée. Le choix du modèle de confort équilibré s'est basé sur les points qui se rapprochent le plus des coordonnées idéales de (100% de confort thermique, 100% de confort visuel. En se rapprochant de ces coordonnées idéales, les modèles sélectionnés peuvent fournir un niveau élevé de satisfaction en termes de confort thermique, de confort visuel, voire les deux aspects simultanément. Ainsi, les décisions relatives à la conception et à l'optimisation peuvent être guidées de manière à atteindre les objectifs spécifiques de confort dans les bâtiments étudiés.

6.8.1 Résultats du Bâtiment 1

La Figure 126 et le Tableau 25 présentent les trois meilleures configurations architecturales pour le bâtiment n°1, basées sur les stratégies vernaculaires des Ziban, en termes de confort thermique et visuel.

La première configuration, représentée en rouge, se distingue par une hauteur de l'appui de la fenêtre de 3 mètres, un ratio fenêtre/mur de 20%, un ratio de Raouzna de 7%, et un mur de type W8. Ce modèle présente un équilibre entre le confort thermique et visuel, avec un confort thermique de 20,84% et un éclairage diurne utile de 69,14%. Il se caractérise par un ratio élevé de fenêtre/mur et une faible valeur de Raouzna, ainsi qu'un mur massif sans isolation.

La deuxième configuration met en évidence un modèle avec un confort visuel élevé. Elle se caractérise par des ratios de fenêtre/mur et de Raouzna plus élevés. Dans cette configuration, le confort thermique atteint 20,0%, tandis que l'éclairage diurne utile dépasse les 69,77%.

La troisième configuration diffère des deux précédentes par un ratio fenêtre/mur de seulement 5%. Les autres paramètres sont identiques à la première configuration, avec un ratio de Raouzna minimal. Cette configuration offre le meilleur confort thermique avec un score de 21,44% et un éclairage diurne utile de 61,18%.

L'analyse des résultats met en évidence que la technique du mur massif sans isolation, inspirée de la stratégie de l'inertie thermique, associée à un faible ratio de Raouzna, est une option validée par les modèles offrant un confort thermique élevé ainsi qu'un confort thermique et visuel équilibré. En revanche, la réduction du ratio fenêtre/mur peut augmenter le pourcentage d'heures de confort de 0,6%, soit plus de 50 heures, et réduire la surface d'espace avec un confort visuel de 9%. D'autre part, l'optimisation du confort visuel réduit le confort thermique de plus de 1,44%, soit plus de 120 heures, avec une augmentation de la surface d'espace avec un confort visuel de seulement 9,5%. Il est également à noter qu'une augmentation de 3% de la surface de Raouzna peut réduire le pourcentage d'heures de confort de plus de 73 heures.

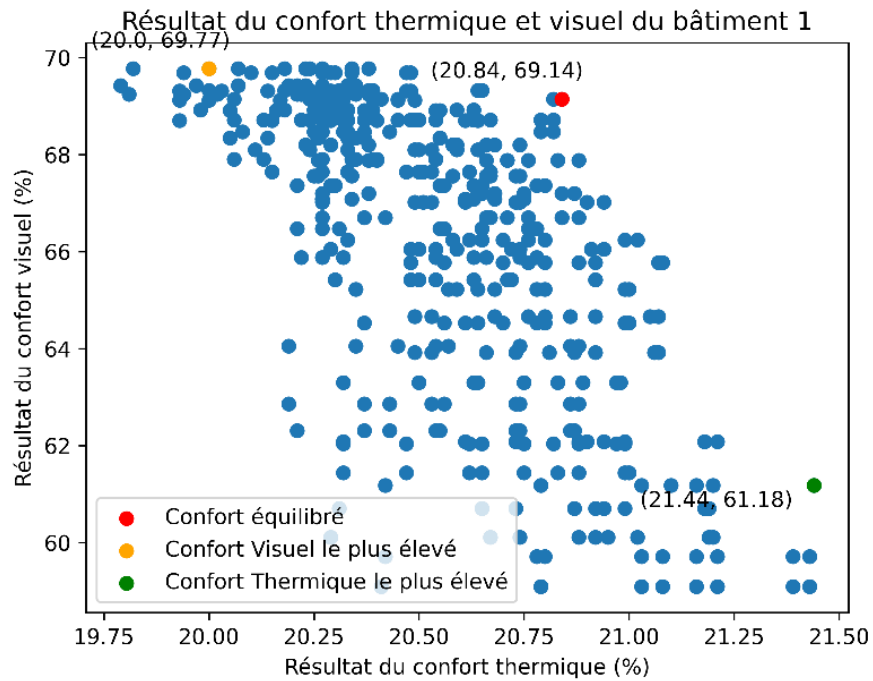


Figure 126: Résultats du confort thermique et visuel du bâtiment n°1

Tableau 25: résultats des trois modèles les plus performants du bâtiment n°1

Hauteur de l'appui de la fenêtre	Ratio fenêtre/mur	Ratio de Raouzna	Mur	Confort thermique (%)	Éclairage diurne utile (%)
3 m	20 %	7 %	W8	20,84	69,14
3 m	20 %	10 %	W1	20,0	69,77
3 m	5 %	7 %	W8	21,44	61,18

6.8.2 Résultats du Bâtiment 2

La Figure 127 et le Tableau 26 présentent les trois configurations architecturales les plus performantes pour le bâtiment n°2, fondées sur les stratégies vernaculaires des Ziban, en termes de confort thermique et visuel. Il est remarquable de constater que ces trois modèles privilégient davantage le confort thermique et présentent un niveau de confort visuel inférieur par rapport au bâtiment n°1. Cette observation peut s'expliquer par la différence du nombre de façades avec des ouvertures. En effet, le premier bâtiment dispose d'une façade supplémentaire orientée vers l'ouest, ce qui contribue à réduire le confort thermique et à augmenter le confort visuel.

La deuxième configuration met en évidence les paramètres qui favorisent un confort visuel élevé dans le modèle. Elle présente une surface de Raouzna plus importante que la première configuration de confort thermique et visuel équilibré, mais proches aux résultats du bâtiment 1.

Quant à la troisième configuration, elle se distingue par un confort thermique élevé. Il a été remarqué une augmentation du ratio fenêtre/mur par rapport à la configuration de confort thermique élevé du bâtiment 1, ainsi que l'ajout d'un isolant entre les murs W8 et W9. On observe également une variation réduite entre les trois modèles en termes de confort thermique et visuel par rapport aux trois modèles du bâtiment n°1.

Ces résultats mettent en évidence que les techniques issues des stratégies vernaculaires des Ziban, visant à optimiser à la fois le confort thermique et visuel, peuvent être appliquées à différentes configurations d'habitations et peuvent donner des résultats approximatifs, avec certaines variations, comme observé dans les résultats des deux bâtiments précédents. Il est également remarqué que la réduction du nombre de fenêtres peut augmenter les heures de confort thermique tout en diminuant le confort visuel. Cependant, cette réduction des fenêtres peut engendrer des problèmes de confort thermique en hiver, qui peuvent être résolus en augmentant les ratios de fenêtres. Il faut noter que cette observation doit être approuvée par d'autres résultats qui vont être présentés dans la chapitre suivant.

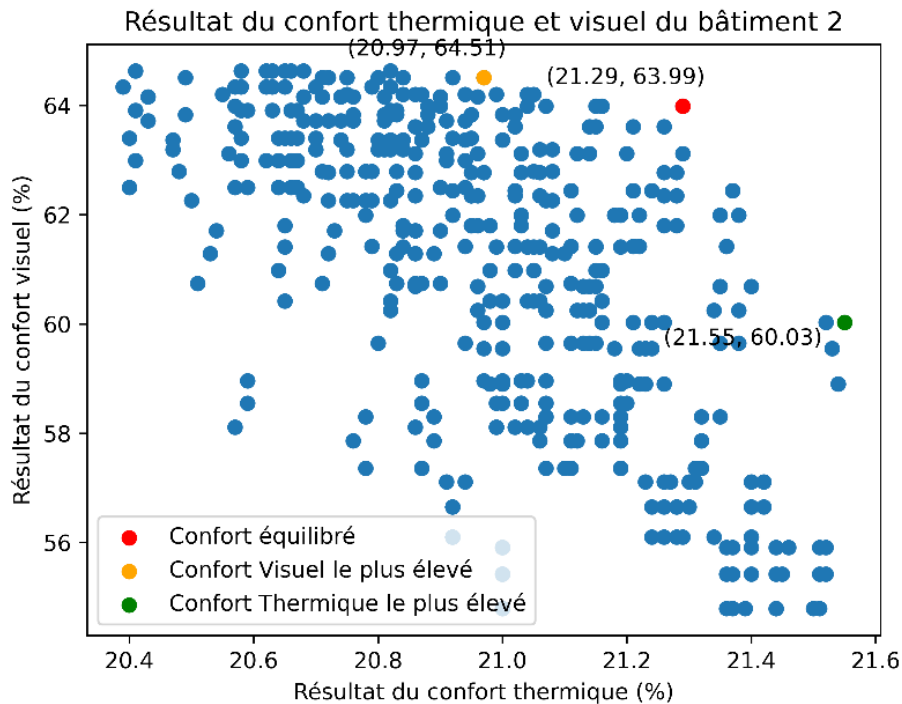


Figure 127: Résultats du confort thermique et visuel du bâtiment n°2

Tableau 26: Résultats des trois modèles les plus performants du bâtiment n°2

Hauteur de l'appui de la fenêtre	Ratio fenêtre/mur	Ratio de Raouzna	Mur	Confort thermique (%)	Éclairage diurne utile (%)
3 m	20 %	7 %	W8	21,29	63,99
3 m	20 %	9 %	W8	20,97	64,51
3 m	10 %	7 %	W9	21,55	60,03

6.8.3 Résultats du Bâtiment 3

La Figure 127 et le Tableau 22 présentent les trois configurations architecturales les plus performantes pour le bâtiment n°3, fondées sur les stratégies vernaculaires des Ziban, en termes de confort thermique et visuel.

La comparaison des tableaux présentant les résultats de simulation paramétrique pour les bâtiments 1 et 3 met en évidence certaines observations. Les résultats de configurations architecturales choisies pour ces deux bâtiments présentent des similitudes en termes de ratios fenêtre/mur, ratios de Raouzna et hauteur de l'appui de la fenêtre. Cependant, il existe une différence minimale au

niveau des résultats du confort thermique et visuel entre ces deux bâtiments, ce qui peut être attribué à la position et à l'orientation de la deuxième façade.

Le bâtiment 1 est doté d'une deuxième façade orientée vers l'est, tandis que le bâtiment 3 possède une deuxième façade orientée vers l'ouest. Cette différence d'orientation de la deuxième façade peut avoir un impact sur les heures de confort, car la façade orientée vers l'ouest peut entraîner des effets de surchauffe et réduire le confort thermique. Il est également possible que la différence a été accentué par le type de mur utilisé dans ces deux bâtiments contribue aux variations observées.

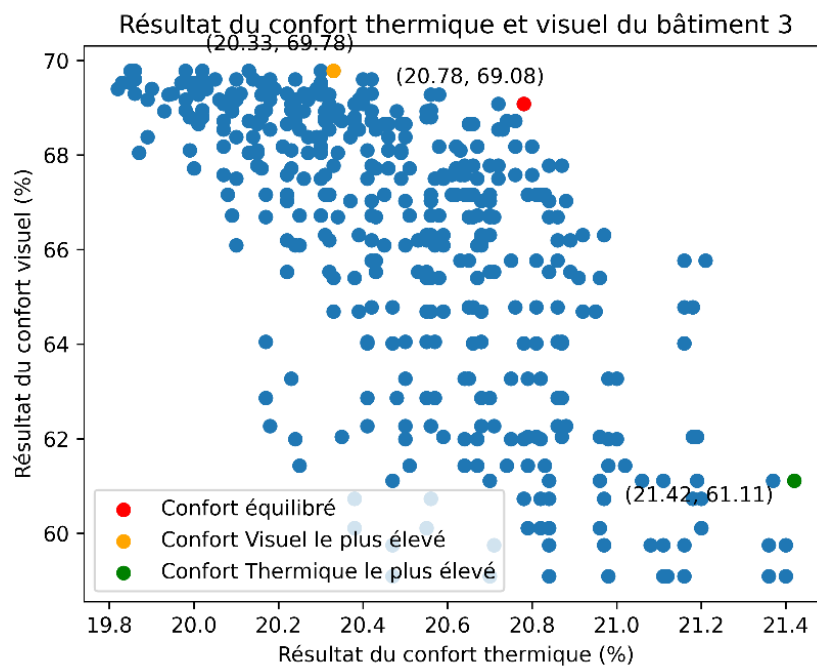


Figure 128: Résultats du confort thermique et visuel du bâtiment n°3

Tableau 2: Résultats des trois modèles les plus performants du bâtiment n°3

Hauteur de l'appui de la fenêtre	Ratio fenêtre/mur	Ratio de Raouzna	Mur	Confort thermique (%)	Éclairage diurne utile (%)
3 m	20%	7%	W9	20,78	69,08
3 m	20%	10%	W8	20,33	69,78
3 m	5%	7%	W8	21,42	61,11

6.8.4 Discussion des résultats de corrélation

Suite à la corrélation des résultats de confort thermique et visuel des 432 modèles des trois bâtiments étudiés, il est possible de tirer plusieurs conclusions. Les configurations architecturales basées sur les stratégies vernaculaires des Ziban ont un impact significatif sur les heures de confort thermique et le pourcentage des heures de confort visuel. Il a été observé que le ratio de Raouzna avec un minimum de 7% présente de meilleures performances que d'autres ratios, offrant un bon confort thermique sans compromettre le confort visuel. Cependant, une réduction du ratio fenêtre/mur s'avère également bénéfique pour maximiser le confort thermique, mais au détriment du confort visuel. Par ailleurs, la hauteur de l'appui des fenêtres au niveau du rez-de-chaussée s'est révélée être une stratégie efficace pour optimiser à la fois le confort thermique et visuel. Enfin, l'utilisation de murs massifs, qu'ils soient isolés ou non, se révèle toujours être une stratégie efficace pour réduire les heures d'inconfort annuelles.

6.9 Conclusion

Le présent chapitre avait pour objectif d'optimiser et d'intégrer les stratégies adaptatives des Ziban dans la conception architecturale contemporaine. Ces stratégies sont issues des techniques vernaculaires de la région des Ziban. Cependant, il a été constaté dans le chapitre précédent que ces techniques présentent à la fois des avantages et des limites. Afin d'atténuer les faiblesses de ces techniques tout en préservant leurs points forts, une étude paramétrique a été réalisée à l'aide d'une expérimentation simulée. L'objectif étant d'optimiser les performances thermiques et visuelles des variantes générées à partir d'un modèle hypothétique de référence.

Le processus a débuté par la création du modèle hypothétique de base prenant en compte différents aspects de l'architecture résidentielle contemporaine, tels que le type d'habitation le plus courant, la forme d'îlot la plus fréquente, ainsi que la surface et le ratio de la parcelle les plus répandus. Ensuite, l'attention s'est portée sur le développement de variantes issues de ce modèle hypothétique, en mettant l'accent sur les habitations individuelles les plus fréquentes. Afin de réaliser l'optimisation paramétrique, différents paramètres inspirés des stratégies architecturales de la région des Ziban ont été sélectionnés, notamment, les dimensions des ouvertures (rapport fenêtre/mur WWR), les hauteurs des appuis des ouvertures du rez-de-chaussée, la dimension de la Raouzna, ainsi que les matériaux utilisés pour les murs. Une exploration de diverses variantes de

murs a également été réalisée, en portant une attention particulière au béton de terre compressée et stabilisée (BTCS) et à ses propriétés thermo-physiques.

Les résultats de l'optimisation paramétrique ont révélé l'impact notable des paramètres testés sur le modèle hypothétique contemporain en termes de performances thermique et visuelle. Cela souligne l'importance de l'optimisation des stratégies adaptatives des Ziban dans la conception architecturale pour améliorer le potentiel d'adaptabilité climatique des bâtiments contemporains et assurer leur qualité environnementale.

En conclusion, les résultats de cette étude indiquent que l'ajustement du ratio d'ouvertures, l'augmentation de la hauteur d'allège des fenêtres du rez-de-chaussée et la réduction du ratio de la raouzna peuvent induire un impact significatif sur le confort thermique et visuel. Cependant, il est important de confirmer ces conclusions par l'application de ces directives sur un véritable bâtiment contemporain individuel, ce qui sera abordé dans le chapitre suivant.

Chapitre 7.

APPLICATION DES

STRATEGIES

ADAPTATIVES DES ZIBAN

7.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer l'efficacité thermique et visuelle de l'intégration des techniques issues des stratégies vernaculaires de la région des Ziban, telles qu'optimisées dans le chapitre précédent, et ce, en les appliquant sur une habitation contemporaine réelle. Pour ce faire, une habitation individuelle contemporaine a été sélectionnée et un modèle numérique a été développé afin d'évaluer l'impact de ces stratégies sur le comportement thermique et visuel de l'habitation. Un processus rigoureux de calibration et de validation du modèle numérique a été mis en place pour garantir sa fiabilité et sa représentativité par rapport à l'habitation réelle. Cette étape préliminaire a nécessité la prise de mesures in situ à l'aide d'un enregistreur de données thermiques installé dans l'habitation. Parallèlement, un modèle énergétique a été développé en utilisant des paramètres numériques représentant la composition de l'enveloppe de l'habitation. Le processus de calibration a impliqué la comparaison des mesures thermiques in situ avec les résultats des simulations à travers la création de différents scénarios, en variant les propriétés physiques des matériaux.

A ce titre, la comparaison entre les résultats de la simulation et les mesures réelles a été réalisée en utilisant des méthodes de validation statistique recommandées par l'organisation ASHRAE, telles que le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CVRMSE) et l'erreur moyenne normalisée (NMBE). Le modèle qui reproduit le mieux le comportement énergétique de l'habitation réelle a été sélectionné, et les trois meilleures configurations issues de l'optimisation paramétrique présentée précédemment ont été appliquées à ce modèle. Ainsi, cette approche permet d'évaluer de manière précise l'efficacité des stratégies vernaculaires dans le contexte d'une habitation contemporaine réelle.

7.2 Sélection de l'habitation cas d'étude

Dans le but de tester l'intégration et le résultat de l'optimisation des stratégies vernaculaires efficaces de la région des Ziban, qui ont été précédemment discutées, une habitation résidentielle existante a été choisie comme indiqué dans les figures Figure 129 Figure 130. Cette habitation sélectionnée a une superficie de terrain comprise entre 200 et 250 m² conformément aux surfaces d'habitation les plus répandues de la ville de Biskra tel que signalé dans la partie 6.2.2.1 du chapitre

précédent, cette habitation est composée d'un rez-de-chaussée et d'un étage supérieur conformément aux habitations les plus courantes d'après le résultat de l'analyse de (LATRECHE, 2019).

Il s'agit d'une habitation individuelle typique, où chaque étage est conçu comme un appartement distinct. Chaque étage comprend des espaces de vie et des espaces de service qui présentent des caractéristiques similaires c'est-à-dire des étages presque courants.

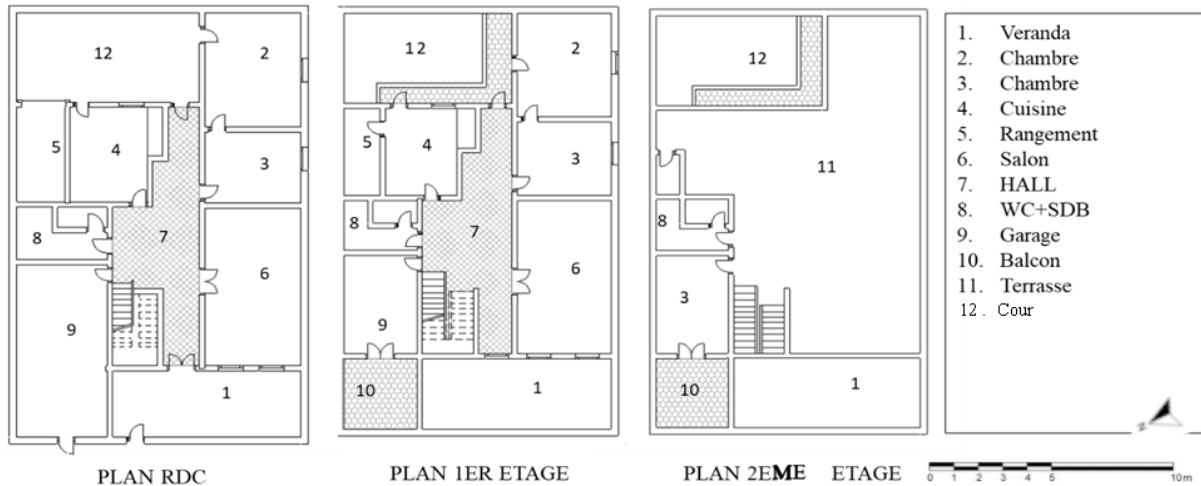


Figure 129: Aménagement spatial de l'habitation sélectionnée.

La façade extérieure de l'habitation se caractérise par sa simplicité, avec une homogénéité dans le choix des éléments de décoration tels que le béton ou le plâtre Figure 130. La finition est réalisée à l'aide de ciment et de peinture de couleur foncée, ce qui contribue à une apparence cohérente.



Figure 130: Illustration de la façade de l'habitation sélectionnée

7.3 Calibration et Validation du Modèle Numérique

Afin de tester l'efficacité de l'optimisation des techniques vernaculaires de la région des Ziban dans un modèle numérique reproduisant au mieux le comportement énergétique de l'habitation existante, un protocole rigoureux de calibration et de validation du modèle numérique a été mis en place. Ce protocole comprend plusieurs étapes, notamment la collecte de mesures thermiques sur site, la modélisation numérique de l'habitation résidentielle, la calibration du modèle numérique et la validation de ce dernier.

Vu que l'habitation comporte plus de 20 espaces, afin de faciliter la lecture et la comparaison des résultats des mesures et des simulations, une appellation spécifique a été attribuée à chaque espace comme il est indiqué dans la Figure 131. La dénomination des espaces est basée sur leur position par rapport aux étages (rez-de-chaussée, 1er étage et 2ème étage) et sur leur emplacement vertical. Par exemple, une chambre située au 1er étage sera désignée par "CH1-1er", tandis que la chambre située en dessus de cette chambre située au 2ème étage et sera désignée par "CH3-2ème". Cette appellation permet une identification rapide des espaces superposés et facilite ainsi la lecture et la comparaison des résultats.

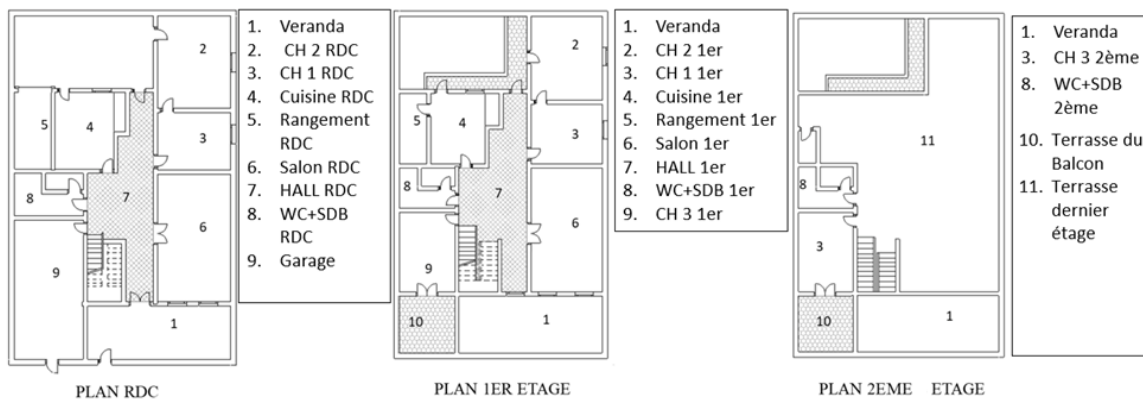


Figure 131: : Désignation des espaces pour faciliter la lecture

Les sections suivantes décrivent en détail le processus suivi pour chacune de ces étapes.

7.3.1 Protocole de mesures

Les mesures de température jouent un rôle essentiel dans la calibration et la validation des modèles énergétiques. En utilisant des capteurs de température placés à des emplacements stratégiques à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, on peut collecter des données en temps réel sur les variations

de température. Ces mesures permettent de comparer les prédictions du modèle avec les observations réelles, ce qui permet d'évaluer la précision et la fiabilité du modèle.

7.3.1.1 Technique et outils de mesures

Afin de collecter les données de température réelle dans l'habitation et le comparer ultérieurement avec les données de simulation afin d'évaluer la fiabilité du modèle.

Une campagne de mesure a été faite 7 jours entre le 28/10/2022 à 10 :54 et le 05/11/2022 à 14 :55 les températures et humidité ont été prise chaque minute. L'appareil qui a été utilisée pour la prise de mesures est un enregistreur de donnée (Weather station -data logger) les informations de l'outil sont présentées dans le tableau si dessous, également la Figure 132 est une photo qui illustre le l'outil.

Tableau 27: Spécifications de l'outil utilisée pour la prise de mesures

	Numéro de modèle	Résolution	Précision
Spécifications	A6-WS-HP3001-8MZ	0,1 °C	+/- 1 °C



Figure 132 : Illustration du data logger utilisée dans la prise de mesures

7.3.1.2 Point de mesures

Compte tenu de l'utilisation d'un outil de mesure comprenant cinq capteurs de température Figure 132, cinq espaces ont été soigneusement choisis pour les mesures Figure 133, en tenant compte de leurs variations d'exposition solaire, de position et d'orientation. Cette sélection a été effectuée dans le but de diversifier les résultats des mesures thermiques et d'obtenir une perspective plus complète des variations de température à travers le bâtiment.

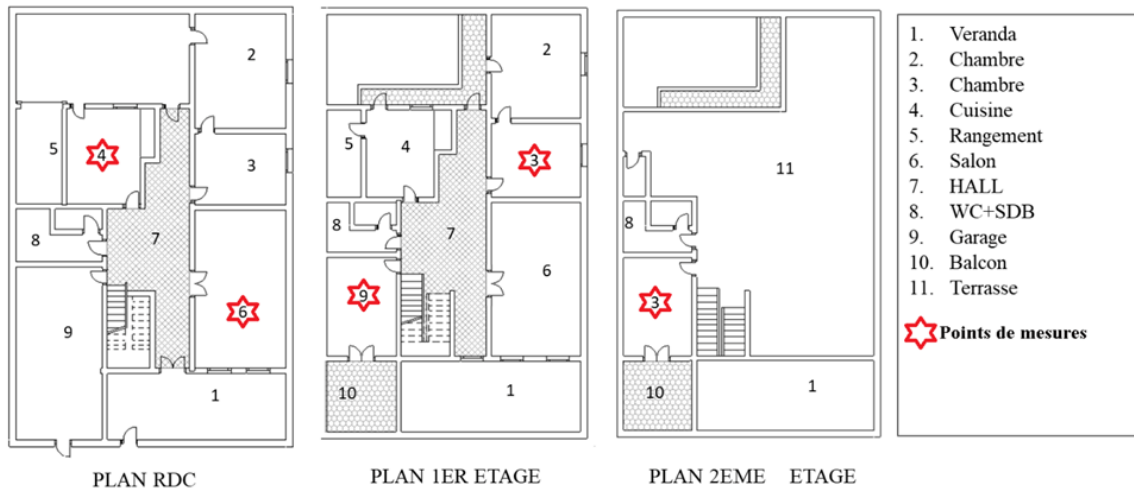


Figure 133 : Les points de mesures dans l'habitation

7.3.1.3 Résultats des mesures de température

La Figure 134 illustre les données de température, mesurées à intervalles d'une minute, recueillies lors de la semaine d'observation dans l'habitation individuelle. Les résultats indiquent une diminution progressive des températures au fur et à mesure que la période de mesure avance vers les mois hivernaux.

Des différences de fluctuations de température sont observées entre les différents espaces, répartis en deux groupes distincts. Le premier groupe comprend la chambre du dernier étage (CH3-2ème) et la chambre du premier étage (CH1-1er), tandis que le deuxième groupe comprend la cuisine du rez-de-chaussée, le salon du rez-de-chaussée et la chambre du premier étage (CH3-1er). Les grandes fluctuations observées dans le premier groupe peuvent s'expliquer par leur exposition directe aux conditions extérieures, notamment au niveau des plafonds. En revanche, les autres espaces bénéficient d'un espace situé en dessous, ce qui les protège des variations extrêmes.

De plus, il est remarqué que les espaces dotés de deux façades, tels que le salon, présentent des fluctuations plus importantes que les espaces dotés d'une seule façade, comme la cuisine ou la chambre du premier étage (CH3-1er).

En conclusion, ces résultats indiquent que plus un espace est exposé à l'environnement extérieur, plus ses fluctuations de température sont importantes.

