

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Architecture
Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique

THÈSE
En Vue de l'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : Architecture, urbanisme, et métiers de la ville
Filière : Architecture
Spécialité : Architecture écologique et durabilité

Présentée par

MEDJELDI Zineb

Intitulée

**Apport de l'approche paramétrique pour une conception
environnementale intégrée. Cas des logements sociaux à Guelma.**

Soutenue le : 20/04/2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr LAZRI Youcef	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr ALKAMA Djamel	Professeur	Univ. de Guelma	Encadreur
Mr DECHAICHA Assoule	M.C.'A'	Univ. de M'sila	Co-encadreur
Mr CHERAITIA Mohammed	M.C.'A'	Univ. de Guelma	Examinateur
Mme SALAH SALAH Hana	M.C.'A'	Univ. de Guelma	Examinatrice
Mr AICHE Messaoud	Professeur	Univ. de Constantine	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

Dédicace

*Je souhaite dédier cet humble travail à mes chers parents,
dont l'amour inconditionnel et le soutien indéfectible ont été des piliers tout au long de mon
parcours.*

*À mes frères et mes sœurs,
pour leur encouragement constant et leur présence réconfortante dans ma vie.*

*À mes neveux,
qui m'inspirent chaque jour par leur curiosité et leur joie de vivre.*

*À mon mari,
pour sa patience, sa compréhension et son soutien inestimable, qui ont été essentiels dans ce
voyage.*

*À ma grande famille et ma belle-famille,
pour leur encouragement et la confiance qu'ils ont placée en moi.*

*À mes amies,
pour leur amitié précieuse et leur soutien dans les moments difficiles.*

*À mes collègues du département d'architecture,
pour leur collaboration enrichissante et les échanges inspirants qui ont nourri cette
recherche.*

Remerciements

Je désire tout d'abord exprimer ma reconnaissance envers Dieu, qui m'a guidé tout au long de cette aventure académique en me donnant la force, le courage et la détermination nécessaires pour mener à bien cette thèse.

*Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, chacune à leur manière. Un grand merci à mon directeur de thèse, le **Pr. ALKAMA Djamel**, pour son accompagnement précieux et ses conseils avisés, ainsi qu'à mon Co-encadreur, le **Dr. DECHAICHA Assoule**, pour son soutien inestimable.*

Je souhaite également exprimer ma gratitude aux membres des jurys qui ont pris le temps d'évaluer mon travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Prof. **Dr. Soofia Tahira Elias-Özkan**, du département d'architecture de l'Université technique du Moyen-Orient à Ankara, pour son soutien indéfectible et ses conseils éclairés*

Mes remerciements s'adressent également à mes amis, collègues et enseignants, dont l'encouragement et le partage des connaissances ont enrichi mon parcours académique.

Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à cette réalisation.

Résumé.

Le changement climatique et la consommation énergétique posent des défis majeurs, notamment dans le secteur résidentiel, grand consommateur d'énergie fossile. L'optimisation de la performance énergétique des bâtiments, tout en répondant aux exigences de confort thermique et visuel, est devenue une priorité. C'est dans ce contexte que l'approche paramétrique émerge comme une solution novatrice et prometteuse, en intégrant des paramètres tels que l'orientation, les matériaux ou l'éclairage naturel dès la conception. Grâce à des outils numériques, cette méthode améliore le confort des occupants tout en réduisant l'empreinte carbone, s'inscrivant dans une vision durable de l'architecture. Cette étude examine l'application de l'approche paramétrique dans la conception des logements sociaux pour optimiser à la fois le confort intérieur et l'efficacité énergétique en tenant compte du changement climatique. Quatre cités ont été analysées à travers des visites et relevés architecturaux. Un bâtiment représentatif de 956 logements a été sélectionné, avec une évaluation de la performance de trois appartements situés à différents niveaux.

Des mesures ont été réalisées durant les périodes climatiques les plus extrêmes de l'année, avec l'évaluation de l'éclairage naturel à l'aide d'un luxmètre et des relevés de température conformes à la norme ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Ces données ont ensuite été validées à travers un test de Pearson, qui a confirmé une forte corrélation entre les résultats expérimentaux et les simulations. Par ailleurs, des simulations climatiques ont été effectuées avec l'outil Meteonorm, en prenant en compte les scénarios RCP 8.5 pour les années 2050 et 2080, sur un cycle de vie de 60 ans. La modélisation énergétique a été réalisée à l'aide de logiciels tels que Rhino et Grasshopper, intégrant les données climatiques via les plugins Ladybug et Honeybee. L'analyse paramétrique s'est appuyée sur des indicateurs tels que l'Autonomie de la Lumière Naturelle Spatiale (sDA300/50%) et l'Intensité d'Utilisation Énergétique (EUI), complétés par des mesures de confort thermique. L'optimisation des performances a ensuite porté sur le rapport fenêtre-mur (WWR), l'évaluation de différents matériaux pour les murs extérieurs, le choix de plusieurs types de fenêtres et l'impact de l'orientation du bâtiment.

Les résultats montrent que l'approche paramétrique optimise la conception des bâtiments résidentiels en s'adaptant aux spécificités climatiques locales et aux besoins des occupants. Les simulations ont révélé des configurations architecturales améliorant l'efficacité énergétique et le confort thermique tout en réduisant l'impact environnemental. Cette recherche souligne l'importance d'intégrer des solutions innovantes et durables dans la conception des logements sociaux, pour répondre aux défis environnementaux présents et futurs.

Mots clés : L'approche paramétrique, Conception environnementale, Efficacité énergétique, Guelma, confort, changement climatique.

Abstract

Climate change and energy consumption pose major challenges, particularly in the residential sector, which is a significant consumer of fossil energy. Optimizing building energy performance while meeting thermal and visual comfort requirements has become a priority. In this context, the parametric approach emerges as an innovative solution, integrating parameters such as orientation, materials, and natural lighting from the design phase. Using digital tools, this method enhances occupant comfort while reducing the carbon footprint, aligning with a sustainable architectural vision. This study examines the application of the parametric approach in the design of social housing to optimize both indoor comfort and energy efficiency while considering climate change. Four housing complexes were analyzed through site visits and architectural surveys. A representative building with 956 units was selected, with performance evaluations conducted on three apartments located on different floors.

Measurements were taken during the most extreme climatic periods of the year, including the evaluation of natural lighting using a lux meter and temperature readings according to ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. These data were validated through a Pearson test, confirming a strong correlation between experimental results and simulations. Climate simulations were also conducted using the Meteornorm tool, considering RCP 8.5 scenarios for the years 2050 and 2080 over a 60-year life cycle. Energy modeling was performed using software such as Rhino and Grasshopper, integrating climatic data via the Ladybug and Honeybee plugins. The parametric analysis relied on indicators such as Spatial Daylight Autonomy (sDA300/50%) and Energy Use Intensity (EUI), complemented by thermal comfort measurements. Performance optimization focused on the window-to-wall ratio (WWR), the evaluation of different materials for exterior walls, the selection of various window types, and the impact of building orientation.

The results demonstrate that the parametric approach optimizes the design of residential buildings by adapting to local climatic specifics and occupant needs. Simulations revealed architectural configurations that enhance energy efficiency and thermal comfort while reducing environmental impact. This research highlights the importance of integrating innovative and sustainable solutions in the design of social housing to address current and future environmental challenges.

Keywords: Parametric approach, Environmental design, Energy efficiency, Guelma, comfort, climate change.

المخلص.

يمثل تغير المناخ واستهلاك الطاقة تحديات كبيرة، خاصة في القطاع السكني الذي يُعتبر من أكبر مستهلكي الطاقة الأحفورية. أصبح من الضروري تحسين أداء الطاقة في المباني مع تلبية متطلبات الراحة الحرارية والبصرية. في هذا السياق، تظهر المقاربة البارامترية كحل مبتكر، حيث تدمج معايير مثل التوجيه والمواد والإضاءة الطبيعية منذ مرحلة التصميم. باستخدام الأدوات الرقمية، تعمل هذه الطريقة على تحسين راحة الساكنين وتقليل البصمة الكربونية، مما يتماشى مع رؤية معمارية مستدامة. تتناول هذه الدراسة تطبيق المقاربة البارامترية في تصميم الإسكان الاجتماعي من أجل تحسين كل من الراحة الداخلية وكفاءة الطاقة مع الأخذ في الاعتبار تغير المناخ. تم تحليل أربع مجتمعات سكنية من خلال زيارات ميدانية واستطلاعات معمارية. تم اختيار مبنى تمثيلي يضم 956 وحدة سكنية، مع تقييم الأداء لثلاث شقق تقع في طوابق مختلفة.

تم أخذ قياسات خلال الفترات المناخية الأكثر تطرفاً في السنة، بما في ذلك تقييم الإضاءة الطبيعية باستخدام مقياس لكس وقرارات درجة الحرارة وفقاً للمعيار ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. تم التحقق من صحة هذه البيانات من خلال اختبار بيرسون، مما أكد وجود علاقة قوية بين النتائج التجريبية والمحاكاة. كما تم إجراء محاكاة مناخية باستخدام أداة Meteonorm، مع الأخذ في الاعتبار سيناريوهات RCP 8.5 للسنوات 2050 و2080 على مدى دورة حياة تمتد إلى 60 عاماً. تم إجراء نمذجة الطاقة باستخدام برامج مثل Grasshopper و Rhino، مع دمج البيانات المناخية عبر إضافات Honeybee و Ladybug.

اعتمدت التحليل البارامترية على مؤشرات مثل استقلالية الإضاءة الطبيعية المكانية (sDA300/50%) وكثافة استخدام الطاقة (EUI)، بالإضافة إلى قياسات الراحة الحرارية. ركز تحسين الأداء على نسبة النوافذ إلى الجدران (WWR)، وتقييم مواد مختلفة للجدران الخارجية، واختيار أنواع متعددة من النوافذ، وتأثير اتجاه المبنى. تظهر النتائج أن المقاربة البارامترية تُحسن تصميم المباني السكنية من خلال التكيف مع الخصائص المناخية المحلية واحتياجات الساكنين. كشفت المحاكاة عن تكوينات معمارية تعزز كفاءة الطاقة وراحة الحرارة بينما تقلل من التأثير البيئي. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية دمج حلول مبتكرة ومستدامة في تصميم الإسكان الاجتماعي للتصدي للتحديات البيئية الحالية والمستقبلية.

الكلمات المفتاحية: المقاربة البارامترية، التصميم البيئي، كفاءة الطاقة، قائمة، الراحة، تغير المناخ.

Table des matières.

<i>Dédicace</i>	ii
<i>Remerciements</i>	iii
Résumé	iv
Summary	iv
.الملخص	vi
Liste des figures	xvi
Liste des tableaux	xx
Chapitre introductif	1
Introduction	2
Problématique	4
Hypothèse	6
Objectifs de recherche	7
Méthodologie de travail	7
Structure de la thèse	8
La première partie : cadre théorique et conceptuel	13
Chapitre I : pensée environnementale dans la conception architecturale ...	13
Introduction	14
I.1. Introduction a la pensée environnementale	14
I.2. Environnement : un concept en evolution	15
I.3. Impacts environnementaux des bâtiments : analyse et evaluation	17
I.3.1. Réchauffement climatique	18
I.3.2. Consommation de ressources croissante et non durable	19
I.3.3. Démystification des autres éléments de pression sur environnement .20	
I.4. Enjeux environnementaux dans les bâtiments	21
I.4.1. Origines	21
I.4.2. Reconnaissance	24
I.4.3. Evolution des pratiques architecturale vers la durabilité	26
I.5. De la conception a l'éco-conception architecturale	28
I.5.1. Résumé historique	28
I.5.2. Conception : notion et pratique intellectuelle	29

I.5.2.1. Conception architecturale.....	31
I.5.2.2. Etapes du processus de conception architecturale	32
I.5.2.3. Phase en amont de la conception.....	33
I.5.3. Ééco-conception : une approche emergente.....	36
I.5.3.1. Complexité et l’incertitude de l’éco-conception.....	36
I.5.3.2. Progression itérative dans le processus d’éco-conception.....	38
I.5.3.3. Quelle place pour l’éco-conception durant la phase de conception.....	39
I.6. Approches innovantes pour la conception environnementale intégrée des bâtiments.....	40
I.6.1. Processus de conception intégrée.	40
I.6.2. Conception environnementale intégrée.	41
I.6.3. Assistance a la conception environnementale intégrée : méthodes et modèles optimaux.....	43
I.7. Conclusion du chapitre.....	45
chapitre II : Approche paramétrique comme stratégie pour une conception environnementale intégrée.	46
Introduction.	47
II.1 Approche paramétrique : théorie et fondements.....	47
II.1.1. Introduction a l’approche paramétrique.....	47
II.1.2. Fondements mathématiques et evolution historique.	48
II.1.3 Paramétrisme en tant que style architectural.	50
II.1.4. Représentation paramétrique contemporaine : outils et techniques	52
II.1.5. Impacts de l’approche paramétrique sur l’architecture moderne....	53
II.1.6. Caractérisation du paramétrique a partir des discours existants....	53
II.1.7. Contexte d’étude et application du paramétrique.	54
II.2. Design paramétrique : techniques et outils.....	55
II.2.1. Définition et caractéristiques du design paramétrique.	56
II.2.2. Analyse comparative du paramétrisme, de l'architecture paramétrique et du design paramétrique.	57
II.2.3. Conception paramétrique, générative et algorithmique : confusion des termes.....	58
II.2.4. Principes fondamentaux du design paramétrique	59

II.2.5. Comparaison avec les méthodes conventionnelles de conception architecturale.	61
II.2.6. Place de la conception paramétrique dans le processus architectural.	63
II.2.7. Procédures du design paramétrique (pdp).	63
II.2.8. Modélisation paramétrique en architecture.	65
II.2.9. Outils et logiciels de conception paramétrique en architecture.	66
II.2.10. Limites et opportunités du design paramétrique dans le bâtiment.	67
II.3. Confort intérieur : aspect thermique et visuel dans les bâtiments résidentiels.	68
II.3.1 notion du confort intérieur.	68
II.3.1.1. Effets sur la santé et le bien-être.	69
II.3.1.2. Confort et bâtiment résidentiels.	69
II.3.2. Confort thermique : caractérisation.	70
II.3.3. Critères et indicateurs de confort thermique	71
II.3.3.1. Modèle de vote moyen prévisible (pmv).	71
II.3.3.2. Modèle de pourcentage prévisible d'insatisfaits (ppd).	72
II.3.3.3. Modèle de vote moyen prévisible étendu (epmv).	72
II.3.3.4. Modèle adaptatif.	72
II.3.4. Normes et règlements internationaux	73
II.3.4.1. Ashrae.	73
II.3.4.2. Organisation internationale de normalisation (iso).	73
II.3.4.3. En 15251 / en 16798-1.	74
II.3.4.4. Réglementation thermique en france (la rt).	74
II.3.5. Réglementation thermique en Algérie.	74
II.3.6. Confort visuel.	75
II.3.7. Critères d'éclairage et de confort visuel.	76
II.3.8. Critères de sélection des métriques de lumière du jour.	77
II.3.8.1. Choix des points de mesure.	77
II.3.8.2. Base temporelle.	78
II.3.9. Description des métriques de confort visuel.	78
II.3.9.1. Eclairage	78
II.3.9.2. Facteur de lumière du jour.	79

II.3.9.3. Autonomie de la lumière naturelle (daylight autonomy da).....	79
II.3.9.4. Autonomie spatiale de lumière naturelle (sda).....	80
II.3.9.5. Éclairement utile de la lumière du jour (udi).....	80
II.3.9.6. Autonomie continue de lumière naturelle (da _{con}),	81
II.3.10. Évaluation du confort visuel dans les bâtiments résidentiels.	81
II.3.10.1. Évaluations sur site.....	81
II.3.10.2. Campagnes de mesures (evaluation objective).....	82
II.3.10.3. Enquêtes.....	82
II.3.10.4. Simulations numériques.	82
II.3.11. Intensité d'utilisation de l'énergie et confort : un équilibre délicat dans le résidentiel.	82
II.3.12. Liaison entre intensité énergétique et confort intérieur.....	83
II.4. Intégration de l'approche paramétrique pour améliorer le confort intérieur.	83
II.4.1. Paramétrisation des facteurs de confort thermique et lumineux.	84
II.4.2. Simulation du confort visuel et thermique via le design paramétrique.	85
II.5. Approche paramétrique dans le contexte de la conception environnementale intégrée.	86
Chapitre III : Optimisation multi-objectifs et scénarios climatique pour une eco-conception architecturale.....	88
Introduction.	89
III.1. Contexte du changement climatique et des scénarios rcp.	89
III.1.1. Présentation des principaux enjeux liés au changement climatique global.....	89
III.1.2. Définition et objectifs des scénarios rcp (representative concentration pathways).....	90
III.1.2.1. Choix du scénario rcp 8.5 et comparaison avec d'autres scénarios.	92
III.1.3. Impact du climat futur sur les bâtiments résidentiels.	94
III.1.4. Stratégies d'adaptation des bâtiments face au changement climatique.	97
III.1.4.1. Définitions de l'adaptation et de l'atténuation dans le contexte architectural.....	97
III.1.4.2. Principales stratégies d'adaptation architecturale.	97

III.1.5. Organisations clés actives dans la recherche sur le changement climatique.	99
III.2. Optimisation multi-objectifs en conception environnementale	100
III.2.1. Concepts d'optimisation multi-objectifs en architecture.....	100
III.2.1.1. Optimisation multi-objectifs : définition et implications.	100
III.2.1.2. Réconcilier confort et durabilité : le rôle de la moo dans la conception environnementale.	103
III.2.1.3. Concepts clés en optimisation.	104
III.2.1.3.1. Variables de décision.....	104
III.2.1.3.2. Fonctions objectives.....	104
III.2.1.3.3. Contraintes.....	105
III.2.1.3.4. Solution optimale.	105
III.2.1.3.5. Algorithmes d'optimisation.....	105
III.2.1.3.6. A priori, a posteriori et optimisation interactive.....	105
III.2.1.3.7. Problème de moo.....	106
III.2.1.3.8. Espace de recherche et l'espace objectif.	106
III.2.1.4. Objectifs d'optimisation en conception architecturale.	107
III.2.1.5. Différence entre objectifs uniques et objectifs multiples.....	108
III.2.1.6. Le concept de dominance.....	109
III.2.1.6.1. Solutions non dominées dans la conception architecturale.....	110
III.2.1.7. Front de pareto.	110
III.2.1.7. Interaction entre objectifs : conflits et résolutions.....	112
III.3. Introduction aux algorithmes génétiques.....	113
III.3.1. Algorithmes génétiques : concepts et principes.....	113
III.3.1.1. Équilibrer l'exploration et l'exploitation dans les algorithmes génétiques	113
III.3.1.2. Structure des algorithmes génétiques.....	114
III.3.2. Rôle des algorithmes génétiques dans l'optimisation architecturale	115
III.3.2.1. Synergie des algorithmes génétiques et des processus d'optimisation dans l'architecture paramétrique.	115
III.3.2.1.1. Processus de synergie.	117
III.3.2.2. Optimisation de l'efficacité de la conception des bâtiments	118
III.4. Variables et indicateurs pour une optimisation environnementale..	119
III.4.1. Identification des variables et des indicateurs clés pour une optimisation efficace.....	120

III.5. Algorithmes d'optimisation multi-objectifs et outils de simulation..	122
III.5.1. Outils de simulation.....	122
III.5.2. Algorithmes d'optimisation multi-objectifs.	123
III.6. Optimisation paramétrique des bâtiments face au changement climatique futur.	124
III.7. Conclusion du chapitre.	125
Deuxième partie : approche méthodologique, analyse et processus d'optimisation.	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre IV : Etude du contexte climatique et présentation d'étude de cas.	126
Introduction.	127
IV.1. Ville de guelma : objet de l'étude.	127
IV.1.1.Présentation de la ville de guelma.	127
IV.1.2. Situation de la ville de guelma.	127
IV.1.3. Étude climatique de la ville de guelma.	128
IV.1.3.1. Interprétation du climat.	128
IV.1.3.2. Température.	129
IV.1.3.3. Vent.	130
IV.1.3.3.1. Analyse de la rose des vents de guelma.	131
IV.1.3.4. Rayonnement solaire.	131
IV.1.4. Analyse bioclimatique.....	133
IV.1.4.1. Diagramme psychrométrique.	133
IV.1.4.2. Diagramme ombrothermique.	134
IV.1.4.3. Carte thermique de guelma.	135
IV.1.5. Typologies de l'habitat collectif en Algérie.	136
IV.1.5.1. Évolution de l'habitat collectif en Algérie.....	136
IV.1.5.2. Description des principaux types de logements collectif résidentiels.....	136
IV.1.5.3. Logements sociaux : conception et défis.	138
IV.1.5.3.1. Défis et évolution des exigences du logement social collectif en Algérie.	138
IV.1.5.3.2. Principaux enjeux liés au confort thermique et visuel dans ces logements.	138
IV.1.5.4. Logements collectifs a guelma.....	139
IV.4.3.3. Pourquoi le logement social collectif a guelma ?	141
IV.2. Choix méthodologique et analyse de l'échantillon d'étude.....	142

IV.2.1. Synthèse des résultats de l'analyse typologique.	146
IV.3. Cas pratique : intégration dans un bâtiment sélectionné.	146
IV.3.1. Présentation de l'étude de cas.	146
IV.3.2. Procédure expérimentale de mesure sur le terrain.	147
IV.3.2.1. Procédure de mesure de l'éclairement naturel.	148
IV.3.2.1.1. Méthodologie de mesure.	148
IV.3.2.1.2. Équipement de mesure.	149
IV.3.2.1.3. Conditions de mesure.	149
IV.3.2.2. Procédure de mesures thermiques intérieures.	150
IV.3.2.2.1. Méthodologie de mesure.	150
IV.3.2.2.2. Analyse des performances thermiques lors des journées extrêmes de l'année.	150
IV.3.2.2.3. Équipement de mesure.	151
IV.4. Interprétation des résultats de la campagne de mesures.	151
IV.4.1. Interprétation des mesures d'éclairement.	151
IV.4.2. Interprétation des mesures thermiques intérieures.	153
IV.5. Conclusion du chapitre.	154
chapitre v : validation des mesures et étude paramétrique.	156
Introduction.	157
V.1. Processus de simulation : exploration du modèle de base.	158
V.2 validation des mesures in-situ a l'aide de la simulation.	159
V.2.1. Validation des mesures d'éclairement naturel.	160
V.2.2. Validation des mesures thermiques par simulation numérique.	164
V.3. Modélisation des scénarios climatiques futurs.	167
V.4. L'approche paramétrique.	169
V.4.1. Description des modèles numériques.	170
V.4.2. Paramétrisation des facteurs de confort.	171
V.4.2.1. Orientation du bâtiment.	172
V.4.2.2. Type de vitrage.	172
V.4.2.3. Matériaux de construction des murs.	172
V.4.2.4. Isolation thermique.	172
V.4.2.5. Systèmes de protection solaire.	172
V.4.2.6. Planning énergétique et de confort.	173

V.4.3. Évaluation des performances du cas de référence face aux changements climatiques.	174
V.4.3.1. Évaluation de l'autonomie spatiale de la lumière du jour : processus et résultats.	175
V.4.3.2. Évaluation de l'intensité d'utilisation de l'énergie (eui) : processus et résultats. ...	178
V.4.3.3. Évaluation du confort thermique: processus et résultats.	180
V.4.4. Impacts de l'altitude des appartements sur les résultats.	184
V.4.5. Impacts du changement climatique futur sur les résultats.	185
V.5. Conclusion du chapitre.	186
chapitre VI. Optimisation multi-objectifs et recherche de la solution optimale.	188
Introduction	189
VI.1. Optimisation multi-objectifs et recherche de la solution optimale. ..	190
VI.1.1. Mise en place de l'optimisation pour le cas d'étude.	190
VI.1.2. Définition des variables et des objectifs a optimiser.	190
VI.1.2.1. Variables d'optimisation.....	190
VI.1.2.1.1. Rapport fenêtre-mur/ window-to-wall ratio (wwr).	190
VI.1.2.1.2. Caractéristiques de construction des murs extérieurs.	191
VI.1.2.1.3. Orientation du bâtiment.	192
VI.1.2.1.4. Sélection du matériau des fenêtres.	193
VI.1.2.1.5. Dispositif d'ombrage horizontal.	194
VI.1.2.2. Objectifs d'optimisation.	195
VI.1.3. Outils et méthodologie d'optimisation utilisés.	195
VI.1.4. Processus d'optimisation.	196
VI.1.4.1. Algorithme génétique.....	196
VI.2. Résultats de l'optimisation multi-objectif.	198
VI.2.1. Front de pareto.	198
VI.2.1.1. Front de pareto pour la pièce 1 sous scénarios de changement climatique.	198
VI.2.1.2. Front de pareto pour la pièce 2 sous scénarios de changement climatique.	203
VI.2.1.3. Front de pareto pour la pièce 3 sous scénarios de changement climatique.	206
VI.2.2. Comparaison des performances optimisées entre trois pièces.	209
VI.2.3. Solution optimale.	211
VI.2.3.1. Démarche pour identifier la solution optimale.	211
VI. 2.3.2. Justification.	213

VI.2.4. Variables clés de la solution optimale.	213
VI.3. Simulation de la solution optimale pour l'objet d'étude.	214
VI.3.1. Autonomie spatiale de la lumière du jour : influence des variables optimales.....	215
VI.3.1.1. Application sur la première pièce du rez-de-chaussée.	215
VI.3.1.2. Application sur la deuxième et la troisième pièce.	216
VI.3.2. Iue : Influence des variables optimales.	218
VI.3.3. Confort thermique : influence des variables optimales.	220
VI.4. Conclusion du chapitre.....	224
Conclusion générale.	225
Conclusion générale et perspectives.	226
Limites de recherche.	232
Perspectives futures.....	233
Références bibliographiques	234
Annexes.....	255
Annexe a	256
Annexe b.....	260
nnexe c	263

Liste des figures.

Figure. 1. Récapitulation de la problématique posée et la méthode d'évaluation utilisée (Auteur, 2024).

Figure I.1. l'évolution historique du confort, de la consommation d'énergie et de l'impact sur l'environnement des bâtiments. Source : (Heeren, 2017)..... 18

Figure I.2. Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur d'activité. Source : (Bilan énergétique national, 2022). 20

Figure I.3. Principaux Effets Environnementaux pendant la Durée de Vie des matériaux de construction. Source : (Huang et al., 2020). 21

Figure I.4. La progression de la réflexion environnementale en architecture. Source : (Gholipour.,2018.). 23

Figure I.5. Tendances et événements importants pour l'environnement, et les réponses à ceux-ci. Source : (Hildebrand, 2014). 25

Figure I.6. Un large éventail de solutions architecturales répondant à différentes conceptions des questions de durabilité. Source : (Schroeder, 2018) 27

Figure I.7. Les étapes du processus de la conception architecturale. Source : (Weissenstein, 2018.). 33

Figure I.8. Courbe de Boyd Paulson. Source : (Tomás Méndez.2013.) 34

Figure I.9. Courbe de MacLeamy. Source : (Stéphane MOR, 2015). 35

Figure I.10. L'équilibre dans le design environnemental des bâtiments. Source : (Vakili-Ardebili & Boussabaine, 2005) 37

Figure I.11. Intégrer les considérations environnementales dans la phase de conception des bâtiments. Source : (Guillaume Lamé, 2017). 40

Figure I.12. Diagramme de cooccurrence des mots-clés dans le processus de conception intégrée des bâtiments. Source : Web of science citée par (Z. Li, Tian, et al., 2022) 42

Figure II.1. Fréquence d'utilisation du terme "DP" comme mot-clé dans différents dépôts scientifiques entre 1978 et 2018, sur un échantillon de 666 mots-clés collectés. Source : (Inês Caetano et al., 2019). 50

Figure II.2. Modèles architecturaux créés sur la base d'une conception paramétrique. Source : (Eltaweel & Su, 2017) 55

Figure II.3. Cadre conceptuel pour les termes utilisés dans le domaine de la conception informatique. Source : (Inês Caetano et al., 2019). 59

Figure II.4. Diagramme de comparaison entre le processus de conception paramétrique et le processus conventionnel. Source : (Eltaweel & Su, 2017) 62

Figure II.5. Méthodologie de calcul par procédures de conception paramétrique. Source : (Abdullah & Kamara, 2013) 65

Figure II.6. Simulations Utilisées par Honeybee et Ladybug dans la Modélisation Environnementale. Source: <https://www.ladybug.tools/honeybee.html> 67

Figure II.7. Le nombre cumulatif d'indices de confort visuel proposés au fil du temps. Source : (Carlucci et al., 2015) 77

Figure III.1. Écart de température de l'air en surface (°C) pour la fin du XXIe siècle (2081-2100) par rapport à la période historique de référence (1986-2005). Source : (Nazarenko et al., 2015). 91

Figure III.2. Émissions mondiales de gaz à effet de serre (Gt_{eq}CO₂/an) dans divers scénarios de référence et d'atténuation pour différents niveaux de concentration à long terme. Source : (Changements climatiques 2014, 2015). 93

Liste des figures

Figure III.3. Visualisation de la densité des mots dans les titres, les résumés et les mots-clés des auteurs des articles de revues sélectionnés. Source :(Manni & Nicolini, 2022).....	103
Figure III.4. Espace de recherche et espace objectif pour le problème test B. Source : (Tomás Méndez Echenagucia, 2013).	107
Figure III.4. Front de Pareto. Source : (Toutou et al., 2018)	111
Figure III.5. Tenus Studiam de Hangzhou : Géométrie pilotée par des algorithmes. Source : (Miller, 2011).	117
Figure III.6. Le flux de travail amélioré pour l'optimisation des algorithmes génétiques par le biais de la simulation hors ligne. Source : (Su & Yan, 2015).	119
Figure III.7. Comparaison des Algorithmes d'Optimisation Multi-Objectifs. Source : (Harshalatha et al., 2024)	124
Figure IV.1. Situation géographique de la ville de Guelma. Source : générée par l'IA et adaptée par l'auteur.....	128
Figure IV.2. Les températures de bulbe sec à Guelma. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.....	129
Figure IV. 3. Les températures du point de rosée à Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.....	130
Figure IV.4. La vitesse du vent à Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.....	130
Figure IV.5. La rose du vent de Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.....	131
Figure. IV.6. Rayonnement solaire pour la ville de Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.....	132
Figure IV.7. Diagramme psychométrique de la ville de Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.	134
Figure IV.8. Diagramme Ombrothermique de la ville de Guelma. Source : climat charts, données traitées par l'auteur.....	135
Figure IV.9. Localisation des sites choisis sur la carte de la ville de Guelma. Source : Google Earth traité par l'auteur, 2024).	144
Figure IV.10. (a) Plan de situation du bâtiment, (b) Localisation de l'étude de cas, (c) Plan du bâtiment étudié, (d) Plan de l'appartement étudié.	147
Figure IV.11. Situation des pièces sélectionnées, (b) Grille des points de mesure dans les pièces sélectionnées. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	148
Figure IV.12. Multimatrix LM 76. Source : Fiche des données techniques de l'appareil)...	149
Figure IV.13. a. Anémomètre à hélice TROTEC BA16, b. HI-9565 Portable Thermo-Hygrometer.....	151
Figure V.1. La visualisation des niveaux d'éclairage simulés et de leur distribution dans les pièces sélectionnées. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	162
Figure.V.2. Comparaison des températures intérieures mesurées en Hiver entre les différents étages. Source : Auteur.....	165
Figure V.3. Comparaison des températures intérieures mesurées en Hiver entre les différents étages. Source : Auteur.....	165
Figure.V.4. L'évolution de la température moyenne annuelle (°C) comparée sur trois scénarios climatiques. Source : Auteur.	169

Liste des figures

Figure.V.5. L'analyse paramétrique : une approche par la simulation numérique. Source : Auteur.....	171
Figure V.6. Représentation du modèle numérique du bâtiment étudié. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	173
Figure V.7. Programme d'Activités pour les pièces sélectionnées. Source : Auteur.	174
Figure V.8. Autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA300/50%) pour les pièces sélectionnées sous différentes conditions météorologiques. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	176
Figure V.9. Distribution de l'Éclairage dans les Trois Pièces Sélectionnées. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	177
Figure.V.10. Consommation énergétique mensuelle des pièces sélectionnées sous différentes conditions météorologiques. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.....	179
Figure V.11. Diagramme de confort adaptatif dans la première pièce du rez-de-chaussée. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	181
Figure.V.12. Diagramme de confort adaptatif dans la deuxième pièce du 3ème étage. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	182
Figure V.13. Diagramme de confort adaptatif dans la troisième pièce du 5ème étage. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	183
Figure VI.1. Pourcentage du ratio fenetres. Source : Auteur.	191
Figure VI.2. Analyse de l'orientation du batiment. Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	192
Figure VI.3. Interface d'Octopus. Source:(Toutou et al., 2018).....	197
Figure VI.4. Front de Pareto pour la Pièce 1 sous Scénarios de Changement Climatique.. Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	199
Figure VI.5. diagramme tripartite pour la piece 1. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	200
Figure VI.6. maillage du front de Delaunay . Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	201
Figure VI.7. Front de Pareto pour la Pièce 2 sous Scénarios de Changement Climatique.. Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	203
Figure VI.8. diagramme tripartite pour la piece 2. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	204
Figure VI.9. maillage du front de Delaunay 2eme piece . Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	205
Figure VI.10. Front de Pareto pour la Pièce 3 sous Scénarios de Changement Climatique.. Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	207
Figure VI.11. diagramme tripartite pour la piece 3. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	207
Figure VI.12. maillage du front de Delaunay 3eme piece . Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.	208
Figure VI.13. sDA pour les pièces sélectionnées après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.....	218
Figure.VI.14. EUI pour les pièces sélectionnées après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.....	219
Figure VI.15. Diagramme de confort adaptatif dans la première pièce après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.	221

Liste des figures

- Figure.V.16.** Diagramme de confort adaptatif dans la deuxième pièce après optimisation.
Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper. 222
- Figure VI.17.** Diagramme de confort adaptatif dans la troisième pièce après optimisation.
Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper 223

Liste des tableaux

Tableau I-1 : La différence entre le processus de conception intégrée et traditionnelle. Source : Inspiré de Busy cité par (Jean-Philippe Dionne, 2015)..... 41

Tableau I.2. Un examen des approches suggestives ou évaluatives de l'assistance à l'éco-conception, basé sur la recherche de Weissenstein (2012). Source : Inspiré de (Charline Weissenstein, 2012)cité par (Charlotte Dautremont, 2023)..... 45

Tableau II.1. Évaluation comparative du Paramétrisme, de l'architecture paramétrique et du design paramétrique. Source : (Ameen Mokhles Youns et al., 2024)..... 57

Tableau II. 2. Principes directeurs définis par le « Manifeste du paramétrage ». Source : (Oktan & Vural, s. d.)..... 60

Tableau II.3. Indice de Vote Moyen Prédit. Source : (Volkov et al., 2014)..... 72

Tableau II.4. Valeurs limites d'éclairément UDI. Source :(Carlucci et al., 2015)..... 81

Tableau III.1. Un résumé des recherches récentes sur la manière dont le changement climatique affecte la demande de chauffage, de refroidissement et de ventilation, ainsi que) les émissions de gaz à effet de serre (GE) dans les bâtiments résidentiels. Source : (Rahif et al., 2022)..... 95

Tableau III.2. Résumé des objectifs clés de l'optimisation multi-objectifs. Source : Elaboration personnelle..... 108

Tableau III.3. Composants essentiels des algorithmes génétiques. Source : élaboration personnelle. 114

Tableau III.4. Processus dans les algorithmes génétiques. Source : élaboration personnelle..... 115

Tableau III.5. Facteurs influençant la performance des bâtiments et indicateurs associés tirés de 46 revues de recherche. Source : (Harshalatha et al., 2024)..... 120

Tableau III.6. Variables de conception des bâtiments identifiées dans les articles examinés. Source :(Harshalatha et al., 2024). 121

Tableau IV.1. Type de logement en Algérie. Source: données collectées et analyse personnelle inspirées des travaux (Amira et al., 2022; Mehibel, Mia, 2018.) 137

Tableau IV.2. Critères d'analyse typologique des logements. Source : Auteur. 144

Tableau IV.3. Analyse typologique des différentes configurations des ensembles de logements sociaux. Source : Auteur..... 145

Tableau IV.4. Éclairément Mesuré par Étage et Intervalle Horaire. Source : Auteur. 152

Tableau IV.5. Données de température relevées aux différents étages d'un bâtiment. Source : Auteur..... 153

Tableau V.1. Propriétés des matériaux de l'enveloppe du bâtiment. Source : (DTR C3.2 Règlement thermique des bâtiment.)..... 158

Tableau V.2. Caractéristiques des vitrages. 159

Tableau V.3. Détails sur le modèle réel utilisé pour la validation du logiciel. Source : Auteur. 160

Tableau V.4. Comparaison des valeurs obtenues à partir des mesures et des simulations. Source : Auteur..... 162

Tableau V.5. Analyse des résultats de la corrélation de Pearson pour trois pièces. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel IBM SPSS Statistics 26. 163

Tableau V.6. Résultats de l'analyse de corrélation de Pearson pour les trois pièces. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel IBM SPSS Statistics 26. 166

Liste des tableaux

Tableau V.7. Vue comparative de la température moyenne annuelle selon différents fichiers météorologiques. Source : Auteur traité par le logiciel Meteonorm.	168
Tableau V.8 . Analyse du confort thermique pour les pièces sélectionnées dans différentes conditions climatiques. Source : Auteur.	180
Tableau VI.1. Caractéristiques des matériaux de mur utilisés pour la simulation paramétrique. Source: Auteur.....	191
Figure VI.2. Caractéristiques des matériaux en verre utilisés pour la simulation paramétrique. Source: Auteur.....	193
Tableau VI.3. Paramètres de l'Algorithme Génétique. Source: Auteur.....	196
Tableau VI.4. Solutions Variées dans le Front de Pareto pour le RDC. Source : Auteur	201
Tableau VI.5. Solutions Variées dans le Front de Pareto pour le 3ème étage. Source : Auteur	205
Tableau VI.6. Solutions Variées dans le Front de Pareto pour le 5ème étage. Source : Auteur	209
Tableau VI.7. valeurs optimales des variables pour la Solution optimale . Source: Auteur.	214
Tableau VI.8. Comparaison de la SDA Avant et Après Optimisation pour la piece1. Source : Auteur.....	215
Tableau VI.9. Amélioration des SDA pour les Pièces 2 et 3 après optimisation. Source : Auteur.....	218
Tableau VI.10. IUE après optimisation pour la piece 1. Source: Auteur.	218
Tableau VI.11. IUE après optimisation pour la piece 2. Source: Auteur.	219
Tableau VI.12. IUE après optimisation pour la piece 3. Source: Auteur.....	220

Nomenclature.

ASHRAE	Société Américaine des Ingénieurs en Chauffage, Réfrigération et Climatisation. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ANSI	Institut National des Normes Américaines American National Standards Institute
RCP	Représentations Conditionnelles Particulières Representative Concentration Pathways
sDA	Spatial daylight autonomie L'Autonomie de la Lumière Naturelle Spatiale.
EUI	L'Intensité d'Utilisation Énergétique Energy use intensif
WWR	Rapport fenêtre-mur Window wall ratio
MOO	L'optimisation multi-objectif Multi-objective optimization.
TMY	Année Météorologique Typique Typical Meteorological Year
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
APRUE	L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie.
PCI	Processus de conception intégrée
DP	Design paramétrique
CA	Conception algorithmique
CG	Conception générative
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Condition
PMV	Vote Moyen Prévu Predicted Mean Vote
PPD	Pourcentage de Mécontents Prévu Predicted Percentage of Dissatisfied
FLJ	Facteur de lumière de jour
AG	Algorithmes génétiques
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
TCP	Pourcentage de confort thermique
HSP	Pourcentage de sensation de chaleur
CSP	Pourcentage de sensation de froid
AC	Confort adaptatif
DA	Daylight Autonomy
UDI	Useful daylight illuminance
cDA	Continuous Daylight Autonomy

Chapitre Introductif.

Introduction.

Au cours des dernières décennies, les préoccupations environnementales ont émergé comme des enjeux majeurs à l'échelle mondiale, exacerbées par des facteurs tels que le changement climatique, l'épuisement des ressources naturelles et les impacts irréversibles des principaux secteurs socio-économiques. Le secteur du bâtiment, en particulier le résidentiel, se distingue par son empreinte environnementale considérable, représentant une part substantielle de la consommation mondiale d'énergie. Cette empreinte commence dès les phases de conception d'un bâtiment et se prolonge tout au long de son cycle de vie, incluant la construction, l'exploitation et finalement la démolition. (Pajek et al., 2022 ; Toutou et al., 2018)

Les bâtiments résidentiels contribuent significativement aux émissions de gaz à effet de serre, en raison principalement de la consommation d'énergie liée aux systèmes de chauffage, de climatisation, d'éclairage et à l'utilisation d'appareils électroménagers. Dans certaines régions, ce type de construction peut représenter jusqu'à 40 % de la consommation totale d'énergie. (Delgarm et al., 2018 ; Nadji Maachi et al., 2019) Par ailleurs, les enjeux environnementaux dans ce secteur soulèvent des questions de justice sociale, en particulier pour les populations vulnérables. Le logement social collectif, par exemple, fait souvent face à des contraintes budgétaires qui limitent l'intégration de technologies durables, essentielles pour améliorer le bien-être des résidents tout en réduisant les dépenses énergétiques à long terme. Ainsi, la transition écologique ne se limite pas à des considérations techniques, mais revêt également une dimension politique et sociale.

Définir les enjeux environnementaux s'avère complexe, englobant non seulement des aspects techniques, mais également des dimensions sociales, économiques et culturelles. La conception de bâtiments écoresponsables nécessite une compréhension approfondie des impacts environnementaux, tels que les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie, tout en intégrant les préférences des utilisateurs, les traditions locales et les pratiques culturelles. Ce processus d'intégration, souvent complexe, requiert des méthodes de conception qui L'architecture, en tant que discipline, transcende la simple création d'un espace bâti ; elle implique une réflexion approfondie sur les interactions entre le bâtiment, ses utilisateurs et l'environnement.(Al-Obaidy et al., 2022) Dans le contexte des bâtiments résidentiels, cette complexité est accentuée par la nécessité de répondre à des critères variés tels que le confort thermique, visuel et acoustique, tout en respectant les exigences structurelles et de durabilité à long terme. Le bien-être des occupants, tant psychologique que physique, ainsi que leur sécurité, se trouvent au cœur de cette démarche.

Parallèlement, les exigences législatives et normatives jouent un rôle déterminant dans la conception architecturale contemporaine. Les réglementations relatives à l'efficacité énergétique, à la durabilité et à la protection de l'environnement évoluent en permanence, imposant aux architectes de s'y conformer tout en anticipant les changements futurs. (Pajek et al., 2022) Cette dynamique ajoute une charge supplémentaire aux concepteurs, qui doivent

Introduction générale

naviguer dans un cadre juridique parfois flou. Ainsi, l'intégration harmonieuse de ces critères dans le processus de conception devient un défi majeur, nécessitant une approche systématique et intégrée pour créer des espaces qui répondent aux attentes des utilisateurs tout en respectant les impératifs environnementaux et réglementaires.

Les modes de vie contemporains, caractérisés par une urbanisation croissante et des besoins en logement diversifiés, ajoutent une dimension de complexité au paysage architectural. La demande accrue pour des logements abordables, durables et adaptés aux nouvelles formes de vie incite les architectes à faire preuve d'innovation. Ces nouveaux modes de vie exigent des conceptions qui ne se limitent pas à des critères esthétiques, mais qui intègrent également des fonctions sociales et écologiques. (Semahi & Djebri, 2023)

Dans cette optique, l'approche traditionnelle du design architectural, souvent fondée sur l'intuition, peut s'avérer insuffisante. Les architectes doivent désormais adopter des méthodes de conception plus rigoureuses et basées sur des données concrètes. L'intégration d'outils technologiques avancés, tels que des logiciels de modélisation paramétrique et de simulation énergétique, permet d'explorer en profondeur les impacts environnementaux dès les premières phases de conception. Cela offre aux concepteurs des opportunités d'analyse qui favorisent des prises de décisions éclairées.

Par ailleurs, la collaboration interdisciplinaire s'avère essentielle, car l'architecture doit désormais s'enrichir des compétences d'experts en ingénierie, en environnement, en sociologie et même en psychologie. Cette approche collaborative enrichit le processus de conception, facilitant une compréhension approfondie des enjeux et ouvrant la voie à des solutions innovantes face aux défis contemporains. Ainsi, l'architecture moderne doit évoluer vers une démarche intégrative, où chaque aspect, qu'il soit technique, social ou environnemental, est pris en compte pour répondre aux exigences d'un monde en perpétuelle mutation (Feng et al., 2019)

Lors de la conception de logements dans des régions à climat méditerranéen chaud, tel que c'est le cas en Algérie, il est crucial de considérer plusieurs paramètres afin d'assurer un confort intérieur optimal et une efficacité énergétique élevée. L'analyse des caractéristiques climatiques locales, incluant les variations de température, l'humidité, ainsi que la direction et la vitesse du vent, influence directement sur les choix de conception architecturale. Cette évaluation permet d'optimiser l'orientation des bâtiments et la disposition des ouvertures, favorisant ainsi les gains solaires en hiver tout en atténuant la chaleur excessive en été.

Le choix des matériaux de construction s'avère également déterminant. L'adoption de matériaux présentant de bonnes propriétés thermiques est essentielle pour stabiliser la température intérieure. Il est par ailleurs impératif de prendre en compte l'isolation thermique et acoustique, afin d'améliorer le confort des occupants tout en minimisant les pertes d'énergie. Les surfaces vitrées, telles que les fenêtres, doivent être sélectionnées en fonction de leur performance énergétique. L'utilisation de verre à haute performance, combinée à des dispositifs de protection solaire, permet de réguler efficacement la lumière naturelle et la chaleur, assurant un éclairage adéquat tout en prévenant les risques de surchauffe.

Dans ce contexte, garantir un confort lumineux et thermique optimal est primordial pour créer un environnement de vie agréable tout en minimisant la consommation d'énergie. Pour relever les défis associés à la performance intérieure et à l'efficacité énergétique, une approche multicritère devient indispensable. Cela implique l'intégration de données climatiques, de considérations fonctionnelles et esthétiques, ainsi que des besoins spécifiques des occupants. L'intégration de technologies durables est également cruciale pour optimiser l'efficacité énergétique tout en assurant un cadre de vie confortable. Ces systèmes peuvent être adaptés aux besoins des utilisateurs et aux fluctuations climatiques, permettant ainsi une utilisation efficace des ressources énergétiques. (Ameur et al., 2020; Sakhri et al., 2022)

Parallèlement, l'optimisation des performances des bâtiments écologiques constitue un défi significatif pour les architectes, qui doivent adopter une approche innovante dès les premières étapes de la conception. L'intégration d'outils modernes et de nouvelles méthodes, notamment l'approche paramétrique, s'avère essentielle pour aborder la complexité croissante des problématiques environnementales. (Abdullah & Kamara, 2013) Cette méthode repose sur des algorithmes informatiques capables d'explorer une large gamme de scénarios de conception, offrant aux concepteurs la possibilité d'analyser en temps réel divers paramètres afin d'identifier les solutions les plus adéquates. En intégrant des modèles paramétriques dès le début du processus, les architectes peuvent affiner leurs propositions pour répondre efficacement aux exigences contemporaines.

Ainsi, créer des logements à faible consommation d'énergie tout en garantissant un confort thermique et visuel constitue un véritable défi pour les chercheurs et les professionnels du secteur. Les architectes et les ingénieurs s'efforcent d'optimiser le bien-être des occupants dans les logements sociaux tout en maintenant l'efficacité énergétique. Néanmoins, peu d'études se consacrent à l'évaluation et à l'amélioration simultanées des critères lumineux, thermique et énergétique. Il est essentiel que les bâtiments résidentiels fournissent un cadre de vie sain et agréable, ce qui fait de la conception d'espaces intégrant un éclairage naturel suffisant et un confort thermique tout en minimisant la consommation d'énergie un enjeu crucial pour les concepteurs.

Problématique.

L'enjeu de la performance climatique des bâtiments résidentiels en Algérie constitue un point central. L'absence de directives claires entrave l'élaboration de conceptions architecturales adaptées au climat, ce qui impacte négativement la capacité des architectes à concevoir des unités résidentielles efficaces sur le plan énergétique. Par conséquent, il devient impératif d'adopter des méthodes novatrices qui intègrent les technologies modernes tout en tenant compte des considérations environnementales afin d'atteindre une efficacité accrue.

Dans ce cadre, le logement social collectif joue un rôle fondamental dans la politique de logement en Algérie. Cependant, les décideurs font face à des défis majeurs, notamment la nécessité d'atteindre des objectifs quantitatifs, souvent au détriment du confort et du bien-être des utilisateurs ainsi que de la qualité de la construction. Les concepteurs négligent

fréquemment ces facteurs en raison de la complexité du processus de conception et de l'exigence d'une construction rapide à coûts maîtrisés. (Semahi et al., 2021) Cette dynamique a conduit à des conceptions inadaptées, ne répondant pas aux véritables besoins des populations, révélant ainsi une approche désorganisée et peu scientifique du plan urbain. De plus, la méconnaissance des spécificités culturelles, sociales et climatiques de la région a favorisé l'uniformisation des logements et la généralisation de l'architecture à travers l'Algérie. Lors de la mise en œuvre du programme quinquennal visant à construire un million de logements entre 2015 et 2019, ces tendances ont persisté dans les pratiques architecturales. Il a été observé que des conceptions similaires sont largement reproduites dans les villes algériennes, soulevant des préoccupations quant à leur intégration avec le climat et l'environnement. Ce programme a également mis en lumière le manque d'harmonie et de conformité aux conditions environnementales.

Au fil des ans, la profession architecturale a constamment recherché un équilibre entre l'environnement naturel et bâti, intégrant de plus en plus des techniques de fabrication numérique, notamment l'approche paramétrique. Ce dernier s'est imposé comme un outil essentiel pour la modélisation dynamique des projets architecturaux, permettant aux concepteurs d'explorer divers scénarios en fonction de contraintes spécifiques et de critères environnementaux. Comme l'indiquent (Qingsong & Fukuda, 2016), l'approche paramétrique permet de générer des solutions architecturales personnalisées, adaptées aux exigences du projet et aux besoins des occupants, tout en tenant compte de la performance énergétique et du confort intérieur. Ainsi, en combinant l'approche paramétrique avec des techniques d'optimisation avancées et une meilleure prise en compte des enjeux climatiques, il devient possible de concevoir des bâtiments qui relèvent les défis posés par le climat, tout en améliorant le bien-être des occupants. La performance énergétique des bâtiments est étroitement liée aux conditions climatiques, soulignant ainsi l'importance d'intégrer les projections de changement climatique dès les premières étapes de la conception architecturale. Cette phase initiale est cruciale, car elle détermine non seulement les principales décisions de conception, mais aussi l'impact à long terme sur le confort des occupants et l'efficacité énergétique.

Les recherches montrent que le changement climatique exacerbe l'inconfort thermique dans les bâtiments, intensifiant la demande en systèmes de chauffage et de refroidissement, ce qui augmente la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. (Andrić et al., 2016, 2016 ; Attia & Gobin, 2020) Cependant, en Algérie, les études portant sur l'impact des scénarios climatiques futurs sur les bâtiments résidentiels restent insuffisantes, limitant ainsi la mise en place de stratégies durables adaptées aux spécificités locales. Pour concevoir des bâtiments résilients face aux défis climatiques, il ne suffit pas de se concentrer uniquement sur l'efficacité énergétique. Il est également indispensable d'assurer un confort thermique et visuel optimal pour les occupants, tout en minimisant la consommation d'énergie. L'éclairage naturel joue un rôle central dans cette démarche, car il a un impact direct sur le bien-être des habitants, améliorant leur santé mentale et physique et augmentant leur productivité. De nombreuses études (Nadji Maachi et al., 2019; Toutou et al., 2018) ont démontré que la qualité de l'éclairage naturel influe positivement sur la qualité de vie au sein des espaces résidentiels.

En parallèle, la recherche sur le confort thermique met en évidence les effets néfastes des conditions extrêmes de température sur la santé des occupants, surtout dans les bâtiments mal isolés. (Al-Obaidy et al., 2022 ; Lakhdari et al., 2021 ; Medjeldi et al., 2023 ; Méndez Echenagucia et al., 2015) Ainsi, le bien-être des résidents, en particulier dans le logement social collectif, dépend directement de la capacité des bâtiments à offrir des conditions thermiques confortables. Ce confort impacte non seulement leur santé physique, mais aussi leur sommeil, leur interaction sociale et leur qualité de vie au quotidien.

Cependant, atteindre un équilibre parfait entre la réduction de la consommation énergétique et la création d'un environnement confortable est complexe. En effet, maintenir des conditions thermiques et d'éclairage optimales peut souvent exiger une quantité d'énergie considérable. Par conséquent, il devient nécessaire de concevoir des stratégies architecturales et des solutions technologiques qui optimisent ces deux aspects. La coordination entre l'efficacité énergétique et le confort des occupants représente donc un enjeu majeur, nécessitant une approche intégrée pour améliorer les performances globales des bâtiments tout en tenant compte des contraintes climatiques futures.

Ce projet de recherche, qui vise à combler les insuffisances relevées dans la littérature scientifique et à anticiper les défis futurs, a pour objectif de démontrer l'importance de l'approche paramétrique dans la conception environnementale des logements sociaux. Il se concentre sur l'optimisation du confort intérieur et de l'efficacité énergétique, tout en prenant en compte les défis posés par le changement climatique. En intégrant cette approche dès les premières étapes du processus de conception architecturale, cette étude aspire à explorer et à identifier des solutions innovantes et durables qui améliorent la performance des bâtiments tout en répondant aux besoins des occupants.

- Cette recherche porte principalement sur les ensembles résidentiels en Algérie, en mettant l'accent sur un bâtiment situé au sein d'un complexe de 956 logements sociaux à Guelma, représentatif des insuffisances observées dans le secteur de l'habitat social. À partir de cette présentation du sujet, il devient possible d'identifier des problématiques propices à des investigations approfondies, ainsi que de formuler les interrogations suivantes :
- **Comment trouver un compromis optimal qui permet une conception architecturale mieux adaptée aux exigences environnementales ?**
- **Comment déterminer les paramètres qui ont plus d'influence pour optimiser la performance environnementale dans le contexte des logements sociaux à Guelma ?**
- **Avec quelle pratique architecturale les concepteurs peuvent intégrer cette pluralité de paramètres de performance face au changement climatique future dans le processus de conception architecturale ?**

Hypothèse.

Afin de mener cette étude, il est indispensable de formuler des hypothèses constitue le début de cette investigation. Alors cette recherche est fondée sur l'hypothèse suivante, qui sera testée :

1- L'adoption d'une approche paramétrique dans le processus d'une conception environnementale intégrée permettra d'améliorer la qualité environnementale du logement et assurer un confort optimal.

2- Les paramètres tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux de construction, ainsi que les caractéristiques des fenêtres et des dispositifs d'ombrage, jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la performance environnementale des logements sociaux à Guelma. Leur intégration dans le processus de conception peut entraîner une amélioration significative de l'efficacité énergétique.

3- L'adoption de pratiques architecturales intégratives, telles que l'éco-conception intégrée, permet aux concepteurs d'incorporer efficacement une diversité de paramètres de performance en réponse aux conditions climatiques futures dans le processus de conception architecturale.

Objectifs de recherche.

Dans ce cadre nous approchons l'Eco conception en particulier, afin d'atteindre les objectifs fondamentaux.

- ✓ Montrer le potentiel de l'approche paramétrique au cours des premières étapes conceptuelles du bâtiment, afin de réaliser ce style durable de conception environnementale basé sur l'optimisation du confort.
- ✓ Contribuer à l'évaluation environnementale des logements sociaux en Algérie et particulièrement à Guelma.
- ✓ Évaluer l'influence des paramètres tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux de construction et les dispositifs d'ombrage sur la performance environnementale des logements sociaux à Guelma.
- ✓ Étudier les pratiques architecturales existantes en matière d'éco-conception intégrée et leur efficacité à intégrer une pluralité de paramètres de performance face aux conditions climatiques futures.

Méthodologie de travail.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, un cadre méthodologique a été soigneusement élaboré, reposant sur trois approches essentielles : conceptuelle, empirique et paramétrique. L'approche conceptuelle joue un rôle clé dans l'établissement d'une base théorique solide qui sous-tend l'ensemble de l'étude. Cela se réalise par le biais d'une revue de littérature approfondie et ciblée, qui englobe une variété de sources bibliographiques, y compris des ouvrages, des thèses et des articles académiques. Cette phase de recherche est cruciale, car elle permet non seulement de contextualiser le sujet, mais aussi de définir clairement les concepts et les mots-clés pertinents.

En s'appuyant sur cette littérature, l'étape conceptuelle vise à approfondir notre compréhension de notions fondamentales telles que le confort intérieur, l'efficacité énergétique, et l'approche paramétrique. Ce faisant, elle permet également d'identifier les insuffisances dans les études antérieures et d'évaluer les avancées réalisées dans le domaine, fournissant ainsi un état de l'art qui éclaire les enjeux contemporains liés à la conception architecturale et aux préoccupations environnementales.

La dimension empirique de cette étude repose sur des visites in situ, centrées sur la ville de Guelma. Des ensembles de logements sociaux récents ont été sélectionnés afin d'évaluer le confort intérieur, tant thermique que visuel. Quatre cités ont été choisies pour ces visites, permettant de réaliser des relevés architecturaux détaillés et d'analyser les solutions de confort et de durabilité mises en œuvre.

Un bâtiment représentatif a été retenu parmi un complexe de 956 logements, avec des mesures effectuées durant les périodes la plus froide et la plus chaude de l'année dans trois appartements à différents niveaux : rez-de-chaussée, troisième et cinquième étage. Les niveaux d'éclairement naturel ont été mesurés à l'aide d'un luxmètre, et les relevés de température ont été réalisés conformément à la norme ANSI/ASHRAE Standard 55-2017.

La validation des données collectées sur le terrain a été effectuée à l'aide du test de Pearson pour évaluer la corrélation entre les mesures expérimentales et les résultats simulés, révélant une forte concordance. Bien que la validation des consommations énergétiques n'ait pas pu être réalisée, les calculs concernant les conditions thermiques et lumineuses validées sont cohérents et permettent d'optimiser les résultats.

Des simulations climatiques ont été menées avec Meteonorm pour les scénarios RCP 8.5, générant des données pour les années 2050 et 2080, en tenant compte du cycle de vie de 60 ans d'un bâtiment. La modélisation a été réalisée avec Rhino et Grasshopper, intégrant les données climatiques via les plugins Ladybug et Honeybee.

Les performances ont été évaluées selon une approche paramétrique, utilisant des indicateurs tels que l'Autonomie de la Lumière Naturelle Spatiale (sDA300/50%) et l'Intensité d'Utilisation Énergétique (EUI), ainsi que des mesures de confort thermique (TCP, HSP, CSP).

L'optimisation a été réalisée en utilisant des algorithmes et des modèles paramétriques, explorant le rapport fenêtre-mur (WWR) et évaluant quatre matériaux pour les murs extérieurs, six types de fenêtres, ainsi que l'impact de l'orientation du bâtiment sur l'efficacité énergétique. Ces analyses permettent d'identifier des configurations architecturales qui améliorent le confort et l'efficacité énergétique des logements sociaux dans le contexte du changement climatique.

Structure de la thèse.

Cette thèse débute par une introduction générale, puis se divise en deux parties principales, chacune composée de plusieurs chapitres. La recherche s'est déroulée en deux phases : la première phase, de nature théorique, a permis de définir les concepts clés associés aux

hypothèses, tandis que la deuxième phase, de nature analytique, a été consacrée à la vérification expérimentale des relations entre les variables, conformément à un cadre méthodologique élaboré au préalable.