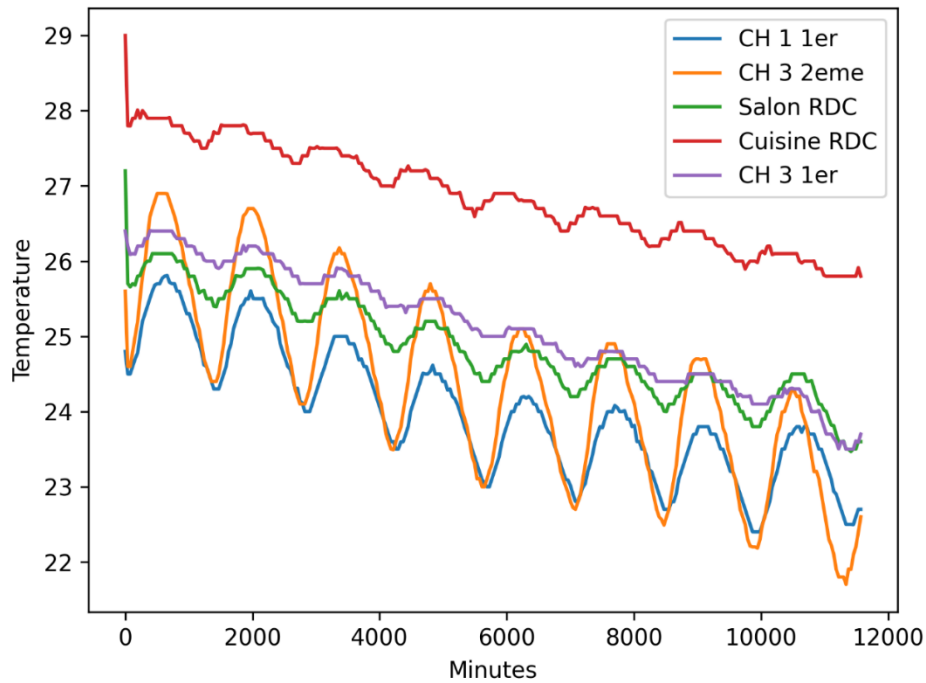


Figure 134: Les données de température prises dans l'habitation à des intervalles d'une minute.

7.3.1.4 Interpolation et traitement des mesures

Étant donné que les résultats de simulation sont généralement générés chaque heure et que les données de mesure sont prises chaque minute, une interpolation a été effectuée pour obtenir des mesures de température horaires. Cette interpolation a consisté à calculer la moyenne des données prises toutes les 60 minutes comme il est observable dans la Figure 135. Les mesures de température horaires ainsi obtenues ont été utilisées pour la comparaison avec les résultats de

simulation numérique afin d'évaluer le comportement du modèle numérique de l'habitation par rapport au comportement réel de l'habitation en question.

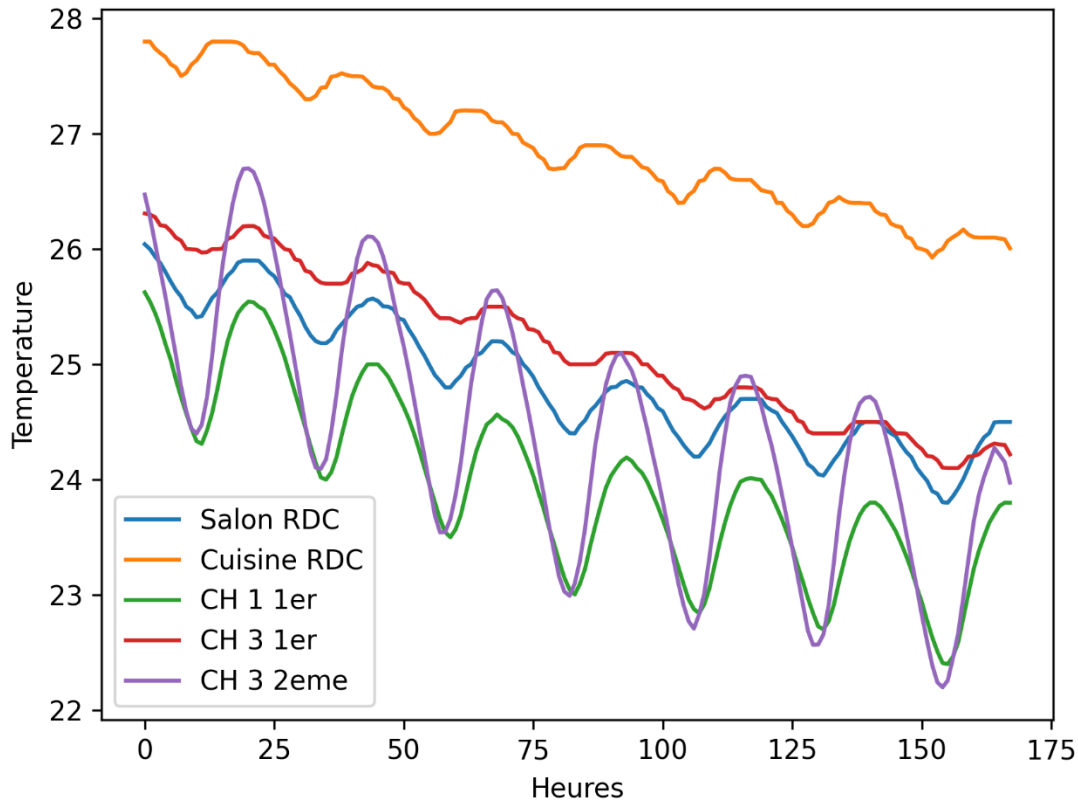


Figure 135 : Résultats de l'interpolation des données de mesures

7.3.2 Protocole de Calibration

Afin de créer un modèle numérique dont le comportement thermique est similaire à celui de l'habitation individuelle sélectionnée comme cas d'étude, un processus de calibration rigoureux a été entrepris. Ce processus comprend plusieurs étapes détaillées. Tout d'abord, une modélisation détaillée a été réalisée en utilisant les informations obtenues lors de l'investigation sur l'habitation réelle. Ensuite, des données météorologiques précises de la région de Biskra, collectées pendant la même période de mesure, ont été utilisées pour générer un fichier météorologique spécifique à l'environnement immédiat de l'habitation. Par la suite, 1794 scénarios de différents paramètres tels que les caractéristiques du mur, de la toiture, les infiltrations intérieures et extérieures ont été simulés au cours de quatre phases de calibration. Enfin, une comparaison des différents modèles a

été réalisée en utilisant des indices statistiques largement utilisés. La section suivante présente en détail le processus suivi pour sélectionner les modèles les plus proches du comportement thermique de l'habitation individuelle

7.3.2.1 Description du Modèle Énergétique

Le modèle énergétique du bâtiment a été créé à l'aide du logiciel de conception assistée par ordinateur Rhino 3D et intégré avec des données thermos physiques à l'aide de Lady bug-Tools. Le fichier IDF généré par Lady bug-Tools a été modifié à l'aide de programmation Python pour créer différents scénarios. Les simulations ont été exécutées sur des machines puissantes utilisant les services Google Cloud Platform (GCP) et Azure afin d'optimiser le temps de simulation.

Le modèle a pris en compte la géométrie détaillée du bâtiment, les caractéristiques architecturales, les caractéristiques urbaines et les propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Les charges internes et les systèmes actifs n'ont pas été inclus car le bâtiment était inoccupé pendant la période de mesure. Les paramètres de simulation ont pris en compte les schémas de circulation de l'air réalistes à l'aide d'un modèle de réseau de circulation d'air (AFN).

Des données météorologiques réelles, obtenues à partir de diverses sources telles que le Service de changement climatique Copernicus (C3S) et le NASA POWER Data Access Viewer, ont été utilisées pour simuler précisément les performances du bâtiment. De plus, un outil générateur de fichiers météorologiques urbains a été utilisé pour incorporer les effets d'îlot de chaleur urbain dans les simulations, améliorant ainsi la précision des prévisions de performance énergétique.

7.3.2.2 Configuration Initiale du Modèle

La configuration initiale du modèle est considérée comme une étape essentielle dans le processus de calibration et de validation du modèle énergétique du bâtiment. Dans cette section, l'attention est portée sur la façon dont le modèle est configuré afin de refléter de manière précise les caractéristiques physiques et les paramètres spécifiques du bâtiment étudié. Cela englobe la définition des propriétés thermiques des matériaux de construction, la caractérisation géométrique du bâtiment ainsi que la spécification des systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation. La configuration initiale du modèle revêt une importance, car elle permet d'établir des conditions de départ précises et réalistes pour les simulations ultérieures, ce qui facilite une calibration et une validation plus fiables du modèle énergétique.

7.3.2.2.1 Géométrie du bâtiment et de ses caractéristiques architecturales et urbaines

Afin de créer un modèle énergétique capable de reproduire fidèlement le comportement énergétique réel de l'habitation, toutes les composantes architecturales spécifiques de l'habitation en question ont été prises en compte. Une modélisation détaillée des formes et dimensions de tous les éléments architecturaux de l'habitation a été effectuée, basée sur une investigation sur site. De plus, les caractéristiques de l'environnement urbain ont également été intégrées pour permettre la simulation des variations spécifiques de l'irradiation solaire sur le bâtiment.

Le modèle numérique présenté indiqué dans la Figure 136 ci-dessous a été obtenu en utilisant le module Lady bug-Tools avec l'extension Grasshoper3D sur la plateforme du logiciel de modélisation Rhino 3D.

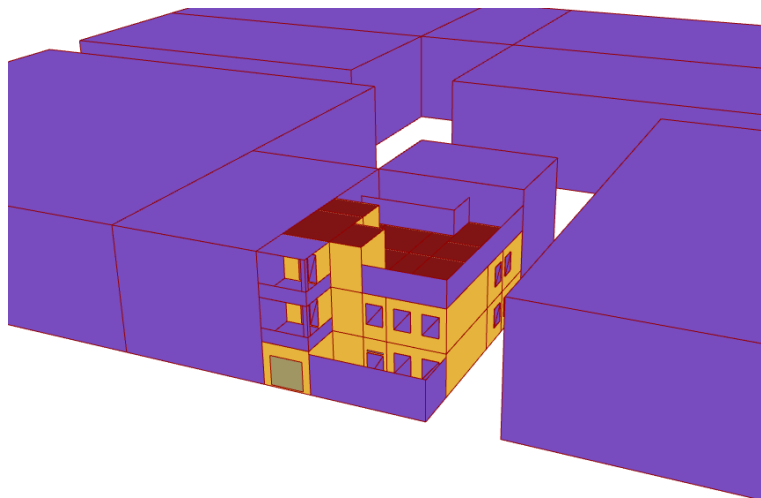


Figure 136 : Modèle numérique de l'habitation individuelle et son environnement immédiat

7.3.2.2.2 Propriétés de l'enveloppe du bâtiment

Les propriétés thermiques de l'enveloppe ont été déterminées en utilisant des données préliminaires provenant de l'enquête sur site et du DTR C3-2 (Règlement thermique des bâtiments d'habitation en Algérie). Le tableau ci-dessous illustre les différentes propriétés thermiques de l'enveloppe.

Tableau 28 : propriétés thermiques de l'enveloppe du modèle numérique

	Matériau	Épaisseur (m)	Conductivité (W/m-K)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg-K)
Mur	Enduit ciment	0.02	1.4	2200.0	1080.0
	Brique pleine (Béton)	0.15	1.2	2115.0	1080.0
	Enduit en plâtre 1	0.02	0.35	875.0	936.0
Toit	Étanchéité	0,03	0,04	200,0	670,0
	Forme en pente	0,04	1,15	1800,0	1080,0
	Polystyrène extrudé	0,05	0,045	140,0	1500,0
	Corps creux dalle de compression	0,2	1,45	1450,0	1080,0
	Enduit en plâtre 2	0,015	0,35	1800,0	936,0

7.3.2.3 Charges internes, Systèmes actifs

Étant donné que le bâtiment était inoccupé pendant la période de mesure, aucune charge interne ni aucun système actif (refroidissement, chauffage et ventilation) n'ont été implémentés dans le modèle énergétique du bâtiment

7.3.2.4 Paramètres de simulation

Pour une simulation plus précise des variations de ventilation, une méthode avancée appelée le réseau de circulation d'air (Air flow Network - AFN) a été utilisée, par opposition aux méthodes conventionnelles de calcul de ventilation par zone. L'AFN permet de représenter de manière plus fidèle le flux d'air et le comportement dynamique des fluides dans les bâtiments réels.

L'une des principales caractéristiques de l'AFN est sa capacité à modéliser avec précision l'écoulement de l'air d'une zone à une autre. Il prend en compte les changements de pression induits par des facteurs tels que le vent et les différences de densité de l'air, ce qui permet une simulation plus réaliste de la ventilation et de la distribution de l'air à travers le bâtiment.

7.3.2.5 Données météorologiques

Afin de créer un modèle énergétique reproduisant le comportement réel du bâtiment, il est essentiel que les résultats de la simulation soient en accord avec les mesures réelles. Pour cela, le modèle numérique doit être simulé dans les mêmes conditions météorologiques que celles rencontrées par le bâtiment réel, en prenant en compte des paramètres tels que la température, l'humidité extérieure, etc. Par conséquent, le processus de simulation doit être effectué sur la même période que celle des mesures réelles, afin d'assurer la cohérence entre les résultats du modèle numérique et les données mesurées.

Pour générer les données météorologiques spécifiques à l'environnement immédiat du bâtiment, plusieurs étapes ont été entreprises. Tout d'abord, les données météorologiques ont été recueillies à partir des principales bases de données de recherche météorologique à travers le monde. Ensuite, ces données ont été traitées pour extraire les informations spécifiques nécessaires à la simulation numérique et à la période de mesure spécifique. Enfin, un générateur de données météorologiques urbaines a été utilisé pour créer des données météorologiques plus précises, spécifiques à l'environnement urbain immédiat de l'habitation étudiée.

Cette approche garantit que le modèle numérique soit alimenté en données météorologiques réalistes et précises, reflétant au mieux les conditions météorologiques réelles auxquelles le bâtiment est exposé. Ainsi, le modèle peut fournir des résultats de simulation qui sont cohérents avec les mesures réelles, permettant une évaluation précise des performances thermiques du bâtiment et la validation du modèle par rapport à la réalité.

7.3.2.5.1 Nature et sources des données météorologique

Dans cette étude, le logiciel de simulation utilisé est EnergyPlus, qui utilise un format de fichier de données météorologiques largement connu appelé EPW (EnergyPlus Weather). Le fichier EPW contient des données météorologiques horaires ou typiques pour une localisation spécifique. Ces données incluent des informations telles que la température extérieure, l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent, l'ensoleillement, les précipitations, la pression atmosphérique, ainsi que d'autres variables météorologiques. Etant donné que les données météorologiques utilisées dans la simulation numérique, telles que celles mentionnées dans l'Annexe-A-I, sont nombreuses, plusieurs sources ont été prises en compte afin d'obtenir les données météorologiques les plus précises à utiliser dans la simulation numérique.

- Le Service de changement climatique Copernicus (C3S) combine les observations du système climatique avec les dernières avancées scientifiques pour développer des informations autoritaires et de qualité sur les états passés, actuels et futurs du climat en Europe et dans le monde (Changement Climatique | Copernicus, 2023).
- Le service de surveillance de l'atmosphère Copernicus (CAMS) fournit des séries chronologiques d'irradiations globales, directes et diffuses sur une surface horizontale, ainsi que d'irradiation directe sur un plan normal (DNI) pour les conditions météorologiques réelles et les conditions de ciel dégagé (CAMS Radiation Service, 2023).
- Le Visual Crossing est un outil complet qui permet d'accéder à des données météorologiques historiques et prévisionnelles (Weather Data & Weather API | Visual Crossing, 2023).
- Le NASA POWER Data Access Viewer (DAV) est un outil qui fournit des ensembles de données solaires et météorologiques issus des recherches de la NASA (NASA POWER | Data Access Viewer, 2023).
- Le Climate Explorer de l'Oikolab est un outil qui permet d'accéder aux données météorologiques et climatiques utilisées par les scientifiques du climat et les météorologues. Il offre plus de 80 ans de données horaires avec une couverture mondiale (Climate Explorer, 2023).

7.3.2.5.2 Les données météorologiques réelles (actuel)

À partir des outils mentionnés précédemment, un fichier EPW de l'année en cours a été créé, correspondant aux conditions météorologiques réellement vécues par le bâtiment pendant la période de mesure. L'utilisation de données météorologiques réelles permet au modèle énergétique de mieux refléter les conditions réelles auxquelles le bâtiment est confronté. Cela contribue à améliorer la précision du modèle énergétique et à fournir des prévisions plus fiables des performances énergétiques du bâtiment. La calibration du modèle énergétique à l'aide de données météorologiques réelles permet également de détecter les écarts entre le modèle et les performances réelles du bâtiment, ce qui permet d'apporter des ajustements pour améliorer la précision du modèle.

7.3.2.5.3 Le générateur de fichiers météorologiques urbains

Afin d'améliorer la précision du modèle et de la simulation, un outil de génération de données météorologiques urbaines a été utilisé en complément des données météorologiques actuelles. Ce générateur de fichiers météorologiques urbains calcule les températures de l'air à l'intérieur des environnements urbains à partir de mesures effectuées par une station météorologique située en dehors de la ville. Il peut être utilisé de manière autonome ou intégré à des programmes existants pour prendre en compte l'effet d'îlot de chaleur urbain dans les simulations énergétiques des bâtiments. L'intégration des effets climatiques urbains dans les fichiers météorologiques permet d'améliorer la précision des simulations énergétiques des bâtiments et de fournir des prévisions plus fiables des performances énergétiques du bâtiment.

7.3.2.6 Méthodes statistiques pour la calibration

La calibration dans la modélisation énergétique des bâtiments fait référence au processus d'ajustement des paramètres d'entrée et des hypothèses du modèle afin d'harmoniser les performances thermiques simulées d'un bâtiment avec les mesures thermiques réelles obtenues par surveillance ou mesure. Elle implique d'affiner le modèle pour garantir qu'il reflète avec précision le comportement thermique réel du bâtiment et produise des prévisions fiables des caractéristiques thermiques. La calibration est essentielle pour améliorer la précision et la fiabilité du modèle énergétique, car elle permet d'identifier les divergences et d'apporter des ajustements afin d'améliorer les capacités prédictives du modèle. Le processus de calibration implique généralement une comparaison itérative des résultats simulés avec les mesures thermiques et des ajustements des paramètres du modèle jusqu'à ce qu'un niveau satisfaisant de concordance soit atteint.

La calibration des modèles de simulation énergétique des bâtiments repose sur l'utilisation de méthodes statistiques telles que le CVRMSE (Coefficient de variation de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) et le NMBE (erreur de biais normalisé). Selon les recommandations de l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) énoncées dans la directive 14, un modèle de simulation est considéré comme valide si les valeurs d'erreur moyenne par heure (MBE) se situent dans une fourchette de +/- 10 % et si les valeurs d'erreur quadratique moyennent par heure (RMSE) sont inférieures à +/- 30 %.

Pour ce qui est des indices statistiques :

Le **CVRMSE** représente la précision globale du modèle en termes d'écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées. Il est calculé en prenant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et en le divisant par la moyenne des mesures réelles. Le CVRMSE exprime cette différence relative en pourcentage, ce qui permet de comparer les performances du modèle entre différents cas d'étude. Plus le CVRMSE est faible, plus le modèle est considéré comme précis et en accord avec les mesures réelles.

$$\text{CVRMSE} = \sqrt{[\Sigma ((Y_i - P_i) **2) / N] / (\text{Moyenne_observé}) * 100}$$

Où :

Y_i : Valeur observée

P_i : Valeur prédite

N : Nombre total d'observations

Moyenne_observé : Moyenne des valeurs observées

Le **NMBE**, quant à lui, évalue le biais moyen du modèle par rapport aux mesures réelles. Il est calculé en prenant la moyenne des écarts entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, puis en le divisant par la moyenne des mesures réelles. Le NMBE exprime ce biais en pourcentage, indiquant si le modèle a tendance à surestimer ou sous-estimer les valeurs réelles. Un NMBE proche de zéro indique que le modèle est bien équilibré et ne présente pas de biais significatif.

$$\text{NMBE} = (\Sigma (Y_i - P_i)) / (\Sigma Y_i) * 100$$

Où :

Y_i représente les valeurs observées ou les valeurs réelles.

P_i représente les valeurs prédites par le modèle de prévision.

Σ indique la somme des valeurs.

7.3.2.7 Séquences de calibration

Étant donné que les fluctuations de température dans le bâtiment réel sont principalement attribuables à des facteurs climatiques plutôt qu'à des charges internes ou des systèmes actifs, le processus de calibration s'est concentré sur deux aspects fondamentaux : la calibration des

paramètres thermiques et physiques de l'enveloppe, ainsi que la calibration de la ventilation. En d'autres termes, la calibration des paramètres thermiques de l'enveloppe et de la ventilation a été considérée comme des variables indépendantes, tandis que la recherche des valeurs les plus faibles de CVRMSE et de NMBE est devenue une variable dépendante dans cette approche. Dans cette perspective, le processus de calibration s'est déroulé en quatre phases : les deux premières phases concernent les variables des paramètres de l'enveloppe, c'est-à-dire les entrées des murs et de la toiture, tandis que les deux phases suivantes concernent la ventilation, c'est-à-dire l'infiltration externe de l'enveloppe et l'infiltration interne entre les espaces.

7.3.2.7.1 Calibration des entrées des murs (Phase-1)

Afin de calibrer le modèle énergétique et d'obtenir les propriétés thermiques du mur réel, une enquête sur site a été réalisée dans le but de déterminer la configuration initiale du modèle. Cette phase, appelée "**Configuration Initiale du Modèle**", correspond à la mise en place initiale du modèle avant son utilisation pour les simulations et la calibration.

À partir des données recueillies lors de l'enquête sur site et en se basant sur le document réglementaire thermique algérien DTR C3-2, la configuration initiale du mur a été établie. Les propriétés thermiques de ce mur sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 29 : Propriétés du mur de la configuration initiale

Matériau	Épaisseur (m)	Conductivité (W/m-K)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg-K)
Enduit ciment	0.02	1.4	2200.0	1080.0
Brique pleine (Béton)	0.15	1.2	2115.0	1080.0
Enduit en plâtre	0.02	0.35	875.0	936.0

Étant donné que le matériau principal utilisé dans les murs est la brique pleine en béton, en raison de son épaisseur qui exerce une influence significative sur les transferts thermiques du bâtiment, une calibration minutieuse des paramètres a été effectuée selon les modalités suivantes :

- **Épaisseur** : L'épaisseur du mur a été modifiée dans une plage allant de 0,15 m à 30 m, avec des intervalles de 0,05 m.
- **Conductivité thermique** : Les valeurs de conductivité thermique ont été sélectionnées dans l'intervalle de 0,9 à 2,02 W/m-K, avec des intervalles de 0,05 W/m-K.
- **Densité** : La densité a été prise dans la plage de 1700 à 2750 kg/m³, avec des intervalles de 150 kg/m³.

A l'aide de la programmation en utilisant le langage de programmation python sur le fichier IDF de base (model initial), un total de 265 itérations du modèle a été créé afin de tenir compte des variations des paramètres. En prenant en compte les différentes plages de variation des paramètres, une exploration systématique des combinaisons possibles a été effectuée. Dans ce cas précis, huit valeurs ont été utilisées pour l'épaisseur du mur, quatre valeurs pour la conductivité thermique et huit valeurs pour la chaleur spécifique comme évoquée auparavant. En multipliant ces nombres ensemble (8 x 4 x 8), un total de 265 combinaisons distinctes de paramètres a été obtenues et ont été testées. Ainsi, chaque itération du modèle correspondait à une combinaison unique de ces paramètres, permettant d'explorer un large éventail de scénarios possibles et d'optimiser la calibration pour obtenir les meilleures correspondances avec les mesures réelles. La Figure 137 ci dessous illustre le résultat de la calibration des paramètres thermique du mur.

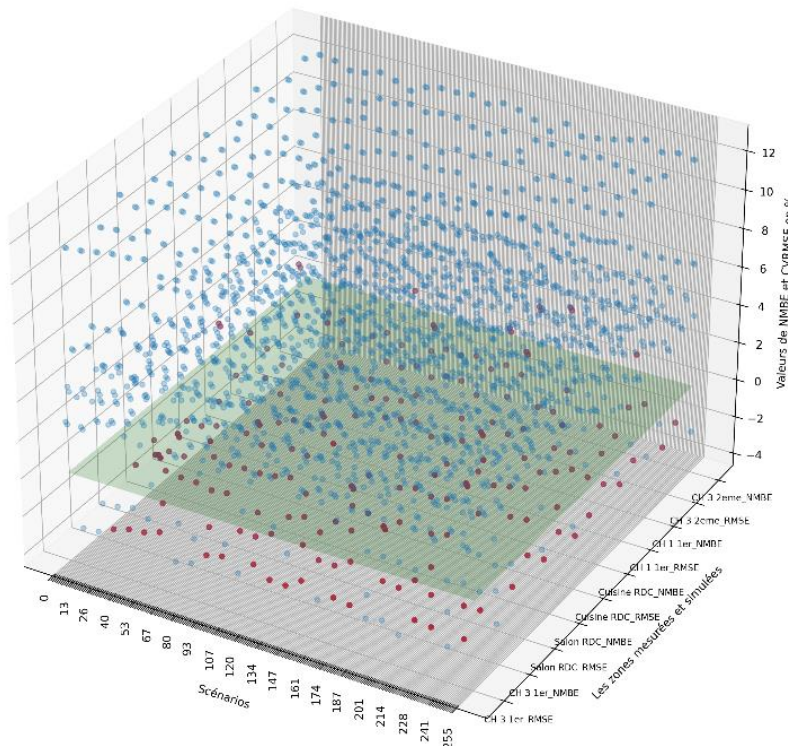


Figure 137: Résultats de simulation de 265 scénarios pour la calibration des paramètres du mur

Pour la calibration des murs, il a été résolu de sélectionner les 20 valeurs les plus faibles du CVRMSE et du NMBE pour chaque espace mesuré préalablement (représentés par les points rouges dans la Figure 137). Cette approche a été privilégiée afin d'éviter de se limiter à un nombre restreint de modèles, ce qui aurait pu entraîner une convergence vers un optimum local plutôt qu'un optimum global. En choisissant les 20 valeurs les plus faibles, il a été possible d'élargir la recherche et de couvrir un espace de paramètres plus vaste, augmentant ainsi les chances d'obtenir une calibration plus précise et représentative de l'enveloppe réelle du bâtiment. Cette méthode de sélection basée sur les multiples valeurs les plus faibles permet d'éviter les biais potentiels associés à la sélection de quelques valeurs extrêmes qui pourraient perturber les autres étapes de la calibration. En considérant un plus grand nombre de valeurs, une calibration plus robuste et fiable est obtenue, ce qui améliore la précision globale du modèle énergétique du bâtiment. Cette approche est conforme aux principes de l'analyse statistique et permet d'obtenir des résultats plus représentatifs et généralisables.

Étant donné que 5 espaces ont été mesurés et simulés sur la même période, il a été observé que plusieurs espaces mesurés et simulés pouvaient correspondre à un même modèle. Cela signifie que certains de ces espaces, avec des valeurs se situant dans l'intervalle des 20 valeurs minimales de CVRMSE et NMBE, se retrouvent dans le même modèle. En conséquence, parmi les 265 modèles initialement simulés, 67 modèles ont été sélectionnés.

7.3.2.7.2 Calibration des entrées de la toiture (Phase-2)

Les 67 modèles sélectionnés lors de l'étape de calibration des murs ont été utilisés pour la calibration des surfaces horizontales extérieures. Un générateur de modèles comme celui de la phase des murs a été employé pour incorporer différentes configurations des propriétés thermiques du toit dans ces 67 modèles préalablement mentionnés. Ces configurations ont été variées en fonction des 4 options proposées par le DTR 3.2 pour la dalle de compression par rapport à la hauteur de l'entrevous dans le cas d'un entrevous en béton.

Comme illustré dans la figure ci-dessous :


Résistance thermique (en m ² .°C/W)					
Entrevous en béton courant ⁽¹⁾		Hauteur des entrevous (en cm)			
Forme des entrevous :		12	16	20	25
Dalle de compression en béton courant		0,12	0,14	0,16	0,19

Figure 138: Les 4 variations des propriétés thermiques proposé par le DTR

Vu que La relation entre la résistance thermique (R), l'épaisseur (e) et la conductivité thermique (k) peut être exprimée par l'équation suivante : la résistance thermique est égale à l'épaisseur divisée par la conductivité thermique, soit $R = e/k$., chaque model des 67 model a produit 4 différente possibilité Tableau 30. Ce qui fait un total de 268 model simulée illustrer dans la Figure 139.

Tableau 30 : Les 4 variantes des paramètres d'entrée de la toiture

Épaisseur (m)	0.12	0.16	0.20	0.25
Conductivité thermique (W/mK)	1	1.13	1.25	1.31

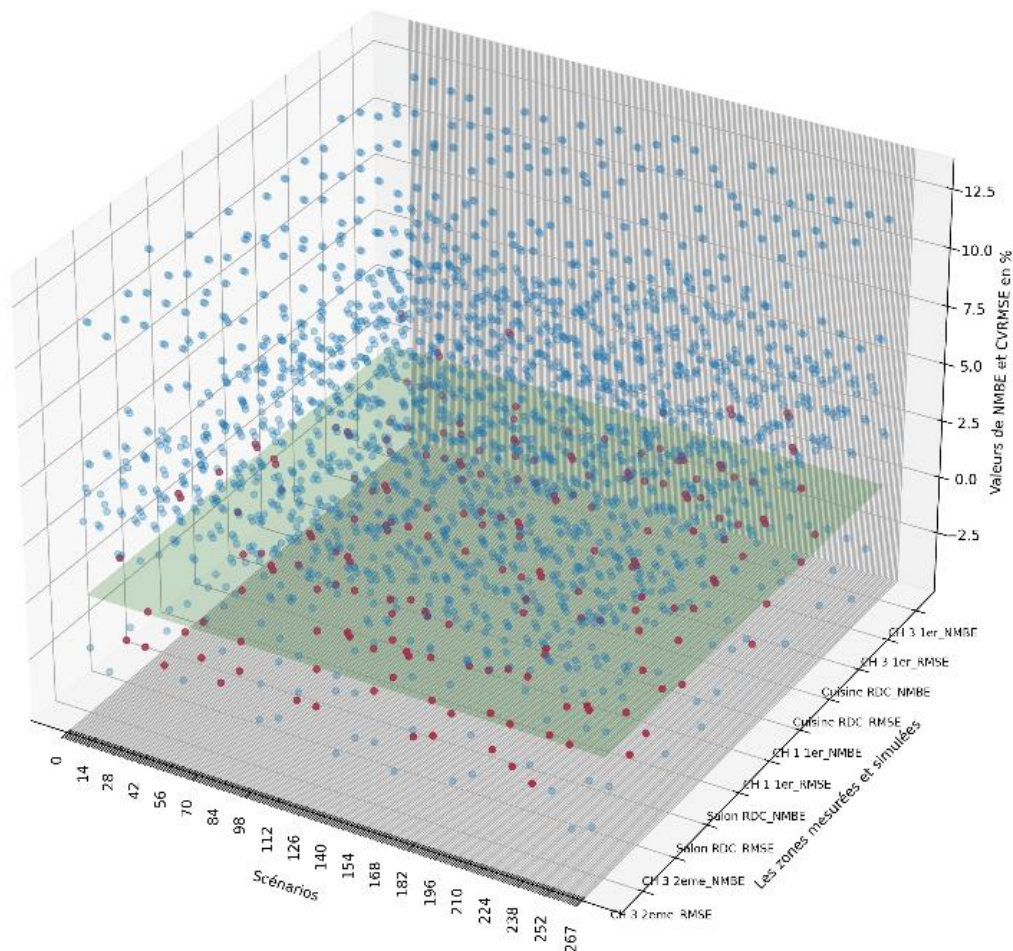


Figure 139: Résultats de simulation de 268 scénarios pour la calibration des paramètres de la toiture

La calibration des propriétés thermiques de la toiture a suivi la même méthodologie que celle utilisée pour la calibration des propriétés thermiques des murs. Cela impliquait la sélection des 20 valeurs les plus faibles de CVRMSE et de NMBE pour chaque espace mesuré précédemment. Cette approche a été privilégiée afin d'éviter la convergence vers un optimum local et de minimiser les biais potentiels liés à la sélection de valeurs extrêmes. Le résultat de la sélection a produit 61 comme indiqués en point rouge dans Figure 139 modèles élue pour la calibration de la ventilation présenté dans la section suivante.