Première Partie : Cadre Théorique et Conceptuel

Cette section est fondée sur une analyse bibliographique visant à clarifier les notions et concepts qui soutiennent la recherche. Elle est divisée en trois chapitres :

- **Chapitre I :** Ce chapitre examine l'émergence de la pensée environnementale face aux effets de l'activité humaine. Il traite de l'évolution des concepts liés à l'écologie, à l'économie et à l'éthique, tout en soulignant l'importance de la durabilité et de l'éco-conception inspirées par l'architecture vernaculaire. Une attention particulière est accordée aux impacts des bâtiments sur le climat et les ressources.
- **Chapitre II :** Ici, l'accent est mis sur l'importance de l'approche paramétrique pour s'adapter aux variations climatiques tout en optimisant les performances énergétiques. Après une analyse théorique et historique, le chapitre explore les outils de modélisation et d'optimisation des paramètres de confort thermique et visuel. Il conclut en affirmant qu'une approche systémique et intégrée, fondée sur des simulations rigoureuses, est cruciale pour relever les défis de durabilité dans la conception des bâtiments résidentiels.
- **Chapitre III :** Ce chapitre se concentre sur le scénario RCP 8.5, qui anticipe une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Il souligne l'importance des stratégies d'adaptation pour concevoir des bâtiments résilients et présente l'optimisation multi-objectifs (MOO) comme un moyen d'équilibrer performances environnementales et exigences esthétiques. Les algorithmes génétiques sont également abordés pour leur potentiel en matière d'efficacité énergétique, mettant en avant la nécessité d'une optimisation paramétrique pour faire face aux défis climatiques à venir.

Deuxième partie : cadre méthodologique, analyse et optimisation

Cette section présente le cas d'étude, décrit la méthodologie, y compris les techniques d'investigation et les outils utilisés, ainsi que l'analyse des données, les résultats obtenus et leur discussion. Elle se compose de trois chapitres :

- **Chapitre IV :** Ce chapitre examine le contexte géographique, climatique et socio-économique de Guelma, en Algérie, qui influence le logement social collectif. Avec son climat méditerranéen chaud, la ville fait face à des défis tels que des températures élevées et un fort rayonnement solaire, affectant le confort thermique et visuel des résidents. L'étude se concentre sur le complexe résidentiel LPL, où des mesures d'éclairage naturel et thermique seront effectuées dans différents appartements pour évaluer leur impact sur le confort des occupants. Ce chapitre vise à établir un cadre d'analyse des enjeux liés au logement social collectif à Guelma, intégrant les

considérations climatiques et socio-économiques pour proposer des améliorations en matière de confort intérieur.

- **Chapitre V** : Ce chapitre explore une approche intégrée alliant la validation des mesures in situ et la simulation paramétrique du bâtiment via le logiciel Rhino/Grasshopper. La validation des données collectées garantit la fiabilité des résultats en comparant les conditions réelles aux simulations, ce qui est essentiel pour ajuster les modèles si nécessaire.
- **Chapitre VI** : Ce chapitre aborde l'optimisation des performances énergétiques des bâtiments, un enjeu crucial dans la lutte contre le changement climatique et la promotion d'une architecture durable. Il se concentre sur une approche d'optimisation multi-objectifs visant à améliorer simultanément le confort intérieur et l'efficacité énergétique. Le chapitre commence par définir les variables pertinentes à optimiser, telles que les caractéristiques des murs, l'orientation du bâtiment et le choix des matériaux. Il met également l'accent sur l'Intensité d'Utilisation Énergétique (IUE) et le confort thermique comme indicateurs clés de l'efficacité énergétique. Enfin, le chapitre présente les outils et méthodologies d'optimisation employés pour évaluer les configurations par rapport à des scénarios climatiques réalistes, soulignant l'importance d'une conception adaptative pour relever les défis environnementaux actuels. La simulation paramétrique permet d'analyser les performances thermiques et énergétiques en fonction de diverses variables, tout en intégrant des scénarios climatiques futurs (TMY et RCP 8.5 pour 2050 et 2080).

Conclusion générale

Cette section résume les principaux résultats de la recherche, en mettant en lumière les contributions théoriques et pratiques, ainsi que les perspectives pour de futures recherches et des applications dans le domaine de l'architecture durable.

Introduction générale

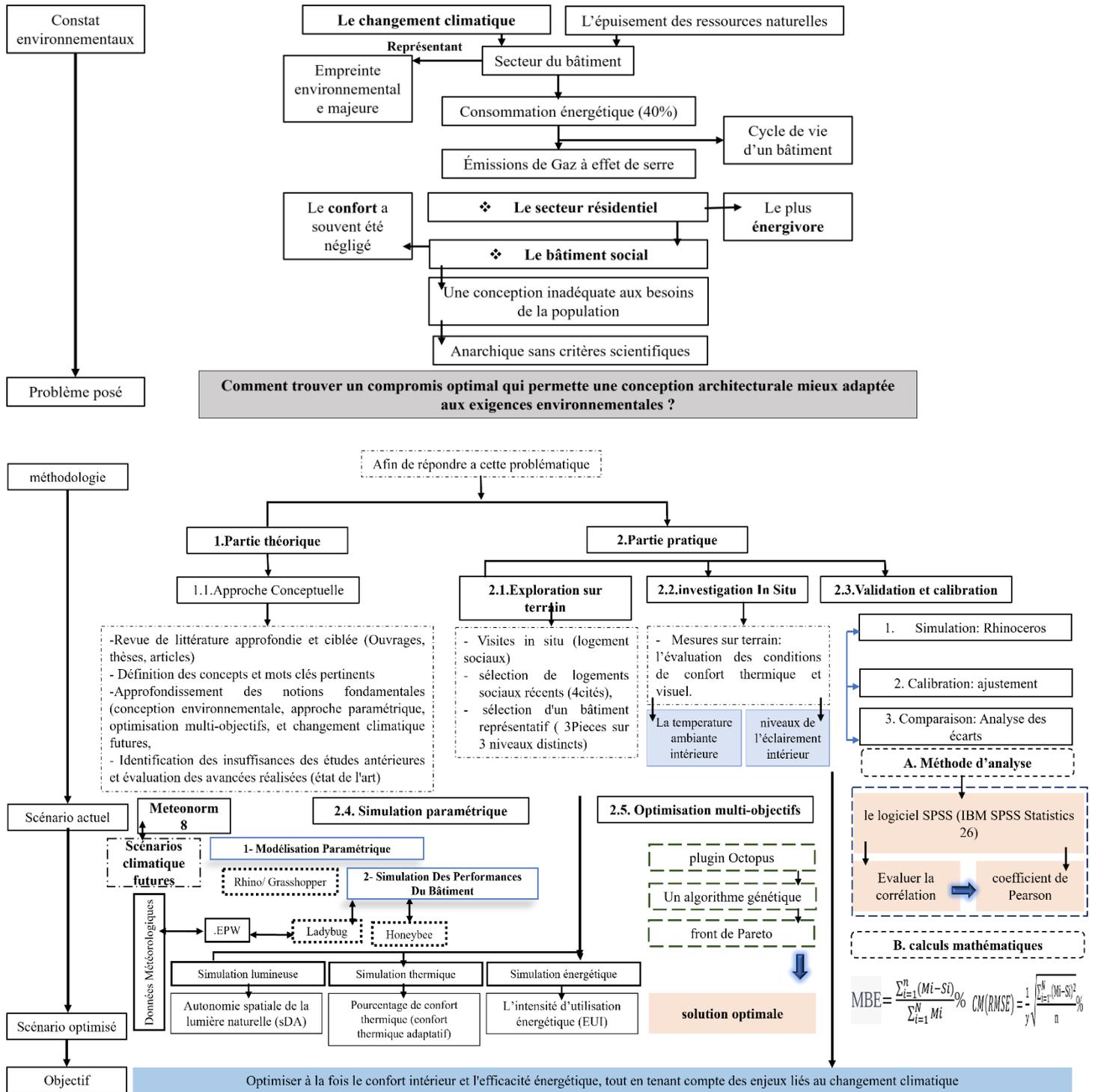


Figure. 1 : Récapitulatif de la problématique posée et la méthode d'évaluation utilisée (Auteur, 2024).

**La première partie : cadre théorique et
conceptuel.**

**Chapitre I : La pensée
environnementale dans la
conception architecturale**

Introduction.

La prise de conscience croissante des enjeux environnementaux a profondément influencé la manière dont nous concevons et construisons nos bâtiments. Depuis le début de l'industrialisation, l'urbanisation rapide et les pratiques de construction intensives ont eu des impacts significatifs sur notre planète, notamment en augmentant les émissions de gaz à effet de serre et en épuisant les ressources naturelles.

Face à ces défis, la pensée environnementale émerge comme un cadre essentiel pour guider la conception architecturale contemporaine. Dans le premier chapitre, nous aborderons les fondements de la pensée environnementale et son évolution au fil du temps. Nous commencerons par une introduction à la pensée environnementale, soulignant son émergence en réponse aux préoccupations croissantes concernant les impacts de l'activité humaine sur notre planète. Nous examinerons ensuite l'évolution des concepts liés à l'environnement, mettant en lumière comment la définition de ce terme s'est élargie pour inclure des aspects écologiques, économiques, et éthiques. Cette évolution a été catalysée par divers événements et contributions scientifiques, ainsi que par une prise de conscience croissante des impacts environnementaux de l'urbanisation et de la construction.

Le chapitre se penchera également sur les impacts environnementaux des bâtiments, une analyse cruciale pour comprendre comment l'architecture influence et est influencée par les enjeux environnementaux. Nous discuterons des effets du réchauffement climatique, de la consommation croissante et non durable des ressources, ainsi que des autres pressions environnementales générées par le secteur de la construction. Enfin, nous conclurons ce chapitre en examinant les enjeux environnementaux dans les bâtiments et leur origine. Nous explorerons comment l'architecture vernaculaire, avec ses pratiques régionales et son adaptation au contexte local, a inspiré des approches modernes d'éco-conception. Ce parcours historique et conceptuel mettra en lumière l'importance de la durabilité et de l'éco-conception dans la conception architecturale contemporaine, en soulignant les avancées et les défis qui subsistent dans ce domaine crucial.

I.1. Introduction à la pensée environnementale.

Au cours de la période historique allant de 1850 à nos jours, où l'activité humaine a eu le plus grand impact sur l'environnement, trois grandes tendances sont apparues : une augmentation marquée de la croissance des industries polluantes, une consommation excessive de matériaux et d'énergie par les pays hautement développés et la formation de concentrations urbaines denses. Les environnements urbains sont parmi les principaux moteurs du changement climatique passé, présent et futur en raison de la concentration des humains et de leurs activités. De plus, ces zones sociales sont les plus exposées aux impacts de ces modifications. Comme l'a souligné Nathalie Pour la première fois dans l'histoire, en 2007, le pourcentage de personnes vivant dans les villes a dépassé les 50%. D'ici 2025, il est prévu qu'il atteigne 60 %, ce qui entraînera des transformations importantes dans les principales zones urbaines, car la croissance de l'urbanisation est accompagnée de graves problèmes humains et environnementaux, et est associée à une dégradation des conditions de vie. En 1960 et 1970, la barrière de résilience de la Terre a été atteinte, mais à l'approche de 2024, comment les émissions de gaz à effet de serre peuvent-elles être réduites alors qu'elles ont augmenté et qu'elles ont probablement atteint leur maximum vers 2020 ? Étant donné que les émissions s'accumulent en quantités importantes

depuis plus de 50 ans, même si elles sont réduites de façon spectaculaire, leurs effets dureront longtemps. Nous sommes donc entrés dans l'ère de l'Anthropocène, un terme inventé par le biologiste américain Eugène Störmer et le géochimiste néerlandais Paul Cruutzen en 2000. Ce néologisme décrit une période où il existe une possibilité significative que l'activité humaine bouleverse de façon permanente la géophysique de la planète et de son climat. (Marsault, 2018)

D'après Sabine Barles, il est affirmé par les experts que nous ne pouvons pas retrouver les densités et les morphologies urbaines actuelles. Néanmoins, il est nécessaire de commencer à prendre sérieusement en compte la façon dont nous concevons et construisons des espaces afin de minimiser l'impact de leur croissance sur la biosphère et les écosystèmes.

À la fin du XIXe siècle, l'architecture se divisa progressivement en deux courants de pensée : l'école "traditionnelle", qui se penchait sur les particularités des pratiques régionales, et l'école "moderne", qui se focalisait sur l'industrialisation et la mondialisation de l'architecture. La seconde moitié du 20e siècle a été marquée par l'émergence de l'école moderne, tandis que la société d'après-guerre était confrontée à une crise de logement de plus en plus importante. Les architectes Adolf Loos, Auguste Perret, Ludwig Mies Van der Rohe et Oscar Niemeyer ont joué un rôle crucial dans l'émergence de ce style, avec le mouvement du Bauhaus comme fondement. Ce style se démarque par la mise en œuvre de nouvelles technologies, une adaptation au design minimaliste et des lignes fonctionnelles et géométriques. Ce mouvement était fondé sur l'idée que le design et l'architecture ont une utilité dans une société de plus en plus industrialisée. Tout au long du siècle, ce mouvement a eu un impact profond sur la théorie architecturale. Néanmoins, une deuxième école, différente de l'école moderne, a continué à suivre l'architecture vernaculaire¹. Plus traditionnelle et rurale, cette école était jugée désuète par la société de l'époque. Elle présentait des valeurs intéressantes d'un point de vue environnemental (utilisation des ressources locales, prise en compte du contexte, etc.) Elle s'est adaptée aux progrès technologiques sans réduire les qualités régionales existantes de l'architecture vernaculaire. C'est cette école qui a inspiré le concept d'éco-conception dans l'architecture d'aujourd'hui. (Gholipour, .2018).

Nous avons vu émerger le concept de la pensée environnementale en réponse aux inquiétudes grandissantes concernant les conséquences néfastes de l'activité humaine sur notre planète. Cette manifestation s'est produite suite à divers événements, tels que les crises environnementales et les catastrophes naturelles, ainsi que les recherches scientifiques sur le changement climatique et la détérioration du système écologique, ainsi que les initiatives sociales et les actions entreprises par les organisations environnementales pour renforcer l'engagement public.

I.2. Environnement : un concept en évolution.

La vie a connu une évolution considérable depuis son émergence sur Terre, avec la disparition et l'émergence de nouvelles espèces. Il y a environ 65 millions d'années, c'était particulièrement

¹ L'architecture vernaculaire correspond à la construction d'un groupe culturel par les utilisateurs eux-mêmes pour leur vie quotidienne. Il s'agit d'une architecture qui exprime ses besoins, ses aspirations et ses principes culturels. Elle évolue en fonction de la tradition qui la forme. Elle ne dépend ni de la conception ni de la réalisation d'un expert, c'est une architecture sans architecte. Source : (Gueliane, 2017)

le cas des dinosaures. Ainsi, l'environnement terrestre n'est pas statique ; il évolue en fonction de phénomènes naturels. Les changements environnementaux ont été provoqués par la présence de l'homme sur la Terre. Cela se traduit par l'extinction d'espèces végétales ou animales, la modification des habitats des animaux, l'apparition de civilisations et de villes, etc. L'objectif de l'espèce humaine est de continuer à exister le plus longtemps possible. La population humaine s'est considérablement accrue et est aujourd'hui fortement industrialisée. Les changements que l'homme apporte à l'environnement ne sont plus négligeables. L'homme tente d'adapter l'environnement à lui-même, souvent en allant au-delà, alors que les autres êtres vivants s'adaptent à un environnement changeant. (Ngô, 2008)

Un point de vue dans l'étude de la signification de l'environnement a fait surface au cours de la dernière décennie. Il s'agit d'une ébauche de solution potentielle qui nécessite davantage de développement plutôt qu'une vision fermée et achevée de la question. Gibson présente ce nouveau point de vue sur l'écologie de la vision. Plutôt que de traiter l'environnement comme une catégorie de perception ou de cognition ou comme une collection de données objectives, il semble qu'une approche écologique permette de mieux saisir le lien réciproque entre l'organisme et son environnement.

L'écologie est la première et la plus cruciale des idées qu'il convient de décrire. Elle doit être utilisée dans le sens où l'entend l'ouvrage de 1866 *Morphologie générale des organismes* du scientifique Haeckel, qui a inventé le terme : « L'écologie est la science générale qui étudie les rapports de l'organisme et de son milieu extérieur. » L'examen des interactions d'un organisme avec son "espace" immédiat constituerait-il une approche écologique de l'étude de l'environnement ? Cependant, d'un point de vue écologique, que signifie exactement « espace » ? Il s'agit de l'espace intellectuel, et non de la grille de lignes spectrales du système de coordonnées tridimensionnelles. La créature habite et navigue dans l'espace écologique. D'un point de vue écologique, l'organisme traverse toujours un matériau poreux sans entrer en collision avec les surfaces qui l'entourent. (Ngô, 2008)

Notre environnement visuel et vécu est constitué de toutes les choses que nous devons observer afin d'agir efficacement. En réalité, seuls les paysages, les montagnes, les arbres, les plantes, les bâtiments, les objets, les animaux et, enfin, les individus sont visibles. Dans notre environnement, on peut mesurer des textures en millimètres, des objets en mètres, ainsi que le paysage visible en kilomètres. Les galaxies ou les atomes ne sont pas visibles.

L'organisme et l'environnement sont étroitement liés. Il est impossible pour un organisme d'exister sans son environnement, et vice versa. Donc, ce qui existait avant l'émergence de la vie sur terre ne peut pas être qualifié d'environnement. (Zube & Moore, 1991)

Depuis une vingtaine d'années, les études sur l'environnement ont connu une croissance rapide et significative. Cela est attribuable à la fois à l'urgence qui prévaut dans ce domaine et à la diversité des questions à aborder.

Jusqu'à un ancien proche, ce domaine de recherche s'est développé progressivement, de manière extrêmement pragmatique : des études ont été menées sur des sujets spécifiques au fur et à mesure qu'ils étaient identifiés, notamment grâce à de nombreux rapports rédigés depuis le

début des années soixante-dix, tant sur des problèmes généraux que sur des questions plus spécifiques.

En termes courants, l'environnement désigne ce qui l'entoure ou c'est ce qui l'entoure ; tout environnement est défini en fonction d'un objet central. Cela entraîne déjà une grande diversité dans la signification du terme pour les chercheurs. Le biologiste se concentre principalement sur la population qu'il étudie, tandis que l'environnement l'entoure. Selon un physiologiste, le principal objet est un organisme, une personne ou un organe ; l'environnement correspond à ce qui l'entoure, qu'il s'agisse de cet organisme (le "milieu ambiant") ou de cet organe (le "milieu interne"). Selon un sociologue, l'environnement peut englober notre famille, notre groupe social, notre environnement de travail, notre environnement de vie...

C'est de cette façon que l'on a défini l'environnement comme étant "l'ensemble des éléments physiques, chimiques et biologiques ainsi que des facteurs sociaux qui peuvent avoir un impact direct ou indirect, immédiat ou à long terme, sur les êtres vivants et les efforts humains". (Jollivet & Pavé, 1993)

Le concept d'environnement a évolué de manière spectaculaire au fil du temps, passant d'une conception étroite des années 1950, axée sur les circonstances à la maison ou au travail, à une conception moderne qui englobe les relations complexes entre l'activité humaine et tous les aspects de l'environnement naturel. Avec un champ d'application plus large qui couvre des problèmes tels que la pollution, le changement climatique, la biodiversité et la préservation des ressources naturelles, la définition actuelle de l'environnement comprend des facteurs écologiques, économiques, esthétiques et éthiques. Cette idée a évolué grâce à des contributions provenant de divers domaines, tels que la politique, le journalisme, la philosophie et les arts, montrant que l'environnement n'est pas seulement une question scientifique, mais aussi une question qui englobe l'éthique et l'esthétique. Il est prévu que, plutôt que l'épuisement des ressources naturelles, les difficultés environnementales futures proviendront de la manière dont les ressources naturelles sont utilisées, avec la possibilité d'une nouvelle technologie influencée par les mécanismes du marché pour réduire les effets sur l'environnement. Les préoccupations environnementales sont aujourd'hui au premier plan des agendas nationaux et internationaux, ce qui souligne leur importance politique et l'attention permanente qu'il convient d'y accorder. (MacDonald, 2003)

I.3. Impacts environnementaux des bâtiments : analyse et évaluation

Un bâtiment joue le rôle d'intermédiaire entre les résidents et l'environnement extérieur, dans le but de créer un espace adapté aux activités prévues (logement, lieu de travail, etc.) tout en s'intégrant à un site. En règle générale, un bâtiment est construit pour durer de nombreuses années, et l'objectif est de garantir la plus grande durabilité des performances. En revanche, l'enjeu du développement « durable »² nécessite de considérer les aspects à long terme dans l'intérêt des générations à venir. (Peuportier et al., 2020)

L'objectif principal d'un bâtiment est d'offrir à l'homme un abri et un confort. Cela signifie par l'intimité et la protection contre l'humidité et le froid. D'une modeste hutte à des structures à

² Un développement qui permet de satisfaire les besoins exprimés aujourd'hui, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins.

plusieurs étages, entièrement climatisées et dotées d'une enveloppe thermique, les premiers systèmes de construction ont évolué avec le temps, ((Heeren, 2017)) comme le montre la figure I.1.

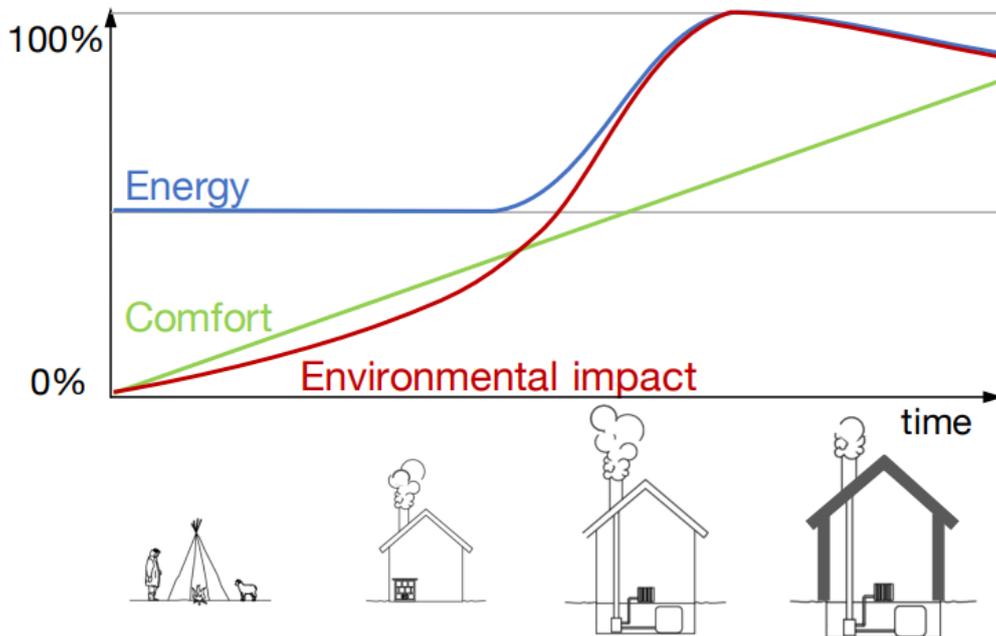


Figure I.1. l'évolution historique du confort, de la consommation d'énergie et de l'impact sur l'environnement des bâtiments. Source : (Heeren, 2017)

Ici, nous exposons plusieurs problèmes environnementaux en mettant l'accent sur les aspects généralement peu abordés dans le domaine du bâtiment.

I.3.1. Réchauffement climatique.

« Il n'y a pas de voie crédible pour lutter contre le changement climatique sans un changement majeur dans le secteur du bâtiment et de la construction » Inger Andersen, directrice exécutive du PNUE³.

Le réchauffement climatique se présente comme une menace considérable pour la planète. Les activités des individus dans le secteur du bâtiment entraînent également des émissions considérables de gaz à effet de serre. Selon le quatrième rapport du GIEC⁴ ces émissions seraient principalement à l'origine de l'élévation de la température mondiale. (Andres MORENO SIERRA, 2012.) l'environnement bâti est la plus grande source d'émissions de gaz à effet de serre, qui contribue à hauteur de 50 % aux émissions de dioxyde de carbone dans le monde. En outre, les conséquences environnementales que le bâtiment génère tout au long de son cycle de vie (en particulier le secteur résidentiel) peuvent être comparables, en termes d'ampleur, à celles qui surviennent pendant la phase d'utilisation (Stéphane CITHERLET, 2001). 40% des matériaux entrant dans l'économie mondiale sont utilisés par le secteur de la

³ PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement est la principale autorité mondiale en matière d'environnement.

⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : évalue l'état des connaissances sur l'évolution du climat, ses causes, ses impacts, source : <https://www.ecologie.gouv.fr/comprendre-giec>. Le 27.03.2024.

construction, qui produit également 40 à 50% des émissions mondiales de gaz à effet de serre⁵ et des agents responsables des pluies acides. (Khasreen et al., 2009). Ce n'est pas si différent en Algérie, elle fait face aux mêmes difficultés. D'après l'APRUE⁶, l'habitat résidentiel occupe la troisième place dans le classement des émissions de dioxyde de carbone par secteur, après les industries énergétiques et le transport. Cela indique l'importance de changer notre façon de construire. (Razika,2013.)

I.3.2. Une consommation de ressources croissante et non durable.

Certaines matières ont tendance à se raréfier avec une échéance plus ou moins proche. Selon les scientifiques, les réserves d'énergie nous donneront la capacité de répondre à la consommation actuelle pendant 230 ans dans le cas du carbone, 70 ans dans le cas du gaz, 50 ans dans le cas de l'uranium et 40 ans dans le cas du pétrole (Alain Liébard et André De Herde, 2005). Les énergies fossiles désignent l'énergie générée par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. De nos jours, les énergies fossiles constituent plus de la moitié de la consommation mondiale d'énergie primaire, notamment dans les domaines des transports, de l'industrie et de l'habitat. Elles occupent également une place prépondérante (plus des deux tiers) dans la production d'électricité, même si les énergies renouvelables progressent constamment. Même s'ils sont encore abondants, leurs réserves ne sont pas inépuisables, contrairement aux énergies renouvelables. (Khaoula, 2021.)

Chaque secteur d'activité n'exige pas la même quantité d'énergie ni les mêmes ressources énergétiques. Selon (Thiers, 2008.), le secteur de la construction, y compris le résidentiel et le tertiaire, représente entre 40 et 30 %, respectivement, de la consommation mondiale d'énergie, dont l'électricité est leur énergie préférée, représentant près de 37 %.

L'Algérie n'est pas une exception, car pendant de nombreuses années, le secteur de la construction a été l'un des plus énergivores. (Kirati et al., 2023), Selon le bilan énergétique national de l'exercice 2022 en Algérie (bilan énergétique., 2022), Le secteur des ménages "résidentiels, tertiaires & autres" occupent la première place dans la structure de la consommation finale (47%), suivi par le secteur du transport (29%) et enfin le secteur de "l'industrie et BTP" avec une part de 24%, comme le montre la figure I.2 ci-dessous :

⁵ Les gaz à effet de serre : Le dioxyde de carbone (CO₂), Le méthane (CH₄), Le protoxyde d'azote ou "gaz hilarant" (N₂O), L'ozone (O₃), Hydrofluorocarbure (HFC), l'hydrocarbure perfluoré 5PFC), et l'hexafluorure de soufre (SF₆), source : (Alain Liébard et André De Herde, 2005)

⁶ L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

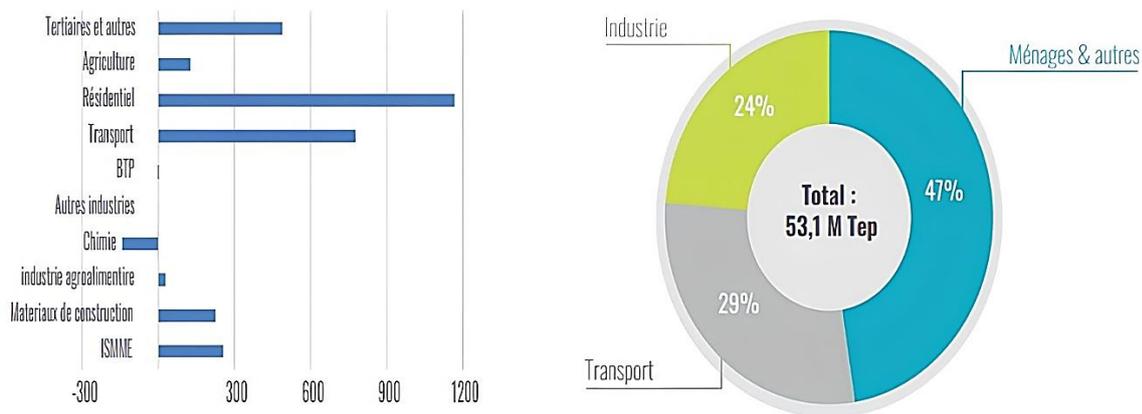


Figure I.2. Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur d'activité. Source : (Bilan énergétique national, 2022).

Suite à la crise pétrolière de 1970, il a été essentiel de diminuer la consommation d'énergie, non seulement pour des raisons économiques, mais également pour des raisons environnementales. La surutilisation de ces ressources naturelles représente la deuxième principale contrainte que la société exerce sur la biodiversité. Depuis 1970, l'utilisation des ressources a augmenté de plus de trois fois et continue d'augmenter. Les pratiques d'exploitation des ressources naturelles ont de plus en plus de conséquences néfastes sur l'environnement. Selon les estimations du Groupe international d'experts sur les ressources, 90 % de la diminution de la biodiversité et du stress hydrique sont attribuables à l'extraction et au traitement de ces derniers.⁷ (Nature France)

I.3.3. Démystification des autres éléments de pression sur environnement.

Chaque étape du cycle de vie d'un matériau de construction implique l'utilisation d'énergie, de ressources et de polluants (La figure I.3 présente une illustration graphique approfondie), qui diffèrent tous en termes d'entrée et de sortie. Près de 90 % des contaminants environnementaux du cycle de vie sont produits par l'extraction et la fabrication des matériaux de construction, sans compter la phase de traitement (Huang et al., 2018). Les émissions d'oxyde d'azote (NOX) et de dioxyde de carbone (CO₂) provenant de la combustion de combustibles fossiles nuisent à l'environnement pendant le transport et la construction. Les déchets de bois et de plâtre provenant des bâtiments sont traités, et ces matériaux sont des sources majeures d'acide organique dans les décharges. La combustion du bois, du plastique et du papier libère des polluants tels que l'ammoniac (NH₃), les ions de métaux lourds et les composés organiques volatils (COV), qui ont tous des effets néfastes sur l'environnement et le bien-être de l'homme. (Le Bars et al., 2010).