7.3.2.7.3 Calibration des entrées de l'infiltration extérieure (Phase-3)

La calibration des entrées d'infiltration extérieure implique l'ajustement des paramètres tels que les coefficients de perméabilité et les surfaces d'infiltration en fonction des mesures réelles obtenues. Étant donné que les mesures de la résidence ont été effectuées lorsque celle-ci était fermée, les valeurs d'infiltration considérées sont minimales par rapport aux ouvertures extérieures. Les pourcentages d'ouverture des portes et fenêtres utilisés pour la calibration sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau 31 : Valeurs utilisées comme paramètres d'entrée de l'infiltration

	Pourcentage d'ouverture des portes et fenêtres						
0.01	0.07	0.34	0.137	0.205	0.272	0.407	0.475

Ces 8 valeurs ont été appliqué au 61 model issue de la calibration des paramètres thermique de la toiture, cette étape a conduit à la création de 488 modèles pour une calibration paramétrique de la paroi extérieure. Le résultat de la simulation de ces modèles est illustré dans la figure

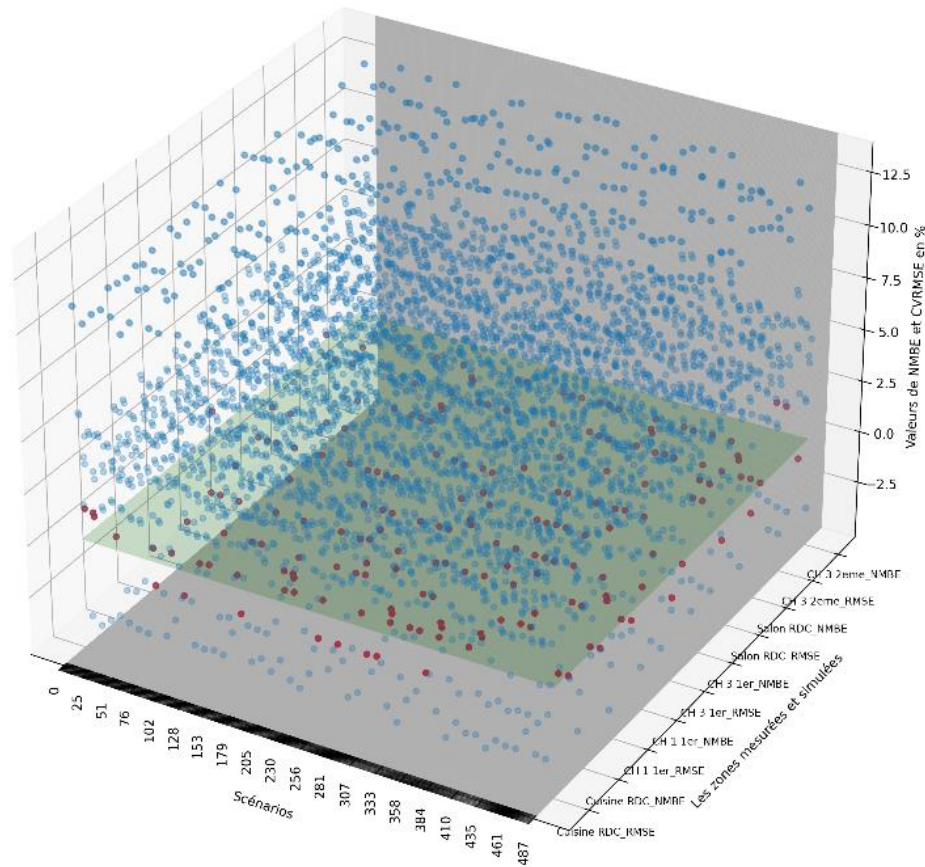


Figure 140 : Résultats de simulation de 488 scénarios pour la calibration des paramètres de l'infiltration extérieure.

La méthode utilisée lors des Phases 1 et 2, qui consiste à choisir les 20 modèles ayant les valeurs minimales de CVRMSE et NMBE, a également été appliquée à la calibration de l'infiltration par les prises d'air extérieures. Cette étape est illustrée par les points rouges dans la Figure 140. À partir de là, 94 modèles ont été sélectionnés pour la dernière phase de calibration, qui se concentre sur l'infiltration entre les parois et les ouvertures intérieures de l'habitation.

7.3.2.7.4 Calibration des entrées de l'infiltration intérieure (Phase-4)

La calibration des entrées d'infiltration intérieure vise à évaluer et ajuster les mesures d'infiltration d'air non intentionnelle à l'intérieur d'un bâtiment. Cela concerne le mouvement d'air entre les espaces intérieurs à travers les ouvertures non contrôlées, telles que les fuites ou les fissures entre les ouvertures intérieures. Pour cette étape, les mêmes valeurs de pourcentage d'ouverture utilisées lors de la calibration de l'infiltration extérieure ont été utilisées (voir Tableau 31.). Ces valeurs ont été appliquées aux 94 modèles sélectionnés à partir de la phase d'infiltration extérieure, ce qui a

conduit à la création et à la simulation de 752 modèles. La même méthode de sélection des 20 valeurs les plus faibles de CVRMSE et de NMBE a été utilisée pour choisir les modèles qui représentaient le mieux le comportement thermique de l'habitation, comme indiqué par les points rouges dans la figure ci-dessous. À partir de cette sélection, un total de 69 modèles a été retenu pour la phase finale de la calibration du modèle énergétique du bâtiment.

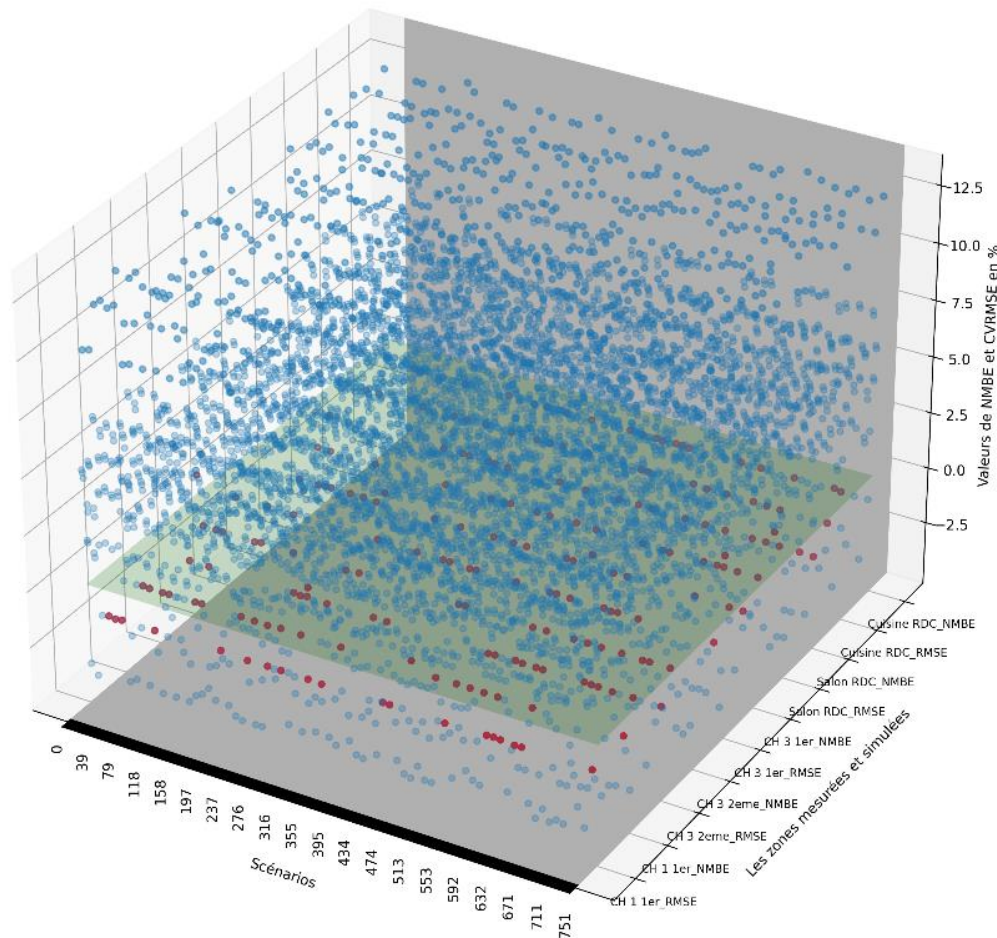


Figure 141 : Résultats de simulation de 488 scénarios pour la calibration des paramètres de l'infiltration intérieure

7.3.2.8 Modèle calibré pour la représentation thermique de l'habitation

La calibration du modèle énergétique du bâtiment a été réalisée en quatre phases distinctes : calibration des entrées des murs, calibration des entrées de la toiture, calibration des entrées de l'infiltration extérieure et calibration des entrées de l'infiltration intérieure. Chaque phase a suivi

une méthodologie similaire, consistant à sélectionner les modèles ayant les valeurs minimales de CVRMSE et de NMBE, afin d'obtenir une calibration plus précise et représentative des mesures réelles. Dans la dernière phase, le modèle représentant le mieux le comportement thermique de l'habitation a été sélectionné en utilisant la somme minimale des moyennes de CVRMSE et NMBE pour tous les espaces de chaque modèle. Le modèle optimal est indiqué en rouge dans Figure 142.

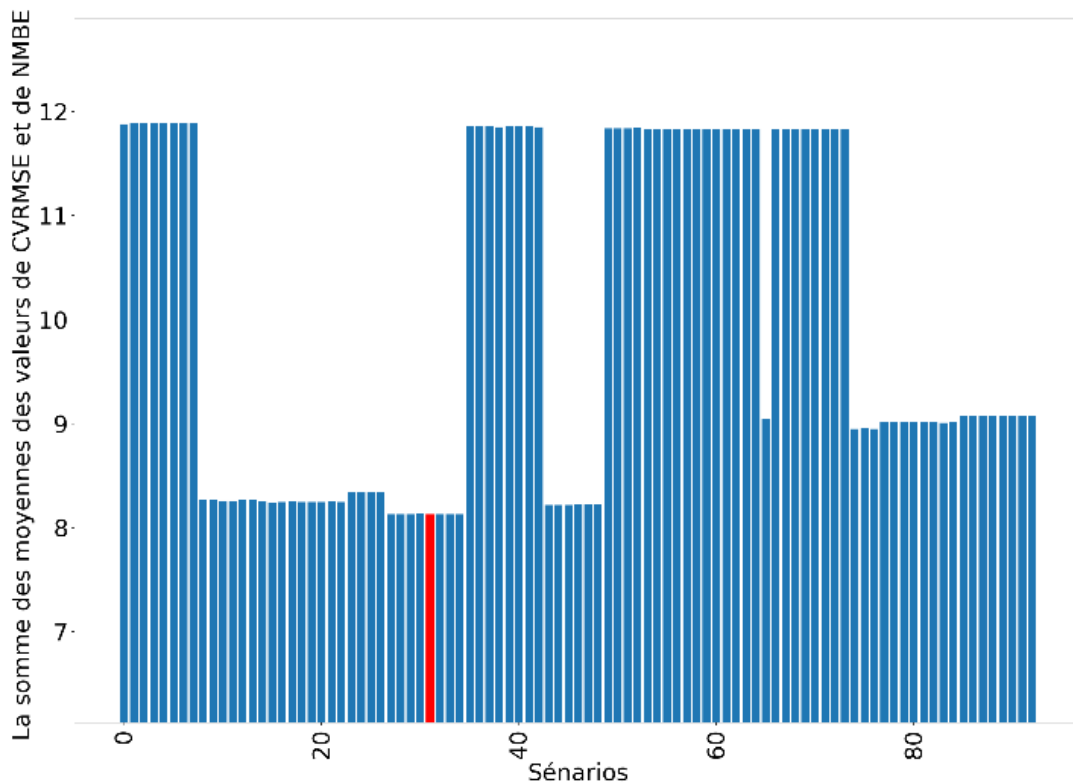


Figure 142: Somme de la moyenne des valeurs de CVRMSE et NMBE

Il est remarqué que la moyenne des valeurs des espaces du modèle calibré est de 5,082 % pour le CVRMSE et de 3,046 % pour le NMBE. Ces valeurs sont excellentes par rapport à la norme qui prévoit des valeurs inférieures à 30 % (\pm) pour le CVRMSE et à 10 % (\pm) pour le NMBE.

Ces résultats indiquent que le modèle calibré présente une bonne correspondance avec les mesures réelles, avec des erreurs de prédiction minimales. Les valeurs du CVRMSE et du NMBE se situent bien en deçà des seuils acceptables définis par la norme, ce qui démontre une fiabilité du modèle calibré dans la représentation du comportement thermique des espaces étudiés.

Les caractéristiques thermiques et les résultats statiques du modèle sélectionné pour représenter le comportement thermique de l'habitation choisie comme cas d'étude pour l'application des stratégies d'optimisation dans le chapitre précédent sont présentées dans les tableaux suivant :

Tableau 32: caractéristiques du modèle calibré

Conductivité thermique Du bloc de Béton	Épaisseur Du bloc de Béton	Densité Du bloc de Béton	Épaisseur de toit	Conductivité thermique de toit	Angle de dégagement des ouvertures extérieures	Angle de dégagement des ouvertures intérieures
0.9	0.3	2750	0.25	1.31	0.00005	0.00407

Tableau 33 : Résultat des indices statistique de la calibration

Cumul des moyennes CVRMSE des espaces	Cumul des moyennes NMBE des espaces
5.082	3.046

7.4 Application des résultats de l'optimisation sur le modèle de l'habitation

Après avoir procédé à la calibration et à la validation du modèle, une application des stratégies optimisées, développées précédemment dans le Chapitre 6, a été réalisée sur le modèle calibré. La sélection de trois configurations distinctes a été opérée à la suite de l'optimisation des stratégies dans. Les configurations comprenant une configuration garantissant un confort thermique et visuel équilibré (Configuration N°1), une configuration mettant l'accent sur un confort visuel élevé (Configuration N°2), et une configuration favorisant un confort thermique élevé (Configuration N°3) ont été choisies. Par la suite, ces trois configurations ont été soumises à des simulations sur le modèle de l'habitation calibrée, permettant ainsi une comparaison avec le modèle initial calibré. Les résultats obtenus ont été regroupés en trois catégories : les espaces de vie, les espaces de services et les halls. Cette catégorisation a été effectuée dans le but d'analyser spécifiquement l'impact des stratégies sur chaque groupe d'espaces. L'analyse des résultats permet d'approfondir notre compréhension des effets des différentes configurations sur le confort et les performances énergétiques du bâtiment. Il est important de noter qu'afin de faciliter la lecture et d'éviter les redondances dans les prochaines parties, les configurations dans le texte seront désignées par des

nombres, et dans les figures, elles seront représentées par leurs caractéristiques conformément au tableau suivant :

Tableau 34: dénomination et techniques des trois configurations

N°	Spécifié	Hauteur de l'appui de la fenêtre	Ratio fenêtre/mur	Ratio de Raouzna	Mur
Configuration N°1	Confort thermique et visuel équilibré	3 m	20 %	7 %	W8
Configuration N°2	Confort visuel élevé	3 m	20 %	9 %	W8
Configuration N°3	Confort thermique élevé	3 m	10 %	7 %	W9

7.4.1 Effet des configurations optimisées des techniques sur le confort thermique

La section suivante présente les résultats de l'application des configurations sur le pourcentage annuel d'heures de confort. Les résultats sont exprimés de manière fractionnelle, avec une échelle allant de 0 à 1. Une valeur de 0 représente 0 heure de confort, tandis qu'une valeur de 1 correspond à 8760 heures de confort selon le modèle de confort adaptatif. Les résultats obtenus pour la période annuelle sont présentés de manière détaillée, espace par espace, afin de faciliter la compréhension des résultats.

7.4.1.1 Résultats du confort thermique sur les espaces de vie

La Figure 143 présente les résultats de l'application des configurations de stratégies optimisées dans les espaces de vie. Les ratios d'ouverture sont identifiés comme des stratégies ayant un impact direct sur le pourcentage annuel d'heures de confort. Les résultats démontrent que les configurations privilégiant un confort thermique élevé (configuration N°3), avec un ratio d'ouverture de 5%, un ratio de Raouzna de 7%, et une double mure en BTCS, surpassent les autres modèles en termes de pourcentage d'heures de confort.

Ces observations sont également mises en évidence dans la Figure 144, qui présente les pourcentages cumulés d'heures de confort. En revanche, le modèle favorisant un confort visuel

élevé (configuration N°2) se positionne en dernière place dans la plupart des chambres, comme l'illustre la figure des pourcentages cumulés.

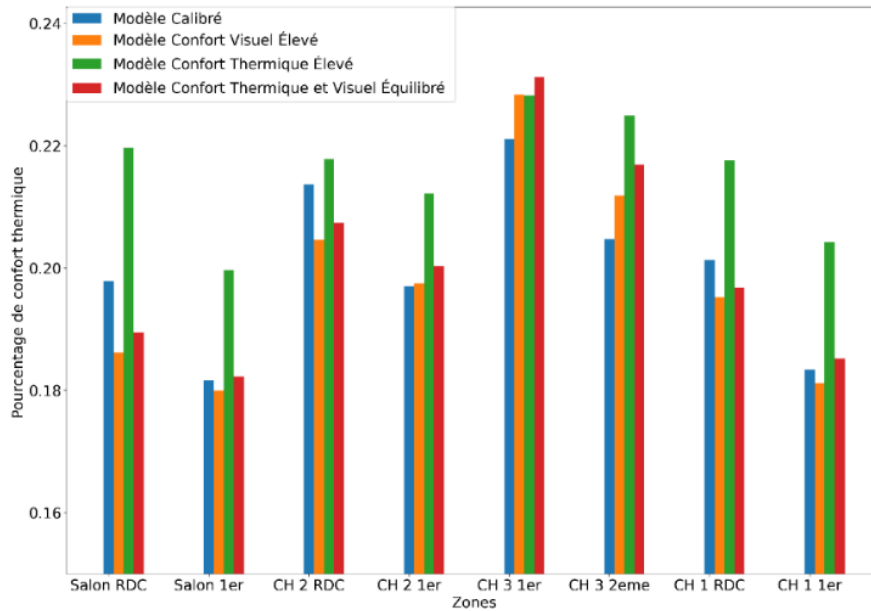


Figure 143: Résultats de l'applications des stratégies optimisées selon les trois configurations sur les espaces de vie

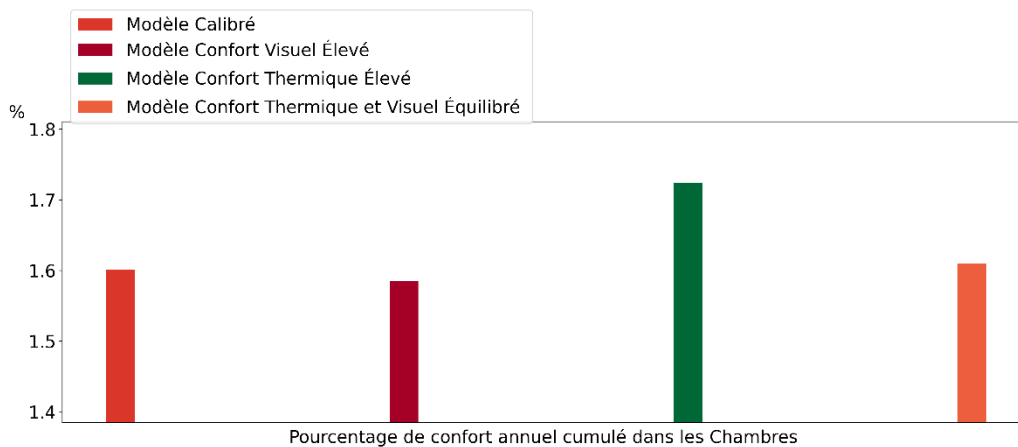


Figure 144 Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort selon les trois configurations sur les espaces de vie

Ces constatations peuvent être expliquées par l'utilisation de ratios d'ouverture spécifiques. Le modèle privilégiant un confort thermique élevé se caractérise par un faible ratio d'ouverture, tandis

que le modèle favorisant un confort visuel élevé présente un ratio d'ouverture de 20% et une Raouzna de 10%. Cette différence dans les ratios d'ouverture entraîne une variation de l'exposition aux rayonnements solaires. Ainsi, les chambres du modèle favorisant un confort visuel élevé reçoivent une plus grande quantité de rayonnement solaire que celles du modèle offrant un confort thermique élevé, ce qui a un impact négatif sur le nombre d'heures de confort en raison des conditions climatiques chaudes et arides.

Quant aux deux autres modèles, à savoir le modèle calibré (de base) et le modèle offrant un confort thermique et visuel équilibré (configuration N°1), une différence très faible a été observée malgré la grande différence dans le type de mur utilisé.

7.4.1.2 Résultats du confort thermique sur les espace de circulations

La Figure 145 présente les résultats de l'application des configurations de stratégies optimisées dans les halls. Étant donné que les halls sont des espaces intérieurs, la stratégie ayant le plus d'effet sur le pourcentage d'heures de confort annuel est la Raouzna.

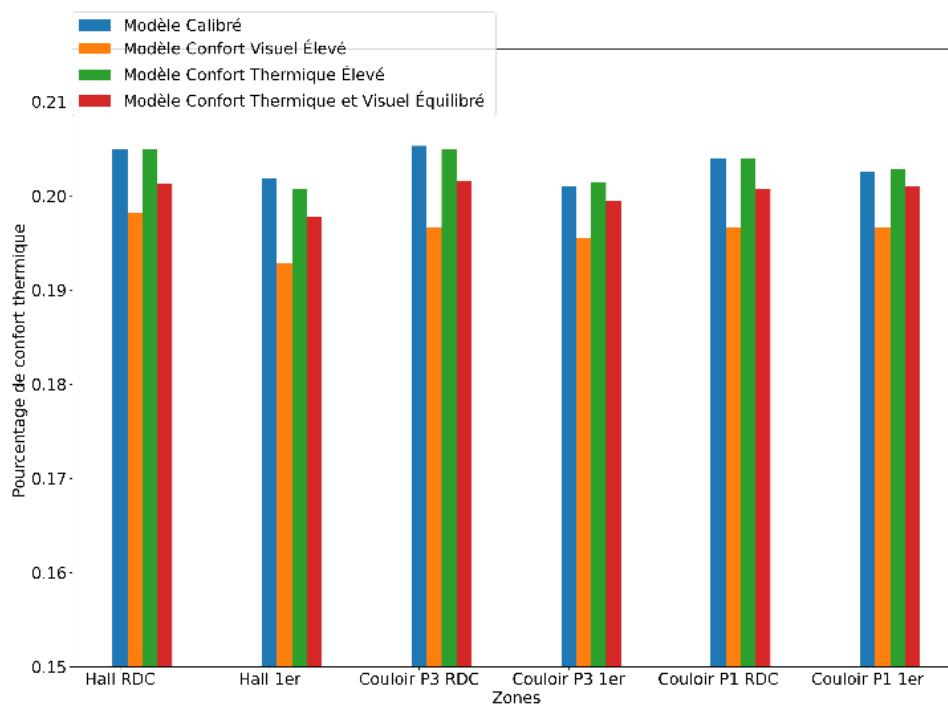


Figure 145 : Résultats de l'applications des stratégies optimisées selon les trois configurations sur les espaces de circulation

Les résultats démontrent que le modèle calibré (sans Raouzna) surpasse tous les autres modèles en termes de pourcentage d'heures de confort. Il est suivi par le modèle offrant un confort thermique élevé (configuration N°3), puis le modèle offrant un confort thermique et visuel équilibré (configuration N°1), et enfin le modèle privilégiant un confort visuel élevé configuration N°2).

Les résultats sont plus clairs dans la Figure 146 qui illustre les pourcentages d'heures de confort cumulées pour tous les modèles. Une légère différence a été observée dans le pourcentage d'heures de confort entre malgré la présence ou l'absence de Raouzna entre les deux modèles (le modèle de base et la configuration N°3). Cela est dû à la performance de la configuration offrant un confort thermique élevé (configuration N°3), qui a réussi à créer un microclimat adéquat même en la présence de Raouzna. Cependant, la Raouzna de 10% a eu un impact négatif sur le pourcentage d'heures de confort du modèle privilégiant un confort visuel élevé (configuration N°2).

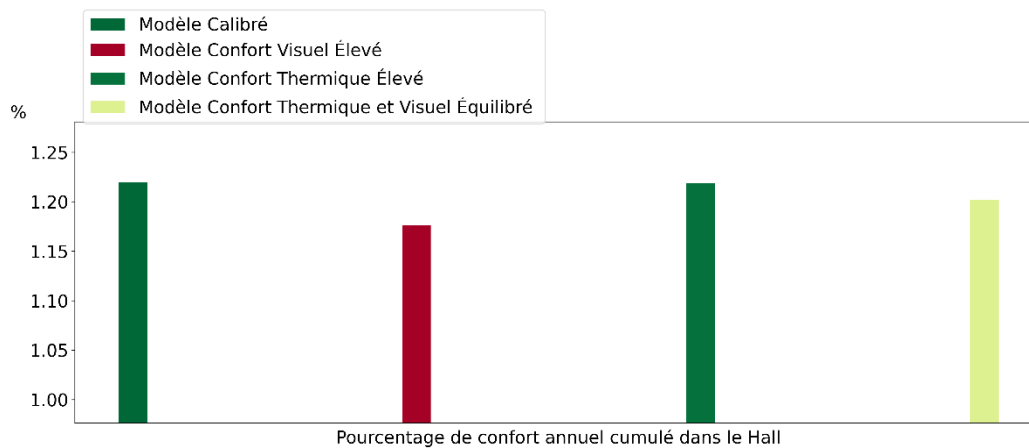


Figure 146 : Résultats du cumule des pourcentages d'heures de conforts selon les trois configurations sur les espaces de circulation

Cette constatation explique l'impact que la Raouzna peut avoir sur les espaces intérieurs et comment une configuration appropriée peut équilibrer l'effet négatif d'une autre technique qui agit de manière inadéquate. Il est observé que la technique des petites ouvertures a équilibré l'effet inadéquat de la Raouzna, ce qui a permis d'obtenir des heures de confort similaires au modèle initial dans les espaces de circulation.

7.4.1.3 Résultats du confort thermique sur les espaces de service

La Figure 147 présente les résultats de l'application des configurations de stratégies optimisées dans les espaces de service. Étant donné que les espaces de service sont des espaces clos, la stratégie ayant le plus d'effet sur le pourcentage d'heures de confort annuel est la mass thermique.

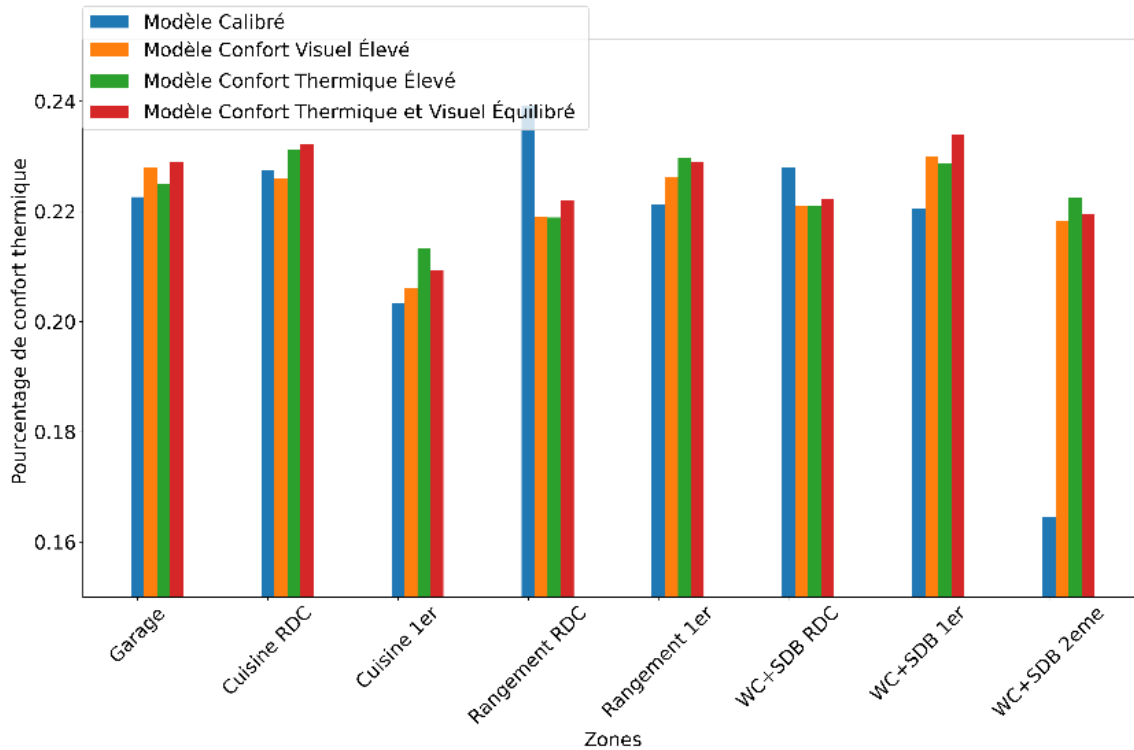


Figure 147: Résultats de l'applications des stratégies optimisées selon les trois configurations sur les espaces de service

En ce qui concerne les résultats des heures de confort cumulées présentés dans la Figure 148, il est observé que les pourcentages annuels de confort thermique dans les espaces de service sont approximativement similaires pour les trois modèles optimisés, tandis que le modèle calibré affiche les pourcentages d'heures de confort les plus bas. Cette différence est également perceptible dans le pourcentage d'heures annuelles de confort cumulé, où une variation de 0,15 est constatée par rapport aux résultats du modèle offrant un équilibre entre confort thermique et visuel. Une différence de 0,15 représente 15 %, ce qui équivaut à plus de 1300 heures de confort cumulé sur une année.

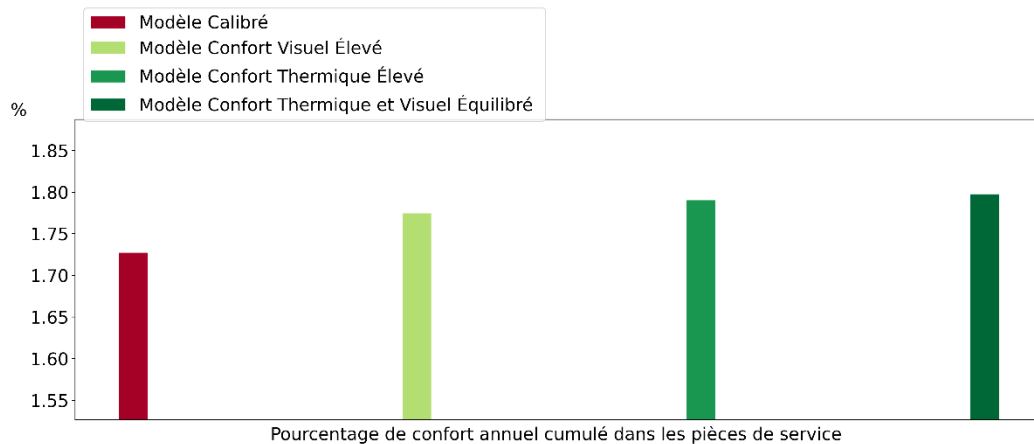


Figure 148 : Résultats du cumul des pourcentages d'heures de confort selon les trois configurations sur les espaces de service

7.4.1.4 Résultats du confort thermique sur tous les espaces

La Figure 149 résume les pourcentages d'heures de confort cumulées pour les quatre modèles simulés dans toutes les pièces. Il a été observé que le modèle offrant un confort thermique équilibré (configuration N°3) dépasse le modèle calibré (habitation de base) de plus de 20 % en termes d'heures de confort cumulées, ce qui représente plus de 1750 heures. Cela est dû à la configuration minimale des ouvertures qui favorise la protection solaire pendant les heures estivales. Il a également été remarqué que le modèle offrant un confort visuel élevé (configuration N°2) se situe en dernière position avec une légère différence par rapport au modèle calibré de base. Cela s'explique par le fait que malgré l'effet positif de la grande masse thermique qui contribue à retarder les variations de température extérieure, ses grandes ouvertures et sa Raouzna ont un effet plus négatif que la positivité de la masse thermique. Enfin, le modèle offrant un confort thermique et visuel équilibré présente des valeurs équilibrées, se situant en dessous du modèle optimal (confort thermique élevé) et au-dessus du modèle calibré.

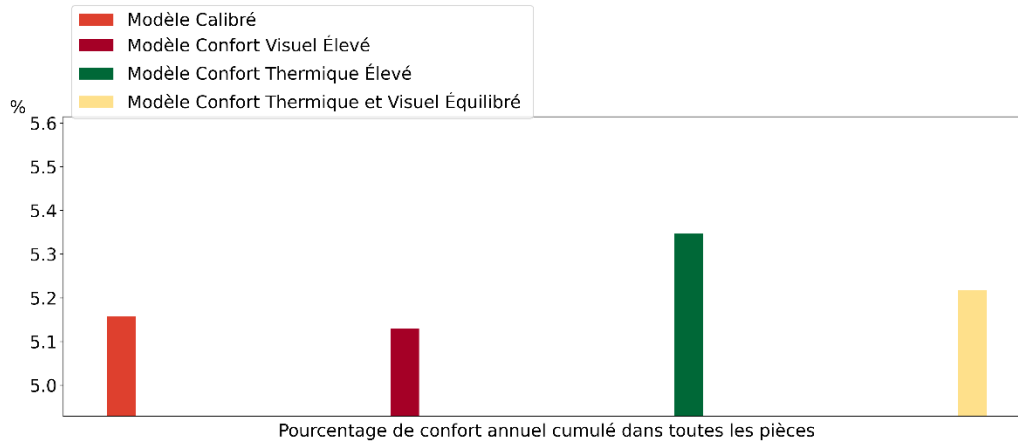


Figure 149 : Cumul des pourcentages d'heures de confort en fonction des quatre configurations pour tous les espaces

Ces résultats mettent en évidence l'impact réel des stratégies vernaculaires des Ziban sur les performances thermiques des bâtiments. De plus, l'optimisation des stratégies peut également contribuer à l'amélioration de ces performances. Cependant, il est important de noter que l'optimisation et l'application des stratégies doivent être effectuées avec précaution. En effet, comme cela a été observé, certaines stratégies, qu'elles soient optimisées ou non, ont eu un effet négatif sur le pourcentage d'heures de confort. Il est donc crucial de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du bâtiment et de mener une évaluation minutieuse des stratégies avant leur mise en œuvre afin de garantir des performances thermiques optimales.

7.4.2 Effet des configurations optimisées des techniques sur le confort visuel

La section suivante présente les résultats de la simulation des performances visuelles des quatre modèles dans lesquels les techniques optimisées basées sur les stratégies vernaculaires des Ziban ont été appliquées. L'indicateur utilisé pour comparer les performances visuelles est l'éclairage du jour utile et l'autonomie de la lumière du jour, tels que présentés dans Chapitre 1, section 1.4.5.

7.4.2.1 Résultats des performances visuelles de l'habitation individuelle

La Figure 150 et l'Annexe-D-II présentent les résultats de la simulation des performances visuelles du modèle d'habitation sélectionné comme cas d'étude (calibré). Ces résultats mettent en évidence une différence significative de performance visuelle entre les espaces du premier étage et ceux du

rez-de-chaussée. Dans l'ensemble, les espaces du premier étage bénéficient d'une meilleure performance visuelle par rapport aux espaces du rez-de-chaussée.

Concernant les espaces de vie, à l'exception du séjour du premier étage, il est généralement constaté que la moitié de ces espaces bénéficient d'un éclairage naturel adéquat, tandis que l'autre moitié présente des niveaux d'éclairage naturel presque nuls.

En ce qui concerne les espaces de circulation tels que le hall, les performances visuelles sont très faibles au rez-de-chaussée, où la présence de fenêtres est limitée. En revanche, pour le premier étage, la présence d'une fenêtre adjacente au séjour améliore les performances visuelles dans cette zone. Cependant, le centre du hall présente toujours des performances visuelles inadéquates.

Il convient de noter que la performance visuelle partiellement élevée du premier étage par rapport au rez-de-chaussée est dû à l'obstruction causée par le mur de la véranda ainsi qu'à la proximité des habitations voisines, comme illustré dans la Figure 136.

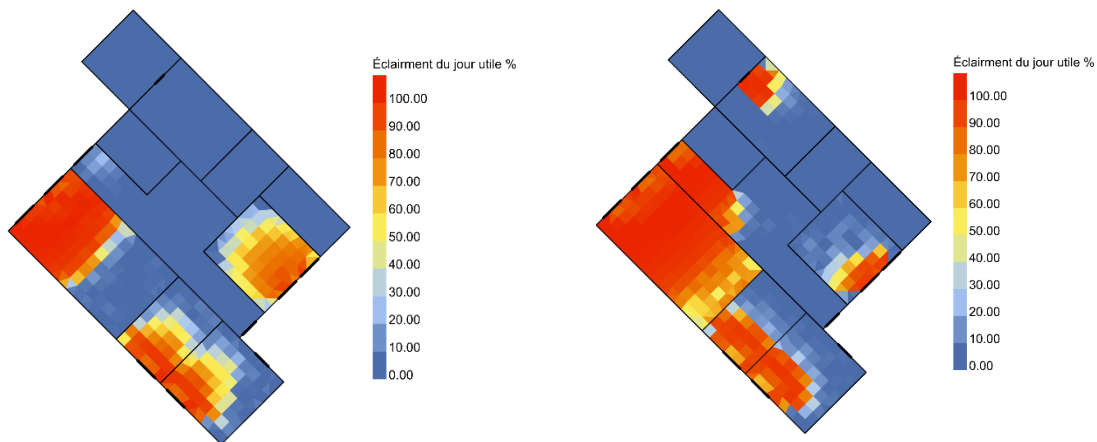


Figure 150 : Résultats de la simulation de l'éclairage du jour utile dans l'habitation, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont orientés vers le nord.

En ce qui concerne les résultats de l'autonomie en lumière du jour dans la Figure 151, il est constaté que les deux étages présentent une faible autonomie, avec seulement 3 ou 4 espaces bénéficiant d'une certaine autonomie pour chaque étage. Par ailleurs, il est observé que le premier étage affiche de meilleures performances en termes d'autonomie en lumière du jour, tout comme les résultats de l'éclairage du jour utile.

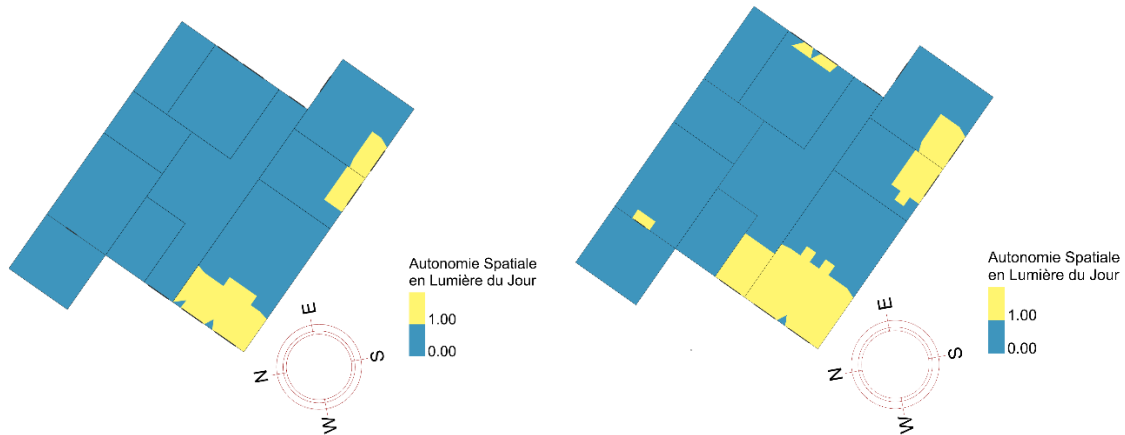


Figure 151 : Résultats de la simulation de l'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°1, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage.

7.4.2.2 Résultat des performances visuelles sur la configuration N°1

Les Figure 152 et l'Annexe-D-II présentent les résultats de la simulation des performances visuelles de la configuration N°1 (modèle avec confort thermique et visuel équilibré). Les résultats révèlent que la plupart des espaces de vie bénéficient d'un éclairage du jour optimal pour plus de la moitié de leur surface. Les salons du premier et du deuxième étage se distinguent particulièrement par leurs excellentes performances visuelles.

En ce qui concerne les espaces de circulation, il a été observé que le hall du premier étage, après l'intégration de la Raouzna, présente une surface de plus de 80% avec d'excellentes performances visuelles. Quant au hall du rez-de-chaussée, un éclairage adéquat et optimal a été constaté dans l'espace central situé sous la Raouzna du premier étage.

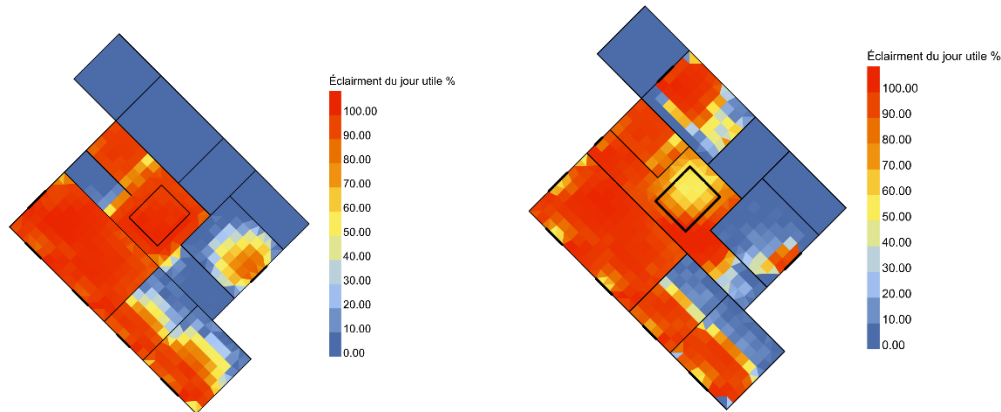


Figure 152 : Résultats de la simulation de l'éclairage du jour utile dans la configuration N°1, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage , Les plans sont orientés vers le nord.

La Figure 153 et l'Annexe-D-II présente les résultats de l'autonomie spatiale de la lumière du jour pour le modèle configuré 1. Une observation importante révèle que le salon du rez-de-chaussée et du premier étage bénéficient d'une autonomie spatiale de plus de 60% de leur superficie. En revanche, en ce qui concerne les espaces de circulation, l'autonomie spatiale est plus faible dans le hall du rez-de-chaussée. Cependant, l'autonomie est excellente en dessous de la Raouzna, et le hall du premier étage présente une autonomie spatiale supérieure à 70%. En ce qui concerne les autres chambres, leur autonomie spatiale ne dépasse pas 50%.

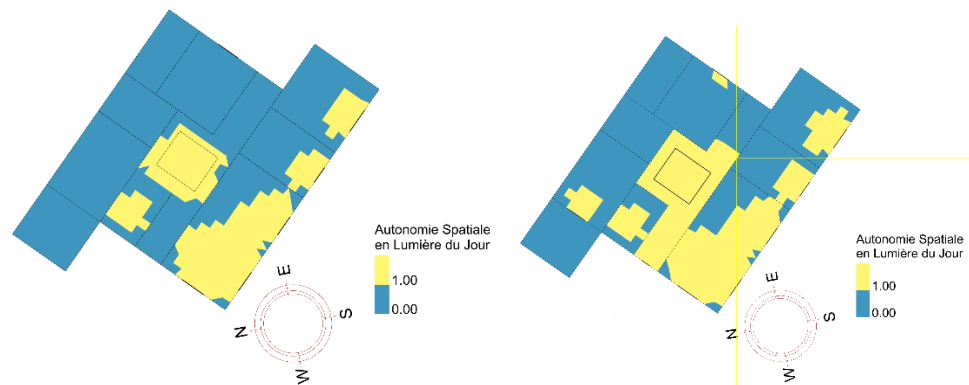


Figure 153 : Résultats de la simulation de m'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°1 , gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage , les plans sont positinés vers le nord.

7.4.2.3 Résultats des performances visuelles sur la configuration N°2

La Figure 154 et présentées en l'Annexe-D-II exposent les résultats de la simulation des performances visuelles de la configuration N°2 (modèle avec un confort visuel élevé). Ces résultats

rèvent des similitudes avec la configuration N°1 en ce qui concerne les espaces de vie, attribuables à des ratios de fenêtres similaires pour ces espaces. Cependant, une différence significative se remarque au niveau des espaces de circulation. La présence d'une grande Raouzna représentant 10% de la surface de la façade a favorisé la performance visuelle du hall du rez-de-chaussée, malgré une réduction des valeurs d'éclairage du jour utile au niveau du premier étage. Cette réduction peut être expliquée par des valeurs d'éclairage supérieures à 3000 lux pendant certaines périodes de l'année, résultant de la présence de la grande Raouzna. Cependant, ces valeurs élevées créent un risque de surchauffe, comme le démontrent les résultats du confort thermique des espaces de circulation (Figure 145 et Figure 146), où une différence observable de pourcentage d'heures de confort est constatée entre la configuration N°1 et la configuration N°2 du modèle.

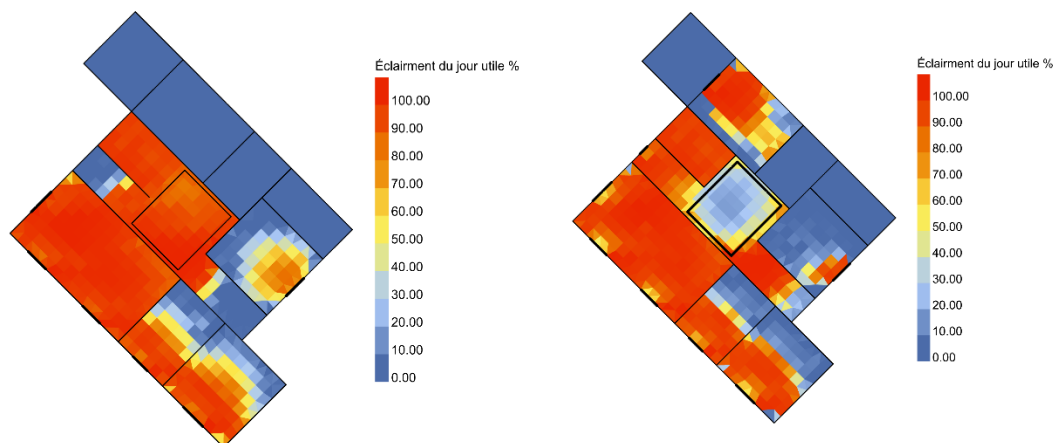


Figure 154 : Résultats de la simulation de l'éclairage du jour utile dans la configuration N°2, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, Les plans sont orientés vers le nord.

Pour la Figure 155 et l'Annexe-D-II qui indiquent les résultats de l'autonomie spatiale de la lumière du jour pour le modèle de la configuration N°2 (confort visuel élevé), les résultats sont similaires à ceux de la configuration 1 (confort thermique et visuel équilibré) pour les espaces de vie en raison de la similarité des ratios d'ouverture. Cependant, pour les espaces de circulation, la présence de la grande Raouzna a permis une augmentation partielle de l'autonomie en lumière du jour dans ces espaces.

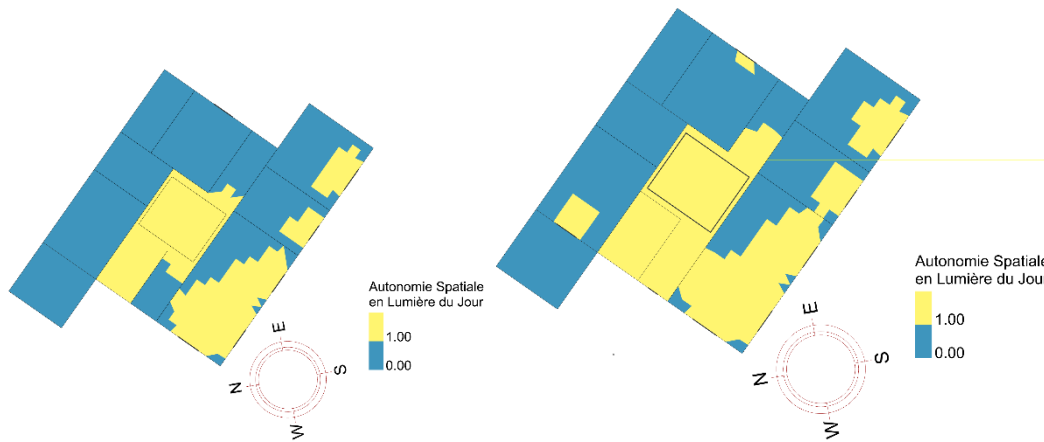


Figure 155 : Résultats de la simulation de m'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°2, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont positionnés vers le nord.

7.4.2.4 Résultat des performances visuelles sur la configuration N°3

Pour les résultats de l'éclairage utile en lumière du jour pour la configuration N°3 (confort thermique élevé), présentés dans la Figure 156, il est constaté que les valeurs de performance visuelle sont très faibles pour les espaces de vie. Cependant, pour le salon du rez-de-chaussée et du 1er étage, les valeurs sont acceptables, avec plus de 60% de l'espace bénéficiant d'une excellente performance visuelle.

En ce qui concerne les espaces de circulation, les résultats sont similaires à ceux de la configuration 1, c'est-à-dire une performance excellente dans le hall du 1er étage et au centre du rez-de-chaussée.

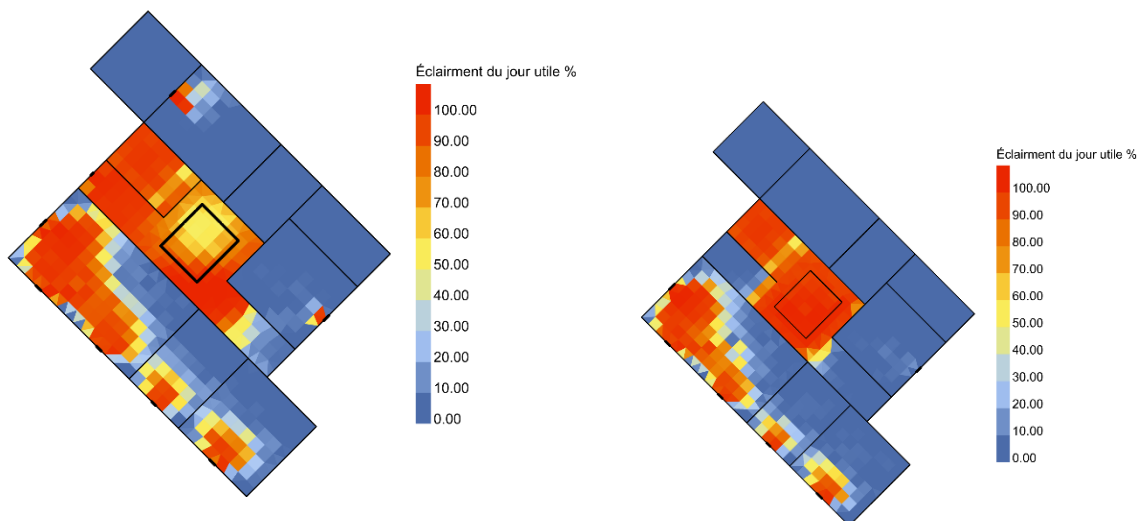


Figure 156: Résultats de la simulation de l'éclairage du jour utile dans la configuration N°3, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, Les plans sont orientés vers le nord.

Pour les résultats de l'autonomie en lumière du jour pour la configuration N°3 présenté dans la Figure 157, il a été constaté une autonomie presque nulle dans tous les espaces de vie. En revanche, pour les espaces de circulation, une excellente autonomie en lumière du jour a été observée dans le hall du 1er étage et dans l'espace situé en dessous de la Raouzna dans le hall du rez-de-chaussée.



Figure 157 : Résultats de la simulation de l'autonomie en lumière du jour dans la configuration N°, gauche le plan du RDC, droite Plan du 1er étage, les plans sont positionnés vers le nord.

7.4.3 Synthèse de l'application des techniques vernaculaires optimisées

La section précédente aborde l'application des stratégies optimisées sur le modèle d'habitation calibré, mettant en évidence leur impact sur le confort thermique et visuel. Trois configurations distinctes ont été sélectionnées pour cette étude : une configuration équilibrée en termes de confort thermique et visuel (Configuration N°1), une configuration axée sur un confort visuel élevé (Configuration N°2) et une configuration favorisant un confort thermique élevé (Configuration N°3). L'analyse des résultats a porté sur les espaces de vie, les espaces de services et les espaces de circulations, permettant ainsi de comprendre l'effet de chaque configuration sur l'ensemble du bâtiment.

Les résultats obtenus ont révélé que les configurations les plus performantes étaient la Configuration N°1 et la Configuration N°3. Tout d'abord, en ce qui concerne le confort thermique, la Configuration N°2 a démontré des performances nettement inférieures par rapport aux autres configurations, voire parfois par rapport au modèle initial (calibré). Deuxièmement, étant donné que la différence entre la Configuration N°1 et la Configuration N°2 réside principalement dans le

ratio de Raouzna, il est intéressant de noter que la Configuration N°1, avec un ratio de Raouzna de 7 %, a montré des performances visuelles presque similaires à celles de la Configuration N°2, qui avait un ratio de Raouzna de 10 %. Cependant, le choix d'un ratio de Raouzna de 10 % a entraîné un désavantage thermique considérable dans les espaces de circulation.

En raison des performances supérieures en termes de confort thermique et visuel des Configurations N°1 et N°3, qui offrent respectivement un équilibre entre ces deux aspects et une priorité donnée au confort thermique, ces configurations ont été sélectionnées pour la prochaine partie de l'étude, qui porte sur les stratégies de ventilation dans les zones chaudes et arides.

7.5 Optimisation de la stratégie de ventilation naturelle

Dans cette partie, l'une des stratégies les plus évoquées et pratiquées dans la littérature et l'architecture des zones chaudes et arides est mise en avant. Cette stratégie a été testée et optimisée en fonction des températures extérieures ainsi que des heures de confort et d'inconfort. Ces tests ont été réalisés en lien avec la partie précédente, qui a identifié les deux configurations les plus performantes : la Configuration N°1, qui assure un confort thermique et visuel équilibré, et la Configuration N°2, qui offre un confort thermique élevé.

7.5.1 La ventilation nocturne

L'une des stratégies les plus efficaces dans les régions chaudes et arides est la ventilation nocturne, tel que mentionné précédemment dans la section 2.3.2.2. Cette approche permet de réduire l'inconfort en utilisant la ventilation naturelle. En règle générale, dans ces zones, la ventilation nocturne implique l'ouverture des ouvertures pendant les mois où les températures diurnes dépassent la plage de confort. Cette notion est clairement illustrée dans la Figure 158, où la zone verte, représentée par une fraction de 1.00 correspondant aux heures où les ouvertures sont non fermées, symbolise les moments de ventilation durant les mois où les températures atteignent ou dépassent les 40°C, seuil de confort.

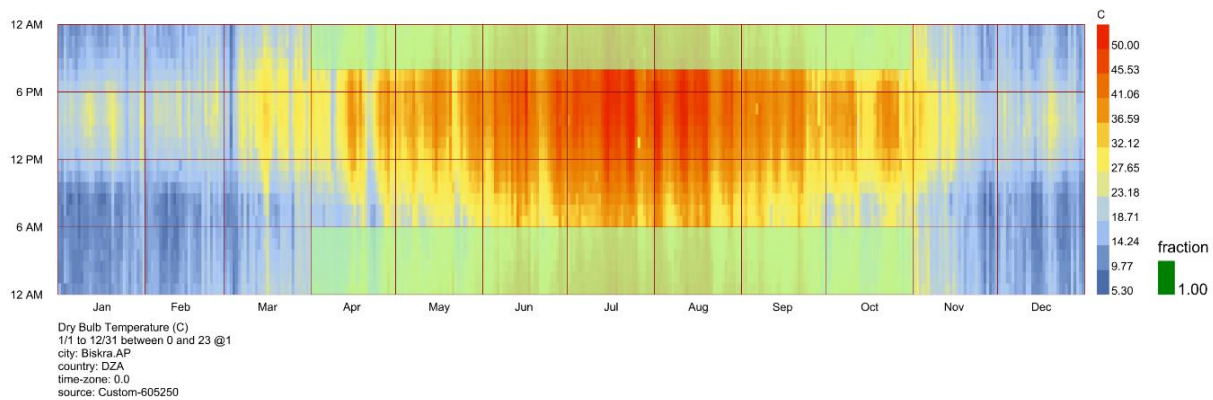


Figure 158: Les heures de l'application de la stratégie de la ventilation nocturne

Cependant, il est important de noter que lors des journées les plus chaudes de l'année, lorsque les températures diurnes et nocturnes se situent toutes deux en dehors de la plage de confort, la ventilation nocturne peut ne pas avoir d'effet ou même avoir un effet négatif sur l'habitat. Par conséquent, il est essentiel d'optimiser les heures de ventilation afin de maximiser les bénéfices et d'assurer le confort souhaité.

7.5.2 Ventilation adaptive

Etant donnée la différence dans la quantité d'heures de confort entre les espaces, comme observée dans les résultats des figures Figure 143, Figure 145, et Figure 147, s'explique par les variations entre les heures d'inconfort et de confort au cours de l'année dans chaque espace. En d'autres termes, à un moment donné au cours de l'année, un espace peut être confortable tandis qu'un autre peut ne pas l'être. Cette disparité conduit chaque espace à avoir des besoins de ventilation différents. Certains espaces peuvent nécessiter une ventilation à certaines heures, tandis que d'autres n'en auront pas besoin. Cette distinction peut être mise en évidence en calculant les heures de ventilation tout au long de l'année, c'est-à-dire les heures où les températures intérieures dépassent généralement la plage de confort (généralement au-dessus de 28°C) et où les températures extérieures se situent dans ou en dessous de la plage de confort.

Pour cela, un calcul a été entrepris en utilisant les résultats de simulation, afin de déterminer le besoin en ventilation pour plusieurs espaces, comme indiqué dans l'Annexe-E-I.