⁷ Nature France, <https://naturefrance.fr/les-consequences-des-activites-economiques>, consulté le 27.4.2024

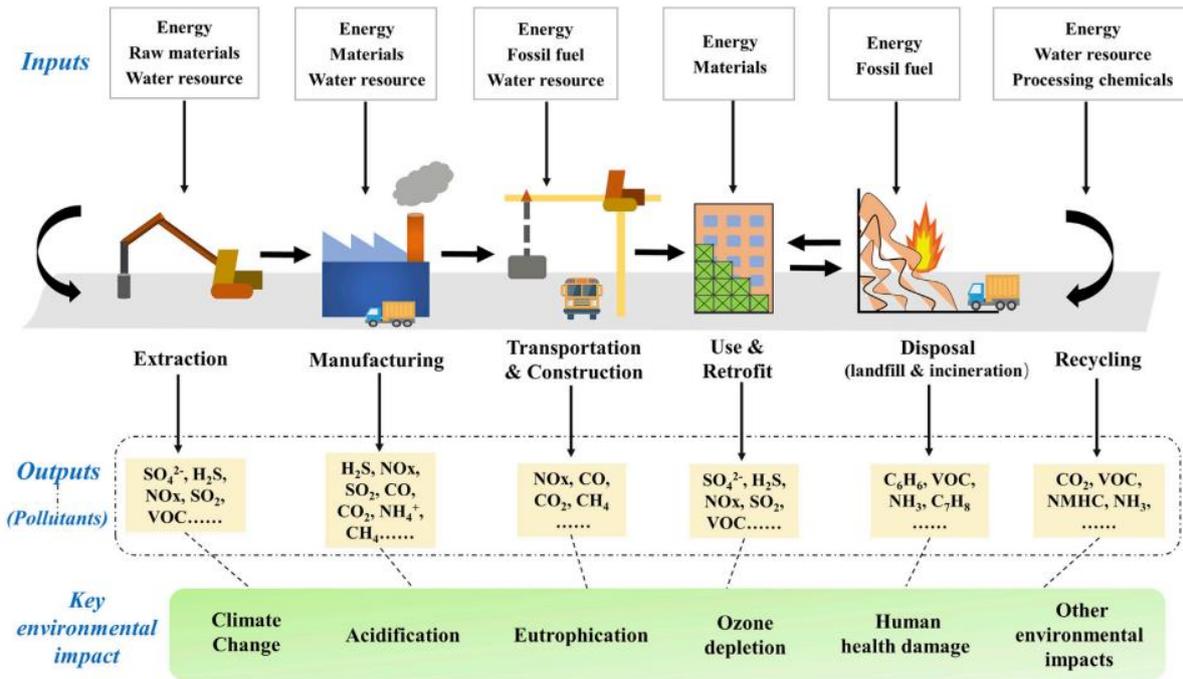


Figure I.3. Principaux Effets Environnementaux pendant la Durée de Vie des matériaux de construction. Source : (Huang et al., 2020).

Il serait judicieux de considérer que le domaine du bâtiment peut jouer un rôle essentiel dans la résolution des défis environnementaux auxquels nous sommes confrontés. En diminuant la consommation d'énergie, en optant pour des matériaux écologiques, en gérant de manière efficace les déchets et en rénovant les bâtiments existants, cependant, ce secteur est considéré comme lent à évoluer en raison de la durée de vie des bâtiments et de l'inertie du secteur du bâtiment. (Le Bars et al., 2010)

I.4. Enjeux environnementaux dans les bâtiments.

I.4.1. Origines.

L'idée fondamentale de l'environnementalisme est la reconnaissance des interconnexions entre les humains et les autres êtres vivants, les ressources naturelles et les questions environnementales. L'environnementalisme est un phénomène culturel qui implique la participation active des personnes, des communautés et des organisations qui sont motivées pour protéger les nombreux systèmes ainsi que les valeurs de la planète. À l'exception des idées et des événements qui ont façonné l'environnementalisme occidental à partir du 13^e siècle et des avertissements des scientifiques sur les menaces qui pèsent sur la nature au 19^e siècle (Grove, 1992), la réponse collective à l'état de l'environnement ne s'est pas renforcée avant la seconde moitié du 20^e siècle. Alors que l'activisme environnemental a pris de l'ampleur aux États-Unis dans le sillage du livre de Carson (2002), Printemps silencieux, la prise de conscience sociale et politique des effets de la dégradation de l'environnement a émergé en Europe dans les années 1960, principalement par le biais d'organisations de gauche qui ont attiré l'attention sur la nature et son importance déclarée. La première célébration de la Journée de la Terre a eu lieu le 22 avril 1970.

En 1972, le Club de Rome publie *Les limites de la croissance*, une description sévère de l'avenir proche, et l'organisation Greenpeace est fondée. Même si les prévisions se sont avérées peu

réalistes, comme la pénurie de pétrole à l'horizon 1990, la traduction du rapport en trente langues a montré que les préoccupations environnementales touchaient l'ensemble de la population mondiale. Le rapport Brundtland (Brundtland, 1987) a attiré l'attention sur les effets de la relation de l'humanité avec la nature à l'échelle mondiale et a conduit à une résurgence du mot « durabilité ». (Hildebrand et al., 2018.)

Afin de replacer la durabilité et l'environnementalisme dans leur contexte (O'Riordan, 1991) a défini le "nouvel environnementalisme" comme un effort pour développer un ensemble de stratégies qui aident les gens à comprendre comment les réformes qui soutiennent la triade de la durabilité, le développement localement approprié qui est écologiquement sain, et la fourniture des besoins de base et des droits politiques servent leurs intérêts ainsi que les intérêts de la terre dans son ensemble. Étant donné que le terme "durabilité" est utilisé dans divers contextes et à différentes échelles de la société moderne, sa signification est complexe. Par conséquent, afin d'apprécier pleinement l'importance de la durabilité à l'ère moderne, il est nécessaire d'examiner les cadres de référence généraux et spécifiques à ce domaine auxquels ce terme se rapporte.

Par conséquent, la durabilité est une nécessité pour le progrès continu de la civilisation mondiale. En raison de la complexité de la voie durable de la croissance humaine, la durabilité comprend aujourd'hui des facteurs sociaux, économiques et écologiques, ainsi que la manière dont ces facteurs sont liés par la culture. Dans la conception architecturale, la durabilité est le plus souvent associée à la composante environnementale, mais d'autres aspects de la durabilité doivent également être pris en compte. (Hildebrand et al., 2018.)

Afin de faire le lien entre l'aspect environnemental et la conception des bâtiments, il est primordial de se référer aux origines des enjeux environnementaux dans le domaine de l'architecture, en mettant en lumière l'architecture vernaculaire.

Avant le XVII^e siècle, la prise en compte de l'environnement dans l'architecture vernaculaire a été une constante au fil des siècles. En comparant l'être humain à sa capacité à s'adapter à l'environnement, (Sue Raof et al, 2009), il est souligné que :

« L'architecture vernaculaire a continuellement évolué afin de promouvoir la meilleure utilisation des matériaux locaux et adaptation aux conditions régionales, dans le but de fournir des habitats adéquats, quelques fois luxueux même à des populations localisées dans les climats les plus extrêmes de la planète. »

En 1964, une exposition internationale intitulée « Architecture sans architectes » a suscité l'intérêt de renommés architectes de l'époque. Plusieurs exemples de ces pratiques sont présentés par (Sue Raof et al, 2009) comme les constructions transportables ou les loggias. Les pratiques vernaculaires reflètent la question de l'environnement à travers divers facteurs, tels que le choix du site, les ressources locales, la réutilisation de l'existant (comme un arbre, une falaise, un dénivelé), le climat, etc. L'objectif de ces pratiques est d'ajuster de manière autonome l'architecture aux conditions climatiques, culturelles et économiques du peuple.

En ce qui concerne l'environnement, à la fin du XX^e siècle, l'architecture a progressivement adopté deux courants de pensée : le courant moderne qui se concentre sur l'industrialisation et

la mondialisation de l'architecture, tandis que le courant artisanal qui se concentre sur les réflexions sur les qualités des pratiques régionales. Cependant, une autre tendance alternative au courant moderne a perduré dans la continuité de l'architecture vernaculaire. La société de l'époque considérait ce courant comme passéiste, plus artisanal et rural (Figure I.4).

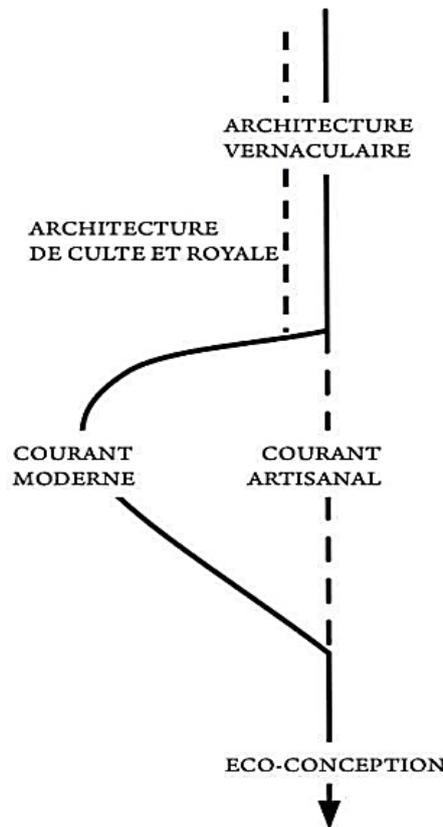


Figure I.4. La progression de la réflexion environnementale en architecture. Source : (Gholipour.,2018.).

Ce mouvement adopte des principes environnementaux intéressants (par exemple, l'utilisation des ressources locales, la prise en considération du contexte). Il s'ajuste aux avancées technologiques, tout en préservant les caractéristiques régionales déjà présentes de l'architecture vernaculaire. En fait, c'est cette tendance qui a donné naissance à la notion d'éco-conception dans le domaine de l'architecture. Ainsi, William Morris⁸ a lancé le mouvement « Arts and Crafts » (1860-1910) en s'inspirant des œuvres de John Ruskin⁹. Il souligne l'importance de l'aspect esthétique à la fois en utilisant des formes naturelles et en introduisant des aspects culturels et économiques dans le domaine de l'art et de l'architecture. (Gholipour ,2018)

En 1933, À partir du début du projet de la Maison Schmincke, l'architecte Hans Scharoun a été conscient de l'importance de l'environnement dans la conception architecturale. Scharoun a tenté de concevoir un espace de vie en harmonie avec la nature en orientant soigneusement la maison afin de mieux capter la lumière du soleil et en utilisant des éléments naturels. Les grandes fenêtres et les balcons de la maison, qui sont une conception originale, renforcent la

⁸ Designer textile, poète, artiste, écrivain et activiste socialiste anglais.

⁹ Ecrivain anglais.

connexion entre l'intérieur et l'extérieur, offrant aux résidents une expérience visuelle et sensorielle de l'environnement qui les entoure. (Samuel & Jones, 2012)

En 1935 L'œuvre architecturale emblématique de Frank Lloyd Wright, Fallingwater House, est un excellent exemple d'architecture écologique, c'est-à-dire de coexistence pacifique entre la conception et l'environnement. La méthode de Wright, qui consiste à fusionner habilement les bâtiments avec leur environnement naturel, est évidente dans la Fallingwater House. Elle utilise des matériaux produits localement et s'intègre parfaitement dans le paysage environnant en incorporant des aspects naturels dans sa conception. (Sdegno et al., 2019)

En 1948, depuis environ quatre-vingts ans, l'architecte égyptien Hassan Fathy a reconnu et prouvé que l'une des solutions aux problèmes architecturaux est de tirer le meilleur parti des ressources locales, il y est parvenu en utilisant les connaissances et les ressources pratiques dont il disposait, à savoir les connaissances et les compétences locales. En s'appuyant sur ses compétences en maçonnerie et en utilisant l'adobe, un matériau de construction ancien en Égypte qui remonte aux premiers établissements humains dans l'oasis de Fayoum, il a construit le nouveau village de New Gurna sur la rive ouest du Nil à Louxor. (Joffroy & Guillaud)

En 1972 (Schnapper et al., 1975), qui est également membre du courant Artisanal, a étudié les liens entre l'architecture et la nature dans son ouvrage intitulé pour "une anthropologie de la maison". Il a mis l'accent sur le fait que l'architecture ne se distingue pas de son environnement, mais qu'elle est étroitement liée à la nature et à la culture des habitants des lieux. Amos Rapoport a mis en avant l'importance de saisir l'impact des divers contextes culturels et environnementaux sur les formes architecturales et les modes de vie des personnes.

Les répercussions de la prédominance du courant moderne et de la substitution de la majorité des problématiques environnementales par des problématiques exclusivement économiques ont ouvert la voie à une nouvelle opportunité pour la réflexion régionale. On peut parfois interpréter cette tendance comme un retour à l'architecture vernaculaire. Cette approche passéiste est sujette à controverse, car elle néglige l'existence omniprésente - mais plus discrète - de la pensée environnementale, qui est une alternative au courant moderne, ainsi que son évolution au fil du temps. (Gholipour,2018)

Cette nouvelle reconnaissance de la pensée environnementale dans la conception de bâtiments sera abordée.

I.4.2. Reconnaissance

Selon Hegger, Fuchs, Stark et Zeumer, tel que cité dans le travail de (Hildebrand et al., 2018)l'industrie du bâtiment est responsable de la production de 40 % des gaz à effet de serre, de 60 % des déchets mondiaux et de 50 % de l'utilisation des ressources mondiales. Les effets des bâtiments sur l'environnement n'ont cessé d'augmenter depuis le début de la révolution industrielle, mais la prise de conscience n'a vraiment commencé qu'au cours de la seconde moitié du 20e siècle, lorsque diverses actions, dont on pense aujourd'hui qu'elles ralentissent les tendances néfastes sur Terre, ont été prises en réponse à des risques environnementaux (Fig I.5) (Hildebrand et al., s. d.,2018)

Chapitre I

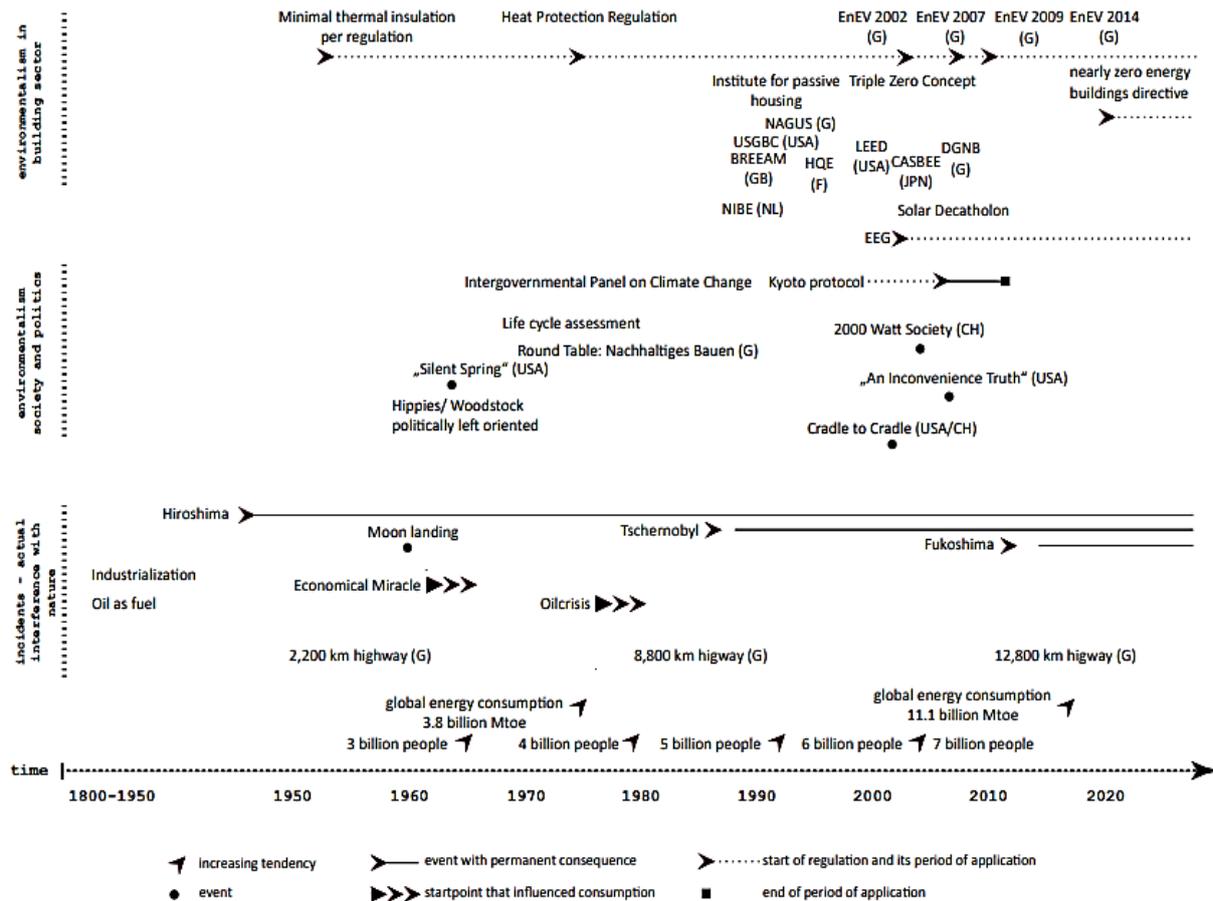


Figure I.5. Tendances et événements importants pour l'environnement, et les réponses à ceux-ci.
Source : (Hildebrand, 2014).

Les grandes façades vitrées et la transparence étaient des caractéristiques du mouvement moderne, qui se traduisaient souvent par une utilisation inconfortable et excessive de l'énergie. À ces époques, les problèmes environnementaux n'étaient pas à l'ordre du jour. D'autre part, de nombreuses tendances de développement qui ont façonné l'architecture contemporaine, y compris l'essor de la préfabrication, prennent tout leur sens à la lumière des théories actuelles de la conception environnementale. En outre, plusieurs architectes modernes bien connus ont involontairement contribué à faire progresser la conception environnementale. Parmi eux, on peut citer Le Corbusier, dont les cinq points de l'architecture comprenaient des jardins sur les toits et des plans libres ; Frank Lloyd Wright et Alvar Aalto, qui ont fourni des interprétations contemporaines de l'architecture organique ; et Oscar Niemeyer, dont la configuration architecturale intégrait des mesures de contrôle solaire. (Hildebrand et al, 2018)

Il est devenu crucial pour les constructeurs de répondre aux besoins en d'abri liés à la croissance démographique mondiale. En plus de réagir aux structures, les architectes doivent aujourd'hui prendre en compte l'environnement afin d'apporter des solutions qui respectent les cycles naturels de la planète et s'adaptent aux nouveaux enjeux climatiques. Par conséquent, on observe une augmentation significative de constructions considérées comme respectueuses de

l'environnement, ce qui témoigne de l'évolution actuelle de l'architecture. (Gholipour ,2018) Selon (Metallinou, 2006), ils estiment que :

« *Pendant de nombreuses années, la construction a été principalement associée à un mode de vie isolé du monde naturel et contrôlé par lui. la crise écologique contemporaine a incité un certain nombre d'experts et de chercheurs à réexaminer les présomptions sous-jacentes qui entourent la conception et la construction des bâtiments.* » (Metallinou, 2006)

Une illustration de cette reconnaissance est que de nombreuses techniques utilisées par l'architecture vernaculaire ont été reprises jusqu'à présent, pour répondre aux besoins d'autonomie (comme la serre, les tours à vent, les patios) des bâtiments modernes. (Gholipour, 2018).

L'étude de (Taleghani & Dariush ,2019) offre un aperçu significatif de la reconnaissance de l'architecture environnementale dans les bâtiments modernes. Elle souligne l'importance des pratiques durables et des méthodes de conception respectueuses de l'environnement dans la promotion d'un environnement bâti plus durable et plus sain.

I.4.3. L'évolution des pratiques architecturale vers la durabilité.

L'industrie du bâtiment, qui comprend la conception, la construction, l'exploitation, la rénovation et la déconstruction, est une fenêtre majeure sur l'effet de l'homme sur le monde et sur les circonstances nécessaires à la survie de l'humanité. Les activités liées au bâtiment ont une influence géographique complexe, multidimensionnelle et de grande envergure sur l'extraction des ressources, le traitement des matériaux et la dégradation de l'environnement. (Hegger et al., 2007). L'Agence internationale de l'énergie note que « *le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur final au niveau mondial* » (Internationale Energieagentur, 2012), bien que, comme le souligne le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le secteur du bâtiment dispose d'un potentiel plus important que les autres secteurs pour réduire les émissions de gaz à effet de serre au moindre coût. (Solomon et al., 2008) En outre, cette position confère au secteur une double responsabilité complexe.

De nos jours, la manière d'interpréter l'idée de durabilité et le respect de l'environnement dans les processus de conception architecturale fait l'objet de nombreux débats. Malgré l'apparente unanimité des architectes, des ingénieurs, des clients, des législateurs et d'autres acteurs sur le fait que la durabilité est une question urgente, il y a plusieurs ambiguïtés, incohérences et problèmes sans réponse qui se cachent sous cet apparent consensus. La plupart des gens ont des idées différentes sur ce qui constitue un défi durable pour la conception architecturale, sur la manière de rassembler toutes les parties prenantes, sur les échelles et les éléments à prendre en compte, et sur la manière de traduire ces questions dans les approches de conception, les arrangements spatiaux et les matériaux de construction. Ces méthodes intègrent fondamentalement une variété de facteurs cognitifs, sociaux, culturels et matériels ; elles ne peuvent donc pas être limitées à la seule résolution de problèmes technologiques. (Schroeder, 2018).

De nombreuses approches pluralistes ont émergé suite à la prise en compte par les acteurs du discours et de la pratique architecturale de la catastrophe environnementale et de la « durabilité », les auteurs abordant un large éventail de difficultés spécifiques (Figure I.6). Certains se sont

concentrés sur les questions de santé, de bien-être et de qualité de vie; d'autres se sont inspirés de "l'analogie avec les formes naturelles" (Ingersoll, 2012); Certains ont parlé d'économie circulaire et de résilience (Norouzi et al., 2021), tandis que d'autres se sont concentrés sur les modes de vie consuméristes et l'empreinte écologique (Bastianoni et al., 2006). D'autres acteurs s'appuient sur des techniques d'évaluation de la durabilité des bâtiments ou sur des recommandations de meilleures pratiques à l'échelle mondiale. Selon d'autres chercheurs, il est essentiel d'intégrer plus de technologies, notamment à travers des approches paramétriques ou génératives (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023; Medjeldi, Kirati, et al., 2023); d'autres encore préconisent un comportement plus archaïque ou de repousser les limites du confort.



Figure I.6. Un large éventail de solutions architecturales répondant à différentes conceptions des questions de durabilité. Source : (Schroeder, 2018)

En réponse à la durabilité, un large éventail de techniques architecturales a été développé. « Le désaccord sur les priorités de conception, le rôle de la technologie, l'importance de l'esthétique, la relation entre l'environnement naturel et construit et le degré d'optimisme et de pessimisme que l'état actuel de la pratique architecturale environnementale devrait invoquer » (Greig Cryslet et al., 2012) est ce qui caractérise ces pratiques pluralistes. Pour comprendre pleinement les diverses préoccupations, objectifs, approches et plans d'action, nous devons « promouvoir un engagement plus profond avec l'architecture durable, qui ne se détourne pas des questions sociologiques ou philosophiques plus larges ou ne se contente pas de se livrer aux débats étroitement instrumentaux qui caractérisent une grande partie de la littérature sur l'architecture environnementale » (Greig Cryslet et al., 2012). Il est essentiel de développer des

environnements construits qui combinent durabilité écologique et bien-être des résidents, tout en minimisant leur impact environnemental.

Il est primordial de mettre l'accent sur l'application de la conception environnementale et de l'approche paramétrique dans des pratiques spécifiques. En plus de comprendre que ces idées ou méthodes employées dans le domaine de l'architecture et du design doivent être interprétées et traduites en définitions appropriées au contexte, en objectifs de conception, en stratégies et bien d'autres encore, afin d'être réellement mises en œuvre dans la réalité. Dans notre recherche, nous examinerons de manière approfondie cette approche afin d'analyser en profondeur ses répercussions dans les sections suivantes de manière méthodique et rigoureuse.

I.5. De la conception à l'éco-conception Architecturale.

I.5.1. Résumé Historique.

Le domaine de la conception environnementale n'est pas nouveau (Randall Thomas, 2005). Pendant la période connue sous le nom de la grande dépression, les architectes ont joué un rôle majeur dans le développement du concept d'architecture en tant que conception environnementale. Leur travail a permis d'acquérir une expérience pratique et a encouragé la collaboration. Les architectes ont largement collaboré avec des urbanistes, des architectes paysagistes, des économistes et d'autres professionnels, ce qui les a exposés à un large éventail de « clients » et de demandes. Cette collaboration a ouvert la voie à de nouvelles fonctions et disciplines professionnelles. Le mot "environnement" a saisi deux concepts. Tout d'abord, cela a élargi l'horizon des architectes englobant tous les aspects de la vie humaine, y compris des sujets tels que le logement et la planification de grande envergure, qui étaient auparavant considérés comme étant à l'extérieur du domaine professionnel. Effectivement, l'environnement peut être appliqué à l'ensemble des zones naturelles et rurales, ainsi qu'aux villes. Ensuite, l'idée de l'environnement a capturé l'idée que l'architecture était influencée, non pas par la sophistication artistique, mais par le juste équilibre entre les individus et leur environnement. A deuxième terme, "recherche", suggérait une approche pragmatique/progressive qui privilégie la science, les expériences sociales et les éléments particuliers de la personne, plutôt que des solutions rationales et universalistes. (Avigail Sachs, 2018).

Bon nombre des concepts créés par les architectes pour définir la conception « performative » et les méthodes de « contrôle environnemental » à la fin des années 1940 et au début des années 1950 sont encore utilisés dans le discours professionnel. Certains architectes étaient plus préoccupés par les décors que par le processus de conception. Ils craignaient que les concepteurs utilisant la méthode de conception conventionnelle, fondée sur des connaissances implicites et souvent intuitives, n'intègrent pas de données scientifiques dans leurs produits. Ils ont donc entrepris de rendre la procédure claire, compréhensible et rationalisée. Pour ce faire, ils ont eu recours à une nouvelle « technologie intellectuelle » créée dans les domaines techniques et scientifiques. (Mumford. 1970). Le design a été conceptualisé comme un processus linéaire commençant par l'analyse et se terminant par la synthèse, conformément à cette logique. (Avigail Sachs, 2018)

L'un des rares pionniers de l'éco-conception et de l'introduction de la notion d'organicité dans la démarche de projet est l'architecte Frank Lloyd Wright (1867-1959). Cependant, malgré les

conseils de certains architectes, comme Ken Yeang, selon lesquels "un site doit être étudié d'un point de vue écologique pour déterminer la meilleure façon d'aménager l'espace sans perturber son équilibre naturel", l'architecture environnementale et écologique, qui utilise des matériaux naturels et se concentre sur la relation entre l'homme et son environnement, était encore perçue comme idéaliste dans les années 1970. Avec plus ou moins de succès, le concept de conception architecturale bioclimatique qualitative a progressé progressivement au cours des 20 années suivantes. (Marsault,2018)

L'avènement du volet quantitatif de l'éco-conception environnementale au début des années 1990 a marqué une avancée significative. À l'efficacité constructive, longtemps synonyme de préservation des ressources, s'est ajoutée l'efficacité environnementale, qui produit également des économies en commençant à réduire les effets de nos constructions sur la nature et les espaces de vie. Bien que l'analyse du cycle de vie et ses fondements scientifiques aient été étudiés pour la première fois en 1992, Depuis lors, l'éco-conception s'est imposée comme une méthodologie faisant appel à un large éventail de techniques. (Marsault ,2018).

I.5.2. Conception : notion et pratique intellectuelle.

Avant d'entamer le processus de conception architecturale, il est impératif de procéder à une analyse de l'activité de conception et du processus de réflexion de l'architecte tout au long de l'élaboration du projet.

« La conception implique essentiellement la structuration préalable des problèmes en utilisant des solutions types ou des possibilités instrumentales potentielles. Une description complète des opérations effectuées par un concepteur ne nous apprendrait toujours pas d'où est sortie la solution. » (Bill Hillier, 1984)

Au cours des dernières années, les chercheurs, les praticiens, les universitaires spécialisés dans la théorie du design et les designers eux-mêmes ont proposé un large éventail d'explications pour caractériser les idées et les pratiques fondamentales de l'activité de design. (NIGEL CROSS, 1982). L'hypothèse qui sous-tend le processus de conception est qu'il a évolué sur une très longue période, peut-être même sur des milliers d'années, lorsque l'homme a commencé à construire des outils de base pour son usage quotidien. La méthodologie de conception est définie par (Nigel Cross, 1984) comme « l'étude des principes, des pratiques et des procédures de conception dans un sens assez large et général. L'étude du mode de fonctionnement et de pensée des concepteurs, la création de cadres appropriés pour le processus de conception, la création et l'utilisation d'approches, de stratégies et de processus de conception novateurs, ainsi que la contemplation de la portée et de la nature des connaissances en matière de conception et de la manière dont elles s'appliquent aux questions de conception figurent parmi les principales préoccupations de la méthodologie ».

Depuis que Vitruve a introduit le principe de base de la technique de conception en 25 avant J.-C., sous le règne d'Auguste, le premier empereur romain, la théorie de la conception est

disponible. En outre, Vitruve a développé sa méthodologie dans divers domaines, notamment l'enseignement de la conception, la construction et l'urbanisme. Ses concepts de conception étaient fondés sur une analyse formelle, mais la technique proprement dite a été développée par essais et erreurs. L'idée de départ était de creuser des cavernes et d'imiter des nids d'oiseaux pour construire les abris. Bien que ces difficultés soient plus étroitement liées au processus global de construction, elles font toujours partie du processus de conception où le monde naturel sert de maître. (Ata Chokhachian, 2014.) Ils ont amélioré ces premières tentatives d'imitation et d'expérimentation en prêtant attention aux détails et en ajoutant des composants basés sur leurs propres observations de leur environnement (Vitruve, 1914). Bien que cela soit difficile à décrire, il s'agit d'un tournant pour la théorie de la conception. D'un autre côté, il s'agissait d'un changement dans l'enseignement du design pour le rendre plus structuré.

En effet cette conception représente l'acte par lequel les individus donnent naissance à des idées originales et créent quelque chose de nouveau, en suivant un processus spécifique. Cependant, pour une meilleure compréhension des mécanismes de la conception, il est essentiel de comprendre certains de ses aspects fondamentaux. Sa dualité inhérente, à la fois contrainte et créative, cognitive et productive, et son aspect à la fois individuel et collectif font partie de cela.

En se basant sur les travaux renommés de (Herbert A. Simon, 1960) « *The Sciences of the Artificial* », (Ahmed Laaroussi, 2007) suggère d'examiner la conception considérée comme étant :

- **Une activité qui mêle à la fois contraintes et créativité.**

La conception implique la réponse à des besoins exprimés à travers un ensemble de contraintes à la fois prescrites et temporelles. Le cadre dans lequel le concepteur agit est façonné par ces contraintes, qu'elles soient initiales ou formulées au cours du processus. Cependant, la gestion de ces contraintes n'est pas une question de conformité stricte, mais plutôt un exercice créatif où le concepteur utilise diverses tactiques cognitives pour trouver des solutions innovantes. Chaque projet est le résultat d'un processus itératif unique qui révèle la complexité et la richesse de cette activité, ce qui signifie que la conception est à la fois contrainte et créative.

- **Cognitive et productive.**

La pratique de la conception se distingue par une dichotomie inattendue : elle intègre des caractéristiques à la fois créatives et contraintes, ainsi que cognitives et productives. En d'autres termes, elle se caractérise par une dynamique dans laquelle les processus internes de la pensée sont intimement liés à la production du monde extérieur. Cela implique un examen approfondi de la question en jeu, la création de modèles mentaux et l'élaboration de solutions potentielles, le tout dans une perspective cognitive. Ces problèmes de conception - également appelés "mal définis" ou "non structurés" - sont caractérisés par des exigences initiales ambiguës et contradictoires qui nécessitent une résolution permanente des conflits. Dans la synthèse la conception est une activité dynamique qui combine habilement la réflexion interne et la production externe pour résoudre des problèmes complexes. (Ahmed Laaroussi, 2007)

- **Une activité qui présente une dualité entre les aspects individuel et collectif.**

Depuis les années 1990, la recherche sur la conception a remis en question l'idée d'un acteur unique, tel qu'un architecte ou un inventeur. Au lieu de cela, la conception est considérée comme un effort de collaboration entre de nombreux concepteurs dans le but d'une synchronisation épistémique des informations et temporelle des activités. Cela soulève le caractère interactif et collaboratif de la conception, qui nécessite une coordination, un travail d'équipe et une collaboration entre les participants.

▪ Une activité qui se distingue par la coopération et la collaboration

Bien que les dictionnaires considèrent la coopération et la collaboration comme des synonymes, les limites entre les deux sont parfois floues. Selon (Ahmed Laaroussi, 2007) la collaboration consiste à travailler ensemble pour atteindre des objectifs communs, tandis que la coopération consiste à attribuer des tâches à différents acteurs. Dans les activités de groupe, les deux stratégies coexistent fréquemment, avec une technique prédominante dans chaque projet. Dans le secteur du design, certaines tâches sont réalisées en coopération (co-conception), d'autres sont réparties entre les participants (design distribué). Il est essentiel de comprendre ces différences pour comprendre comment les gens collaborent à des projets de groupe.

I.5.2.1. Conception architecturale.

(Andres Moreno Sierra, 2012) définit la conception architecturale comme un processus créatif qui implique l'interprétation de l'environnement externe par le biais de la pensée. Grâce à la raison logique ou méthodologique et à l'utilisation des aspects cognitifs, ce processus permet de concevoir, de proposer, de regrouper et d'organiser divers éléments afin de créer une forme de représentation appelée une idée. On peut également représenter cette idée sous différentes formes, comme des images, et leur synthèse permet d'évaluer et de développer le projet. Selon (J.-C. Lebahar, 1986) la conception architecturale est un environnement où différents acteurs peuvent interagir sans avoir à faire la distinction entre la conception et la mise en œuvre. Par conséquent, il la considère comme un processus collaboratif dans lequel les différentes parties prenantes parviennent à des conclusions par le biais de moyens de représentation tels que l'esquisse. La création individuelle et la création collective sont considérées de la même manière dans ce sens.

S'appuyant sur des recherches scientifiques antérieures telles que l'ouvrage fondateur de (Bryan R. Lawson, 1978) "*Design in Architecture*" (1978). Cette étude présente la conception architecturale comme un réseau complexe de systèmes interactifs qui impliquent à la fois les utilisateurs et les bénéficiaires. Elle souligne que, sous la direction du mode de pensée choisi, il est du devoir du concepteur d'identifier de nouveaux problèmes, d'examiner attentivement les solutions de conception et de poursuivre le processus d'innovation. La conception en architecture désigne, selon l'étude de (Ahmed Laaroussi, 2007), le travail de coopération effectué au stade de la planification d'un projet architectural. Afin de créer et de synthétiser les conceptions, une variété de spécialistes, dont des architectes, des ingénieurs, des économistes, des paysagistes et d'autres, doivent collaborer. Il est particulièrement important de mettre l'accent sur les méthodes de construction et les applications structurelles. Au lieu de fournir uniquement des réponses à certaines préoccupations, cette technique s'attaque à une variété de problèmes complexes qui doivent être trouvés et résolus. En outre, l'expression "conception

architecturale" décrit le travail imaginatif et innovant de l'architecture qui se concentre sur les questions spatiales et esthétiques.

I.5.2.2. Etapes du processus de conception architecturale

Le processus de conception architecturale implique que l'architecte synthétise toutes les informations issues du potentiel et des exigences du site, en se basant sur leur expérience personnelle et leur style artistique. Dans les faits, le processus de conception architecturale comprend toutes les phases du processus de construction, depuis le premier contact entre le client et l'architecte jusqu'à l'achèvement final. Cette procédure est appréhendée comme un acte créatif en soi. Contrairement à d'autres disciplines artistiques, il existe des contraintes et des difficultés que le processus de conception architecturale doit surmonter.

De nombreux chercheurs ont mené des études pour tenter de comprendre les théories et les méthodes de résolution de problèmes utilisées dans le processus de conception architecturale. La loi MOP¹⁰ (France) et le Décret ministériel (15 mai 1988) relatif aux conditions et honoraires de maîtrise d'œuvre (Algérie) ont été les principales sources d'information pour notre recherche sur le processus de conception architecturale. Il est adapté d'une recherche antérieure menée par (Semahi Samir,2013). Il divise les six étapes du processus de conception de la manière suivante :

- La première phase : Les études d'esquisse / préliminaire / de diagnostic.
Proposer une ou plusieurs solutions d'ensemble, traduisant les éléments majeurs du programme et d'en indiquer les délais de réalisation ; Vérifier la faisabilité de l'opération au regard des différentes contraintes du programme et du site. En fonction du type de projet, le nom et les missions de cette première étape changent. (Journal français. 2018). Lorsqu'il est question de nouveaux projets, on parle d'études préliminaires pour les infrastructures et d'études d'esquisse pour les bâtiments. En ce qui concerne les réhabilitations, il s'agit d'une étude de diagnostic.¹¹
- La deuxième phase : Avant-projet sommaire (APS) vise à :
Définir la composition générale en termes de volume et de plan, respecter l'aspect extérieur et les volumes intérieurs de la structure, participer à la confirmation de l'échéancier de construction. Participer à la validation de l'économie générale du contrat et de ses composantes architecturales, techniques et économiques.
- La troisième phase : Les études d'avant-projet définitif (APD).
Identification de la surface précise de chaque élément du programme, déterminer les dimensions et l'aspect de la structure pour ses sections, ses façades et ses plans, déterminer les matériaux, les installations techniques et les systèmes constructif ; aider à confirmer que les composants et les services du projet ont un sens compte tenu de l'économie générale du contrat. (Journal français. 2018).
- La quatrième phase : Le projet.

¹⁰ La loi MOP : Loi sur la Maîtrise d'Ouvrage Public.

¹¹ Exucusion projet, <https://www.executionprojet.fr/les-etapes-des-projets-selon-le-code-de-la-commande-publique/#PRE>, consulté le 24/04/2024 à 19.35.

Les exigences relatives aux formes des différents éléments du bâtiment, les types de matériaux et leur mode d'utilisation, la coordination des données nécessaires à l'agencement spatial de l'ouvrage et la création du budget préliminaire et du calendrier du projet.

- La cinquième phase : Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (ACT).
L'organisation de l'évaluation des offres, la consultation des entreprises, le choix des candidats et les modifications nécessaires à l'attribution des marchés de travaux.
- La sixième phase : Les études d'Exécution (EXE).
Créer l'ensemble des plans d'exécution et des cahiers des charges spécifiques au chantier, (mission qui s'ajoute à la mission principale). (Semahi Samir, s. d.,2013)

L'activité du bâtiment se décompose en trois phases primordiales. La pré conception souvent mis à l'actif du maître d'ouvrage, consiste à réaliser une programmation et une étude de faisabilité. Le maître d'œuvre est responsable du processus de conception, qui commence par une idée vague du projet et se poursuit par plusieurs étapes où le projet prend forme (voir figure I.7). La sélection des entrepreneurs, la construction et l'entretien du bâtiment font partie de la phase de post-conception. (Weissenstein, 2018)

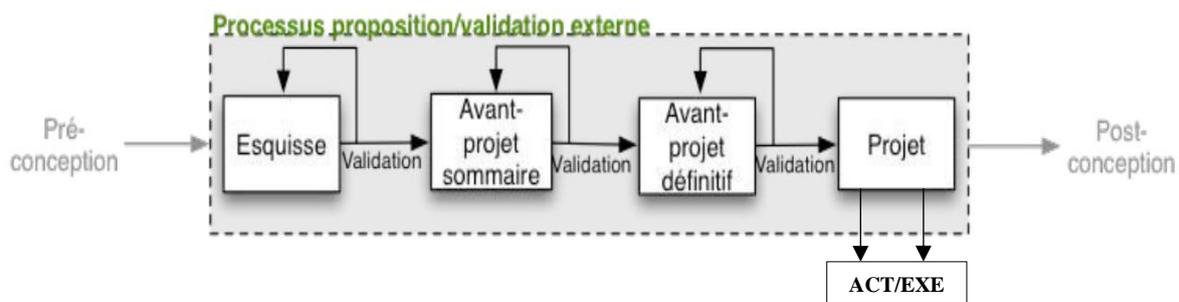


Figure I.7. Les étapes du processus de la conception architecturale. Source : (Weissenstein, 2018.)

La phase de conception architecturale, telle que définie par la loi MOP, commence lorsqu'une idée émerge pendant la phase d'esquisse et se termine lorsque les plans descriptifs validés sont produits pendant la phase de projet. La préconception et la post-conception ne sont donc pas inclus dans le processus de conception architecturale.

I.5.2.3. Phase en amont de la conception.

Tout processus de conception comportera inévitablement des phases d'une complexité croissante. Le projet doit être décrit de manière plus détaillée et sur le bon support au fur et à mesure de l'évolution du processus. Dans un processus de conception architecturale traditionnel, cela se traduit généralement par des dessins à une échelle plus élevée, comme 1/100, 1/50, 1/20, etc. Un niveau de détail plus élevé nécessite un nombre croissant de décisions sur le résultat final. Les décisions sont généralement prises après avoir pris en compte les faits disponibles concernant les effets, les avantages et les inconvénients d'un ensemble spécifique de solutions. Ces connaissances peuvent être recueillies à partir de diverses sources, y compris des consultations d'experts ou l'expérience antérieure, mais elles peuvent être coûteuses et prendre beaucoup de temps. (Tomás Méndez.2013.)

Les procédures itératives caractérisent la plupart des processus de conception. Il est rare que les étapes du processus passent de 1 à 2 puis à 3 dans un ordre rigide. Dans la procédure, les sauts en avant et en arrière sont assez fréquents. Les sauts vers les débuts de la conception sont les plus significatifs pour cette étude. Lorsque les concepteurs déterminent qu'ils doivent étudier toutes les options viables et prendre en compte les alternatives à la solution qu'ils étaient en train de construire, ils reviennent à la phase exploratoire. Ces retours en arrière n'impliquent toutefois pas un redémarrage complet du processus, car le concepteur revient à ce stade avec de nouvelles connaissances - soit sur les solutions rejetées ou les tentatives infructueuses de résolution du problème - soit avec une vision plus approfondie de la définition du problème. (Tomás Méndez.2013.)

Selon (Tomás Méndez.2013.), Boyd Paulson a peut-être été le premier à expliquer le lien entre le coût total du projet, le degré d'impact à chaque étape de la conception et les étapes de la conception en 1976. La relation inverse, selon laquelle plus on avance dans le processus de conception, plus le niveau d'impact sur le projet est faible et plus les dépenses du projet sont élevées, est illustrée dans un diagramme qu'il a réalisé (voir figure I.8) (Paulson 1976

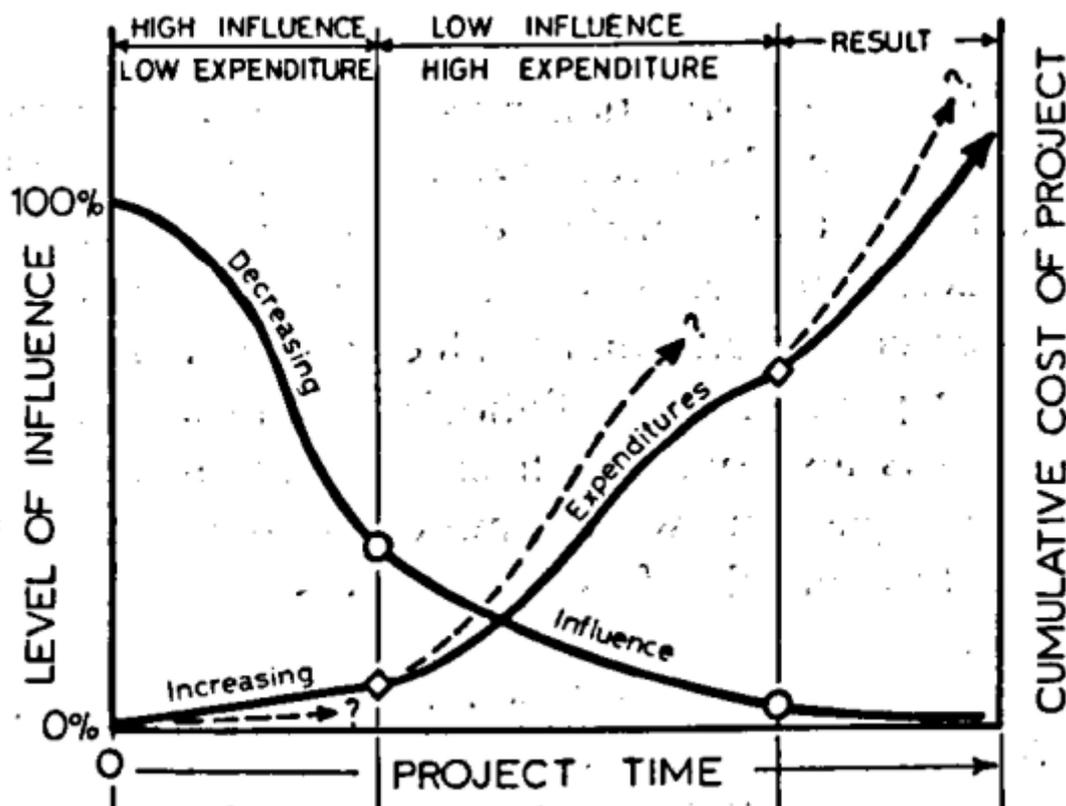


Figure I.8. Courbe de Boyd Paulson. Source : (Tomás Méndez.2013.)

Par la suite, de nombreuses variantes de ce graphique ont vu le jour ; la courbe de (McAloone, 2009), (Voir figure I.9) est sans doute la version la plus connue ; néanmoins, l'idée fondamentale est restée la même. Ce lien soulève des questions fondamentales sur l'importance des premières étapes de la conception, la nécessité de disposer d'informations exactes et de prendre des décisions judicieuses pendant cette période.

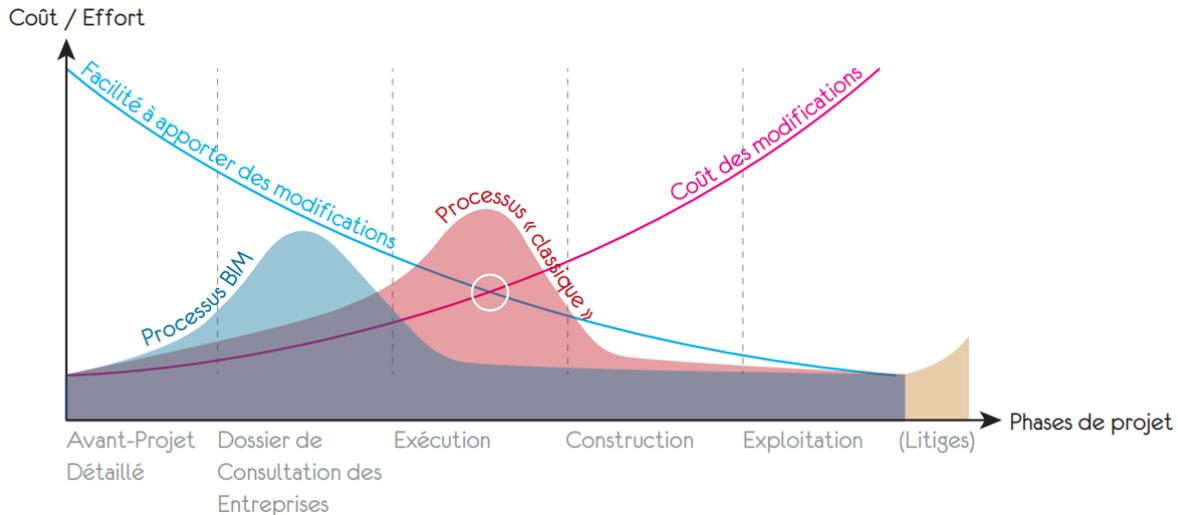


Figure 1.9. Courbe de MacLeamy. Source : (Stéphane MOr, 2015).

Les décisions prises au cours des premières étapes de la conception ont un impact considérable sur l'impact environnemental futur des bâtiments, selon l'article de (Feng et al., 2019). En outre, comme les décisions de conception détaillées peuvent avoir déjà été prises sur la base des premiers concepts, il est très difficile et coûteux de les modifier par la suite. En outre, il est très difficile de compenser les mauvaises décisions prises au début de la conception par des choix de conception plus approfondis. Par conséquent, les choix effectués au cours des premières étapes de la conception sont cruciaux et ont une grande influence sur l'effet environnemental des bâtiments tout au long de leur durée de vie. Selon la présentation de l'évolution du processus de conception de l'agence ADEME, 2002, citée par (Gholipour, 2018), les phases d'esquisse (ESQ) et d'avant-projet (APS) constituent la phase amont de la conception architecturale.

1.5.2.3.1. D'un point de vue environnemental.

Jusqu'à 80 % du profil environnemental d'un nouveau produit est décidé au stade de la création du concept, affirment (McAloone, 2009). En partant du principe que chaque bâtiment est considéré comme un nouveau projet, à l'exception des constructions de masse ou des plans conventionnels, la conception est cruciale pour déterminer le profil environnemental du bâtiment. Plus précisément, la conception en amont, c'est-à-dire les étapes de l'esquisse et de l'APS, est le moment où les facteurs les plus importants et les questions critiques concernant les préoccupations environnementales telles que l'orientation et les principes de construction sont déterminés.

En fait, l'objectif d'une stratégie de conception environnementale est de réduire l'impact environnemental d'un bâtiment par des mesures simples, sans en augmenter les coûts financiers ou sociaux. Par conséquent, une option pour aller de l'avant est de prendre en compte les besoins environnementaux dans le processus de conception des bâtiments en amont afin d'éviter les effets négatifs des ajustements ultérieurs.

En passant de la conception à l'éco-conception architecturale, les concepteurs se heurtent à plusieurs obstacles, notamment les effets persistants de l'industrialisation techno centrée, une

compétence et une compréhension insuffisantes et un manque de conscience écologique chez les experts de l'industrie de la construction. Selon l'analyse de (Marsault, 2018) cette transition repose sur quatre éléments fondamentaux : les experts et les participants au projet doivent d'abord appréhender l'écologie et ses liens avec l'environnement construit ; déterminer conjointement comment utiliser la nature comme modèle architectural inspirant ; remettre en question et perturber la systématisation de la production industrielle et la pensée traditionnelle ; renoncer à plus de deux siècles de conception basée sur la machine ; Et coopérer dès la phase en amont du projet.

I.5.3. Eco-conception : Une approche émergente.

L'éco-conception utilisée pour la première fois dans les années 1970, consiste à intégrer les facteurs environnementaux aux facteurs techniques, commerciaux et économiques au cours du processus de création d'un produit.

« [...] L'éco-conception est la pratique qui consiste à intégrer des considérations environnementales dans la conception et le développement de produits afin de minimiser l'impact environnemental de ces derniers tous au long de leur durée de vie. » (Berneman et al., 2009).

L'Association française de normalisation (AFNOR) donne une définition plus complète dans la norme NF X30-264, qui définit l'écoconception comme suit : « l'intégration méthodique de considérations environnementales dans la conception et le développement de produit, afin de minimiser les effets négatifs sur l'environnement au cours de leur cycle de vie en échange de la fourniture de services comparables ou de meilleure qualité ». Cette approche, initialement conçue pour des produits industriels, a été maintenant étendue à l'architecture. Son objectif dès l'amont de la conception est de créer des produits qui équilibrent au mieux les exigences sociale, technique, environnementale et économique. Dans le secteur du bâtiment, elle peut être résumée comme un processus qui intègre des considérations environnementales dans la conception d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie (Bruno Peuportier, 2013).

L'objectif du processus d'éco-conception - également appelé « écodesign », « architecture de qualité », « conception environnementale » ou « qualité intégrale » est de construire des bâtiments qui tiennent compte de l'environnement. Un bâtiment éco-conçu est le résultat d'un processus d'éco-conception ; il est également appelé « bâtiment durable », « bâtiment environnemental », « bâtiment vert » ou « bâtiment intégré » (Van Hal, 2006).

L'éco-conception ne se résume donc pas à l'emploi de méthodes techniques quelque peu avancées, ou la simple intégration de concepts et de critères environnementaux dans les projets. Il s'agit avant tout d'une stratégie globale complexe et multicritères destinés à aider, orienter et soutenir le ou les concepteurs dans la création d'objets durables, qu'il s'agisse de bâtiments, de communautés ou de villes entières. (Marsault.,2018)

I.5.3.1. Complexité et l'incertitude de l'éco-conception.

La conception environnementale des bâtiments est présentée comme un système dynamique complexe qui intègre de nombreuses caractéristiques et éléments qui jouent un rôle essentiel dans l'évolution du design durable. Cette complexité découle de la prise en compte des questions environnementales, socio-économiques, des ressources et de la consommation

d'énergie, ainsi que du contexte de conception. Par conséquent une compréhension des éléments de l'éco-conception et de leurs interactions internes et externes peut être bénéfique pour identifier la hiérarchie et les aspects structuraux de ses éléments. (La figure I.10) montre comment les différents aspects de la conception sont équilibrés. Une compréhension insuffisante des facteurs technologiques et environnementaux au cours de la phase de conception peut entraîner le développement d'un modèle qui n'est pas adapté aux spécificités et à l'environnement du projet. (Vakili-Ardebili & Boussabaine, 2005)

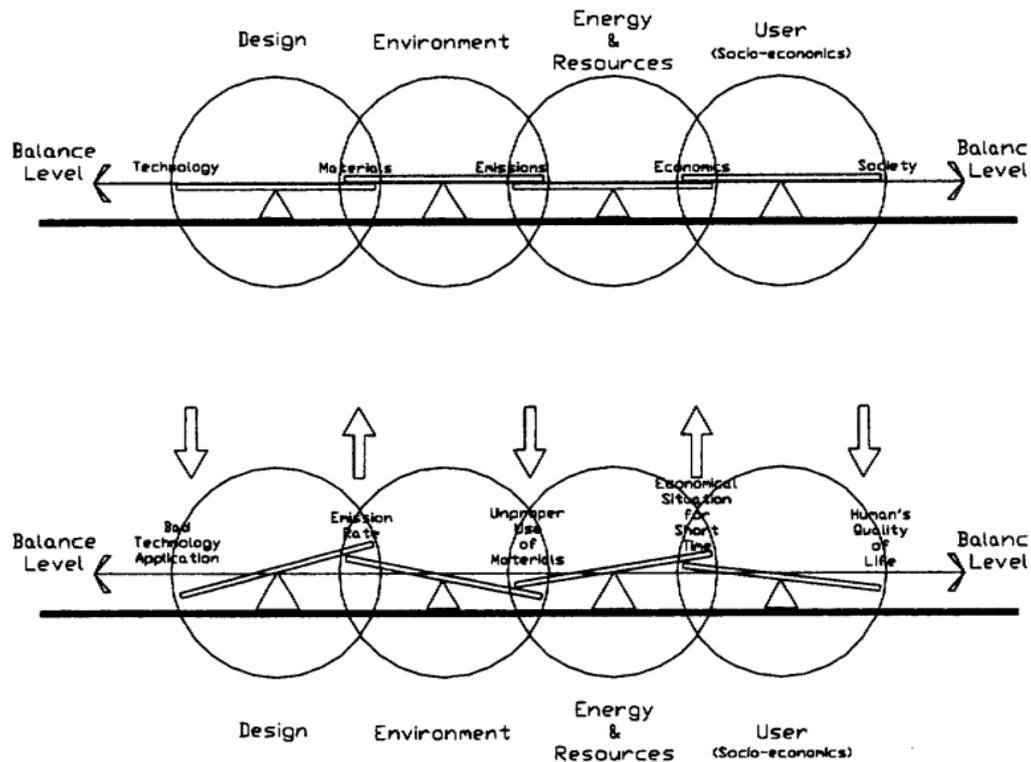


Figure I.10. L'équilibre dans le design environnemental des bâtiments. Source : (Vakili-Ardebili & Boussabaine, 2005)

La pensée écologique comporte une part d'ambiguïté puisqu'elle ne peut se résumer à la somme des croyances et des actes, mais doit prendre en compte les nombreuses interactions entre les éléments constitutifs. Le fait que les objets de connaissance sur lesquels se fonde ce mode de pensée soient souvent détenus par un large éventail de parties ne fait qu'exacerber cette confusion. Par conséquent, le contexte dans lequel un bâtiment environnemental est conçu est à la fois incertain et complexe. (Gholipour, 2018).

Pour aborder la complexité de l'écoconception architecturale. Selon (Iordanova, 2007) Les concepteurs peuvent suivre deux approches. Premièrement, ils peuvent utiliser une approche holistique qui prend en compte différents points de vue et considère l'ensemble du processus de conception. D'autre part, ils peuvent utiliser une approche heuristique qui consiste à explorer de multiples solutions potentielles afin de stimuler la créativité. Toutefois, il est important de comprendre que les connaissances techniques ne suffisent pas à garantir un processus créatif

productif. Les concepteurs doivent également comprendre la complexité du monde. En fin de compte, pour favoriser la créativité tout en répondant aux préoccupations environnementales, il est souvent judicieux de combiner ces approches, en réduisant la complexité par une approche holistique tout en acceptant une certaine complexité par des méthodes heuristiques.

En ce qui concerne l'incertitude, (Malhorta, 2001) cité par (Gholipour, 2018) la définit comme suit : « Un certain degré d'incertitude concernant les déductions nécessaires, les estimations ou les prédictions qui en découlent, ainsi que des informations factuelles insuffisantes sur l'objectif, la situation ou la tâche ».

La citation fait référence au concept d'incertitude, où les conclusions ou estimations qui en découlent ne peuvent être prises en compte en raison de l'absence d'informations objectives concernant le but, la situation ou le travail. Le manque de connaissances à un impact considérable sur les processus de prise de décision dans divers domaines professionnels, notamment dans les processus de design et de planification. Pour comprendre la nature de ce nihilisme et faire face à lui de manière efficace, il est nécessaire d'adopter des stratégies réfléchies et concrètes afin d'obtenir les résultats souhaités et de prendre les décisions les plus écologiques et efficaces.

I.5.3.2. Progression itérative dans le processus d'éco-conception.

Le contexte d'un bâtiment est un défi pour la conception architecturale, et une forme architecturale est la solution nécessaire. La difficulté de la conception d'un bâtiment environnemental peut être exprimée en termes d'exigences du concepteur et d'attentes du client, ou de programme de construction. Le concepteur et le client peuvent négocier des changements à ce contexte problématique, qui comporte des milliers de variables, en le reformulant, en l'interprétant ou même en le modifiant. Pour cette raison, la conception environnementale des bâtiments nécessite une validation constante et entraîne des modifications progressives pour garantir l'applicabilité des solutions. La relation non déductive entre les faits contextuels (tels qu'un programme, des circonstances d'action ou des réglementations) et les solutions formelles proposées pour y répondre dans une situation de conception est appelée ajustement. L'objectif est de parvenir à une bonne adéquation entre la forme (solution) et le contexte (problème). (Gholipour, 2018)

Les processus d'éco-conception des bâtiments utilisent la progression itérative, qui est une méthode cyclique de conception dont l'objectif est d'améliorer la durabilité environnementale du bâtiment à chaque itération. Tout d'abord, des objectifs environnementaux spécifiques sont fixés, notamment en ce qui concerne la conservation des ressources, l'efficacité énergétique et l'effet environnemental total. Ensuite, les architectes créent des concepts qui intègrent des idées respectueuses de l'environnement telles que des matériaux durables, une isolation efficace et une conception solaire passive. (Sofia Seabra Águas)

La performance environnementale de ces systèmes est rigoureusement évaluée grâce à l'utilisation de technologies telles que l'évaluation du cycle de vie et les méthodes de conception computationnelle (ce sujet sera abordé plus en détail dans le chapitre suivant). Ce cycle itératif se poursuit jusqu'à ce que l'on parvienne à une conception idéale qui concilie les facteurs environnementaux et les besoins pratiques et esthétiques.