Les Figure 159, Figure 160 indique le besoin en ventilation pour le Salon du 1^{er}, de CH3-1^{er} au 1^{er} étage respectivement.

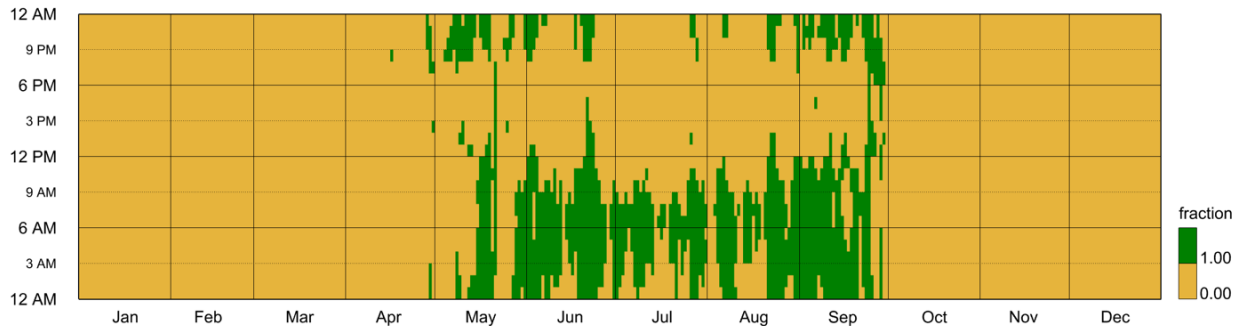


Figure 159: Les heures (en vert) qui nécessitent de la ventilation au cours de l'année pour le Salon du 1er étage

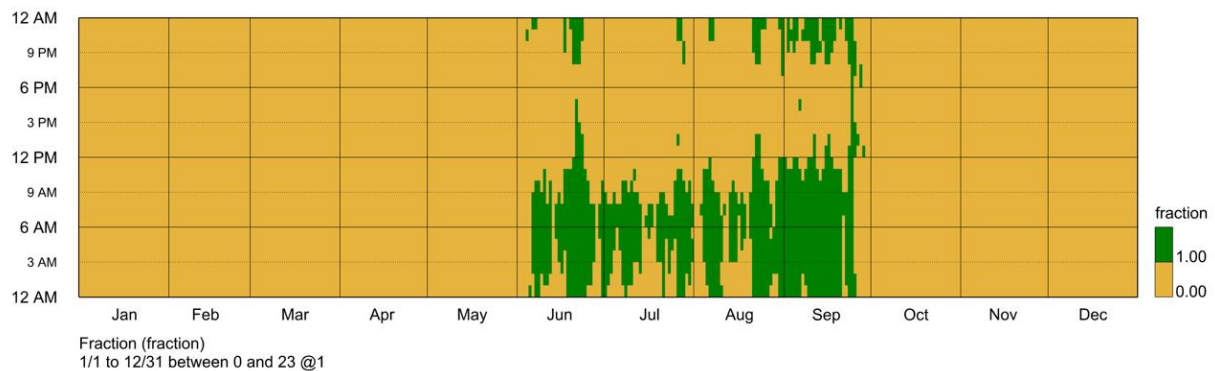


Figure 160: Les heures (en vert) qui nécessitent de la ventilation au cours de l'année pour le Chambre N°3 du 1er étage

D'après les résultats, il est remarqué que le salon du 1er étage nécessite une ventilation au mois de mai, tandis que la CH3-1er étage n'en a pas besoin. Cette différence s'explique par les disparités d'orientation et de nombre d'ouvertures entre les deux espaces. Cette analyse conclut que malgré l'efficacité de la ventilation nocturne en tant que stratégie vernaculaire, elle n'est pas parfaite et peut ne pas toujours aboutir à des résultats optimaux de confort, voire réduire les heures d'inconfort. Comme il est observable dans Annexe-E-II expose une comparaison entre les heures de besoins en ventilation et les heures de ventilation nocturne dans plusieurs espaces. Dans la Figure 161 les résultats du Salon du 1er sont exposées comme ci-dessous :

Couleur verte : les heures où le besoin de ventilation de l'espace correspond à la ventilation nocturne (ventilation "identique").

Couleur jaune : les heures de ventilation nocturne mais l'espace n'a pas besoin de ventilation (ne doit pas être ventilé).

Couleur bleue : les heures où l'espace doit être ventilé mais dehors des heures de la ventilation nocturne (doit être ventilé).

Couleur rose : les heures où il n'y a pas de besoin de ventilation de l'espace et non à la ventilation nocturne (non ventilation identique).

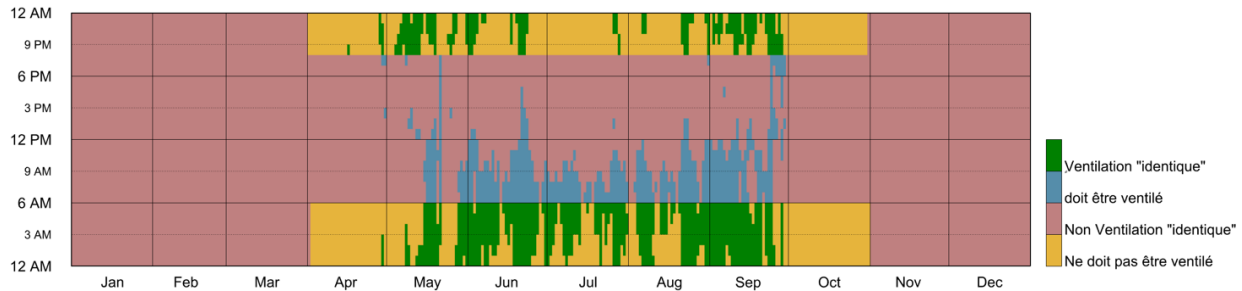


Figure 161 : Comparaison de la ventilation nocturne et du besoin réel en ventilation pour le Salon du 1er étage.

Selon les résultats, la ventilation nocturne n'est pas toujours efficace lorsque les températures diurnes dépassent la zone de confort. Par exemple, au mois d'avril, il n'y a pratiquement pas besoin de ventilation, et au mois d'octobre, aucune ventilation n'est nécessaire. De plus, cette stratégie de ventilation n'est pas active pendant les matinées des journées de la période estivale, ni pendant les après-midis des mois de transition comme mai et septembre, où il y a en revanche un besoin de ventilation. Ces observations mettent en évidence la variabilité de l'efficacité de la ventilation nocturne en fonction des saisons et des conditions spécifiques, ce qui en fait une solution non systématiquement optimale pour assurer le confort thermique dans l'habitation.

Étant donnée cette constatation, il est essentiel d'optimiser la ventilation nocturne en adoptant une approche de ventilation adaptative, c'est-à-dire une ventilation ciblée et contrôlée. Cette approche vise à utiliser la ventilation lorsque les températures extérieures permettent un refroidissement des températures intérieures pour atteindre un niveau de confort thermique. Dans la section suivante, la stratégie de ventilation a été optimisée en l'appliquant aux modèles sélectionnés dans la partie 7.4.3, qui ont présenté les meilleurs résultats en termes de confort thermique et visuel.

7.5.3 Application de la ventilation optimisée (ventilation adaptative)

Dans cette partie, une ventilation adaptative a été appliquée et simulée pour chaque espace des deux modèles sélectionnés ayant obtenu les meilleurs résultats en termes de confort thermique et

visuel, à savoir la Configuration N°1 (modèle avec un confort thermique et visuel équilibré) et la Configuration N°3 (modèle avec un confort thermique élevé). En parallèle, les modèles ont été simulés avec l'application de la ventilation nocturne. L'objectif était de comparer l'efficacité des deux stratégies : l'approche optimisée et l'approche non optimisée de la ventilation nocturne.

Les résultats sont présentés selon quatre catégories, à savoir espace de circulation et espace de service, chambres et salon. Il est remarqué que la catégorisation utilisée précédemment, qui concerne les espaces de vie, a été divisée en deux types d'espace. Cette division a été effectuée afin d'isoler les espaces avec deux façades et les espaces avec une seule façade. Ainsi, les chambres ont été regroupées dans une catégorie et les salons dans une autre catégorie. Cette division a été faite dans le but de réduire au maximum les variables indépendantes et d'avoir une lecture plus claire des résultats de la ventilation. Cette comparaison permettra de déterminer quelle stratégie offre les meilleurs résultats en termes de confort thermique par rapport à différentes catégories et configurations d'espaces.

7.5.3.1 Résultats de la ventilation dans les chambres

La Figure 162 représente les résultats de simulation de la ventilation adaptative et de la ventilation nocturne, comparées à l'absence de ventilation et au modèle calibré dans les chambres (les espaces de vie avec une seule façade). Les résultats sont présentés en termes de pourcentage de confort annuel cumulé, c'est-à-dire le pourcentage d'heures de confort par rapport au nombre total d'heures annuelles, cumulé pour tous les chambres. Les résultats montrent clairement que les modèles avec une ventilation adaptative performant mieux que tous les autres modèles, et que la ventilation nocturne n'a pas donné de grande amélioration par rapport au modèle de base et aux modèles sans ventilation. Il est également remarqué que le modèle avec confort thermique et visuel équilibré, sans ventilation (c'est-à-dire un modèle avec une masse thermique non négligeable), a été moins performant que le modèle de base en l'absence de ventilation. Cela montre que la stratégie de ventilation est plus importante que la stratégie d'inertie thermique, et que dans l'absence de ventilation, une stratégie d'inertie thermique peut devenir inefficace.

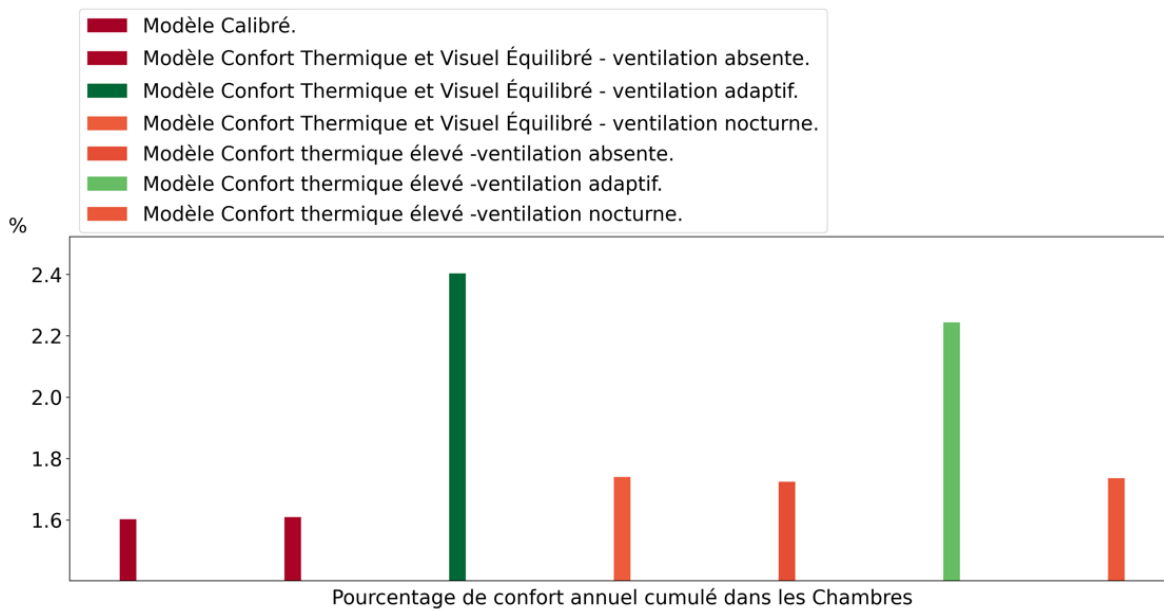


Figure 162: : Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort des chambres

7.5.3.2 Résultats dans les espaces de séjour

La Figure 163 présente les résultats de la simulation de la ventilation adaptative et de la ventilation nocturne, comparées à l'absence de ventilation ainsi qu'au modèle calibré dans les espaces de séjour (les espaces de vie avec deux façades). Les résultats observés dans les espaces de séjour sont similaires à ceux des chambres, mais avec quelques variations. On remarque que les modèles avec ventilation adaptative bénéficient d'un pourcentage d'heures de confort plus de deux fois supérieur à celui des autres modèles, malgré le fait que les espaces de séjour dans les modèles optimisés sont orientés de manière moins favorable (à l'ouest) avec une plus grande ouverture par rapport au modèle de base de l'habitation(calibré).

Effectivement, il est observé que les deux modèles optimisés, malgré leur différence de 15%

En effet, les résultats démontrent que les deux modèles optimisés, malgré leur différence de 15% dans le rapport fenêtre/mur, ne montrent pas de grandes variations lors de l'application de la ventilation nocturne pour le modèle avec un grand rapport fenêtre, et l'absence totale de ventilation pour le modèle avec de petites ouvertures. Ces résultats suggèrent que l'augmentation ou la réduction du rapport fenêtre/mur entraîne une augmentation ou une diminution des heures de confort en raison de l'exposition solaire de manière similaire à la réduction ou l'augmentation des heures de confort par rapport à la ventilation adaptative. En d'autres termes, le rapport de fenêtre

est directement proportionnel à la ventilation adaptative et inversement proportionnel à l'exposition solaire en ce qui concerne les heures de confort, avec une quasi-similitude dans la quantité d'heures de confort concernées.

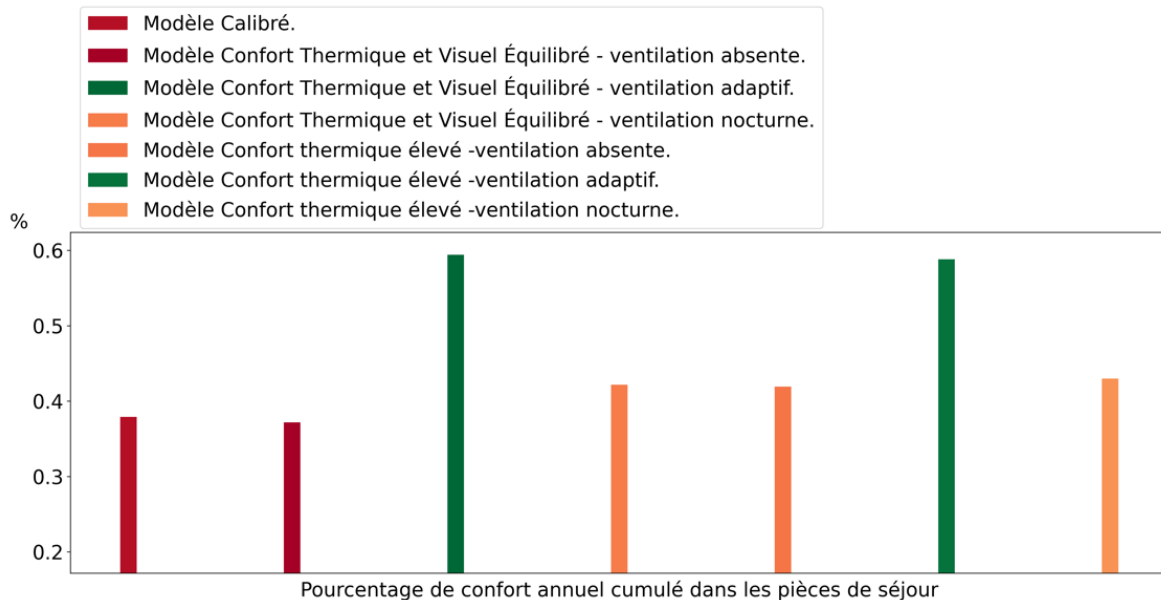


Figure 163: Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort des pièces de séjour

7.5.3.3 Résultats dans les espaces de circulation

La Figure 164 présente les résultats de la simulation des différents types de ventilation dans les trois modèles (deux modèles optimisés et le modèle de l'habitation) pour les espaces de circulation. Les résultats montrent clairement que la ventilation adaptative a amélioré le pourcentage d'heures de confort dans le modèle avec un confort thermique et visuel élevé, malgré la présence d'une Raouzna de 7% qui accentue l'exposition solaire dans ces espaces par rapport au modèle calibré sans Raouzna. Il est également remarqué que dans les espaces où il y a une exposition solaire, la ventilation adaptative est nettement plus efficace que la ventilation nocturne. En revanche, dans le modèle avec un mur massif (modèle avec un confort thermique élevé), la ventilation nocturne agit de manière similaire au modèle de base sans Raouzna et ventilation nocturne. Cela prouve que les techniques vernaculaires sans optimisation et adaptation, combinées à d'autres stratégies complémentaires, peuvent ne pas être efficaces dans toutes les situations.

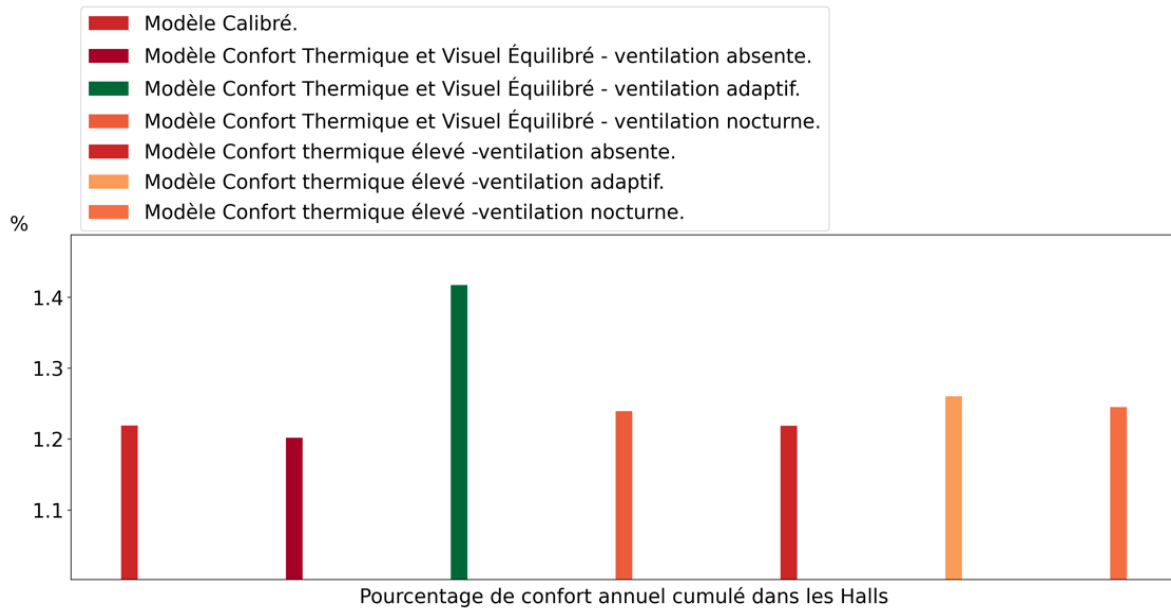


Figure 164: Résultats du cumule des pourcentages d'heures de confort des pièces de Halls

7.5.3.4 Résultats dans les espaces de services

La Figure 165 présente les résultats de la simulation des différents types de ventilation dans les trois modèles (deux modèles optimisés et le modèle de l'habitation) pour les espaces de service, c'est-à-dire les espaces sans ouvertures. Les résultats montrent que la ventilation adaptative agit également de manière excellente sur les espaces adjacents aux espaces ventilés, en réduisant la surchauffe dans les espaces ventilés. Le transfert de chaleur permet également de dissiper la chaleur vers les espaces adjacents aux espaces ventilés. Il est également remarqué que la ventilation adaptative est proportionnelle au ratio fenêtre/mur, car le modèle avec un plus grand ratio fenêtre/mur a plus d'heures de confort. Cette observation suggère que le choix d'un ratio fenêtre/mur approprié est essentiel pour optimiser l'efficacité de la ventilation adaptative dans la recherche du confort thermique.

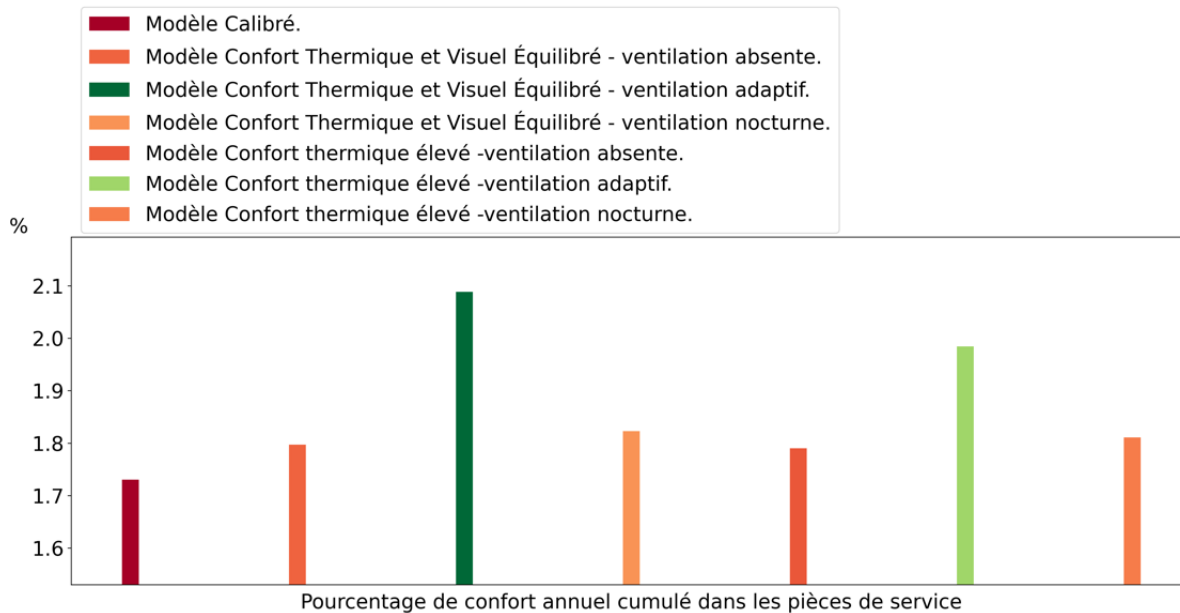


Figure 165 : Résultats du cumul des pourcentages d'heures de confort les pièces de services

7.5.3.5 Résultats dans tous les espaces

La Figure 167 présente les résultats de la simulation des types de ventilation dans les deux modèles, dans toutes les pièces, par rapport au pourcentage d'heures de confort thermique, dans le but d'avoir une vue globale du comportement des différentes configurations dans différents espaces par rapport au modèle de base. Il est clairement remarqué que le modèle avec un confort thermique et visuel équilibré, avec une ventilation adaptative, surpasse tous les autres modèles dans presque tous les espaces, avec des valeurs élevées. Il est suivi du modèle avec un confort thermique élevé avec ventilation adaptative. Ces résultats sont encore plus clairs dans la Figure 166, qui montre le cumul du pourcentage d'heures de confort dans tous les espaces pour les trois modèles. Il est clairement remarqué que les deux modèles optimisés avec ventilation adaptative dépassent nettement les modèles avec ventilation nocturne et sans ventilation, ainsi que le modèle de base. Cela expose la stratégie de ventilation comme la plus importante dans la conception des bâtiments durables.

Il est également observable que le modèle avec un confort visuel et thermique équilibré a prouvé être la configuration optimale pour une conception architecturale basée sur les techniques vernaculaires issues des stratégies vernaculaires des Ziban. Cette configuration équilibre et optimise intelligemment les techniques vernaculaires pour réduire l'exposition solaire, accroître la

ventilation sans réduire les performances visuelles, démontrant ainsi son efficacité et son adéquation dans la conception de bâtiments durables et adaptés aux climats chauds et arides.

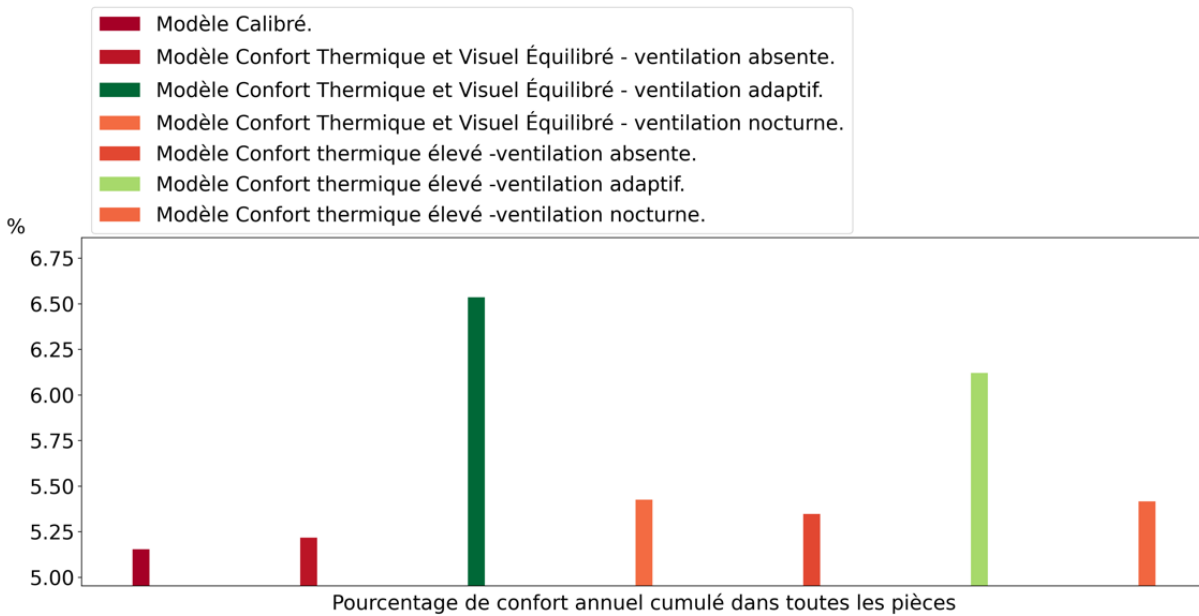


Figure 166: Résultats du cumul des pourcentages d'heures de confort dans toutes les pièces

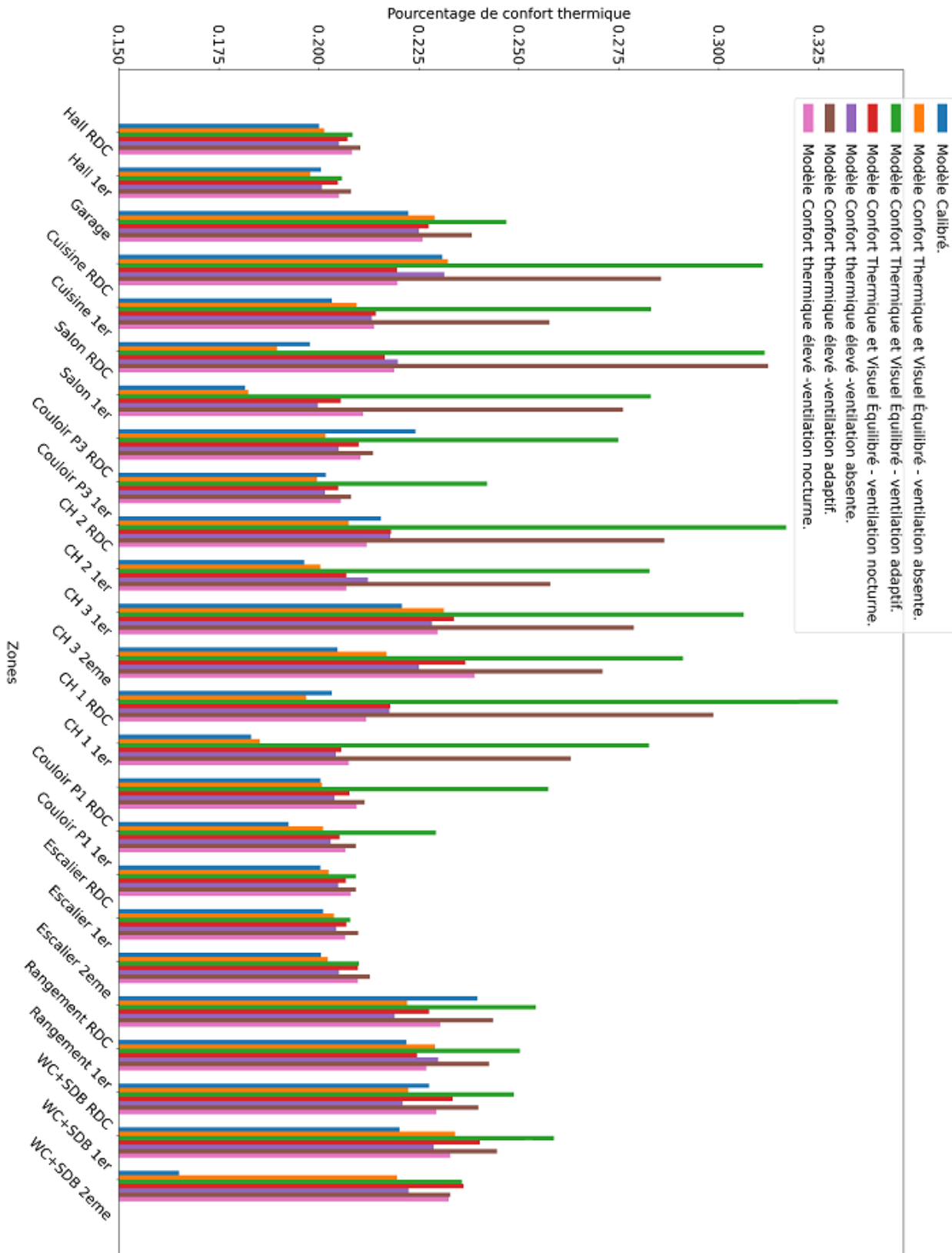


Figure 167 : Résultats du pourcentage d'heures de confort annuelle dans tous les espaces des deux modèles optimisés, plus le modèle de base l'habitation (calibré)

7.5.4 Synthèse de l'optimisation de la ventilation

Suite à l'application de différents types de ventilation sur les modèles optimisés par les techniques issues des stratégies vernaculaires de la région des Ziban, il est remarqué que la ventilation adaptative surpasse de manière significative la ventilation nocturne en termes d'heures de confort annuelles. Il est également observé que la stratégie vernaculaire de la ventilation nocturne n'est pas toujours efficace et peut parfois avoir des effets négatifs.