I.5.3.3. Quelle place pour l'éco-conception durant la phase de conception.

C'est aux stades de la programmation, de l'esquisse et de l'APS que les décisions en matière de construction sont les plus laxistes et les plus incertaines. Elles ont donc un impact significatif sur les performances à venir du bâtiment. L'orientation du bâtiment ou la forme sont deux exemples de décisions de conception qu'il sera difficile, voire impossible, de modifier dans les phases ultérieures du projet, bien qu'elles aient un impact significatif sur l'efficacité énergétique et environnementale du projet. Au cours de ces phases ultérieures, les défauts de conception peuvent être corrigés à l'aide de divers outils techniques, mais il s'agit d'une approche potentiellement coûteuse, longue et inefficace. C'est pourquoi l'écoconception doit être intégrée au projet dès que possible. (Mija Frossard, 2021)

Cependant, un certain nombre de défis ont été relevés par (Guillaume Lamé, et al., 2017), qui ont été référencés par (Mija Frossard, 2021) sur la base d'entretiens avec des experts de l'écoconception et de la construction :

Les différents acteurs du projet ont des objectifs environnementaux variés, caractérisés par des sensibilités et des intérêts divers en matière d'atténuation des impacts environnementaux. Une perception commune de l'écoconception est qu'elle ajoute de la complexité et des dépenses sans offrir un retour sur investissement significatif. L'étude de (Naciba Haned et al., 2014) portant sur 119 entreprises révèle toutefois que 96 % d'entre elles ont fait état d'une influence favorable (45 %) ou neutre (51 %) sur leur Profitabilité. Parmi les autres avantages, citons l'amélioration de la perception du public, l'augmentation de l'inventivité et les retombées sociétales. Néanmoins, les petites et moyennes entreprises estiment qu'il est difficile de supporter les dépenses d'investissement substantielles liées à l'éco-conception. Les entreprises interrogées soulignent la nécessité d'un soutien financier accru ainsi que d'initiatives de formation et de sensibilisation de la part des pouvoirs publics.

L'intégration d'un spécialiste de l'environnement dès le début du processus de conception permettrait de surmonter un certain nombre de difficultés. Dès la phase de programmation, ces spécialistes donneraient des conseils sur les solutions à faible impact et mettraient en garde contre les mauvaises décisions. Par conséquent, l'intégration de l'éco-conception (voir figure I.11) dans le bâtiment nécessite de modifier les outils et les méthodologies de recherche scientifique pour les adapter aux flux de travail modernes, de développer des outils accessibles et suffisamment simples pour que tous les professionnels de la construction puissent les utiliser lorsqu'ils prennent des décisions concernant l'environnement, et d'intégrer un nouvel acteur ayant une expérience de l'éco-conception, qui sera impliqué dès la phase critique de la programmation.

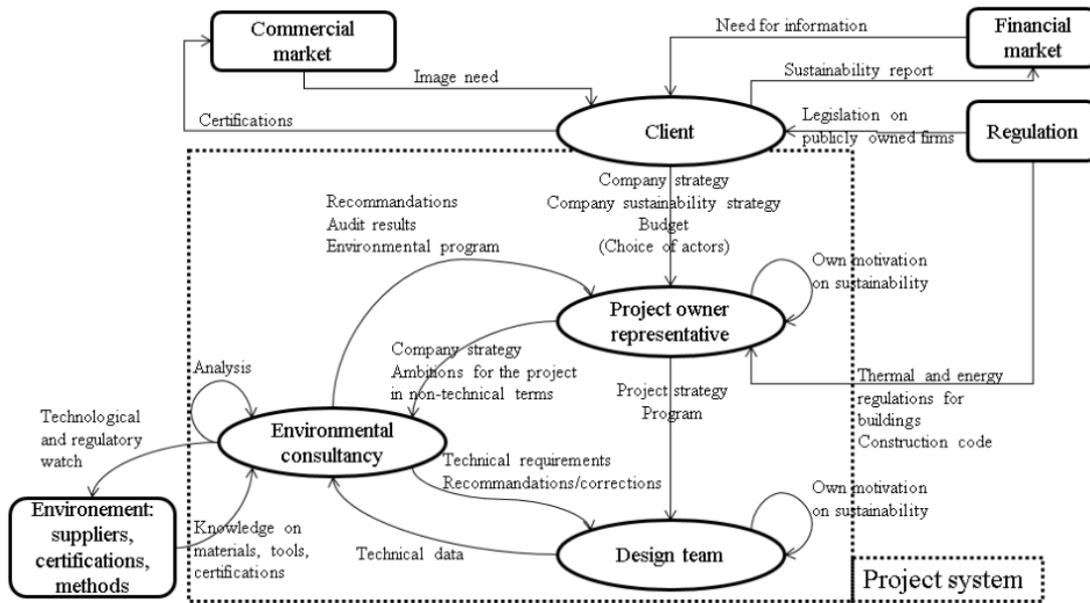


Figure I.11. Intégrer les considérations environnementales dans la phase de conception des bâtiments.

Source : (Guillaume Lamé, 2017).

I.6. Approches innovantes pour la conception environnementale intégrée des bâtiments.

I.6.1. Processus de conception intégrée.

La conception intégrée est une méthode qui remet en question les fondements des méthodes de conception conventionnelles. Il est nécessaire de s'engager dans un processus de conception collaboratif et pluridisciplinaire, qui remplace la pratique antérieure consistant à coordonner les travaux de spécialités particulières. La conception n'est plus un processus linéaire. Selon (Che Khairil Izam Che Ibrahim, et al., 2013) cette conception fait appel à des boucles itératives centrées sur l'analyse des problèmes et l'optimisation des résultats de la conception. Quatre concepts directeurs constituent donc le fondement de la conception intégrée : La créativité innovante, Les itérations préliminaires, la coopération permanente entre les parties prenantes (y compris avec les consultants) et la prise de décision axée sur les performances.

L'utilisation du processus de conception intégrée (PCI) permet d'obtenir des bâtiments écologiques qui favorisent un environnement bâti durable. C'est un travail collaboratif qui concerne la durée de vie d'un édifice. Le PCI est conçu pour permettre au client et aux autres parties prenantes d'atteindre plus facilement et plus efficacement leurs objectifs créatifs et bien définis en matière de fonctionnalité, d'environnement et de finances. Pour relever tous les défis de conception résultant des objectifs du bâtiment. (Jean-Philippe Dionne, 2015).

Comme le montre le tableau (I.1), il existe des différences significatives entre le processus de conception conventionnel et le processus de conception intégrée (IDP).

Chapitre I

Tableau I-1 : La différence entre le processus de conception intégrée et traditionnelle. Source : Inspiré de Busy cité par (Jean-Philippe Dionne, 2015).

Processus de conception intégrée (PCI)	Processus de conception traditionnelle (PCT)
Implication de toute l'équipe dès la phase en amont.	Implication des membres limités.
Processus Itératif	Processus linéaire.
Atteint des résultats optimaux.	Parvient à des conclusions utiles.
Pensez en termes de coût globale.	Ignorez les dépenses d'exploitation au profit des coûts initiaux.
Procédure continue. Se déroule tout au long de la période post-occupation	La procédure s'est terminée pendant la construction.
Les décisions sont influencées par une multitude de parties impliquées ou d'acteurs.	De nombreux choix sont faits par un groupe limité de participants.

La conception intégrée se distingue par l'importance qu'elle accorde à l'optimisation précoce des solutions de conception, qui implique tous les membres de l'équipe et les parties prenantes dès le début du processus. D'autre part, la PCT se préoccupe principalement de l'utilité de la conception dans le cadre d'un budget déterminé., l'ICD cherche à anticiper et à résoudre les problèmes de conception afin de produire une solution optimale qui tienne compte de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Alors que la PCT est généralement restreinte à la conception fonctionnelle. Selon plusieurs études (Gunter Lohnert, 2003; Larson Idp, s. d.; Zimmerman.) elles soulignent que le processus de conception intégrée (PCI) devrait être le fondement de la construction de bâtiments environnementaux, Par conséquent, la mise en œuvre de la conception intégrée est une voie vérifiée pour le développement des pratiques dans le secteur de la construction et une bonne occasion d'améliorer l'intégration des éléments environnementaux tels que l'énergie.

I.6.2. Conception environnementale intégrée.

En utilisant le terme « processus de conception intégrée des bâtiments » comme mot-clé, (Z. Li, Tian, et al., 2022) a effectué une analyse des diagrammes de cooccurrence des points chauds de la recherche pertinente au cours des dix dernières années sur la base de données Web of Science (voir la figure I.12). Au total, 5303 documents pertinents ont été recensés. Le diagramme de cooccurrence indique que les termes associés à l'étude sur le « processus de conception intégrée des bâtiments » sont principalement la méthodologie axée sur les événements, l'environnement bâti, la modélisation de l'information sur les bâtiments, etc. certaines œuvres littéraires contiennent également des mots-clés tels que: changement climatique, optimisation, systèmes d'aide à la décision, analyse du cycle de vie, bâtiment écologique ; performance thermique et énergétique, etc.

Selon (Marian Keeler, 2009) dans son ouvrage « *Fundamentals of Integrated Design for Sustainable Building* » La conception intégrée des bâtiments, également appelée "conception durable" ou "conception verte", est une approche qui considère la durabilité dès les premières étapes du processus de conception. Historiquement, le terme "conception écologique" était souvent entouré de guillemets, suggérant une certaine ambiguïté et une perception de viabilité

Les informations sont classées dans l'intervalle. Ensuite, les normes de connaissance sont étudiées sur la base de la collecte et de la catégorisation des données. Sur cette base, un modèle d'information est construit afin de fournir un modèle de système qui intègre les attributs des composants, les règles statiques et les règles dynamiques.

- Hypothèses de conception : Les résultats de l'analyse de la conception indiquent qu'un ou plusieurs schémas théoriques sont présentés de manière appropriée. Les éléments architecturaux et environnementaux qui affectent la consommation d'énergie - tels que l'ombrage des bâtiments voisins, les caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment, l'ombrage, les habitudes d'utilisation du bâtiment, etc. Certains paramètres d'indexation qui doivent être établis conformément aux réglementations locales ou nationales peuvent être corrélés avec ces facteurs.
- L'évaluation et la modélisation approfondies des technologies : impliquent le choix de solutions appropriées en utilisant des techniques telles que l'évaluation du cycle de vie, la liste d'inventaire, les simulations énergétiques et environnementales. Cette méthode permet de synthétiser et de comparer plusieurs solutions, ce qui aide à déterminer comment les différentes variables de conception interagissent. Il est ainsi plus facile d'identifier les facteurs clés de la conception et d'orienter l'amélioration de la conception.
- L'apport interne et l'optimisation de la conception : reposent sur l'évaluation des résultats globaux de la conception. La solution évaluée devient définitive si les objectifs sont atteints ; dans le cas contraire, le processus itératif est répété avec des modifications apportées aux connexions variables du modèle d'information jusqu'à ce que la satisfaction soit atteinte. (Z. Li, Tian, et al., 2022).

I.6.3. Assistance à la conception environnementale intégrée : méthodes et modèles optimaux.

L'exploration de l'assistance à la conception environnementale intégrée mettrait en lumière une variété d'approches et de méthodes spécifiques utilisées pour guider les processus de conception architecturale. Ces outils permettent aux concepteurs d'évaluer les performances énergétiques et environnementales des bâtiments à différentes étapes du processus de conception. Basée sur l'étude de (Charlotte Dautremont, 2023); et s'inspirant de deux courants de recherche complémentaires : l'un axé sur les approches et décisions architecturales (Kristel de Myttenaere, 2006), l'autre sur les outils et méthodes (Charline Weissenstein, 2012).

L'écoconception comprend trois grandes catégories d'outils selon (Kristel de Myttenaere, 2006).

- Les outils intellectuels d'aide à la décision : dont la complexité varie et qui aident les concepteurs à examiner des sujets particuliers. Trois typologies sont utilisées pour les classer : cognitive, empirique et analytique. Les outils cognitifs fournissent une base de connaissances partagée, tandis que les outils empiriques tirent des leçons des expériences architecturales passées et présentes. Les outils analytiques combinent les deux pour orienter les décisions architecturales, qu'ils soient sensoriels, informatiques ou typologiques.

Chapitre I

- Les certifications environnementales comme HQE¹² (France), LEED¹³ (États-Unis) et BREEAM¹⁴ (Royaume-Uni) visent à évaluer la performance environnementale des bâtiments et à attribuer des niveaux de reconnaissance. Toutefois, elles présentent des limites en se concentrant sur des aspects spécifiques, comme la consommation d'énergie, tout en négligeant d'autres facteurs, tels que l'impact des matériaux ou la qualité architecturale. Ces certifications sont principalement destinées aux financiers et maîtres d'ouvrage, ce qui peut entraîner une confusion entre performance environnementale et qualité architecturale, et encourager l'utilisation de technologies coûteuses, parfois au détriment de l'économie et de la société. Cette critique souligne l'importance d'une approche plus globale et systématique en éco-conception.
- Les démarches architecturales : Les approches architecturales de l'éco-conception impliquent souvent des concepts et des idéologies en plus des outils et des listes de critères. Elles peuvent être divisées en groupes selon les principes de Vitruve :

Recherche esthétique : vise à utiliser des formes et des images qui représentent la nature d'une manière cohérente avec le biomimétisme et le bio climatisme. Afin de préserver la durabilité, les aspects sociaux et culturels doivent être pris en compte.

Investigation technique : met l'accent sur les composantes technologiques de la conception tout en trouvant un équilibre entre les solutions high-tech et low-tech.

Recherche fonctionnelle : Utilise des matériaux, des processus et une organisation spatiale durables en mettant l'accent sur le bien-être humain, les exigences sociétales et l'héritage culturel.

Ces méthodes sont combinées pour créer une architecture écologique, chacune ayant ses propres contraintes et contribuant à une conception plus ou moins durable.

Afin d'atteindre la qualité environnementale en architecture - un objectif aussi insaisissable que l'architecture durable - (Charline Weissenstein, 2012). S'appuie sur des principes de conception d'ingénierie et utilise des techniques et des instruments. Le confort, l'écoconstruction et la gestion de l'énergie sont les trois principaux concepts qui entourent la qualité environnementale, qui vise à trouver un équilibre entre les exigences des clients, des utilisateurs et des concepteurs. L'examen des méthodes d'aide à l'éco-conception prend en compte trois composantes essentielles : Le moment où l'intervention a lieu est le moment du processus de conception. Le type d'approche : S'agit-il d'une approche évaluative ou suggestive ? L'accent mis sur l'environnement : Il s'agit d'une stratégie ciblée ou globale. (Charline Weissenstein, 2012). classe le soutien à l'éco-conception en trois catégories sur la base de ces éléments : Soutien à la formation du problème (A) ; Aide à l'émergence d'une solution primaire (B). Aide à l'évaluation de la proposition (C).

Six approches sont analysées, résumées dans une étude de (Charlotte Dautremont, 2023), synthétisant l'aide à l'éco-conception proposée par (Charline Weissenstein, 2012). dans le tableau (I.2) présenté ci-dessous.

¹² Haute qualité environnementale (HQE) ; site web ; consulté le 12/04/2024 : <https://www.hqegbc.org/>.

¹³ Leadership in Energy and Environmental Design (LEED); site web; consulté le: 12/04/2024: <https://www.usgbc.org/leed>.

¹⁴ Bre Environmental Assessment Method (BREEAM) ; Source web, consultée le 12/04/20224 : <https://bregroup.com/products/breem>.

Chapitre I

Tableau I.2. Un examen des approches suggestives ou évaluatives de l'assistance à l'éco-conception, basé sur la recherche de Weissenstein (2012). Source : Inspiré de (Charline Weissenstein, 2012) cité par (Charlotte Dautremont, 2023)

	Approches	Description	Approches			Méthodes	
			A	B	C	Suggestives	Estimatives
1	Par base de connaissances	Constituent un ensemble d'informations plus ou moins ordonnées, sous formes de guides de bonnes pratiques	X	X		X	
2	Généralité	Sous forme de modélisation déclarative, elles visent une optimisation créative à travers des <i>generative system</i>	X	X		X	
3	A matrice	Sous forme de tableaux à plusieurs entrées mettant en avant des liens de causes à effets	X	X		X	
4	Liste / référentiel	Énumèrent un certain nombre d'enjeux	X	X	X	X	X
5	Dynamique	Anticipent le comportement du bâtiment projeté par le biais de simulations dynamiques			X		X
6	Inventaires	Quantifient les impacts environnementaux des bâtiments sur un certain nombre d'enjeux. Aussi appelées méthodes éco-bilan ou analyse de cycle de vie (ACV)			X		X

Où :

A = assistance à la formulation de problèmes ; pour clarifier les considérations environnementales et identifier les conflits et interactions

B = assistance à l'émergence d'une solution primaire ; pour explorer des solutions

C = assistance à l'évaluation d'une proposition ; pour reconsidérer la solution proposée

I.7. Conclusion du Chapitre.

Du point de vue environnemental, ce premier chapitre a examiné les principaux changements dans les pratiques architecturales. Il est évident que la pensée environnementale est passée d'une simple réaction aux problèmes écologiques à une intégration méthodique des idées de durabilité dans la conception architecturale. De nouvelles approches et de nouveaux instruments sont apparus au cours de ce processus, permettant une évaluation complète des effets environnementaux dès le début de la conception. Les discussions et la sensibilisation accrue autour des approches de durabilité attirent l'attention sur la complexité croissante du domaine et sur la nécessité d'une amélioration continue de la pratique et de la théorie.

Nous avons vu que l'intégration de la durabilité a évolué au fil du temps, passant de méthodes d'avant-garde à une éco-conception plus stricte à partir des années 1990. Cette évolution souligne à quel point il est crucial de prendre en compte les facteurs écologiques dès le début du processus de conception. Afin de résoudre les problèmes environnementaux et de répondre aux besoins humains, la pratique architecturale contemporaine doit donc trouver un équilibre entre l'innovation et la rigueur technique.

Afin d'optimiser le processus de conception environnementale, le chapitre suivant explorera la transition vers une approche paramétrique qui met davantage l'accent sur les considérations environnementales. En introduisant de nouvelles perspectives sur la modélisation et l'évaluation de la performance environnementale, cette méthode contribue au développement de solutions architecturales plus créatives et plus efficaces.

**Chapitre II : l'approche
paramétrique comme stratégie
pour une conception
environnementale intégrée.**

Introduction.

L'intégration des données environnementales dans le processus paramétrique constitue une avancée clé dans la conception architecturale contemporaine. En tant que stratégie pour une conception environnementale intégrée, l'approche paramétrique permet d'adapter les projets aux variations climatiques et environnementales tout en optimisant les performances énergétiques. Face aux défis du changement climatique, de la raréfaction des ressources et des réglementations énergétiques, l'architecture doit adopter des méthodologies innovantes et flexibles. Le design paramétrique devient ainsi un outil essentiel pour intégrer ces données de manière dynamique, garantissant une gestion efficace des ressources et le confort intérieur des occupants.

Ce chapitre commencera par une analyse des fondements théoriques de cette approche et de son évolution historique en lien avec les préoccupations environnementales. Ensuite, les outils et techniques de modélisation des données seront étudiés, notamment l'optimisation des paramètres liés au confort thermique et visuel. Ces ajustements dynamiques améliorent à la fois la qualité de vie des occupants et réduisent l'empreinte écologique des bâtiments.

Enfin, ce chapitre mettra en avant l'importance d'une approche intégrée et systémique, où chaque décision de conception est guidée par des simulations rigoureuses basées sur des données empiriques. Cela démontre ainsi comment l'intégration des données environnementales dans le design paramétrique contribue à atteindre les objectifs de durabilité, tout en relevant les défis complexes que pose la conception des bâtiments résidentiels contemporains

II.1. Approche paramétrique : théorie et fondements

II.1.1. Introduction à l'approche paramétrique.

Au cours des deux dernières décennies écoulées, les pratiques architecturales ont connu des changements substantiels dans les méthodologies de conception et de construction. Historiquement, l'architecture dépendait principalement de méthodes analogiques, y compris les dessins à main levée, la création de modèles physiques et le dessin traditionnel. Récemment, cependant, l'intégration de la conception assistée par ordinateur (CAO) s'est imposée dans de nombreux bureaux d'études, transformant de manière significative la représentation et la réalisation des idées architecturales. Au fur et à mesure que nous avançons, les progrès technologiques devraient continuer à façonner la manière dont nous concevons les bâtiments et les espaces. (Ameen Mokhles Youns, et al, 2024) Le domaine de l'architecture a connu une transformation majeure avec l'adoption croissante de l'approche paramétrique. Cette méthode, basée sur la manipulation de paramètres influençant le processus de conception, a bouleversé la manière dont les architectes conçoivent et réalisent des formes complexes. Elle ouvre la voie à un vaste éventail de possibilités créatives et repousse les limites de ce qui est réalisable dans l'architecture contemporaine. Cette approche innovante permet aux architectes d'explorer de nouveaux horizons dans la création de formes non conventionnelles, qui peuvent être modifiées de manière dynamique, facilitant ainsi une interaction plus fluide et une intégration efficace entre la conception et la fabrication des éléments architecturaux. (M. Stavric, et al, 2017).

Selon (Patrik Schumacher, 2014), dans son chapitre « *Design Parameters to Parametric Design* » dans le livre « *The Routledge Companion for Architecture Design and Practice* », souligne que l'approche paramétrique est une approche computationnelle¹⁵ dans laquelle les propriétés géométriques d'une conception, telles que les dimensions et les angles, sont traitées comme des variables qui peuvent être ajustées. Cette approche permet de modifier et d'adapter continuellement la conception à mesure que de nouvelles informations sont disponibles, ce qui facilite la création de formes complexes et dynamiques. Contrairement aux modèles fixes, les conceptions paramétriques sont définies par leurs relations et dépendances sous-jacentes, ce qui permet de générer diverses options de conception avec souplesse.

Cette méthode offre des avantages significatifs, notamment la possibilité de maintenir l'adaptabilité tout au long du processus de conception et d'explorer efficacement d'autres conceptions. Elle permet également la personnalisation de masse, où les composants ajustent leurs formes en fonction des contraintes locales, ce qui conduit à des solutions uniques et spécifiques au contexte. Ainsi, cette approche offre une méthodologie robuste pour développer de nouvelles morphologies architecturales caractérisées par une différenciation continue. Cette différenciation s'applique non seulement à l'ajustement géométrique de formes complexes aux courbures variables, mais aussi aux critères de performance, tels que les facteurs structurels ou les conditions environnementales comme l'exposition au soleil ou les charges de vent. Par exemple, la taille des ouvertures d'un panneau de façade ou la forme des éléments d'ombrage peuvent être ajustées en fonction des variations de l'exposition à la lumière du soleil sur une façade incurvée. (Patrik Schumacher, 2014). Comme en témoignent de nombreux chercheurs à l'échelle mondiale. ((Al-Azzawi & Al-Majidi, 2021; Ahmad Eltaweel et al., 2017; Zhang et al., 2020)

À la lumière des recherches sur l'approche paramétrique, il est essentiel de souligner que cette méthode ne se limite pas simplement à une technique de conception. Elle représente une véritable philosophie innovante qui repose sur l'utilisation de paramètres comme variables dynamiques dans le processus de conception. En effet, cette approche permet de définir et d'ajuster les relations et les dépendances entre les différents éléments d'un système architectural, offrant ainsi une flexibilité et une adaptabilité sans précédent. Cette étude se propose d'explorer cette philosophie sous un nouvel angle, en mettant l'accent sur son potentiel à optimiser non seulement la forme, mais également la fonctionnalité des espaces architecturaux. En intégrant ces paramètres de manière plus intégrée et contextuelle, on peut obtenir des conceptions qui répondent de manière plus précise aux exigences environnementales et fonctionnelles.

II.1.2. Fondements mathématiques et évolution historique.

Le design paramétrique trouve ces racines dans les mathématiques, comme le montrent plusieurs chercheurs. (Daniel Davis, 2013), dans sa thèse "*A History of Parametric*", précise que le terme "paramétrique" trouve ses origines dans les mathématiques, bien que son adoption dans le domaine du design soit difficile à dater précisément. Selon David Gerber, dans sa thèse

¹⁵ Une approche computationnelle est une méthode qui utilise des outils informatiques et des techniques algorithmiques pour résoudre des problèmes complexes, concevoir des systèmes ou analyser des données.

"*Parametric Practice*" (2007), comme le rapporte (Ahmad Eltaweel, 2017), la première utilisation du terme 'paramétrique' est attribuée à Maurice Ruitter dans un document de 1988., illustrant ainsi le lien avec les principes mathématiques qui fondent le design paramétrique. D'autre part, Robert Stiles soutient que les concepts associés à la paramétrie remontent à plus tôt, aux années 1940, à travers les écrits de Luigi Moretti. Toutefois, Stiles reconnaît également que les bases mathématiques jouent un rôle clé dans l'évolution de cette approche. Ces analyses soulignent que les principes du design paramétrique reposent sur des concepts mathématiques fondamentaux.

S'agissant de son application initiale dans le domaine de la conception fasse l'objet d'un débat permanent. Conformément aux idées de (Daniel Davis, 2013). David Gerber (2007) attribue la première utilisation du terme à Maurice Ruitter. La même année, Parametric Technology Corporation, fondée par le mathématicien Samuel Geisberg¹⁶, a lancé le premier logiciel de modélisation paramétrique à succès commercial, Pro/ENGINEER, qui a révolutionné l'utilisation des outils informatiques dans la conception mécanique. Toutefois, Robert Stiles (2006) affirme que le concept est apparu plus tôt, plus précisément dans les années 1940, grâce aux travaux de l'architecte Luigi Moretti. Moretti s'est attaché à définir les relations entre les différents paramètres des systèmes architecturaux, en s'appuyant sur des exemples tels que la conception des stades, où des paramètres tels que les angles de vue et les coûts de construction étaient essentiels. Sa présentation à la Triennale de Milan en 1960 a constitué une première exposition publique de la conception paramétrique dans la pratique.

Comme mentionné dans le travail de (Makert Rodrigo et al., 2016). Le concept de paramétrique a été également largement exploité, bien que non explicitement nommé ainsi, par Antoni Gaudi, avec son utilisation de la chaînette, et par Frei Otto, qui a recours aux films de savon pour étudier les surfaces minimales, ainsi qu'aux réseaux de fils de laine imbibés d'eau pour optimiser les trajectoires des forces. Frei Otto qualifiait ces différentes méthodes exploratoires de « recherche de forme » (*form finding*), un terme visionnaire annonçant la dimension exploratoire qui caractérise aujourd'hui la modélisation paramétrique.

(John Frezer) a apporté des éclaircissements à l'idée de L'évolution historique de la conception paramétrique est parallèle aux progrès de la puissance de calcul et des outils numériques dans le domaine de l'architecture. Dans les années 1960 et 1970, les premiers systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) ont permis aux architectes d'explorer des géométries complexes. À la fin des années 1980, des logiciels paramétriques, ont rendu la conception paramétrique plus accessible et l'ont intégrée au processus de conception. Ces outils ont permis aux concepteurs de manipuler des ensembles de paramètres de manière dynamique, facilitant ainsi les changements en temps réel et les flux de travail de conception plus efficaces. Comme l'a également affirmé (Aurélié de Boissieu, 2013). Des architectes comme Frank Gehry et Zaha Hadid ont joué un rôle essentiel en démontrant le potentiel de la conception paramétrique pour créer des formes complexes et organiques qui étaient auparavant impossibles à réaliser avec des méthodes conventionnelles.

¹⁶ Samuel P. Geisberg is a Russian immigrant and the founder of Parametric Technology Corporation (PTC).

L'augmentation de l'utilisation Design paramétrique (DP) a entraîné une augmentation du nombre d'utilisations de la conception paramétrique dans la littérature. Cette tendance, mise en évidence dans la (figure II.1), démontre l'adoption croissante des méthodes de DP par les architectes, qui reconnaissent les avantages de l'intégration d'outils informatiques dans le processus de conception. Cette figure est extraite du travail (Inês Caetano et al., 2019) Elle illustre également la fréquence du mot clé « DP » dans les recherches entre 1978 et 2018.

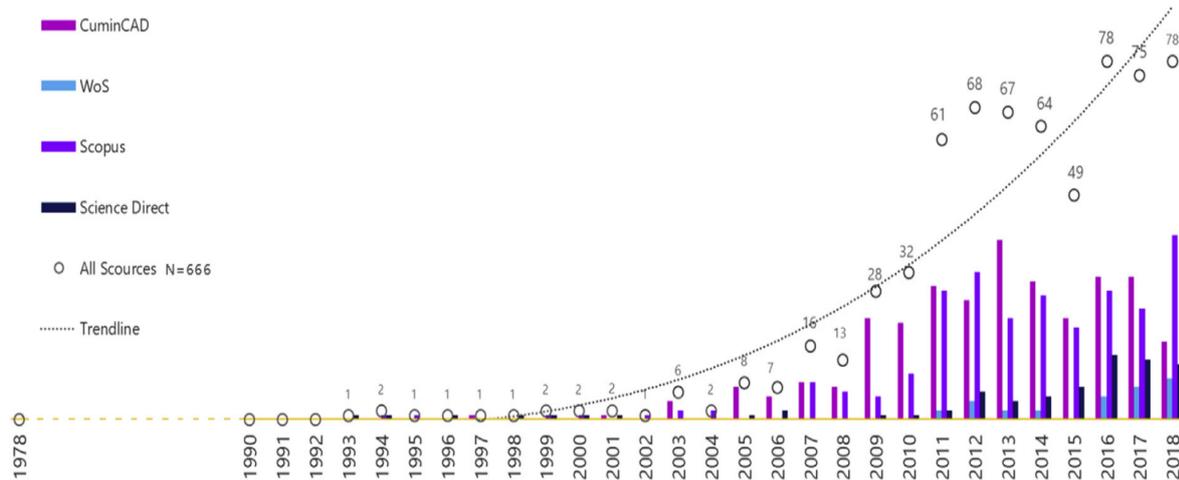


Figure II.1. Fréquence d'utilisation du terme "DP" comme mot-clé dans différents dépôts scientifiques entre 1978 et 2018, sur un échantillon de 666 mots-clés collectés. Source : (Inês Caetano et al., 2019).

En résumé, la conception paramétrique, fondée à l'origine sur les mathématiques, a ensuite été adoptée en architecture et a continué à évoluer avec les progrès des technologies numériques. Cette approche a gagné en importance ces dernières années, car les architectes s'appuient de plus en plus sur des outils informatiques pour créer des conceptions innovantes et adaptatives qui répondent de manière dynamique à diverses contraintes et facteurs environnementaux.

II.1.3. Paramétrisme en tant que style architectural.

"Parametricism is architecture's answer to contemporary, computationally empowered civilization" (Patrick Schumacher, 2014).

Le Paramétrisme est un style révolutionnaire qui fait suite au modernisme et qui met en évidence la malléabilité des éléments et des complexes architecturaux. Pour comprendre la conception paramétrique, il est utile d'examiner séparément les définitions de « paramétrique » et de « conception ». Le terme « paramétrique » fait référence à l'utilisation de variables (paramètres) pour générer une gamme de variations par le biais de la manipulation. (S SIDDHARTH, 2016 ; John Frezer.)

Le Paramétrisme, introduit par (Patrick Schumacher, 2014), est un style architectural contemporain. En 2008, dans son article intitulé (Patrick schumacher, 2008), Schumacher a établi des principes directeurs (Dogmes) et des éléments à éviter (Tabous). Les Dogmes mettaient l'accent sur des techniques telles que l'inter-articulation des formes, l'hybridation, et l'utilisation de splines et de NURBS. En revanche, les Tabous interdisaient le recours à des formes classiques comme les solides platoniciens, les lignes droites, les angles droits, tout en

évitant également les répétitions simples. Comme le souligne (Al-Azzawi & Al-Majidi, 2021) dans son analyse des travaux de Schumacher, ce dernier a clarifié en 2009, dans son ouvrage *Parametricism : A New Global Style for Architecture & Urban Design*, que les formes doivent être modulables de manière paramétrique et différenciées systématiquement. (Al-Azzawi & Al-Majidi, 2021) note également que Schumacher a élargi les tabous en évitant la répétition simple et les éléments non liés. Dans *Autopoiesis of Architecture*, Schumacher a reformulé ces concepts, remplaçant les 'formes platoniciennes' par des 'primitives géométriques rigides' parmi les tabous

Il est apparu pour la première fois à la Biennale de Venise en 2008 et est devenu depuis un mouvement mondial reconnu. Il englobe diverses disciplines de conception. Au cours des quinze dernières années, les outils numériques sont passés du statut de simples aides à la représentation à celui de composants à part entière du processus de conception et de construction. La conception paramétrique trouve son origine dans les progrès des médias numériques, des techniques d'animation et des outils informatiques du milieu des années 1990. Aujourd'hui, elle constitue le style dominant de l'architecture contemporaine d'avant-garde, grâce à des systèmes de conception paramétrique innovants. (Chokhachian, 2016.; Schumacher, 2008.)

De nombreux chercheurs et spécialistes s'accordent à dire que le Paramétrisme représente un nouveau style architectural significatif. Par exemple, (Patrick Schumacher, 2014) souligne son impact révolutionnaire, le décrivant comme un changement majeur par rapport aux paradigmes architecturaux précédents. De même, (Michael Hensel.; Neil Leach. 2009.; Roland Hudson. 2010) reconnaissent que le Paramétrisme est une approche transformatrice qui offre des solutions innovantes aux défis de la conception. D'autres personnalités, comme (A. Heidari et al., 2019.; Inês Caetano et al., 2019.; Al-Azzawi & Al-Majidi, 2021), reconnaissent également son rôle pour repousser les limites de l'architecture et du design. Ce large soutien de la part des chercheurs souligne l'importance du Paramétrisme dans l'élaboration de la pratique architecturale contemporaine.

Au fil du temps, le concept de Paramétrisme a considérablement évolué. Initialement, à l'époque du Paramétrisme 1.0, l'accent était mis sur l'exploration de nouvelles formes grâce à l'utilisation d'outils numériques. Cette phase initiale était caractérisée par l'accent mis sur la génération et la visualisation de géométries complexes. Cependant, avec les progrès des techniques et des outils informatiques, la phase suivante, le Paramétrisme 2.0 (Patrick Schumacher, 2014), s'est orientée vers une application plus nuancée. Cette dernière phase est marquée par une concentration sur l'optimisation, l'adaptation à l'environnement et l'intégration de méthodes de calcul avancées tout au long du processus de conception architecturale. Ainsi, alors que le Paramétrisme 1.0 a joué un rôle de pionnier dans la création de nouvelles formes architecturales, le Paramétrisme 2.0 représente une maturation de l'approche, incorporant une utilisation raffinée et systématique de la conception computationnelle pour améliorer les performances et la compatibilité avec l'environnement. (Patrick Schumacher, 2014)

La transition du Paramétrisme 1.0 au Paramétrisme 2.0, dirigée par (Patrick Schumacher, 2008), visait à répondre aux critiques post-2008 en mettant l'accent sur la performance technique et sociale du Paramétrisme. Face à la marginalisation et aux accusations d'esthétisme excessif, cette évolution cherche à repositionner le Paramétrisme comme une pratique

architecturale axée sur l'efficacité et l'impact social, plutôt que sur les seuls aspects esthétiques et processuels.

II.1.4. Représentation paramétrique contemporaine : outils et techniques

D'après (Tomás Méndez Echenagucia, 2013) ; la conception assistée par ordinateur (CAO) a vu le jour dans les années 1950, mais ce n'est qu'au milieu des années 1990 qu'elle s'est imposée dans les studios d'architecture. Même à cette époque, de nombreux studios contemporains utilisaient cette technologie de manière relativement traditionnelle. Les dessins orthogonaux numériques et les modèles 3D étaient utilisés d'une manière qui ne différait pas sensiblement des pratiques décrites par Alberti. La principale avancée apportée par la technologie CAO est sa capacité à améliorer l'interaction avec les dessins, permettant aux architectes de modifier et d'affiner leur travail avec plus de rapidité, de précision et de rentabilité. Cette innovation a considérablement amélioré la rapidité et la fiabilité de la représentation architecturale.

L'introduction des B-Splines non rationnelles (NURBS) a représenté une amélioration notable de la boîte à outils de l'architecte. Les courbes et les surfaces complexes, qui sont depuis longtemps une caractéristique de la conception architecturale, ont bénéficié de cette innovation mathématique, qui a apporté une précision, une répétabilité et une facilité d'utilisation sans précédent, comme l'explique (Tomás Méndez Echenagucia, 2013). Selon Rafael (Rafael Sacks et al., 2004)., même si l'impact initial de ces technologies n'a pas été immédiatement profond, elles ont jeté les bases de la modélisation paramétrique contemporaine.

Les logiciels de CAO ont joué un rôle crucial dans la renaissance des algorithmes en tant que méthode de représentation architecturale. Plus important encore, ils ont facilité leur utilisation en tant qu'outils de conception contemporains, marquant un passage de la simple représentation à la conception active, comme le souligne (Tomás Méndez Echenagucia, 2013). Cette transition s'éloigne considérablement de l'utilisation classique et de la Renaissance des algorithmes, qui étaient principalement employés pour la représentation géométrique plutôt que pour les processus de conception. Les algorithmes de Vitruve et d'Alberti, par exemple, servaient davantage à la notation qu'aux modifications itératives de la conception.

L'une des avancées les plus significatives dans les pratiques algorithmiques actuelles est la capacité des logiciels de CAO à fournir un retour d'information graphique immédiat, permettant aux concepteurs d'interagir avec la géométrie résultante et de la modifier en temps réel. Cette fonction interactive est fondamentale pour la modélisation paramétrique moderne, car elle permet un plus grand nombre d'itérations de conception et améliore potentiellement la qualité de la construction, même si elle n'est pas sans limites. Comme le note (Daniel Davis, 2013), la vitesse et la flexibilité offertes par la modélisation paramétrique répondent au rythme rapide de la conception et de la construction contemporaines.

La modélisation paramétrique a également comblé le fossé entre la conception et la construction en permettant aux architectes de représenter un large éventail de composants avec une grande précision et efficacité. (Daniel Davis, 2013) affirme que cette méthode réduit les contraintes des systèmes de notation précédents et pourrait signifier la fin de ce que l'on appelle le « goulot d'étranglement de la notation ». Cette notion de goulot d'étranglement fait référence aux limites

imposées par les méthodes de représentation traditionnelles, qui ont été considérablement atténuées par les progrès des outils numériques de conception et de construction.

Le concept de personnalisation de masse, tel qu'abordé par (Tomás Méndez Echenagucia, 2013), concerne les processus de construction automatisés qui produisent divers composants sans coût supplémentaire. Ce concept s'attaque aux limites de la production de masse, où les coûts sont amortis sur des pièces identiques. Les composants personnalisés en masse sont réalisables lorsque les outils de conception peuvent traiter divers composants collectivement, en maintenant un contrôle rigoureux sur les variations sans dessin manuel de chaque pièce.

Enfin, les algorithmes définissant les modèles paramétriques sont désormais décrits dans des environnements de programmation plutôt que sous les formes verbales ou écrites traditionnelles. La communauté des concepteurs utilise divers environnements de programmation qui offrent des fonctionnalités et des interfaces utilisateur différentes. Au départ, les modèles paramétriques impliquaient l'intégration de scripts personnalisés dans les systèmes de CAO, tels que les « Rhino scripts » dans Rhinoceros et les scripts Maya Embedded Language (MEL) dans Maya. Récemment, les logiciels de CAO commerciaux se sont étendus pour inclure des environnements de programmation graphique, tels que Generative Components de Bentley Systems, Grasshopper pour Rhinoceros et Dynamo pour Autodesk Revit. (Daniel Davis, 2013., Tomás Méndez Echenagucia, 2013) soulignent que la représentation d'un modèle paramétrique nécessite un examen minutieux de tous les résultats possibles et de la géométrie incluse ou exclue dans le modèle.

II.1.5. Impacts de l'approche paramétrique sur l'architecture moderne.

L'approche paramétrique a profondément remodelé l'architecture moderne, en introduisant des méthodologies transformatrices dans la conception et la construction. Comme le souligne Roland Hudson dans son exploration de la conception paramétrique, ce changement a redéfini les processus de conception, qui sont passés de statiques à dynamiques, permettant des solutions architecturales plus fluides et adaptables (Roland Hudson. 2010). Kat Park souligne comment les outils informatiques permettent aux architectes de conceptualiser et de réaliser des géométries complexes et des structures adaptatives, repoussant ainsi les limites des formes architecturales traditionnelles (Kat park et al.). En outre, JuHyun Lee souligne l'intégration des processus algorithmiques dans la conception architecturale, ce qui a conduit à des structures innovantes et réactives qui étaient auparavant inimaginables (JuHyun Lee.). Cette transformation est également illustrée par Patrick Schumacher, qui évoque l'impact du paramétrage sur l'esthétique architecturale contemporaine et la polyvalence fonctionnelle (Patrick Schumacher, 2011). Mounira Badeche note également que l'approche paramétrique facilite l'optimisation de la performance des bâtiments et de l'efficacité des matériaux, améliorant ainsi la durabilité et la fonctionnalité de l'architecture moderne (Mounira Badeche et al., 2020). Ces idées soulignent collectivement l'influence significative de la conception paramétrique sur les pratiques architecturales modernes, en mettant en évidence son rôle dans l'avancement des aspects conceptuels et pratiques de l'innovation architecturale.

II.1.6. Caractérisation du paramétrique à partir des discours existants.

La caractérisation du paramétrique à partir des discours existants révèle une approche de plus en plus intégrée dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, où l'accent est mis sur la flexibilité et l'adaptabilité aux contraintes environnementales, structurelles et esthétiques. Plusieurs théoriciens ont tenté de définir et de formaliser cette approche. Parmi eux, (Patrick Schumacher, 2014) est l'un des pionniers, soulignant que l'architecture paramétrique repose sur des systèmes complexes capables de générer une diversité formelle en fonction d'un ensemble de paramètres définis, permettant ainsi une réponse optimisée à des conditions spécifiques (Patrick Schumacher, 2008). Cette approche est souvent décrite comme une rupture avec l'architecture moderniste, car elle permet de répondre à des besoins en constante évolution, notamment ceux liés aux performances énergétiques et au confort des usagers.

Des chercheurs tels que (Aish & Woodbury, 2005) ont également contribué à caractériser le paramétrique en le liant à l'utilisation de logiciels spécifiques comme *Generative Components* et *Rhino-Grasshopper*. Ces outils permettent de modéliser des formes en fonction de données précises et de les ajuster automatiquement lorsqu'un paramètre change, ce qui rend l'approche particulièrement efficace pour la conception intégrée. (Rivka Oxman, Robert Oxman., 2007) , pour sa part, explore comment cette approche se différencie des méthodes traditionnelles, en mettant l'accent sur la création d'une relation symbiotique entre les formes et leur environnement par le biais de la simulation et de l'optimisation.

En revanche, certains critiques comme (Harding & Shepherd, 2017) mettent en garde contre la dépendance excessive aux outils paramétriques, affirmant que ces derniers peuvent parfois favoriser une esthétique déconnectée des réalités physiques et contextuelles. Néanmoins, des études plus récentes, notamment celles de (Antonio Fioravanti et al., 2017), montrent que le paramétrique, lorsqu'il est utilisé de manière rigoureuse, permet d'optimiser des bâtiments en prenant en compte plusieurs variables, comme la performance énergétique et le confort thermique, rendant ainsi cette approche essentielle dans le contexte du changement climatique.

Ainsi, la caractérisation de l'approche paramétrique à travers ces différents discours souligne son potentiel à transformer la conception architecturale en intégrant des critères multi-objectifs tout en favorisant une meilleure performance environnementale et une adaptation aux exigences contemporaines.

II.1.7. Contexte d'étude et application du paramétrique.

La conception paramétrique a considérablement progressé, trouvant des applications dans de nombreux domaines tels que l'architecture, l'urbanisme, la décoration et les études environnementales. Cette approche de la conception s'appuie sur des relations algorithmiques complexes et des logiciels spécialisés, ce qui permet de trouver des solutions plus efficaces que les méthodes traditionnelles ne peuvent atteindre. Des chercheurs comme (Branko kolarevic.; Patrick Schumacher, 2014; Wimmer et al., 2022) ont largement exploré son potentiel pour générer des conceptions créatives, interdisciplinaires et dynamiques.

- En Urbanisme. Les outils paramétriques permettent d'explorer un large éventail d'alternatives de conception. Par exemple, des études utilisant Grasshopper ont optimisé les voies piétonnes et abordé les connexions visuelles urbaines. (Taleb & Musleh, 2015)

ont également démontré la valeur des méthodes paramétriques dans l'amélioration des environnements urbains durables, en se concentrant sur les analyses du vent, du soleil et de la lumière du jour pour le confort humain.

- En Architecture. La conception paramétrique permet de générer de multiples alternatives formelles. (Kat park et al.; Patrick Schumacher, 2014) soulignent que les outils paramétriques constituent un moyen puissant de relever des défis complexes en matière de conception, en favorisant le contrôle dynamique des éléments de conception, ce qui permet aux architectes d'explorer des solutions plus innovantes et durables. En outre, des chercheurs comme (Al-Attili, s. d.; Feng et al., 2019; Haidar et al., s. d.) ont exploré la manière dont la conception paramétrique peut conduire à de nouvelles formes d'expression architecturale et de performance environnementale. (Voir figure II.2).



Figure.II.2. Modèles architecturaux créés sur la base d'une conception paramétrique. Source : (Eltaweel & Su, 2017)

- Dans la Décoration et mode : La conception paramétrique a également eu un impact sur des domaines créatifs tels que la décoration et la mode, offrant des possibilités infinies de création de formes modulaires et de styles futuristes grâce à des processus algorithmiques. (Eltaweel & Su, 2017)
- Dans les Études environnementales : Les outils paramétriques sont particulièrement utiles dans l'analyse environnementale, où ils simulent des variables climatiques telles que la lumière du soleil, le vent et le gain de chaleur. (Rivka Oxman, Robert Oxman., 2007) et d'autres auteurs soulignent l'importance de ces simulations pour optimiser les performances des bâtiments en temps réel, ce qui permet de concevoir des structures plus durables et plus réactives. Des chercheurs comme (Lobaccaro et al., 2018; López-López et al., 2023; Lu et al., 2022) ont également contribué de manière significative à la compréhension de la manière dont la conception paramétrique peut améliorer les performances environnementales en intégrant des données et des simulations en temps réel dans le processus de conception.

Dans l'ensemble, la conception paramétrique est devenue indispensable pour faire face aux complexités de la conception moderne, en fournissant des solutions innovantes dans de multiples disciplines tout en améliorant l'efficacité et la durabilité.

II.2. Design paramétrique : techniques et outils

II.2.1. Définition et caractéristiques du design paramétrique.

Au cours des dernières décennies, la conception paramétrique a fait l'objet de réflexions approfondies. Certains chercheurs (Kolarevic, 2001) l'ont abordée comme un cadre philosophique ou théorique au sein de l'architecture contemporaine, tandis que d'autres (Aish & Woodbury, 2005; patrick schumacher, 2008.; Ameen Mokhles Youns et al., 2024) l'ont caractérisée comme un style architectural distinct avec des caractéristiques uniques. En outre, la conception paramétrique a été interprétée comme un mouvement architectural plus large ou comme un ensemble de techniques utilisées pour générer des formes pendant les phases de conception et de mise en œuvre. De nombreux efforts ont été déployés pour définir l'architecture paramétrique afin d'améliorer la collaboration entre les architectes et les professionnels de l'ingénierie au cours du processus de conception.

Lorsqu'on aborde le design paramétrique, il est crucial d'examiner le terme 'paramètres' qui le sous-tend. D'après les travaux de (Ine's Caetano et al., 2019) Selon le dictionnaire Oxford, un paramètre est défini comme « un facteur numérique ou autre facteur mesurable faisant partie d'un ensemble qui définit un système ou fixe les conditions de son fonctionnement », ou comme « une limite qui définit la portée d'un processus ou d'une activité particulière ». Le terme « paramétrique » fait donc référence à quelque chose qui est « lié à un ou plusieurs paramètres ou exprimé en termes de paramètres ».

Conformément à ce qui est précisé dans l'article de (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023), la définition du design paramétrique selon (Jabi, 2013) est décrite comme « *un processus basé sur la pensée algorithmique qui permet l'expression de paramètres et de règles qui, collectivement, définissent, encodent et clarifient la relation entre l'intention de conception et la réponse de conception.* » Cependant, certaines perspectives ont réduit la portée de la conception paramétrique. (Zboinska et al., 2015) la définit comme une approche de conception qui repose exclusivement sur des processus algorithmiques, la considérant comme un sous-ensemble de la conception algorithmique. De même, (Elghandour et al., s. d.) décrivent la conception paramétrique comme une approche de conception basée sur le code qui facilite la création de multiples instances de conception sans qu'il soit nécessaire de reconstruire manuellement le modèle. (Khelil Sarra, 2021) décrit la conception paramétrique comme une approche de conception numérique innovante qui permet de générer des formes géométriques complexes grâce à l'utilisation de nombreuses données, notamment des données environnementales, acoustiques, sociales, structurelles et urbaines. Cette approche permet de créer et de contrôler des formes complexes et adaptables, mais exige également une grande expertise pour surmonter les défis artistiques et techniques associés à la conception de ces formes.

Ce design s'appuie sur des paramètres et des règles pour structurer et limiter les possibilités de conception (Eltaweel & Su, 2017; Hsiao, s. d.; Jabi, 2013; Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023; Ine's Caetano et al., 2019; Ameen Mokhles Youns et al., 2024; Yildiz et al., s. d.). En outre, la DP est étroitement liée au paradigme de la modélisation des données du bâtiment, qui intègre des concepts issus de la conception paramétrique, tels que la géométrie associative et les relations topologiques (Rivka Oxman, Robert Oxman., 2007 .; Pedersen, s. d.), permettant des interdépendances entre les différents éléments de la conception.

Cette définition de la conception paramétrique cherche à englober les interprétations précédentes fournies par d'autres chercheurs, sans imposer de limites inutiles à son utilisation. Si la géométrie associative est souvent un sous-produit des applications pratiques de la conception paramétrique, elle n'en est pas pour autant une condition essentielle. En fin de compte, toute conception reposant sur la manipulation de paramètres relève de la conception paramétrique.

Selon (J. Zhang et al., 2020), l'objectif de la conception paramétrique va au-delà de la simple création de formes complexes ; il s'agit de transformer les défis de la conception en paramètres qui guident le processus de conception. Cette approche facilite non seulement la création de formes sophistiquées et adaptables, mais aborde également une série de questions essentielles, notamment les préoccupations environnementales. Par exemple, la conception paramétrique peut être utilisée pour améliorer l'efficacité énergétique, optimiser les performances et traiter diverses questions de durabilité. Dans sa thèse, (Khaoula, s. d.) affirme cette perspective en soulignant comment la conception paramétrique intègre ces facteurs dans le processus de conception. En convertissant des problèmes de conception complexes en paramètres ajustables, cette méthodologie favorise les solutions innovantes tout en incorporant systématiquement la performance environnementale et d'autres éléments cruciaux.

II.2.2. Analyse comparative du paramétrisme, de l'architecture paramétrique et du design paramétrique.

Comme l'explique (Ameen Mokhles Youns et al., 2024) , le design paramétrique représente une évolution notable de la théorie et de la pratique architecturales, caractérisé par l'intégration d'algorithmes informatiques et de techniques de fabrication numérique. Comme le montre le tableau II.1, la distinction entre le Paramétrisme, de l'architecture paramétrique et du design paramétrique établit un cadre permettant de comprendre leurs applications et méthodologies distinctes. Alors que la conception paramétrique élargit le paradigme architectural traditionnel grâce à l'utilisation des technologies numériques pour générer des formes innovantes, l'architecture paramétrique met l'accent sur l'application pratique des principes paramétriques pour développer des conceptions réactives. Néanmoins, la conception paramétrique a été critiquée parce qu'elle risque de limiter la flexibilité en raison d'une dépendance excessive à l'égard des algorithmes, ce qui peut limiter la capacité à s'adapter aux besoins spécifiques du projet et à l'évolution des conditions. Cela souligne l'importance de trouver un équilibre entre l'innovation technologique et l'adaptabilité pratique dans la conception architecturale.

Tableau II.1. Évaluation comparative du Paramétrisme, de l'architecture paramétrique et du design paramétrique. Source : (Ameen Mokhles Youns et al., 2024)

Aspect	Design paramétrique	Architecture paramétrique	Paramétrisme
Définition	Une approche méthodologique complète qui utilise des variables et des paramètres pour créer et ajuster des modèles numériques, applicable à toute une série de	L'utilisation des principes de conception paramétrique dans l'architecture pour générer des formes et des conceptions régies par des paramètres et des algorithmes.	Un cadre théorique qui caractérise un style architectural particulier intégrant la modélisation paramétrique et la conception informatique.

Chapitre II

	disciplines de conception au-delà de l'architecture		
Caractéristiques principales	- Développement de scripts et d'algorithmes. - Expérimentation de la conception et raffinement itératif. - Application dans diverses disciplines (conception de produits, conception industrielle, urbanisme).	- Utilisation des technologies de fabrication numérique. - Intégration des langages de programmation. - Mise en œuvre de techniques de modélisation paramétrique pour les solutions architecturales.	- Accent mis sur les processus de conception pilotés par des algorithmes. - Géométries non linéaires. Accent mis sur la différenciation et la variation. - Réactivité adaptative. - Techniques de fabrication numérique. - Formalisme dynamique. - Collaboration interdisciplinaire.
Objectif	Met en évidence le processus de conception par la manipulation des paramètres, applicable à diverses disciplines de conception.	Se concentre sur l'application des principes de conception paramétrique pour développer des solutions architecturales innovantes	Établir un style et un mouvement dans l'architecture et au-delà, qui se distingue par l'utilisation d'outils de modélisation paramétrique
Intégration technologique	Exploite les outils informatiques pour explorer les possibilités de conception, optimiser les performances et produire des formes complexes dans diverses disciplines de conception.	Utilise des logiciels de modélisation paramétrique spécialisés tels que Grasshopper pour Rhino ou Dynamo pour Autodesk Revit pour créer des formes architecturales.	Utilise des outils informatiques et des algorithmes avancés pour élaborer des conceptions complexes et adaptatives.

II.2.3. Conception paramétrique, générative et algorithmique : confusion des termes.

Comme l'a démontré (Inês Caetano et al., 2019) dans son travail en établissant une distinction claire entre les termes. La conception paramétrique (CP), la conception générative (CG) et la conception algorithmique (CA) sont des concepts interconnectés dans le domaine de la conception computationnelle, (voir figure II.3), chacun ayant ses propres méthodologies et applications distinctes. La CP, telle qu'articulée par (Aish & Woodbury, 2005; Jabi, 2013) implique la définition d'un ensemble de règles et de contraintes dans un modèle paramétrique pour guider le processus de conception, permettant l'adaptabilité et la personnalisation sur la base d'entrées variables. Cette approche met l'accent sur la manipulation des paramètres de conception pour obtenir des résultats spécifiques tout en maintenant une intention de conception cohérente. En revanche, la CG, explorée par (Agkathidis, 2015) va plus loin en employant des algorithmes pour générer de manière autonome un large éventail d'alternatives de conception par le biais de processus itératifs, souvent inspirés par les principes de l'évolution. Cette méthode tire parti de la puissance informatique pour explorer des espaces de conception complexes et identifier des solutions innovantes qui ne seraient pas apparues avec les méthodes de conception traditionnelles. L'CA, tel que décrit par (Queiroz et al., 2015; Terzidis, 2004), est un sous-ensemble plus ciblé de la CG, qui se concentre sur la création de conceptions par le

biais de processus algorithmiques précis. La CA met l'accent sur le contrôle explicite des résultats de la conception sur la base des paramètres d'entrée algorithmiques, garantissant une relation claire et traçable entre les variables de la conception et les résultats finaux. Alors que la CP est centrée sur des règles de conception flexibles basées sur des paramètres, la CG explore de vastes possibilités de conception grâce à des algorithmes génératifs, et la CA permet un contrôle et une analyse détaillés des processus algorithmiques dans la conception. Ensemble, ces approches représentent une boîte à outils complète pour la conception computationnelle moderne, permettant aux concepteurs de naviguer et de manipuler des défis de conception complexes avec une précision et une créativité accrue. Bien que ces termes soient distincts, ils partagent de nombreuses similitudes et se chevauchent considérablement dans leurs applications et méthodologies.

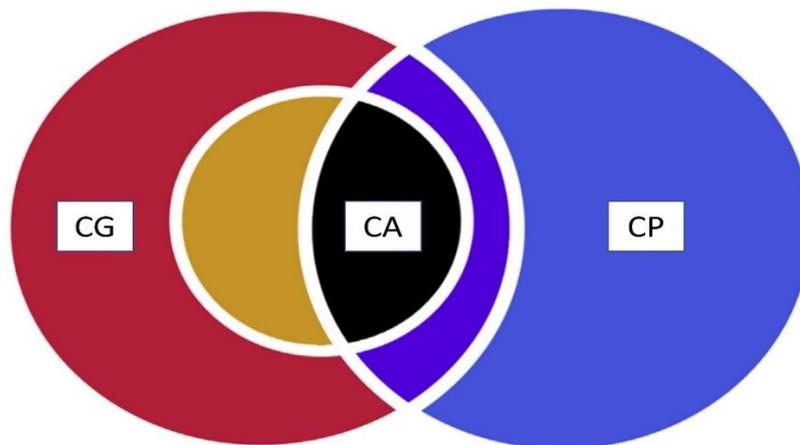


Figure II.3. Cadre conceptuel pour les termes utilisés dans le domaine de la conception informatique. Source : (Inês Caetano et al., 2019).

II.2.4. Principes fondamentaux du design paramétrique

La conception paramétrique a considérablement transformé les pratiques architecturales en introduisant un ensemble de principes fondamentaux qui améliorent à la fois la créativité et la performance. Comme le soulignent (Aish & Woodbury, 2005; Rivka Oxman, Robert Oxman., 2007), la conception paramétrique repose sur l'idée de définir des paramètres qui contrôlent les relations entre les éléments de conception, ce qui permet aux architectes de développer des formes complexes et adaptables. (Jabi, 2013) souligne que cette adaptabilité garantit que les conceptions peuvent répondre à une variété de contraintes, telles que les facteurs environnementaux ou les propriétés des matériaux, ce qui la rend particulièrement efficace dans la conception durable.

En outre, la flexibilité est une caractéristique essentielle de la conception paramétrique, qui permet de modifier facilement les modèles sans avoir à les reconstruire à partir de zéro, comme l'explique (Roland Hudson. 2010). Cela permet aux architectes d'explorer efficacement de multiples itérations d'une conception. En outre, l'optimisation est au cœur de la conception paramétrique, car elle intègre des critères de performance par le biais de processus informatiques. Selon (Turrin et al., 2011) des algorithmes tels que les algorithmes génétiques

Chapitre II

sont souvent utilisés pour affiner les conceptions en fonction d'objectifs tels que l'efficacité énergétique ou l'intégrité structurelle.

Outre ces principes, la différenciation est un aspect important de la conception paramétrique, qui se concentre sur la génération d'une grande variété d'options formelles plutôt que de s'appuyer sur des formes répétitives. Comme le suggère (Patrick Schumacher, 2014), cette différenciation permet une plus grande flexibilité pour répondre aux exigences fonctionnelles et esthétiques, offrant des solutions de conception uniques adaptées à chaque projet.

Un autre principe essentiel est la corrélation, où divers systèmes de conception - tels que la structure, la façade et la circulation - interagissent de manière coordonnée pour produire des solutions intégrées. (Patrick Schumacher, 2014) note que cette interconnexion renforce la complexité et la richesse des environnements architecturaux, conduisant à des espaces fonctionnellement sophistiqués.