Le ratio fenêtre/mur joue un rôle primordial dans l'efficacité de la ventilation adaptative. En effet, ce ratio est directement proportionnel à l'efficacité de la ventilation adaptative, car une plus grande fenêtre permet une extraction plus rapide de l'air chaud, ce qui se traduit par davantage d'heures de confort. De plus, la ventilation adaptative permet d'atténuer les températures élevées dues à l'exposition solaire, ce qui permet d'utiliser d'autres techniques vernaculaires comme la Raouzna. Il est également souligné que la stratégie de ventilation est un complément essentiel à la stratégie d'inertie thermique. Sans la stratégie de ventilation, la stratégie d'inertie thermique ne peut pas être efficace, voire avoir des effets négatifs (surchauffe). Enfin, il est observable que la stratégie de ventilation est aussi importante que la stratégie de protection solaire dans la conception des habitations contemporaines avec des techniques vernaculaires dans les zones chaudes et arides.

7.6 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application des techniques vernaculaires optimisées, issues des stratégies adaptatives de la région des Ziban, a été effectuée sur une habitation réelle. Cela a été réalisé après avoir soumis le modèle numérique de l'habitation à un processus rigoureux de calibration et de validation, lui permettant ainsi de reproduire fidèlement le comportement thermique de l'habitation réelle.

Au début de l'application, les trois meilleures configurations en termes de confort thermique et visuel, sélectionnées parmi les 432 configurations étudiées dans le chapitre précédent, ont été utilisées afin de vérifier concrètement les résultats de l'optimisation des techniques vernaculaires sur le confort thermique et visuel. Les résultats de l'application de ces trois configurations ont permis d'identifier deux modèles très performants qui ont pu être utilisés comme modèles de test pour l'optimisation de la stratégie de ventilation.

Les résultats ont démontré que le ratio d'efficacité de la technique Raouzna est de 7 % de la surface du toit. Son agrandissement sans nécessité ne ferait que réduire les heures de confort. De plus, la technique de Raouzna et du mur massif sont complétées par la stratégie de ventilation, qui peut être optimisée en passant d'une ventilation aléatoire à une ventilation contrôlée et dirigée, spécifique à chaque espace, désignée ventilation adaptative. Cette dernière est une stratégie aussi importante que la protection solaire, car elle permet de dissiper la quantité d'énergie non nécessaire accumulée par les radiations solaires journalière. Cette stratégie est proportionnelle au ratio fenêtre/mur dans le cas des ratios de 5 et 20 %. L'efficacité de cette stratégie, qui complète plusieurs autres, est également démontrée par les résultats du chapitre précédent où deux habitations vernaculaires ont été comparées : l'une ventilée (celle de Farfar) et l'autre non ventilée (celle du Mcid).

Par conséquent, cela permet de conclure que l'optimisation des techniques vernaculaires basée sur les stratégies adaptatives de la région des Ziban a permis de les adapter et de les améliorer afin qu'elles puissent répondre aux exigences de l'architecture contemporaine. Les techniques vernaculaires optimisées doivent être positionnées en synergie les unes avec les autres afin de fournir de meilleurs résultats pour une habitation contemporaine confortable sur le plan thermique et visuel.

Conclusion générale

I) Synthèse générale et principaux résultats

L'architecture vernaculaire, aussi connue sous le nom d'architecture traditionnelle ou populaire, se distingue par son ancrage dans les pratiques locales, les matériaux et les techniques de construction propres à chaque région. Dans les zones arides, les conditions environnementales sont souvent rigoureuses, caractérisées par des radiations solaires extrêmes et une faible humidité avec des températures pouvant dépasser les 45°C pendant la saison estivale. Cependant, l'architecture vernaculaire a pu contrecarrer ces contraintes climatiques extrêmes en mettant en œuvre des techniques architecturales spécifiques et adaptatives développées à travers le temps en fonction des moyens disponibles et des ressources locales.

Cette étude s'inscrit dans le sillage des travaux focalisés sur l'architecture vernaculaire et prend la région chaude et aride des Ziban comme cas d'étude. Son but primordial est d'identifier les diverses techniques et stratégies architecturales et urbaines passives, susceptibles d'améliorer les performances thermiques et visuelles des bâtiments contemporains. Ensuite, ces techniques seraient optimisées, facilitant ainsi leur intégration au sein des habitations modernes. En effet, l'hypothèse qui a fondé l'investigation admet qu'en combinant les techniques optimisées issues des stratégies adaptatives vernaculaires aux contraintes conceptuelles contemporaines, il serait envisageable de concevoir des bâtiments qui répondent aux exigences de confort thermique et de confort visuel tout en s'adaptant aux besoins architecturaux actuels. Dans cette perspective, une évaluation architecturale du confort thermique et visuelle des différentes techniques architecturales basées sur des stratégies passives a été menée selon un raisonnement déductif rigoureux et une approche qui utilise des méthodes qualitatives et quantitatives expérimentales.

Dans la première partie de la thèse, une étude théorique a été menée dans le but d'exposer les relations entre les performances thermiques et visuelles des bâtiments, ainsi que les techniques de construction adaptatives propres aux régions chaudes et arides. Les objectifs de cette partie étaient les suivants :

- Cerner les mécanismes ingénieux utilisés dans les techniques vernaculaires et les stratégies adaptatives propres aux régions chaudes et arides, afin d'améliorer les paramètres de confort thermique et visuel des bâtiments.
- Identifier les techniques vernaculaires à travers le monde qui ont démontré leur capacité à produire des stratégies adaptatives au climat chaud et aride. Ceci permettrait de trouver des analogies avec les techniques vernaculaires adaptatives spécifiques à la région des Ziban.

Cette partie a été clôturée par l'identification et la présentation des Ksour dans la région des Ziban, à travers la visite sur site ce qui a permis d'évaluer l'état des Ksour. Malheureusement, la plupart de ces établissements humains ont été laissés à l'abandon ou détruits. Ces transformations ont donné lieu à de nouvelles conceptions architecturales et urbaines qui ne sont pas adaptées à la réalité locale en termes de climat et d'environnement physique.

Dans la seconde partie de la thèse, une étude approfondie de l'état actuel des connaissances dans le domaine de l'architecture adaptée aux climats chauds et arides a été réalisée. Les méthodes scientifiques couramment employées pour extraire, évaluer et adapter les stratégies vernaculaires passives dans ce domaine ont été examinées en détail. Le travail de recherche a été situé dans son contexte en relation avec la littérature existante, et les différentes méthodologies utilisées pour mener la recherche ont été exposées.

Par la suite, une section consacrée à l'extraction des techniques vernaculaires des stratégies passives propres à la région des Ziban a été développée avec minutie. Cette étape a permis d'approfondir la connaissance des caractéristiques architecturales spécifiques de cette région. Pour extraire les stratégies propres à la région des Ziban ; une analyse basée sur l'observation a été entreprise, visant à comparer les stratégies utilisées dans les zones arides avec celles spécifiques aux Ziban. Cette démarche a permis de mettre en évidence les particularités de cette région. Les résultats ont révélé que certaines techniques et dispositifs urbains étaient partagés à la fois par les zones arides et la région des Ziban, démontrant ainsi une certaine similarité dans les stratégies déployées pour faire face aux conditions climatiques chaudes et arides. Cependant, des différences significatives ont également été observées dans les techniques architecturales vernaculaires, mettant en évidence des adaptations spécifiques aux caractéristiques uniques de la région des Ziban.

Plus précisément, au niveau de l'échelle urbaine ces techniques et dispositifs englobent le choix de l'emplacement des Ksour dans des terrains plats au sein des oasis, afin de bénéficier de la stratégie d'évaporation propre à l'effet de l'oasis. La compacité des bâtiments est également exploitée pour réduire l'impact du soleil. Les ruelles étroites et entrelacées du vieux ksar des Ziban présentent un rapport hauteur sur largeur (H/L) réduit, permettant ainsi d'accentuer l'ombrage et de minimiser l'exposition aux radiations solaires. De plus, la couverture des rues par des galeries urbaines appelées "skifa", ainsi que l'intégration de la végétation, notamment des palmiers, et l'irrigation

des cultures par le biais de canaux à ciel ouvert appelés "sagias", constituent des stratégies spécifiques à la région des Ziban pour faire face aux conditions climatiques difficiles.

En ce qui concerne les techniques et dispositifs architecturaux vernaculaires de la région des Ziban, en plus de la technique du mur massive qui accentue la stratégie d'inertie thermique, il a été constaté que les ouvertures sont conçues pour minimiser l'exposition directe aux rayons du soleil tout en favorisant une circulation d'air adéquate. Ces ouvertures sont positionnées en hauteur sur les murs et orientées vers la cour intérieure. Un dispositif d'éclairage et de ventilation propre à la région des Ziban, nommé "raouzna", a également été présenté. Ce dispositif se manifeste sous la forme d'une ouverture zénithale placée au centre de l'espace central de l'habitation, appelée "west-eddar". La "raouzna" permet d'éclairer l'espace central tout en évacuant le surplus de gain de chaleur interne par effet thermosiphon.

Dans l'architecture vernaculaire des régions chaudes et arides à l'échelle mondiale, d'autres dispositifs ont été développés tels que les "malqaf" (attrapes-vent), les cheminées solaires, les fontaines et les "serdab" (espaces enterrés). Cependant, dans la région des Ziban, ces éléments sont absents. En revanche, on observe la présence de claustras et de moucharabiehs, bien que ces derniers soient rarement utilisés dans les ksour des Ziban, car la plupart des ouvertures sont orientées vers l'intérieur notamment la cour centrale selon le principe de l'introversion.

Les différences dans les techniques et les dispositifs utilisés dans la construction vernaculaire dans les Ziban par rapport à l'architecture vernaculaire d'autres régions chaudes et arides s'expliquent par les spécificités propres aux conditions sociales, culturelles et environnementales de la région des Ziban. Ces adaptations témoignent de la prise en compte des besoins et des contraintes particulières de ce contexte spécifique, contribuant ainsi à l'unicité de l'architecture vernaculaire Zibanaise.

Cette partie du travail a permis d'approfondir la compréhension des connaissances actuelles dans le domaine de l'architecture adaptée aux climats chauds et arides, grâce à l'identification et à l'analyse des techniques architecturales vernaculaires spécifiques à la région des Ziban. En outre, elle a apporté une contribution à la recherche dans le domaine de l'architecture vernaculaire, en élargissant le répertoire des techniques vernaculaires adaptatives aux climats chauds et arides. Cela a été réalisé grâce à une identification et à une comparaison de ces techniques vernaculaires des Ziban avec les techniques vernaculaires adaptatives au climat chaud et aride, provenant d'autres régions du monde.

Par la suite, une partie complémentaire à la précédente a été consacrée à la quantification des performances thermiques et visuelles des stratégies vernaculaires spécifiques à la région des Ziban. Cette étape avait pour objectif d'évaluer de manière objective l'efficacité et l'impact de ces stratégies sur le confort thermique et visuel des occupants. Des mesures hygrothermiques et d'éclairage ont été effectuées sur deux habitations : l'une située dans le Ksar de Farfar et l'autre dans le quartier de Mcid (vieux Biskra). Ces deux habitations présentent des configurations architecturales différentes, mais sont toutes deux localisées dans la même région des Ziban. Il est à noter que le site de Farfar est un exemple authentique de l'architecture vernaculaire, préservant toutes les techniques architecturales et urbaines de l'ancien ksar. En revanche, le site de Mcid a subi une mutation partielle de son environnement urbain vernaculaire, entraînant l'altération et voire même la disparition de certaines stratégies passives.

Les résultats obtenus démontrent que l'habitation de Farfar présente des avantages notables par rapport à celle du Mcid. En ce qui concerne les performances thermiques, les mesures de température intérieure ont révélé que l'habitation de Farfar maintient des conditions plus stables tout au long de la journée, avec des écarts de température moins importants par rapport à l'habitation du Mcid. Également, les niveaux d'humidité à l'intérieur de la maison de Farfar sont mieux adaptés à la zone de confort par rapport à la maison du Mcid.

Ces résultats ont clairement démontré que l'adoption des techniques vernaculaires adaptatives au climat doit être globale, en prenant en compte à la fois l'échelle urbaine et l'échelle architecturale. En effet, les performances thermiques des habitations au sein d'un environnement urbain vernaculaire authentique ont été supérieures à celles situées dans un environnement urbain vernaculaire altéré. La raison en est la synergie qui existe entre toutes les techniques, de l'échelle urbaine à l'échelle architecturale, et vice versa, ce qui crée des espaces confortables à l'intérieur de l'habitation. L'absence ou l'altération d'une technique spécifique peut réduire considérablement la performance globale de l'habitation. Ainsi, l'approche intégrale de l'architecture vernaculaire s'avère essentielle pour assurer un confort thermique dans les bâtiments contemporains de la région des Ziban.

Dans un autre volet, les mesures d'éclairage effectuées dans les maisons de Farfar et Mcid ont révélé des niveaux relativement bas dans les espaces de vie, tout en n'étant pas conformes aux exigences des habitations contemporaines en termes de confort visuel. Cependant, les espaces menus de raouzna bénéficiaient de taux d'éclairage acceptables. Ce résultat démontre que les

techniques de conception vernaculaire peuvent améliorer la performance thermique des bâtiments, mais elles ne répondent pas nécessairement aux exigences en matière d'éclairage naturel dans les espaces internes des habitations contemporaines.

Pour cela, il est primordial d'intégrer ces techniques d'une manière globale et intégrale, en cherchant des combinaisons de techniques vernaculaires sous forme de configurations architecturales qui optimisent le confort thermique tout en assurant un éclairage naturel adéquat dans les espaces internes des bâtiments. Il s'agit de trouver un équilibre entre les paramètres de conception des techniques vernaculaires adaptatives au climat et les exigences modernes en matière de performance thermique et visuelle, afin de créer des espaces intérieurs confortables et bien éclairés dans les habitations contemporaines de la région des Ziban.

Dans cette optique, la suite du travail s'est concentrée sur l'optimisation des techniques vernaculaires adaptatives au climat dans le contexte d'une habitation contemporaine typique de la ville de Biskra, capitale de la région des Ziban. Une étude paramétrique a ainsi été menée sur un modèle hypothétique représentant cette habitation individuelle contemporaine, dans le but de déterminer la combinaison et la configuration optimales de ces techniques afin de répondre aux exigences thermiques et visuelles actuelles.

Le processus a débuté par la création d'un modèle virtuel urbain inspiré de l'architecture résidentielle contemporaine, qui intègre divers aspects essentiels tels que le type d'habitations le plus fréquent, la forme d'îlot la plus répandue, l'orientation optimale pour l'îlot, ainsi que les superficies et les proportions de parcelles les plus courantes. Par la suite, l'accent a été mis sur le développement de variantes architecturales représentatives d'habitations individuelles contemporaines, adoptant des configurations architecturales largement utilisées, tout en prenant en compte les contraintes urbaines locale. L'objectif était de rapprocher les techniques vernaculaires adaptatives au climat avec les normes et exigences modernes en matière de confort thermique et visuel, tout en tenant compte des contraintes spécifiques à l'environnement urbain de Biskra.

Ensuite, dans le but d'atteindre une optimisation paramétrique des performances thermique et visuelle du modèle, différents paramètres inhérents aux stratégies vernaculaires passives de la région des Ziban ont été rigoureusement manipulés. Cela incluait les dimensions des ouvertures, les hauteurs des allèges des ouvertures du rez-de-chaussée, la dimension de la Raouzna, ainsi que les matériaux utilisés pour les murs. Un panel de variantes murales a également été étudié, avec

une attention particulière portée sur le béton de terre comprimée (BTCS) et ses propriétés thermiques avantageuses, qui offre la stratégie de l'inertie thermique sans porter les inconvénients physiques associés aux techniques de construction en adobe vernaculaire.

Cette étude paramétrique a permis d'explorer un large éventail de possibilités (scénarios) pour optimiser la conception architecturale des habitations contemporaines tout en préservant des techniques vernaculaires de la région des Ziban. A ce titre, les résultats de l'optimisation paramétrique ont démontré l'impact significatif des paramètres des techniques vernaculaires sur le modèle hypothétique contemporain. L'intégration des stratégies vernaculaires propres à la région des Ziban a permis une amélioration notable de la régulation thermique et du confort visuel. Plus précisément, les stratégies liées à la masse thermique et à la hauteur des appuis de fenêtre ont apporté une contribution significative au confort thermique, tandis que la stratégie de la raouzna a amélioré le confort visuel. Cette partie a été conclue par la sélection de trois différentes combinaisons de techniques architecturales optimisées. La première met l'accent sur le confort thermique, la deuxième sur le confort visuel, et la dernière propose un équilibre harmonieux entre performances thermiques et visuelles.

En dernier lieu, une application des techniques vernaculaires optimisées, dérivées des stratégies adaptatives de la région des Ziban, a été réalisée sur une habitation réelle. Le modèle numérique de l'habitation a été calibré et validé pour reproduire fidèlement ses comportements thermique et visuel. Ensuite, les trois configurations offrant le meilleur confort thermique et visuel ont été utilisées pour vérifier concrètement les résultats de l'optimisation des techniques vernaculaires. Les résultats ont prouvé que les configurations de techniques vernaculaires optimisées surpassent nettement l'habitation existante. Deux modèles très performants ont été identifiés parmi les trois combinaisons précédentes, et le modèle avec un ratio de fenêtre/mur de 5% a montré une meilleure performance thermique que celui avec un ratio de 20%. Enfin, ces deux modèles ont été utilisés comme référence pour optimiser la stratégie de ventilation nocturne largement utilisée dans les zones chaudes et arides, mais absente dans l'habitation vernaculaire du Mcid qui a réduit ses performances thermiques par rapport à l'habitation vernaculaire de Farfar.

Les résultats ont démontré que la stratégie de ventilation nocturne optimisée en ventilation adaptative, c'est-à-dire une ventilation contrôlée dans chaque espace en fonction des besoins internes et des conditions climatiques externes, a considérablement amélioré le confort thermique dans les deux modèles. L'efficacité de cette stratégie est proportionnelle au ratio fenêtre/mur pour les ratios

de 5 et 20 %. Cette relation proportionnelle a poussé à considérer comme le plus performant, le modèle construit en double mur en BTC, avec ou sans isolation, s'ouvrant par un ratio de fenêtre/mur de 20 %, une hauteur d'allège de fenêtres du rez-de-chaussée à 3 mètres du sol et une surface de raouzna de 7 % par rapport à la surface du toit, ventilé de manière adaptative. Cette configuration illustre l'optimisation et l'intégration judicieuse des stratégies passives issues des techniques vernaculaires adaptatives au climat chaud et aride de la région des Ziban dans le contexte des exigences de l'architecture contemporaine pour accentuer les performances thermiques et visuelles des habitations.

Au final, cette thèse a pu examiner en profondeur l'architecture vernaculaire de la région des Ziban et a évalué ses performances thermiques dans le contexte des conditions climatiques chaudes et sèches. L'objectif était d'identifier les techniques architecturales et urbaines issue des stratégies passives utilisées dans cette région et de les adapter aux exigences des bâtiments contemporains afin d'améliorer le confort thermique et visuel. En intégrant ces stratégies vernaculaires dans la conception architecturale contemporaine, il est possible de créer des bâtiments durables et économes en énergie qui offrent un confort thermique adéquat aux occupants. Ces résultats ont des implications significatives pour la conception de nouveaux bâtiments dans les régions chaudes et arides, où le confort thermique est un enjeu majeur. Cependant, il convient de noter que l'adoption généralisée de ces techniques vernaculaires dans l'architecture contemporaine nécessite une prise de conscience et une sensibilisation des architectes, des ingénieurs et des décideurs. Il est également important de mener davantage de recherches et de tests sur le terrain pour affiner ces techniques et les adapter à des contextes spécifiques.

II) Limitations de l'étude

Bien que la recherche a étudié en profondeur les techniques vernaculaires spécifiques à la région des Ziban et a évalué leurs performances thermique et visuel, il convient de souligner certaines limites qui méritent d'être investies et examinées dans des travaux futurs. Les points suivants mettent en évidence les aspects restreints de l'étude, nécessitant une approche plus approfondie pour une meilleure compréhension.

1. Disparition de certaines techniques vernaculaire : la plupart des ksour ont été détruits ou abandonnés, ce qui signifie qu'il existe peut-être des techniques ou stratégies architecturales qui ont disparu ou que l'auteur n'a pas pu identifier dans son étude.

2. Le manque d'analyse d'une technique : la technique du claustra, largement utilisée dans la région des Ziban, a été identifiée mais n'a pas été évaluée ni intégrée dans ce travail. L'introduction de cette technique aurait pu potentiellement offrir d'autres combinaisons intéressantes avec les stratégies existantes pour améliorer le confort thermique et visuel.
3. Limitations de l'échantillonnage : L'échantillonnage des mesures thermiques réalisées sur les deux maisons est de petite taille, ce qui limite la généralisation des résultats. Une comparaison plus étendue impliquant un plus grand nombre de maisons aurait permis une analyse plus complète et fiable des performances thermiques des différentes habitations et leurs techniques.
4. Limitations de l'analyse par simulation : L'analyse des techniques architecturales est principalement basée sur des simulations, mais ces simulations sont limitées par les méthodes et outils utilisées, en particulier pour les techniques basées sur la stratégie de la ventilation, qui nécessitent une évaluation plus détaillée à l'aide de simulations CFD (Simulations numériques de dynamique des fluides). Par conséquent, certaines stratégies pourraient ne pas avoir été pleinement évaluées ou leur efficacité peut avoir été sous-estimée.
5. Le calibrage du modèle numérique de l'habitation existante a été effectuée en se basant sur des mesures thermiques prises pendant les mois de transition, à la fin d'octobre et au début de novembre. L'utilisation de mesures prises pendant des mois d'hiver ou d'été aurait pu permettre une comparaison avec les pics de température du modèle numérique et de l'habitation réelle, ce qui aurait pu aboutir à un modèle plus précis et valide.
6. Limite du logiciel Energyplus (Version 22.2.0-aa78da9668) : Lors de l'étape d'optimisation paramétrique et d'application des techniques, en raison de l'utilisation de la technique de la Raouzna (fenêtre horizontale), la méthode du réseau de circulation d'air (Air Flow Network) qui représente mieux la dynamique des fluides au cours de la simulation n'a pas pu être utilisée en raison d'erreurs liées à l'utilisation d'une fenêtre horizontale. À la place, une méthode plus simplifiée, la méthode "WindandStackOpenArea", a été utilisée comme indiqué dans Annexe-A-II.

III) Perspectives et travaux futurs

L'étude des stratégies vernaculaires adaptatives dans la région des Ziban ouvre de nombreuses perspectives pour des recherches supplémentaires visant à améliorer la compréhension et l'efficacité des techniques architecturales traditionnelles dans le contexte contemporain. Parmi celles-ci, on peut notamment citer les suivantes :

1. Étude approfondie des stratégies perdues ou non identifiées : Il est essentiel d'explorer les anciennes techniques de construction qui ont été perdues ou qui n'ont pas été identifiées dans cette recherche. Cela pourrait impliquer des recherches archéologiques, des entretiens avec les habitants locaux et l'examen de documents historiques pour reconstruire ces connaissances perdues.
2. Élargissement de l'échantillonnage : Une étude plus exhaustive nécessite l'inclusion d'un plus grand nombre de maisons pour des mesures thermiques. Cela permettra d'obtenir une compréhension plus précise des performances thermiques des différentes typologies architecturales vernaculaire présentes dans la région.
3. Utilisation de simulations CFD pour évaluer les stratégies complexes : Certaines techniques architecturales vernaculaire nécessitent une évaluation plus détaillée à l'aide de simulations de la dynamique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics). Il serait intéressant de mener des études approfondies en utilisant cet outil pour évaluer avec précision l'efficacité des systèmes de ventilation et d'autres stratégies complexes.
4. L'inclusion des paramètres énergétiques dans l'évaluation : étant donné que l'application des stratégies passives à travers les techniques vernaculaires ne pourra jamais procurer un confort total à toutes les heures pendant les périodes estivales, en raison des températures élevées de jour et de nuit qui dépassent la plage de confort, l'intégration des paramètres de consommation énergétique et de dimensionnement des systèmes de climatisation dans l'étude paramétrique ouvrirait de nouvelles perspectives et pourrait fournir des résultats intéressants.

5. Le test in situ de la ventilation adaptative : étant donné la grande efficacité de la ventilation adaptative au niveau de la simulation numérique, il serait intéressant de vérifier concrètement son efficacité à travers son application réelle et des mesures thermiques sur le terrain, en automatisant l'ouverture et la fermeture des ouvertures d'une habitation individuelle existante.

Bibliographie

Automatic citation updates are disabled. To see the bibliography, click Refresh in the Zotero tab.

Annexes

Annexe-A

A-I. Donnée métrologique comme entrée du fichier EPW

- **Année** : L'année des données météorologiques.
- **Mois** : Le mois des données météorologiques.
- **Jour** : Le jour des données météorologiques.
- **Heure** : L'heure des données météorologiques.
- **Minute** : La minute des données météorologiques.
- **Source de données et drapeaux d'incertitude** : Drapeaux indiquant la source des données et leur incertitude.
- **Température de bulbe sec** : La température de l'air mesurée par un thermomètre exposé librement à l'air mais protégé des radiations et de l'humidité.
- **Température du point de rosée** : La température à laquelle l'air doit être refroidi pour être saturé de vapeur d'eau.
- **Humidité relative** : La quantité de vapeur d'eau présente dans l'air exprimée en pourcentage de la quantité nécessaire pour la saturation à la même température.
- **Pression atmosphérique de la station** : La pression exercée par le poids de l'atmosphère en un point donné de la surface terrestre.
- **Rayonnement horizontal extraterrestre** : Le rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale en dehors de l'atmosphère terrestre.
- **Rayonnement direct normal extraterrestre** : Le rayonnement solaire reçu en dehors de l'atmosphère terrestre sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil.
- **Intensité du rayonnement infrarouge horizontal** : L'intensité du rayonnement infrarouge reçu sur une surface horizontale provenant du ciel.
- **Rayonnement global horizontal** : La quantité totale de rayonnement à ondes courtes reçue d'en haut par une surface horizontale. Cette valeur est la somme du rayonnement direct et diffus.
- **Rayonnement direct normal** : La quantité de rayonnement solaire reçue par unité de surface par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil.
- **Rayonnement diffus horizontal** : La quantité de rayonnement solaire reçue par unité de surface par une surface horizontale provenant du ciel, à l'exclusion du rayonnement solaire direct.
- **Éclairement global horizontal** : L'éclairement total incident sur une surface horizontale provenant à la fois de sources naturelles et artificielles. Il est exprimé en lux (lumens par mètre carré).
- **Éclairement direct normal** : L'éclairement sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil, produit par la lumière directe du soleil. Il est exprimé en lux (lumens par mètre carré).
- **Éclairement diffus horizontal** : L'éclairement sur une surface horizontale produit par la lumière diffusée par l'atmosphère. Il est exprimé en lux (lumens par mètre carré).
- **Luminance zénithale** : La luminance au point directement au-dessus. Elle est exprimée en candelas par mètre carré (cd/m²).

- **Direction du vent** : La direction d'où vient le vent, mesurée en degrés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord vrai.
- **Vitesse du vent** : La vitesse du vent, mesurée en mètres par seconde (m/s).
- **Couverture totale du ciel** : La fraction du dôme céleste couverte par des nuages ou des phénomènes obscurcissant.
- **Couverture opaque du ciel** : La fraction du dôme céleste couverte par des nuages ou des phénomènes obscurcissant qui empêchent d'observer le ciel ou les couches nuageuses supérieures à tous les points.
- **Visibilité** : Une mesure de la transparence atmosphérique, définie comme la plus grande distance à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet sombre proéminent contre le ciel d'horizon pendant la journée ou une source lumineuse connue, de préférence non focalisée, modérément intense la nuit. Elle est exprimée en kilomètres (km).
- **Hauteur du plafond** : La hauteur au-dessus du niveau du sol (AGL) de la couche la plus basse de nuages ou de phénomènes obscurcissant qui est signalée comme "brisée", "couverte" ou "obscurcissement" et non classée comme "mince" ou "partielle". Elle est exprimée en pieds (FT).
- **Observation météorologique actuelle** : Un code représentant les conditions météorologiques actuelles observées à une station météorologique.
- **Codes météorologiques actuels** : Codes représentant les conditions météorologiques actuelles observées à une station météorologique.
- **Eau précipitable** : Une mesure de la profondeur de l'eau liquide à la surface terrestre qui résulterait de la précipitation de toute la vapeur d'eau dans une colonne atmosphérique. Elle est exprimée en millimètres (mm).
- **Profondeur optique des aérosols** : Une mesure de la quantité de lumière solaire empêchée de traverser l'atmosphère terrestre en raison d'aérosols tels que la poussière, la fumée et le brouillard.
- **Profondeur de neige** : La profondeur de la neige au sol, mesurée en centimètres (cm).
- **Jours depuis la dernière chute de neige** : Le nombre de jours écoulés depuis la dernière chute de neige à un endroit donné.
- **Albédo** : Une mesure de la quantité de lumière solaire réfléchiée par la surface terrestre. Elle est exprimée sous forme d'une fraction sans dimension entre 0 et 1.
- **Profondeur des précipitations liquides** : La profondeur des précipitations liquides tombées pendant une période donnée. Elle est exprimée en millimètres (mm).

Quantité de précipitations liquides : La quantité de précipitations liquides tombées pendant une période donnée.

Annexe-B

B-III. Script avec le langage de programmation Python qui a été développé pour examiner les parcelles des habitations individuelles en utilisant la bibliothèque Open CV.

```
import cv2
import numpy as np
import os

def traiter_images(chemin_dossier, chemin_sortie):
    # Obtenir une liste de toutes les images dans le dossier
    images = [fichier for fichier in os.listdir(chemin_dossier) if fichier.endswith(".jpg") and fichier.startswith("test")]

    for nom_image in images:
        # Charger l'image
        image = cv2.imread(os.path.join(chemin_dossier, nom_image))

        # Convertir l'image en niveaux de gris
        gris = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

        # Appliquer un seuillage à l'image pour créer une image binaire
        _, seuil = cv2.threshold(gris, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY_INV + cv2.THRESH_OTSU)

        # Trouver les contours dans l'image binaire
        contours, _ = cv2.findContours(seuil, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

        # Dessiner des rectangles autour des contours
        for contour in contours:
            x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
            cv2.rectangle(image, (x, y), (x + w, y + h), (0, 255, 0), 2)

        # Enregistrer l'image de sortie
        cv2.imwrite(os.path.join(chemin_sortie, f"contours_{nom_image}"), image)
```

B-IV. Script avec le langage de programmation Python qui a été développé pour modifier les fichiers IDF (Input Data File).

```
import os
import re

# Chemin du dossier contenant les fichiers IDF
dossier_chemin = r"/mnt/f/thesis simul/Results/calibration/test"

# Liste des fichiers IDF dans le dossier
idf_fichiers = [fichier for fichier in os.listdir(dossier_chemin) if fichier.endswith(".idf")]

# Sélection du premier fichier IDF de la liste
fichier_selectionne = os.path.join(dossier_chemin, idf_fichiers[0])

# Listes de valeurs de densité et conductivité thermique
densites = [str(2000 + (i * 57)) for i in range(0, 8, 1)]
conducitivites = [1 + (i * 0.057) for i in range(0, 8, 1)]

# Lignes à rechercher dans le fichier IDF
ligne_a_trouver = "1.2,                               !- Conductivity"
deuxieme_ligne_a_trouver = "2115,                    !- Density {kg/m3}"
derniere_ligne_a_trouver = "0.15,                    !- Thickness"

# Boucles pour parcourir toutes les combinaisons de densité et conductivité thermique
for densite in densites:
    for conducitivite in conducitivites:
        with open(fichier_selectionne, "r") as fichier_idf:
            print(densite)
            nouveau_fichier = r"/mnt/f/thesis simul/Results/calibration/test/idfs/" + "cond" + str(
                round(float(conducitivite), 3)) + "_dens_" + str(round(float(densite), 3)) + ".idf"
            )
            print(nouveau_fichier)
            lignes = fichier_idf.readlines()
            lignes = [ligne.strip() for ligne in lignes]
            with open(nouveau_fichier, "w") as nouveau_fichier_idf:
                fichier_idf.seek(0)
                for i, ligne in enumerate(fichier_idf):
                    if ligne.find(ligne_a_trouver) > -1 and lignes[i - 1].find(
                        derniere_ligne_a_trouver) > -1 and i not in [0, 1]:
                        print("y")
                        nouvelle_ligne = str(re.sub("1,", str(round(conducitivite, 3)) + str(", "), ligne))
                        nouveau_fichier_idf.write(nouvelle_ligne)

                    elif ligne.find(deuxieme_ligne_a_trouver) > -1:
                        nouvelle_ligne = str(re.sub("2223", str(round(densite, 3)), ligne))
                        print(nouvelle_ligne)
                        nouveau_fichier_idf.write(nouvelle_ligne)

                    else:
                        nouveau_fichier_idf.write(ligne)
            nouveau_fichier_idf.close()
```

B-V. Script développé en langage de programmation Python qui permet d'envoyer les fichiers vers un serveur (Google Cloud/Azure) afin d'exécuter les simulations, puis de les télécharger à la fin des simulations.

- Partie-1

```
import os
import paramiko
import py7zr
from code_libs import check_and_create_directory as ccd, check_and_transfer_file as ccf, \
    remove_png_files as rmpng, copy_files_to_destination_dir as cftd, create_image_grid as image_grid, \
    modify_post_process_file, get_external_ip
from tqdm import tqdm
import time

# Chemins locaux
repertoire_local = '/mnt/f/thesis simul/Results/calibration/test/idfs/'
repertoire_sortie_local = '/mnt/f/thesis simul/Results/calibration/test/graphs_digital/'
fichier_epw_local = os.path.join(repertoire_local, 'DH_500_nh_100.epw')
fichier_ip_externe = "/mnt/f/thesis simul/Results/calibration/test/Libs/external_ip_digital.txt"

# Chemins distants
repertoire_travail_distant = "/home/adel_boumerzoug/simulation/idfs/"
fichier_epw_distant = os.path.join(repertoire_travail_distant, 'DH_500_nh_100.epw')
repertoire_sortie_distant = os.path.join(repertoire_travail_distant, 'output')

# Variables
archive_entree = "compressed.7z"
archive_sortie = "Png_graphs.7z"

# TO DO
modifier_fichiers_post_process = "On"
simuler = "On"
post_processor = "On"

# Modifier les fichiers post-process s'ils doivent être modifiés
modify_post_process_file(modifier_fichiers_post_process, num_columns=28, num_rows=5)

# Obtenir l'adresse IP externe du serveur distant
adresse_ip_externe = get_external_ip(fichier_ip_externe)

# Se connecter au serveur distant
ssh = paramiko.SSHClient()
ssh.set_missing_host_key_policy(paramiko.AutoAddPolicy())
pem_key = paramiko.RSAKey.from_private_key_file('/mnt/c/Users/boume/Downloads/Nkey.pem')
ssh.connect(hostname=adresse_ip_externe, username='root', pkey=pem_key)
print('Connexion au serveur établie.')

# Si les fichiers post-process doivent être modifiés
if modifier_fichiers_post_process == "On":
    sftp = ssh.open_sftp()
    ccf(sftp, "/mnt/f/thesis simul/Results/calibration/test/idfs/fixe/post_process_remote.py",
        os.path.join(repertoire_travail_distant, "post_process_remote.py"))
    sftp.close()
```

- Partie-2

```
# Si la simulation doit être effectuée
if simuler == "On":

    # Supprimer les anciens fichiers PNG
    rmpng(repertoire_sortie_local)
    print('Anciens fichiers PNG supprimés localement.')

    ssh.exec_command("cd repertoire_travail_distant")
    ssh.exec_command('sh /home/adel_boumerzoug/simulation/ids/remove_script.sh')
    print('Anciens fichiers supprimés du serveur distant.')

    # Créer le répertoire de sortie sur le serveur distant
    fichiers_idf = [fichier for fichier in os.listdir(repertoire_local) if fichier.endswith(".idf")]

    # Créer une archive
    os.chdir(repertoire_local)
    with py7zr.SevenZipFile(os.path.join(repertoire_local, archive_entree), 'w') as z:
        for fichier in fichiers_idf:
            z.write(fichier)

    # Exécuter les fichiers IDF comme une archive
    sftp = ssh.open_sftp()
    ccd(sftp, repertoire_sortie_distant)
    ccf(sftp, os.path.join(repertoire_local, archive_entree),
        os.path.join(repertoire_travail_distant, archive_entree))

sftp.close()

# Exécuter le fichier Python sur le serveur distant
print('7z x ' + str(os.path.join(repertoire_travail_distant, "compressed.7z")))
stdin, stdout, stderr = ssh.exec_command(
    '7z x ' + str(os.path.join(repertoire_travail_distant, "compressed.7z -y -o" + str(repertoire_travail_distant))))

for line in iter(stdout.readline, ""):
    print(line.strip())

# Exécuter le fichier Python sur le serveur distant
stdin, stdout, stderr = ssh.exec_command(
    'python3 ' + os.path.join(repertoire_travail_distant, "energyplusmultiprocess_remote.py"))

# Lire la sortie de la simulation en temps réel
for line in iter(stdout.readline, ""):
    print(line.strip())

# Télécharger les fichiers PNG
stdin, stdout, stderr = ssh.exec_command('python3 ' + os.path.join(repertoire_travail_distant, "plot_show_remote.py"))
```

- Partie-3

```

# Lire la sortie de la simulation en temps réel
for line in iter(stdout.readline, ""):
    print(line.strip())

# Si le post-process doit être effectué
if post_processor == "On":
    stdin, stdout, stderr = ssh.exec_command('python3 ' + os.path.join(repertoire_travail_distant, "post_process_remote.py"))

# Lire la sortie de la simulation en temps réel
for line in iter(stdout.readline, ""):
    print(line.strip())

sftp = ssh.open_sftp()
fichiers_sortie_distant = sftp.listdir(repertoire_sortie_distant)
for fichier_sortie_distant in fichiers_sortie_distant:
    if fichier_sortie_distant.endswith(".7z") or fichier_sortie_distant.endswith(".csv"):
        fichier_sortie_local = os.path.join(repertoire_sortie_local, os.path.basename(fichier_sortie_distant))

        sftp.get(os.path.join(repertoire_sortie_distant, fichier_sortie_distant), fichier_sortie_local)
        print(f"{fichier_sortie_distant} téléchargé")
sftp.close()

# Fermer la connexion SSH
ssh.close()
print('Connexion SSH fermée.')

# Extraire le groupe d'images
with py7zr.SevenZipFile(os.path.join(repertoire_sortie_local, archive_sortie), mode='r') as z:
    z.extractall(path=repertoire_sortie_local)

print("Groupe d'images extrait")

```

B-VI. Script Python développé pour calculer les heures de confort avec l'équation du confort adaptatif.

```

import os
import pandas as pd
from code_libs2 import calculate_comfort_hours, calculate_useful_cells, calculate_UDI_and_CH, calculate_weekly_average_dry_bulb_temperature
import csv
import honeybee_radiance

folder_path = "/mnt/h/TH_models"
epw_file = "/mnt/h/TH_models/fixed/Biskra-2050.epw"

Map_files = [file for file in os.listdir(folder_path) if file.endswith("map.csv")]
results_files = [file for file in os.listdir(folder_path) if file.startswith("i") and file.endswith(".csv") and not file.endswith("Meter.csv") and not file.endswith("")]

dict_hours = calculate_UDI_and_CH(Map_files, results_files, folder_path, epw_file)

data = pd.DataFrame(dict_hours, index=results_files, columns=list(dict_hours.keys()))
data.to_csv("/mnt/h/TH_models/inputs/comfort_visual_results.csv")

def calculate_comfort_hours_for_building(folder_path, results_file, epw_file_path):
    preveil_temp = calculate_weekly_average_dry_bulb_temperature(epw_file_path)[:8760]
    buildings = ["B1_F1", "B1_F2", "B2_F1", "B2_F2", "B3_F1", "B3_F2"]
    dict_t = {}
    dict_av_t = {}

    df = pd.read_csv(os.path.join(folder_path, results_file))
    for col in df.columns:
        for b in buildings:
            if "Operative" in col and b in col:
                dict_t[b] = df[col].tolist()

    for j in range(1, 4):
        avg_list = [(dict_t[f"B{j}_F1"][i] + dict_t[f"B{j}_F2"][i]) / 2 for i in range(len(dict_t["B1_F1"]))]
        n_comf_hours = [1 for i, e in enumerate(avg_list) if (0.33 * preveil_temp[i]) + 17.84 <= e <= (0.33 * preveil_temp[i]) + 22.46]
        dict_av_t[f"B{j}"] = n_comf_hours
        pourcentage_comfort_hours = round(len(dict_av_t[f"B{j}"]) / len(avg_list), 4)
        print(f"B{j}: {pourcentage_comfort_hours}")

results_files = [file for file in os.listdir(folder_path) if "csv" in str(file)]
for file in results_files:
    calculate_comfort_hours_for_building(folder_path, file, epw_file)

```

Annexe-C

C-I. Analyse de la forme des ilots pour plusieurs quartiers d'habitation individuelle de la ville de Biskra





C-II. Résultats de l'analyse de la forme des parcelles pour plusieurs quartiers d'habitation individuelle de la ville de Biskra, réalisée à l'aide du scan avec la bibliothèque OpenCV.

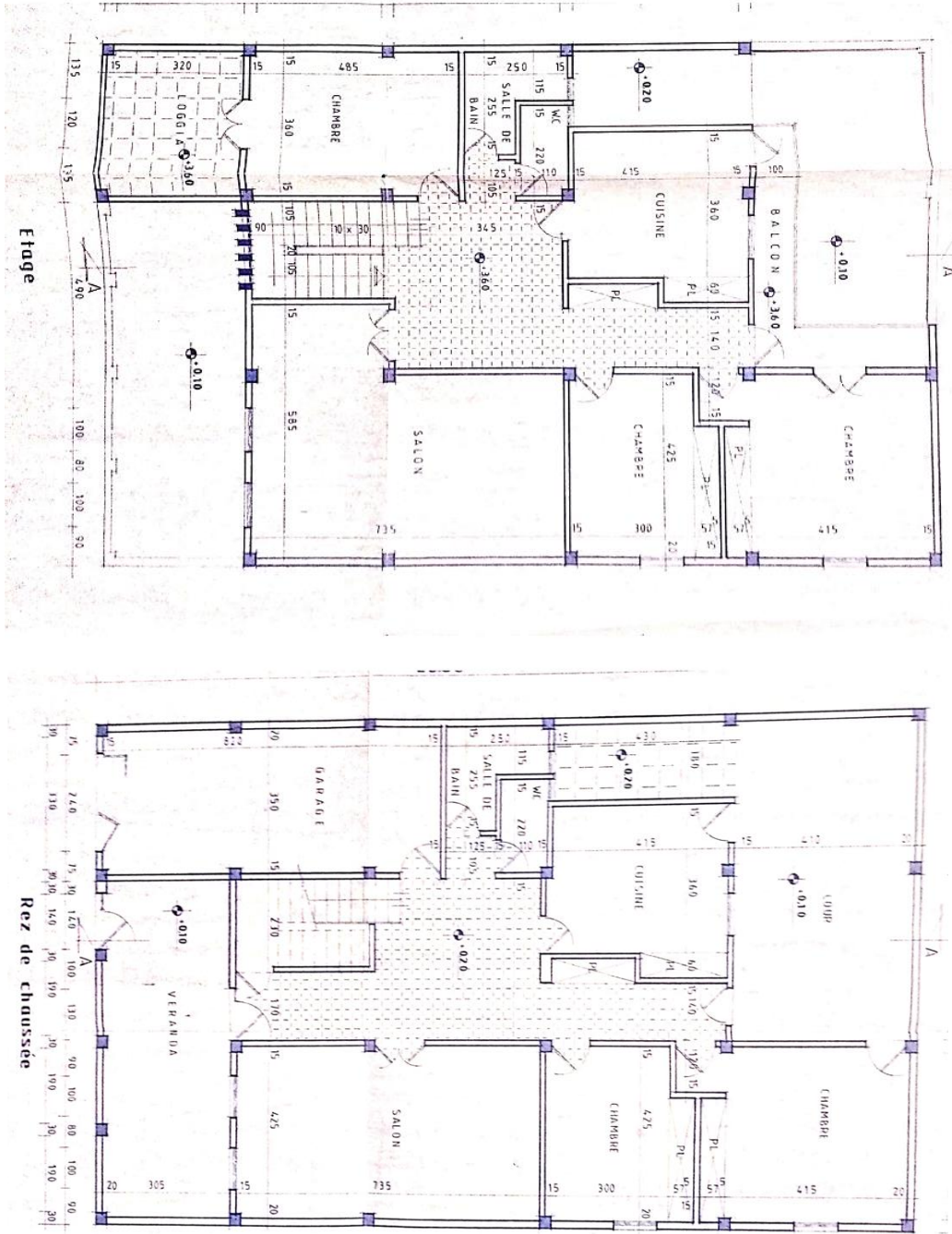


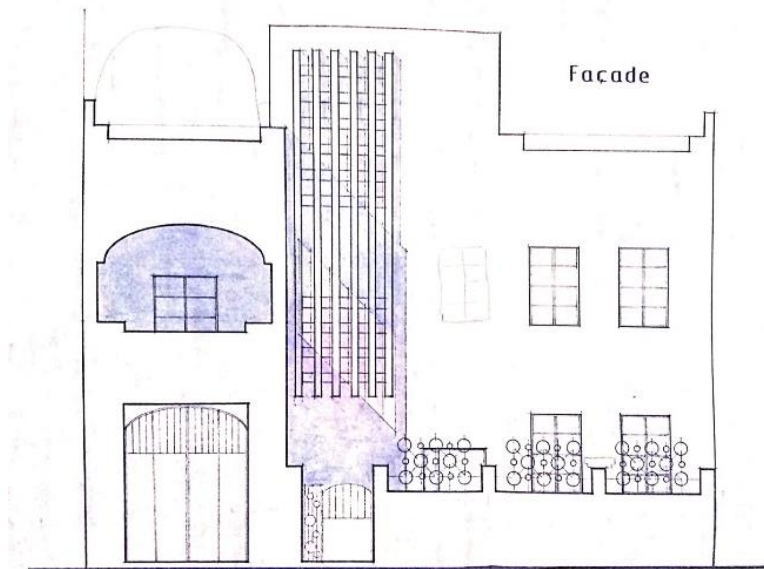
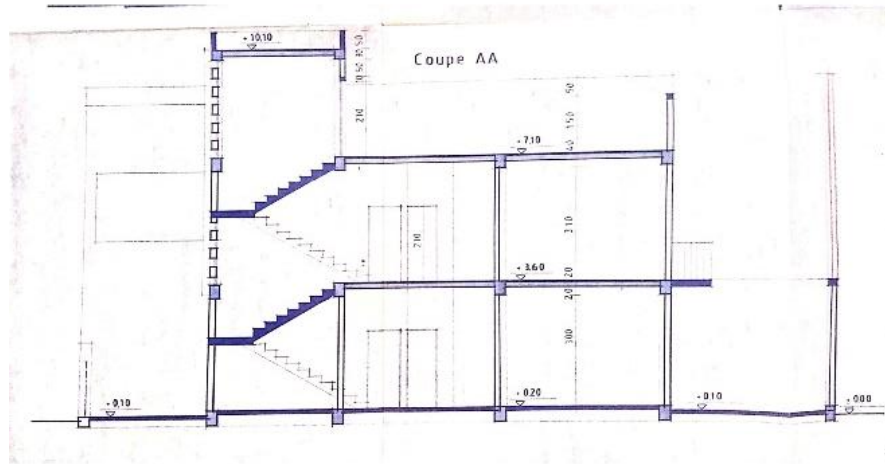
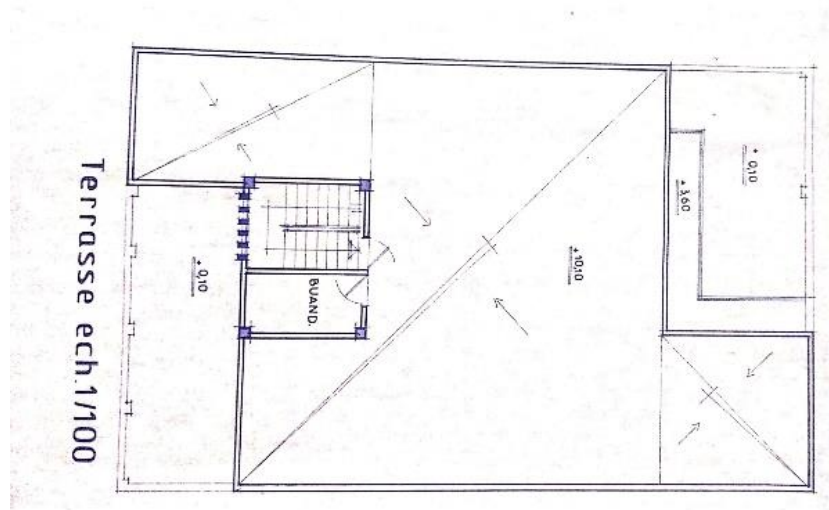




Annexe-D

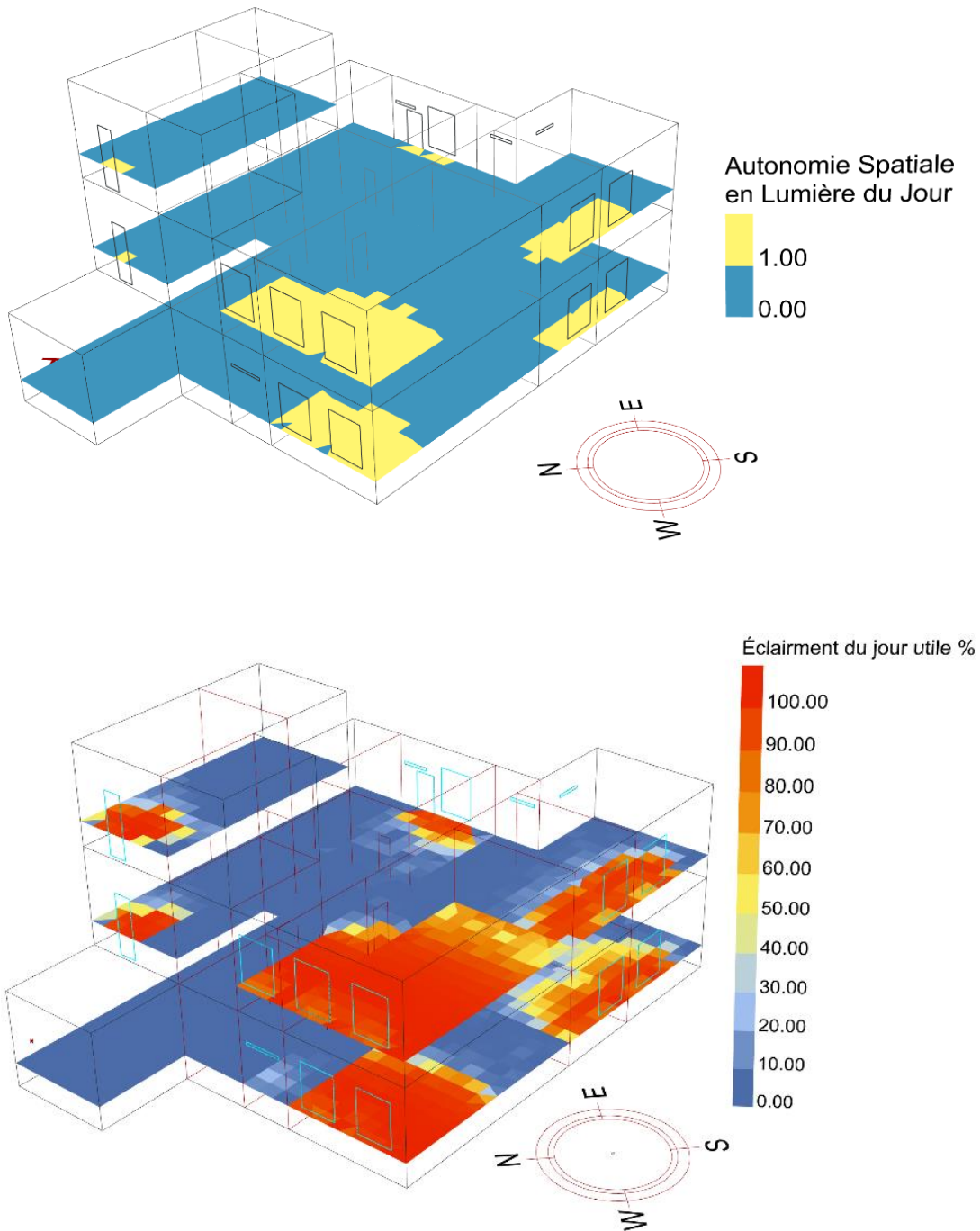
D-I. Documents architecturaux de l'habitation résidentielle



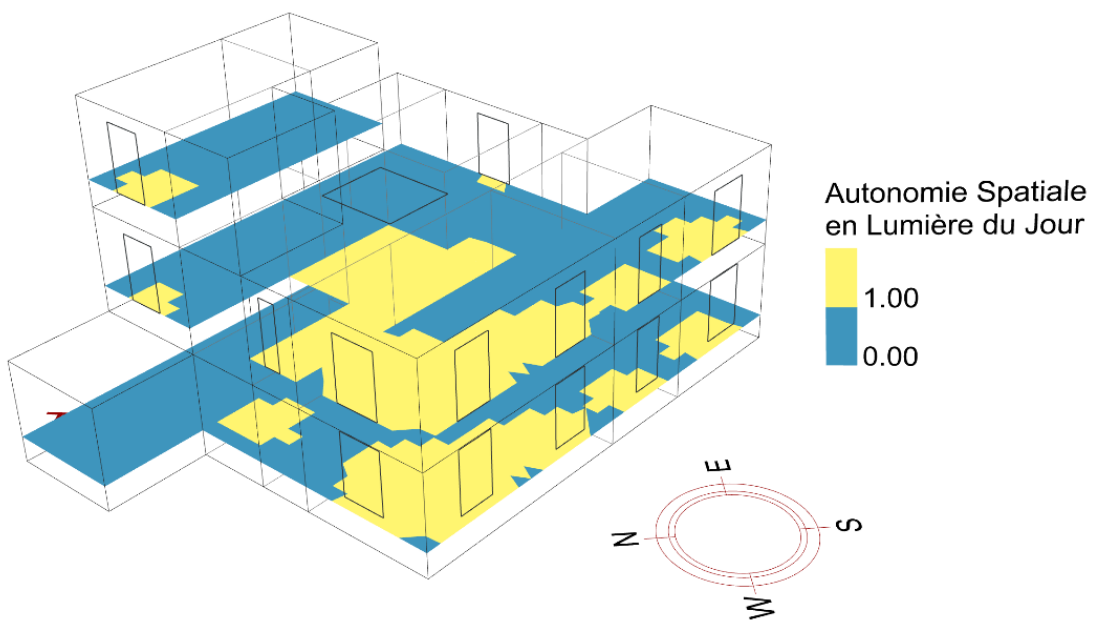
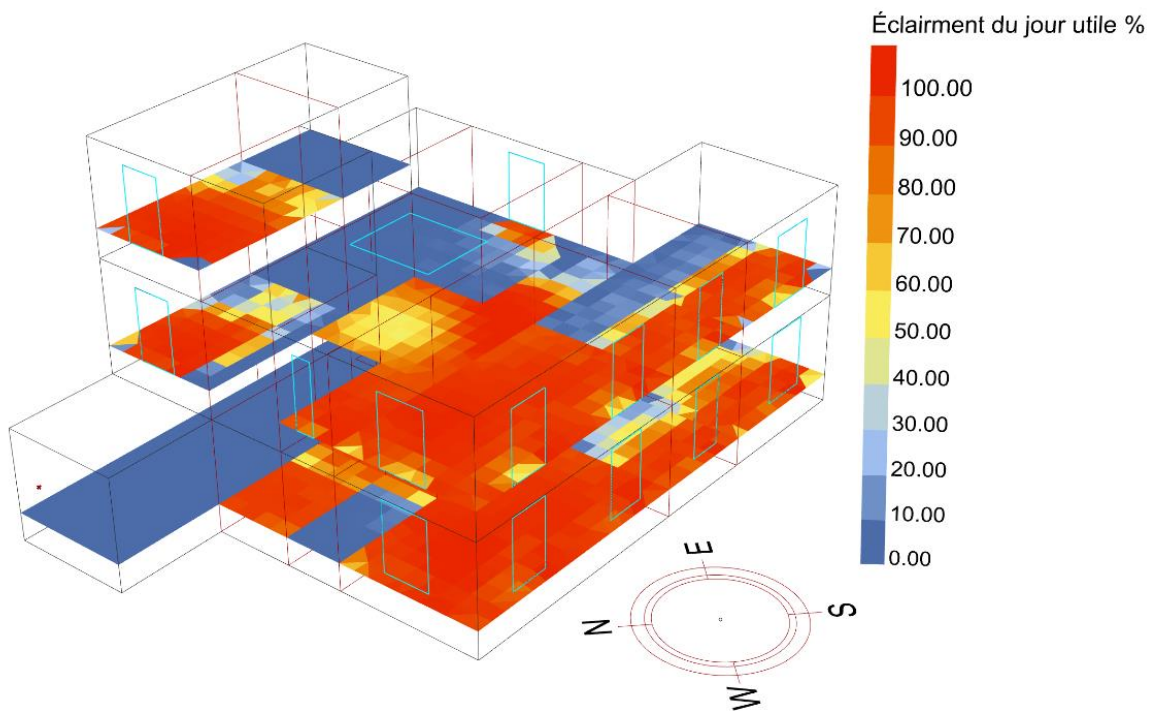


D-II. Vue en perspective des résultats des simulations du confort visuelle ()

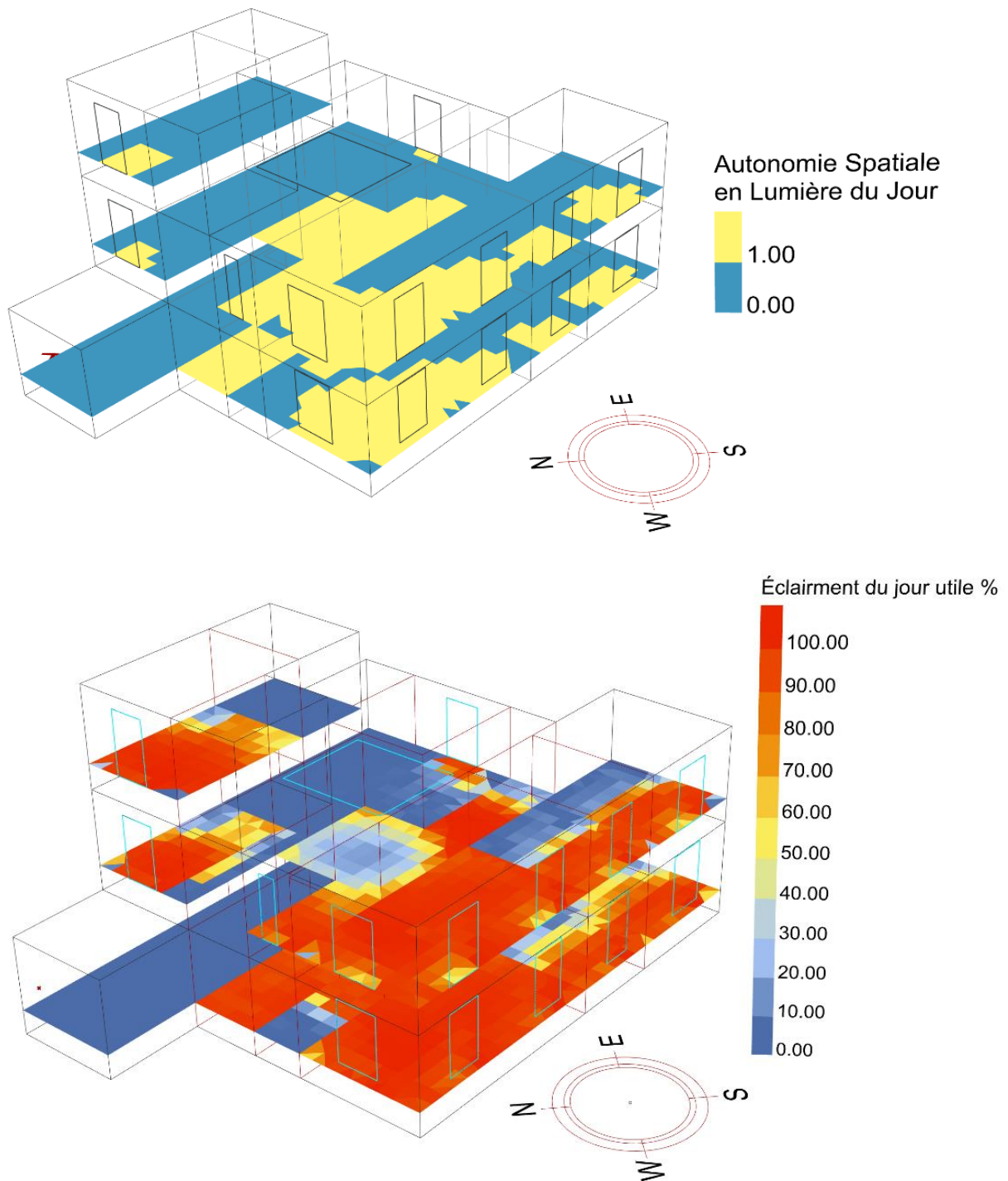
- Résultat des simulations de l'autonomie spatiale et éclairement utile du jour de l'habitation existante



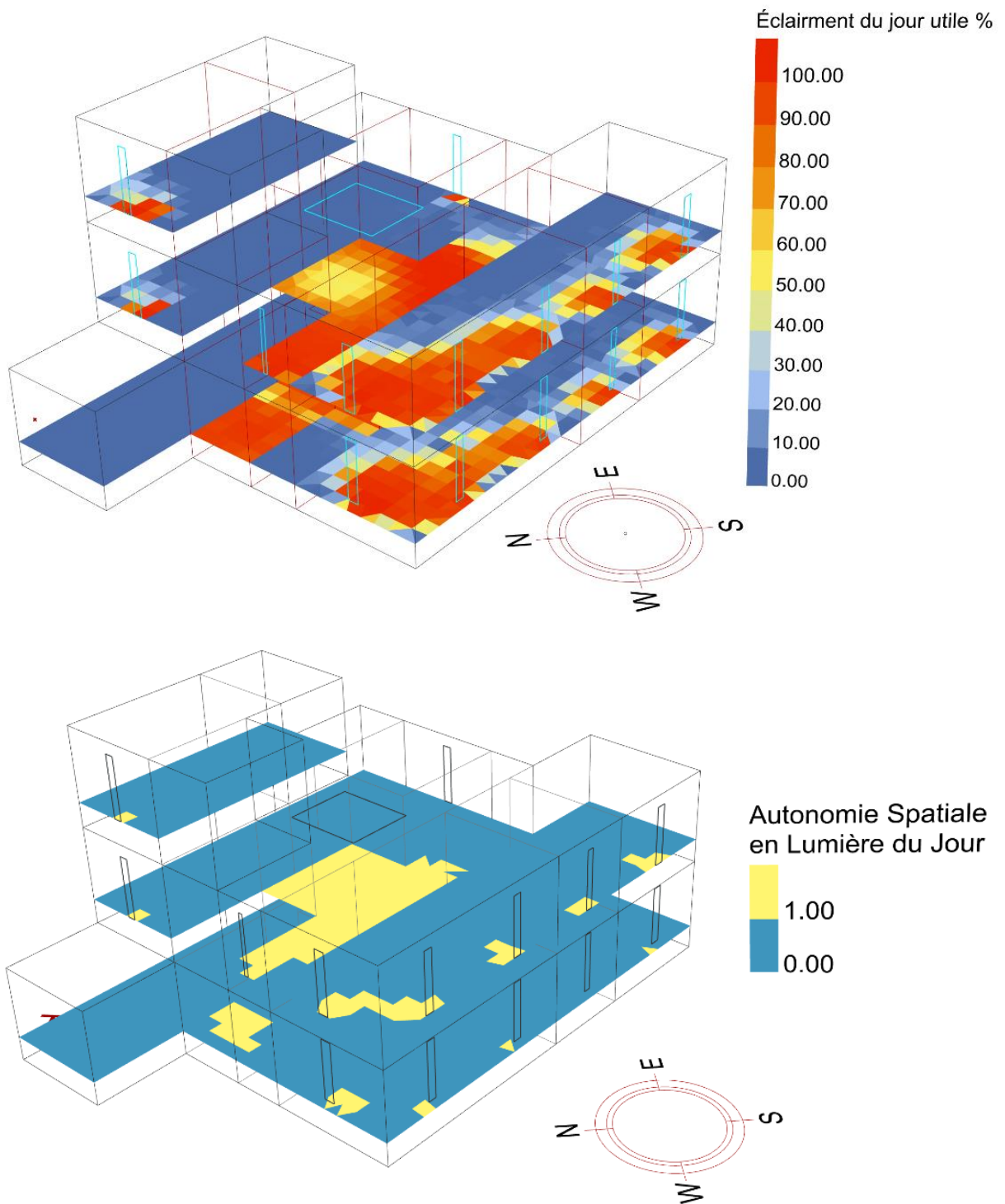
- Résultat des simulations de l'autonomie spatiale et éclairage utile du jour de la configuration N°1



- Résultat des simulations de l'autonomie spatiale et éclairement utile du jour de la configuration N°2



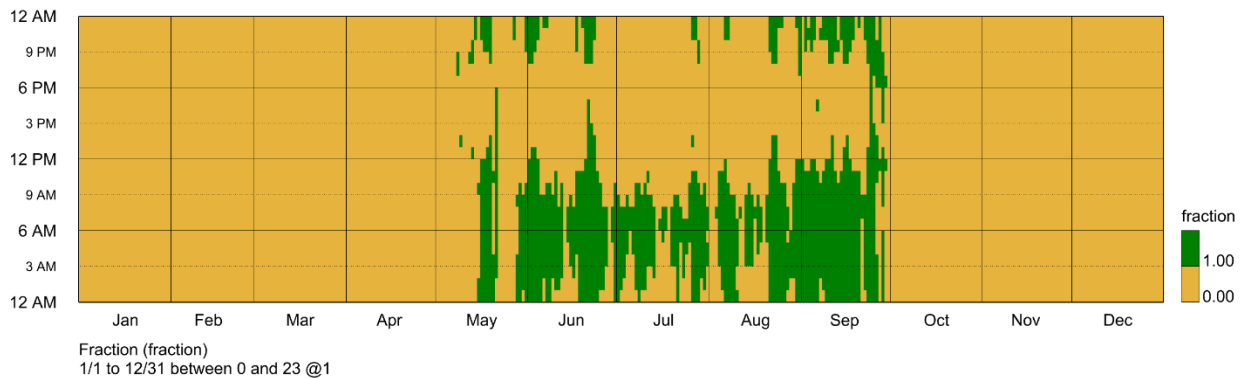
- Résultat des simulations de l'autonomie spatiale et éclairement utile du jour de la configuration N°3



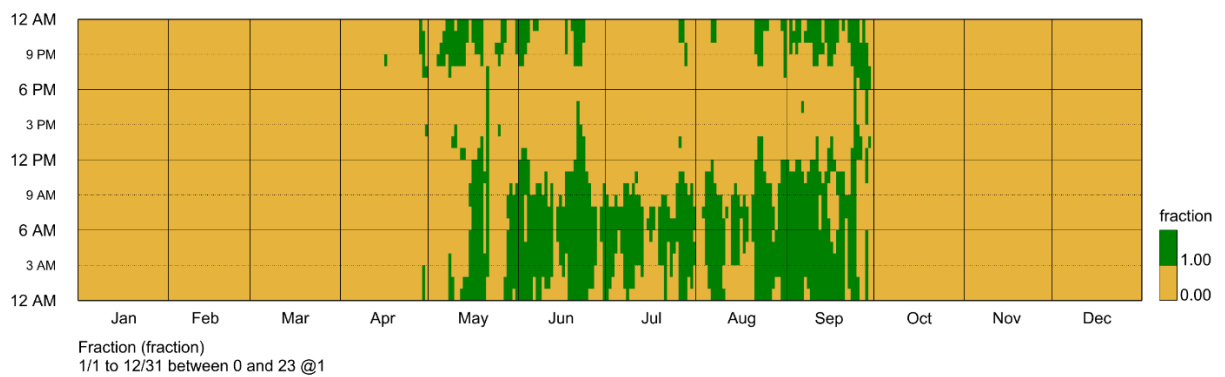
Annexe-E

E-I. Les résultats du calcul des heures de besoins de ventilation dans les espaces de l'habitation individuelle sont présentés, où une fraction de 1 indique le besoin de ventilation, et une fraction de 0 indique l'absence de besoin de ventilation.

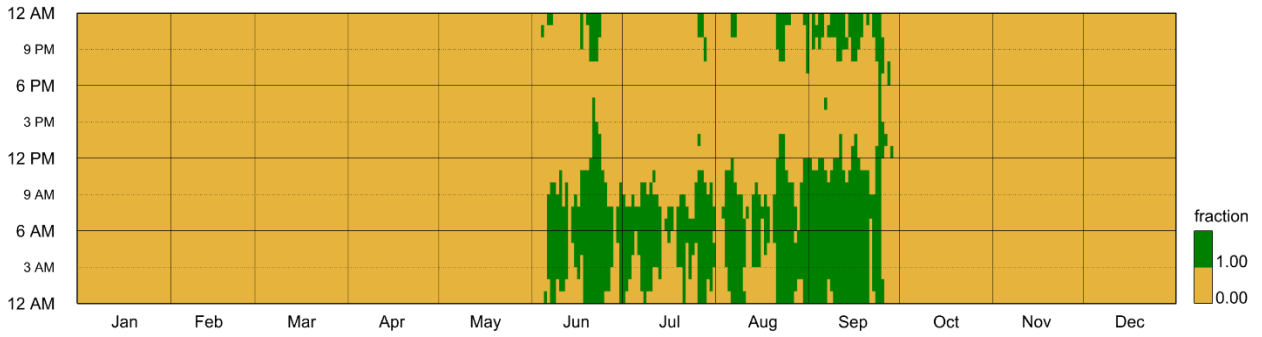
Salon RDC



Salon 1^{er}

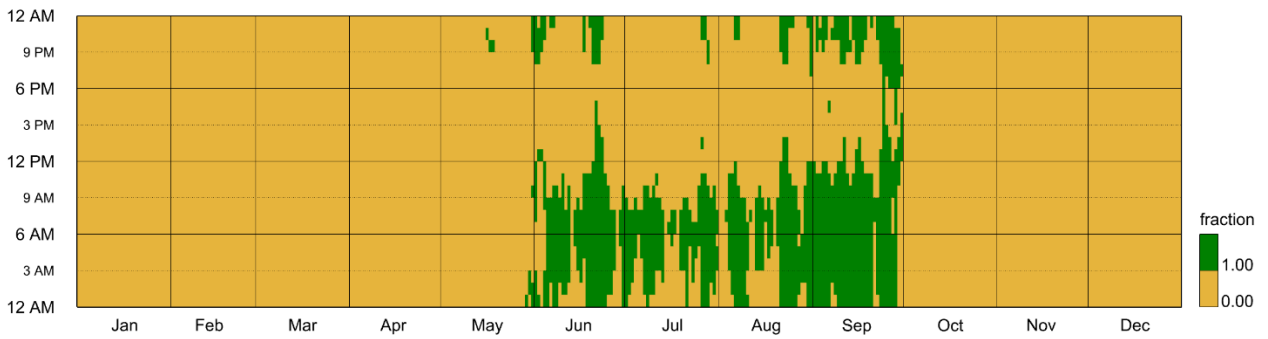


CH3-1^{er}



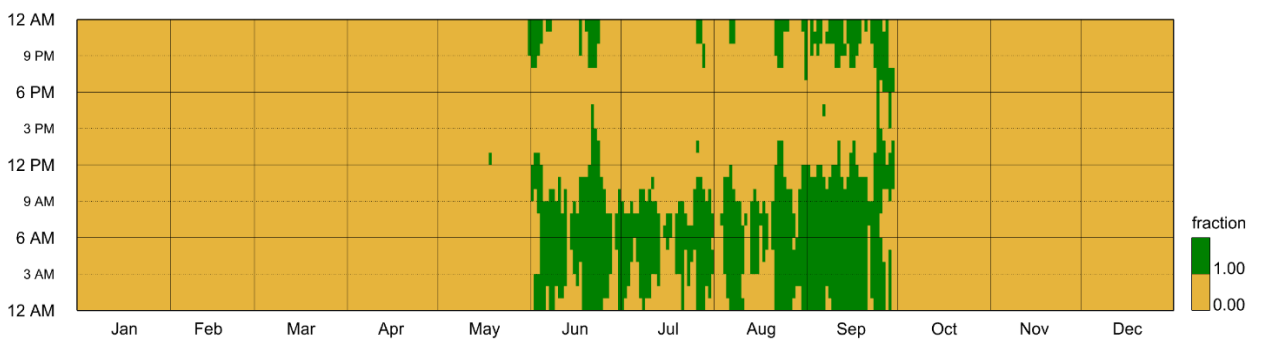
Fraction (fraction)
1/1 to 12/31 between 0 and 23 @1

CH3-2^{ème}



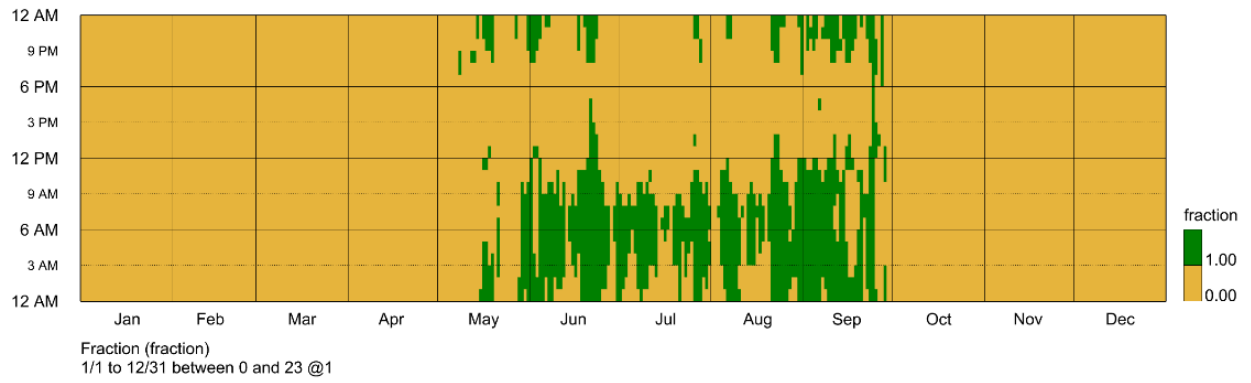
Fraction (fraction)
1/1 to 12/31 between 0 and 23 @1

CH2-RDC

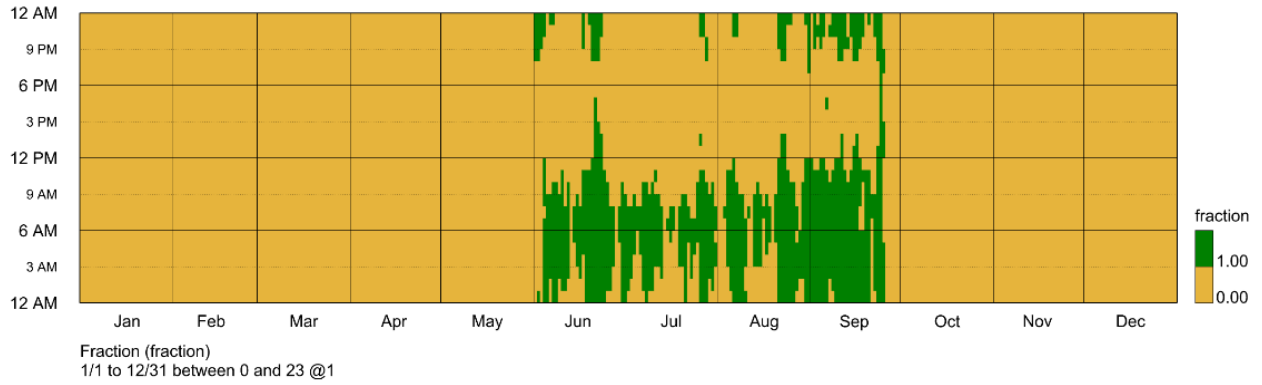


Fraction (fraction)
1/1 to 12/31 between 0 and 23 @1

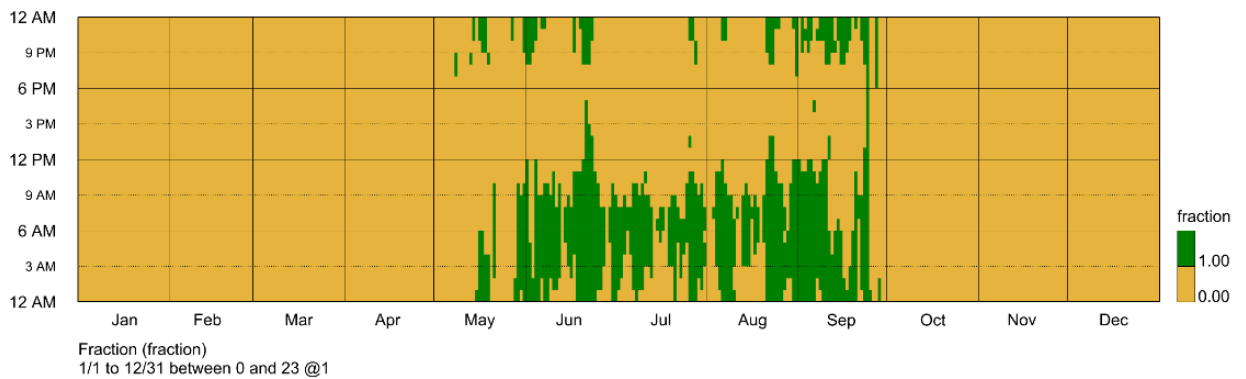
CH2-1er



CH1-RDC

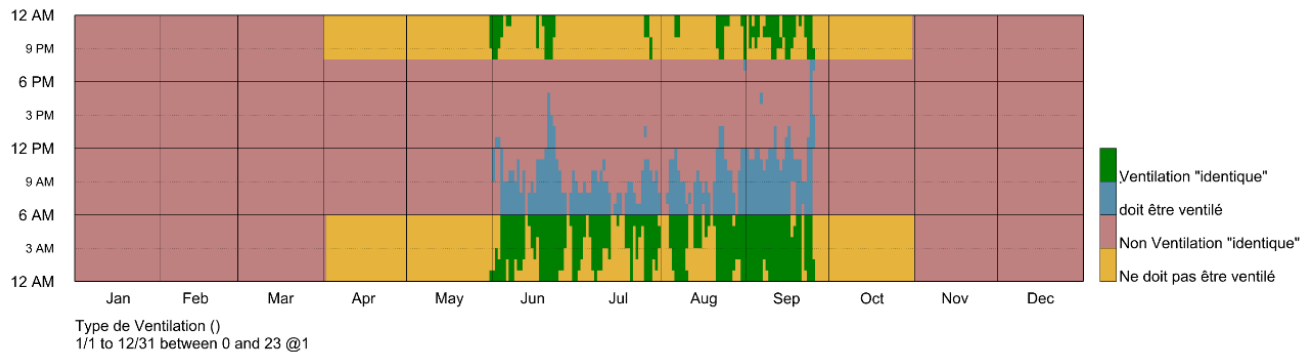


CH1-1er

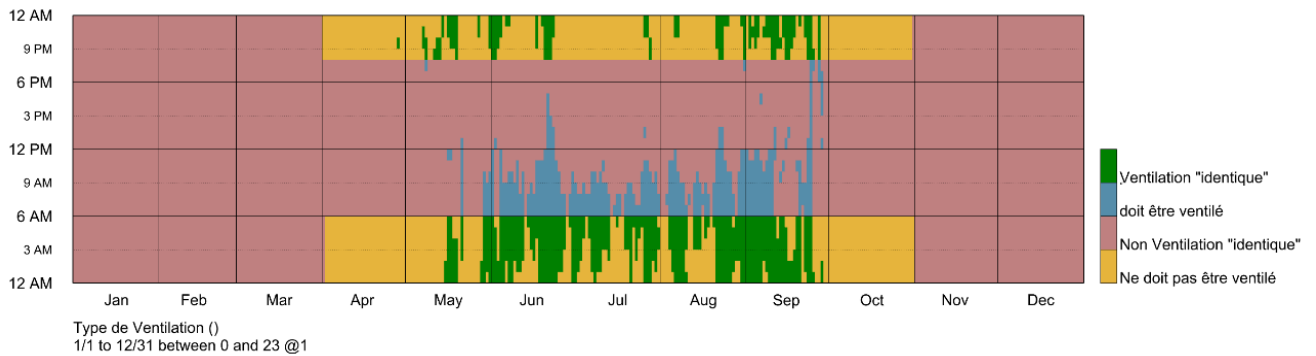


E-II. Les résultats de la comparaison entre les heures de besoins de ventilation (Ventilation Adaptive) avec les heures de la ventilation nocturne.

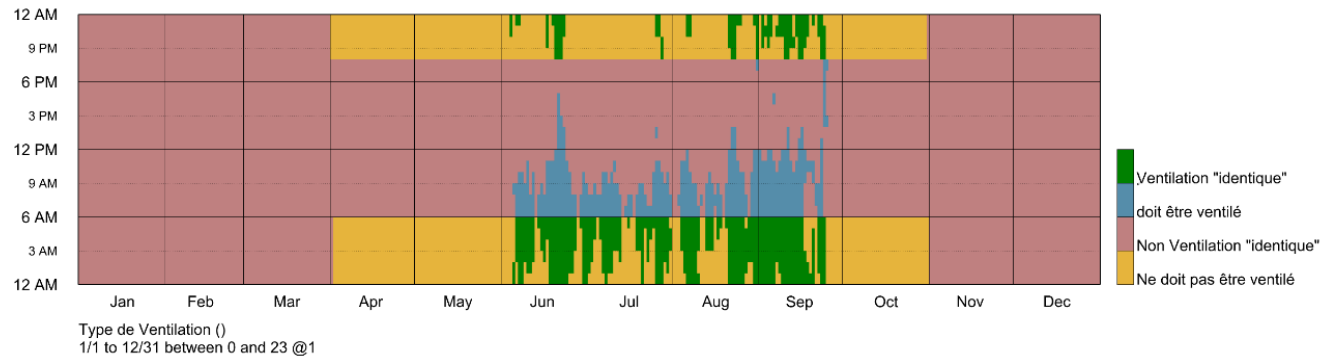
Salon RDC



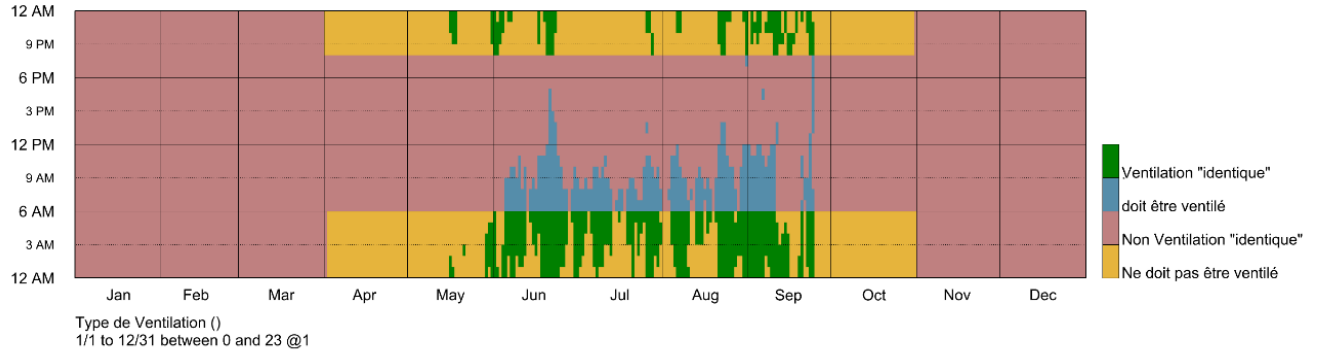
Salon 1er



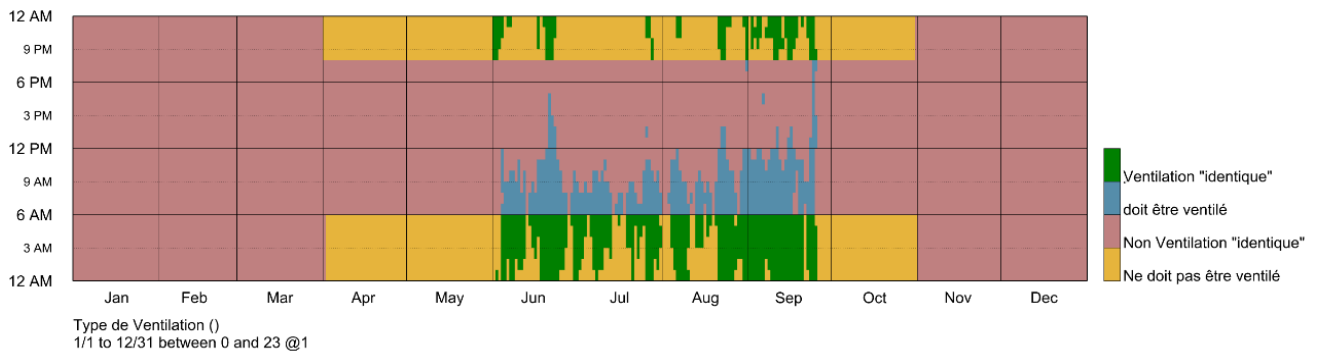
CH2-RDC



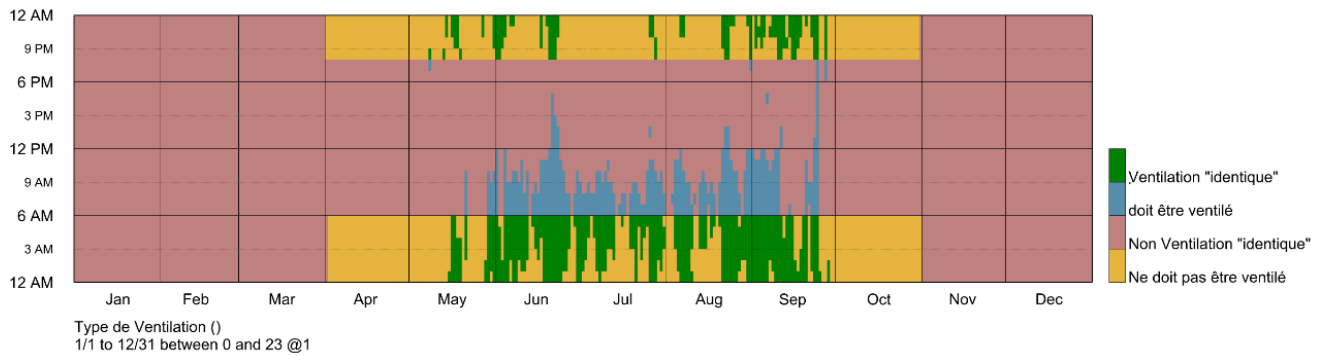
CH2-1^{er}



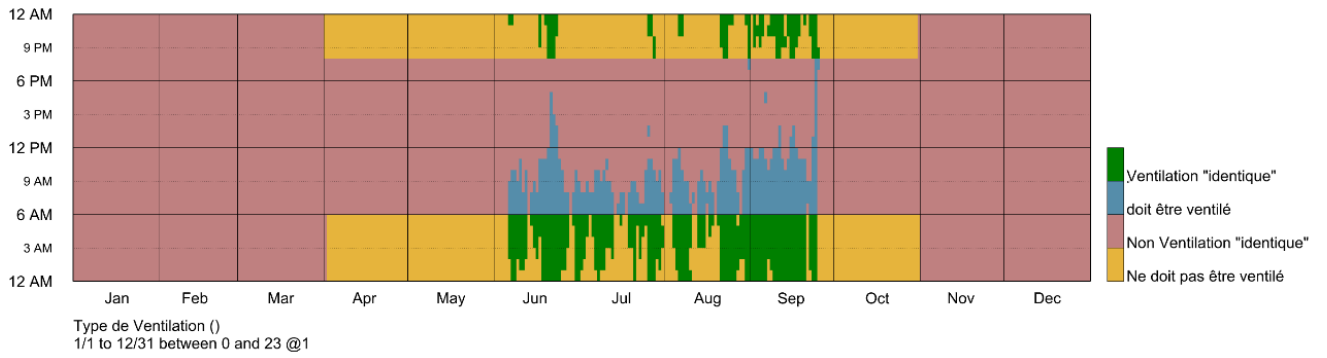
CH2-1^{er}



CH1-RDC



CH1-1er



CH2-2ème