Enfin, le principe d'intégration contextuelle joue un rôle crucial dans la conception paramétrique. Ce principe garantit que la conception interagit de manière significative avec son contexte environnant, qu'il soit urbain ou naturel, tout en maintenant l'identité architecturale et en répondant aux besoins culturels et sociaux de la communauté (Patrick Schumacher, 2014).

Ensemble, ces principes - adaptabilité, flexibilité, optimisation, différenciation, corrélation et intégration contextuelle - constituent la base de la conception paramétrique, offrant aux architectes une boîte à outils puissante pour résoudre des défis architecturaux complexes tout en gardant le contrôle sur l'esthétique et la fonctionnalité.

Lorsqu'il a publié son premier article sur le « Parametricism » en 2008 sous le titre « The Parametricism Manifesto », il a positionné cette approche comme la nouvelle tendance architecturale après le modernisme. Schumacher identifie les « dogmes » à suivre, tandis que les « tabous » à éviter.

Dans son ouvrage « *A New Global Style for Architecture and Urban Design* », (Schumacher, 2008) insiste sur le fait que les formes doivent être modelables de manière paramétrique et évoluer progressivement. Dans « *Autopoiesis of Architecture* » (Patrick Schumacher, 2011), il réaffirme la nécessité d'une mise en forme paramétrique et d'une différenciation des systèmes, tout en évitant les principes géométriques rigides et la simple répétition.

L'analyse de l'œuvre de Schumacher révèle des thèmes récurrents dans ses dogmes et ses tabous, qui sont résumés dans un tableau. Ce tableau (II.2) est extrait du travail (Oktan & Vural, s. d.)

Tableau II. 2. Principes directeurs définis par le « Manifeste du paramétrage ». Source : (Oktan & Vural, s. d.)

	Principes du Manifeste du Paramétrisme	Principes Régulés
DOGMES	<ul style="list-style-type: none">• Utiliser le script plutôt que le modèle• Toutes les formes doivent être paramétriquement malléables	Design paramétrique.
	<ul style="list-style-type: none">• Utiliser des NURBS• Utiliser des courbes splines	Curvilinéaire

TABOUS	<ul style="list-style-type: none"> • Hybrider • Transformer • Déformer • Infecter et corréler systématiquement • Tous les systèmes doivent être légalement différenciés 	Déformation
	<ul style="list-style-type: none"> • Composants génératifs • Différencier progressivement 	Répétition complexe
	<ul style="list-style-type: none"> • Interarticulaire • Tous les systèmes doivent être corrélés entre eux 	Répétition complexe
	<ul style="list-style-type: none"> • Déterritorialiser 	Universalité
	<ul style="list-style-type: none"> • Typologies familières • Objets platoniciens • Zones claires / coupées • Lignes droites • Angles droits et coins • Primitives géométriques rigides • Formes hermétiques 	Formes euclidiennes
	<ul style="list-style-type: none"> • juxtaposition d'éléments / systèmes non liés • Collage d'éléments non liés 	Formes non reliées
	<ul style="list-style-type: none"> • Répétition simple • Ne pas ajouter ou soustraire sans articulations élaborées • Répétition simple des éléments 	Répétition simple

II.2.5. Comparaison avec les méthodes conventionnelles de conception architecturale.

La conception paramétrique se démarque nettement des méthodes de conception traditionnelles en offrant un cadre flexible et itératif qui favorise l'adaptabilité et la réflexion avancée. Alors que les méthodes de conception traditionnelles s'appuient généralement sur des modèles fixes et des conceptions prédéfinies, qui peuvent limiter l'innovation et la flexibilité (Aish & Woodbury, 2005; Eltaweel & Su, 2017), la conception paramétrique permet de créer des modèles qui peuvent s'adapter dynamiquement en fonction de paramètres variables. Cette approche permet aux concepteurs d'explorer un large éventail de possibilités en modifiant les paramètres et les systèmes intégrés (Ine^s Caetano et al., 2019, Roland Hundson, 2010)

En outre, la conception paramétrique fournit des outils avancés pour l'analyse des performances et la conception précise des systèmes. Selon (Toutou et al., 2018; Turrin et al., 2011) des algorithmes sophistiqués tels que les algorithmes génétiques sont utilisés pour affiner les conceptions sur la base de critères de performance tels que l'efficacité énergétique et l'intégrité structurelle, ce qui surpasse les capacités des méthodes de conception manuelle. La conception paramétrique excelle également dans la réponse aux changements environnementaux et aux contraintes opérationnelles, car elle permet l'intégration de données en temps réel et l'analyse dynamique (Oxman, 2017).

En tirant parti de ces techniques avancées, la conception paramétrique offre un plus grand potentiel pour atteindre la durabilité et répondre à des exigences complexes en matière de conception et d'environnement, ce qui en fait un outil puissant qui dépasse les limites des

méthodes conventionnelles (Jabi, 2013). Cela reflète les progrès et les innovations qui peuvent être réalisés grâce à l'adoption de la conception paramétrique par rapport aux méthodes traditionnelles. (Voir Figure II.4)

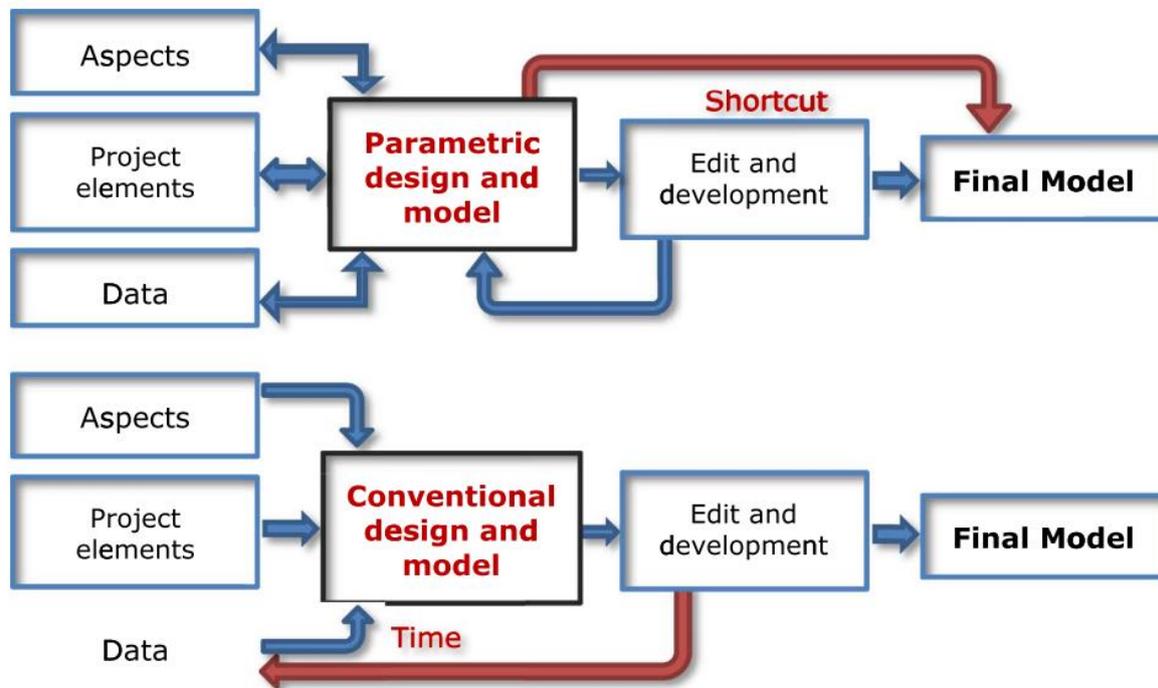


Figure II.4. Diagramme de comparaison entre le processus de conception paramétrique et le processus conventionnel. Source : (Eltaweel & Su, 2017)

Dans la conception architecturale, divers aspects tels que l'emplacement, l'orientation, la forme et le rayonnement solaire sont souvent traités comme des paramètres. Selon (Harding & Shepherd, 2017), les méthodes de conception traditionnelles exigent la répétition du processus complet pour chaque modification de paramètre, ce qui est long et peu efficace. En revanche, la conception paramétrique utilise des logiciels avancés tels que Grasshopper, permettant d'ajuster et d'améliorer les conceptions de manière plus fluide et intégrée (Oxman, 2017). Ce système permet des mises à jour automatiques et instantanées du modèle lorsque les paramètres changent, simplifiant ainsi le chemin vers la conception finale.

(Jabi, 2013) souligne que les méthodes de conception traditionnelles, même dans les projets simples, impliquent des cycles itératifs de modification et de développement jusqu'à l'atteinte d'une solution optimale. Cependant, (Gallas et al., s. d.) note que, pour des projets plus complexes, la gestion de ces processus devient de plus en plus complexe et problématique, avec des implications significatives en termes de temps et de faisabilité. En conséquence, les méthodes paramétriques sont essentielles pour gérer ces relations complexes (Schumacher, s. d.). L'approche paramétrique se révèle être un outil précieux pour coordonner des projets complexes, permettant des ajustements et des mises à jour sans avoir à refaire l'intégralité du processus de conception, grâce à l'interconnexion paramétrique de tous les paramètres, disciplines et éléments.

II.2.6. Place de la conception paramétrique dans le processus architectural.

Dans le processus de conception architecturale, le design paramétrique occupe une place centrale qui influence profondément plusieurs étapes du processus, depuis la conceptualisation initiale jusqu'à l'évaluation post-construction. Au stade de la conception préliminaire, le design paramétrique joue un rôle clé dans l'exploration et la génération de diverses alternatives de conception en ajustant les paramètres dynamiques. Comme le soulignent (Tomás Méndez Echenagucia, 2013; Qingsong & Fukuda, 2016; Schumacher, 2009), cette capacité à modifier directement et rapidement les paramètres renforce la flexibilité du design et aide à surmonter les limitations imposées par les méthodes traditionnelles, souvent lentes et itératives.

Pendant la phase de développement du design, le design paramétrique contribue de manière significative à améliorer la précision et l'intégration des différents éléments de la conception. (Aish & Woodbury, 2005) met en avant comment les outils de design paramétrique permettent aux architectes d'intégrer efficacement des systèmes complexes tels que les structures et les systèmes environnementaux, contribuant ainsi à un équilibre entre esthétique, fonctionnalité et performance écologique à travers des simulations en temps réel. Ces outils aident également à relever les défis liés à l'optimisation de la performance des bâtiments, notamment en termes de durabilité et d'efficacité énergétique.

Au stade de l'analyse de performance, l'impact du design paramétrique devient particulièrement évident. (Eltaweel & Su, 2017; Oxman, 2017) montrent comment le design paramétrique peut simuler des facteurs environnementaux tels que l'éclairage naturel et la ventilation, permettant ainsi de prendre des décisions éclairées pour améliorer la durabilité des bâtiments. Ces analyses contribuent à optimiser la performance environnementale des bâtiments et à réduire les impacts écologiques négatifs.

Lors de la phase de documentation de la construction, le design paramétrique assure précision et continuité dans la préparation des documents et des spécifications détaillées. (Achim Menges et al.) souligne comment le design paramétrique améliore la précision des détails et facilite une meilleure coordination entre les différentes équipes. De plus, (Kat park et al.,) met en évidence l'utilisation des outils de design paramétrique pour l'évaluation post-construction, permettant des améliorations itératives basées sur la performance réelle du bâtiment.

Ainsi, l'impact du design paramétrique ne se limite pas à l'amélioration de l'efficacité du processus architectural, mais il renforce également sa capacité à gérer les complexités environnementales et techniques, contribuant à la création de conceptions plus innovantes et durables tout au long du cycle de vie du projet.

II.2.7. Procédures du design paramétrique (PDP).

Inspirée par le travail de (Abdullah & Kamara, 2013), l'intégration du design Paramétrique (PD) avec les Méthodes de Conception pour former les procédures de Paramétrique (PDP). Les PDP répondent à la complexité de la conception et au besoin de solutions de conception polyvalentes sans nécessiter de connaissances approfondies en programmation.

Les PDP exploitent des paramètres tels que les formes initiales, les variables, les opérations et les relations pour générer et explorer de manière interactive des solutions de conception. Selon Lecky-Thompson, tel que cité par (Abdullah & Kamara, 2013), une procédure est définie comme un "*bloc de code nommé, semblable à une sous-routine, mais avec des fonctionnalités supplémentaires*", y compris l'acceptation de paramètres pour des fonctions d'entrée, de sortie ou de passage. Contrairement aux méthodes de conception traditionnelles, qui ne supportent que des formes génératives prédéfinies, les PDP facilitent l'exploration de diverses possibilités de conception en permettant la manipulation des paramètres au sein d'un même modèle.

Cette approche surmonte les limitations des modèles paramétriques traditionnels en permettant des transformations en 2D et 3D, y compris des formes non fermées, ce qui est restreint dans les procédures de conception classiques (Schumacher, 2009). Les PCP facilitent la transition entre différentes opérations comme l'extrusion et la rotation, offrant ainsi une exploration plus large des options de design essentielles (Aish & Woodbury, 2005).

Les PCP reposent sur une plateforme historique, permettant des modifications itératives tout au long du processus de conception, et combinent procédures automatisées et manuelles, augmentant la flexibilité (Bhooshan, 2017). Elles permettent également la création de formes non euclidiennes et de surfaces curvilignes, répondant aux besoins modernes en architecture. (La figure II.5.) montre le PDP en tant que méthodologie de calcul.

Les premières étapes de la conception, telles que l'identification des problèmes et l'esquisse, sont d'abord réalisées manuellement avant d'être intégrées dans l'environnement numérique via les PCP, enrichissant ainsi le processus de conception (Abdullah & Kamara, 2013). Les PCP représentent ainsi un avancement majeur dans la conception paramétrique en alliant flexibilité procédurale et exploration interactive.

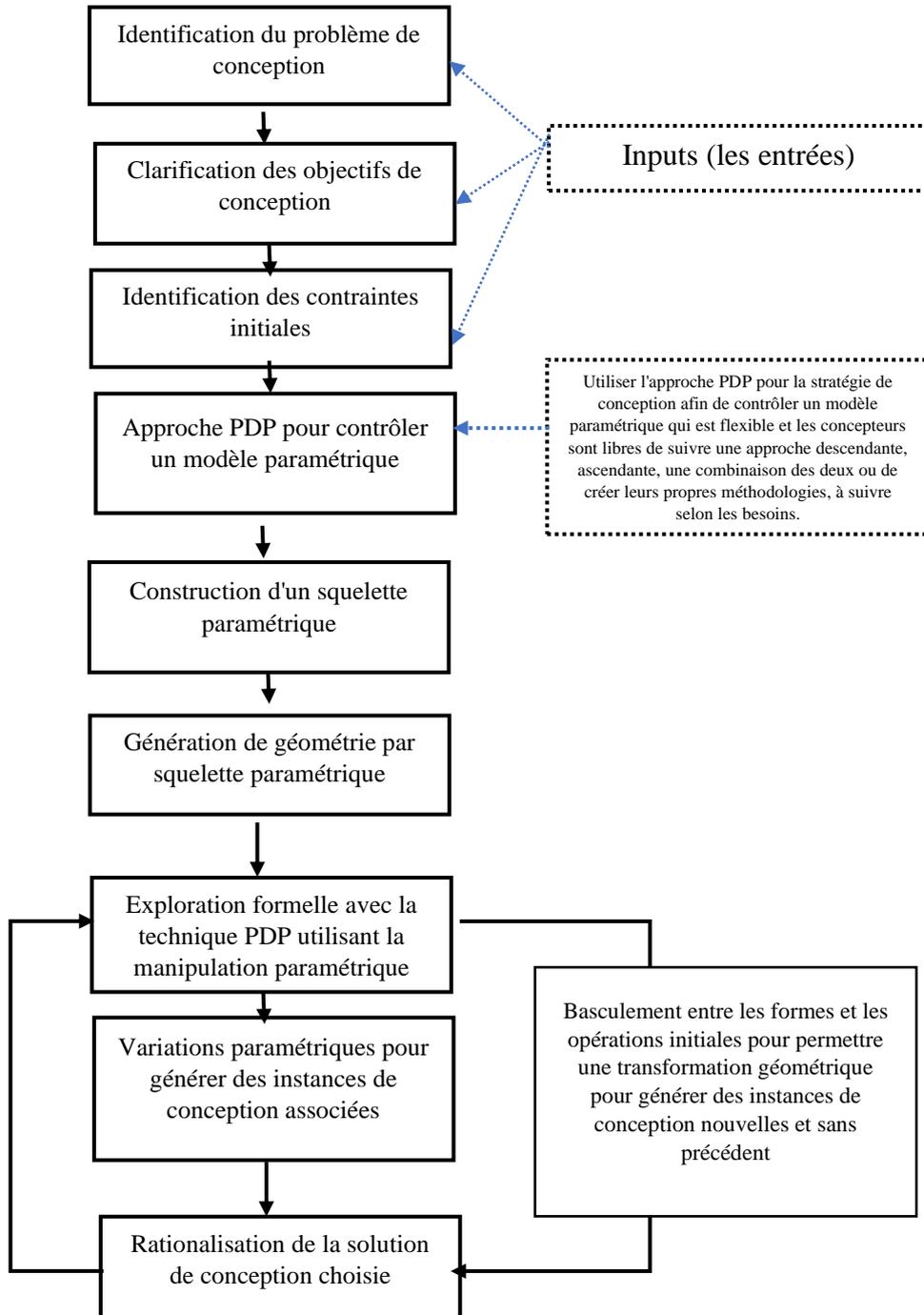


Figure.II.5. Méthodologie de calcul par procédures de conception paramétrique. Source : (Abdullah & Kamara, 2013)

II.2.8. Modélisation paramétrique en Architecture.

La modélisation en architecture est l'utilisation de modèles pour concevoir et analyser des projets architecturaux, facilitant la visualisation et l'optimisation des designs (Miet, s. d.). La modélisation paramétrique, en particulier, permet d'ajuster des variables pour générer diverses solutions de conception, offrant ainsi une flexibilité et une personnalisation accrues. Selon (Schumacher, s. d.), cette approche dynamise le processus de conception en permettant une exploration interactive des variations de design, ce qui conduit à des solutions plus innovantes et adaptées aux besoins spécifiques du projet.

Selon (Yan, 2015), la modélisation paramétrique est une méthode générale pour définir des modèles avec des contraintes et des paramètres variables (Eastman & Eastman, 2008). En architecture, elle facilite la création générative de formes en utilisant des paramètres et des règles basés sur des critères esthétiques et de performance, et permet une mise à jour automatique selon le contexte (Aish & Woodbury, 2005). Cette approche évolue de la conception d'une solution unique à celle de systèmes générant plusieurs solutions optimisées. Le design paramétrique est largement adopté dans des projets majeurs, tels que les stades des Jeux Olympiques de Pékin (Krish, 2011). Selon les observations de (Shepherd et al., 2011), le stade Aviva constitue un exemple illustratif de réussite dans l'application de la conception paramétrique.

II.2.9. Outils et logiciels de conception paramétrique en architecture.

Ces dernières années, les logiciels de conception paramétrique sont devenus des outils essentiels pour développer des principes de conception complexes. Comme l'indique (Elnaz Taghipourarasteh. s. d.) dans sa thèse de magister, les outils et logiciels de conception paramétrique jouent un rôle crucial dans l'architecture moderne en permettant une modélisation plus précise et adaptable des projets. Parmi ces outils :

- **Dynamo** : Dynamo est un environnement de programmation graphique open-source qui s'intègre avec Revit via l'API de Revit. Il utilise des nœuds visuels pour faciliter la programmation et est adapté aux formes visuelles (DARWN NEZAMALDIN, s. d.).
- **Digital Project et CATIA** : CATIA, développé par Dassault, est utilisé pour la modélisation 3D complexe dans divers secteurs, notamment l'architecture. Il offre des outils pour la création de surfaces de Classe A et améliore la précision du design (Tubielewicz-Michalczuk, 2019).
- **Outils de Script** : Les outils de script visuel permettent de créer des applications personnalisées sans programmation traditionnelle. Ils utilisent des nœuds graphiques pour gérer les paramètres et automatiser des tâches (Kensek, 2013).
- **Outils d'Analyse des Plug-ins** : Des plug-ins comme Ecotect et ETABS améliorent la conception paramétrique en offrant des analyses énergétiques et structurelles précises (DARWN NEZAMALDIN. s. d.).
- **Grasshopper**, intégré à **Rhinceros 3D**, se distingue comme l'un des plus utilisés, selon un nombre significatif de chercheurs (Abdullah & Alibaba, s. d.; Bahdad et al., 2021; Chi et al., 2021; Q. Liu et al., 2023; Piskac et al., 2014, 2014; Toutou et al., 2018) Grasshopper offre des capacités étendues grâce à des plugins avancés tels que "Ladybug" et "Honeybee," qui améliorent l'analyse des données environnementales et l'efficacité de la conception.

Comme l'a souligné (Eltaweel & Su, 2017) dans son étude académique, "Ladybug" permet l'importation de fichiers météorologiques standard de EnergyPlus pour analyser les impacts climatiques sur les projets, facilitant l'intégration des données environnementales avec les données du projet afin de comprendre les effets climatiques. De son côté, "Honeybee" s'intègre à des outils comme OpenStudio et EnergyPlus pour analyser la lumière naturelle, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité, et plus encore, ce qui améliore la précision et les performances du design. (Voir Figure II.6).

Bien que Grasshopper puisse nécessiter plus de temps pour le rendu de modèles complexes par rapport à d'autres logiciels comme 3D MAX, il offre des résultats précis et efficaces. Grasshopper permet la création et la conception de formes complexes en utilisant des algorithmes paramétriques, améliorant ainsi le contrôle du modèle à travers les ajustements de paramètres ou une programmation simple. Cette flexibilité en fait un outil puissant dans la conception paramétrique.

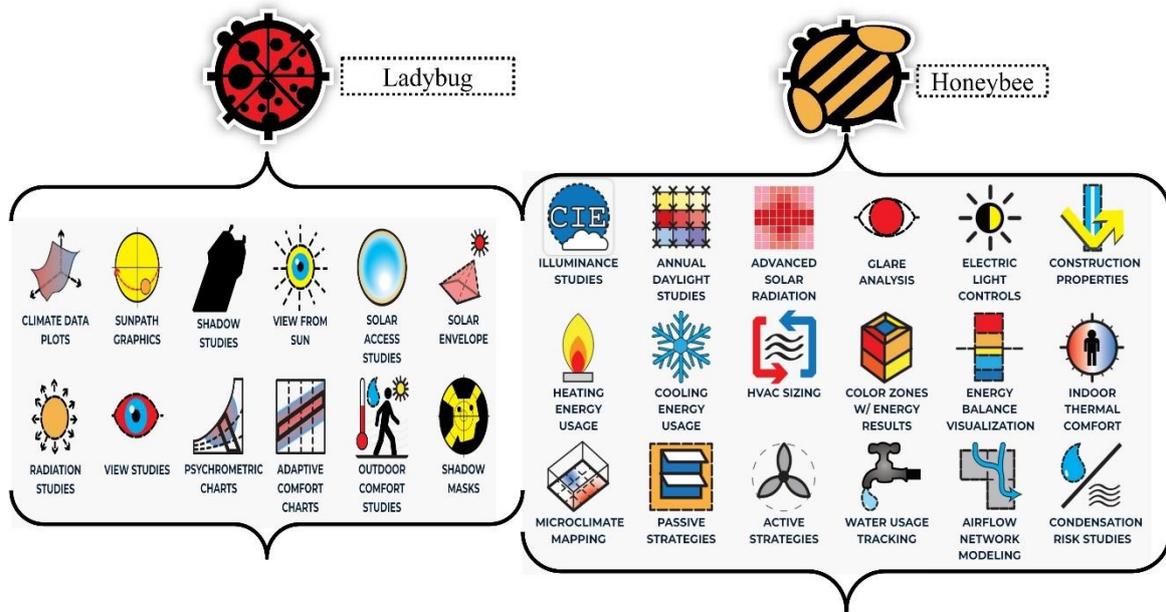


Figure.II.6. Simulations utilisées par Honeybee et Ladybug dans la modélisation environnementale. Source : <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>

Étant donné la large gamme d'outils disponibles dans le domaine du design paramétrique, et en considérant que Grasshopper et ses plugins figurent parmi les plus utilisés, J'ai privilégié son utilisation pour les simulations dans le cadre de ma recherche. Cela sera traité en détail dans la seconde partie pratique, notamment dans les chapitres 1 et 2, où l'intégration de Grasshopper dans le processus de simulation sera examinée de manière approfondie.

II.2.10. Limites et opportunités du design paramétrique dans le bâtiment.

Les limitations et opportunités du design paramétrique dans le bâtiment offrent des perspectives contrastées, comme l'ont souligné plusieurs chercheurs. D'une part, cette approche permet une flexibilité et une personnalisation accrues, permettant aux architectes de concevoir des formes complexes et uniques adaptées aux besoins spécifiques des projets, comme le montrent les travaux (Oxman, 2017) et (Eltaweel & Su, 2017). Des outils comme Grasshopper et Dynamo facilitent l'optimisation des performances en intégrant des données environnementales et structurelles, contribuant ainsi à la durabilité et à l'efficacité énergétique (Elnaz Taghipourarasteh. s. d.). En outre, le design paramétrique rationalise les tâches répétitives et permet des itérations rapides, améliorant ainsi l'efficacité de la conception (Roland Hundson, 2010). Cependant, des limites subsistent, telles que la courbe d'apprentissage élevée, les exigences computationnelles importantes et le temps de configuration initiale, ce qui peut

freiner son adoption, notamment pour les petits projets (Jabi, 2013). De plus, une suroptimisation liée à cette approche pourrait négliger des aspects essentiels du design, comme l'esthétique (Aish & Woodbury, 2005). Toutefois, l'intégration du design paramétrique avec les outils BIM et son potentiel de collaboration interdisciplinaire restent des atouts majeurs. Le succès de son application dans le bâtiment repose donc sur l'équilibre entre ces opportunités et ces défis, comme l'illustrent plusieurs études de cas menées sur des projets à grande échelle et plus traditionnels (Pottmann et al., 2015).

II.3. Confort intérieur : aspect thermique et visuel dans les bâtiments résidentiels.

II.3.1 Notion du confort intérieur.

Selon (Volkov et al., 2014), assurer un environnement intérieur confortable est un aspect fondamental de la conception et de l'exploitation des bâtiments, étant donné le rôle crucial que ces derniers jouent dans la vie quotidienne. Selon les recherches de (Frontczak & Wargocki, 2011), les individus passent environ plus de 85 % de leur temps à l'intérieur, ce qui souligne l'importance de la qualité de l'environnement intérieur pour le bien-être et la productivité. Le confort intérieur, bien que souvent subjectif, se divise généralement en quatre aspects principaux : le confort thermique, le confort visuel, le confort acoustique et la qualité de l'air, comme le souligne (Berto et al., 2023)

Le confort thermique et le confort visuel sont particulièrement critiques en raison de leurs effets directs sur la santé des occupants et l'efficacité énergétique. (Stemers & Manchanda, 2010) notent que l'équilibre entre confort thermique et efficacité énergétique peut être difficile, surtout dans les bâtiments avec une isolation ou une ventilation insuffisante. Les techniques de conception paramétrique offrent une approche robuste en optimisant à la fois le confort thermique et la consommation d'énergie.

Le confort visuel est également crucial pour le bien-être des occupants. (Nadji Maachi et al., 2019) met en avant les avantages d'un éclairage adéquat, qui peut améliorer l'humeur, réduire la fatigue oculaire et augmenter la productivité. L'intégration de la lumière naturelle à travers la conception architecturale améliore non seulement le confort visuel, mais réduit également la dépendance à l'éclairage artificiel, diminuant ainsi la consommation d'énergie, comme le montre (Reinhart & Wienold, 2011).

En se concentrant sur le confort thermique et visuel lors de la phase de conception, il est possible de créer des espaces qui favorisent à la fois la santé et la productivité tout en soutenant l'efficacité énergétique. L'intégration des outils de conception paramétrique rend cet équilibre de plus en plus réalisable, répondant à la fois aux besoins humains et à la durabilité environnementale.

Dans le cadre de mon travail pratique, j'ai choisi de me concentrer exclusivement sur le confort thermique et visuel dans le logement social collectif en utilisant l'approche paramétrique, en négligeant volontairement d'autres aspects du confort tels que le confort acoustique ou olfactif. Ce choix est justifié par plusieurs raisons. Tout d'abord, le confort thermique et visuel joue un rôle central dans la perception quotidienne du bien-être des occupants, particulièrement dans des contextes de logement social collectif où les ressources sont souvent limitées et où l'amélioration de ces deux paramètres peut avoir un impact direct sur la qualité de vie. De plus,

l'approche paramétrique offre une flexibilité et une capacité d'optimisation particulièrement adaptées à ces deux types de confort, permettant d'intégrer les données environnementales et énergétiques avec précision. Enfin, l'intégration de toutes les dimensions du confort aurait alourdi considérablement l'analyse, compromettant la clarté et l'efficacité de l'étude, tout en dépassant les objectifs initiaux de la recherche, qui sont centrés sur l'optimisation thermique et visuelle des bâtiments résidentiels. Ce cadre restreint permet également de rester en cohérence avec la littérature existante, qui met souvent en avant ces aspects comme prioritaires dans le contexte des bâtiments à faible coût.

II.3.1.1. Effets sur la santé et le bien-être.

Le confort intérieur, particulièrement le confort thermique et visuel, joue un rôle crucial dans la santé et le bien-être des occupants. Selon (Frontczak & Wargocki, 2011), un environnement intérieur agréable peut améliorer la qualité de vie en réduisant les risques de maladies liées aux conditions de vie défavorables. Le confort thermique, par exemple, influence directement la santé physique des individus. Une température intérieure inappropriée peut entraîner des troubles tels que des maladies respiratoires et des troubles cardiovasculaires. La recherche de (Stemers & Manchanda, 2010) montre que des conditions thermiques optimales contribuent à une meilleure régulation corporelle et à une réduction des stress physiologiques, ce qui se traduit par une amélioration générale du bien-être.

En ce qui concerne le confort visuel, (Nadji Maachi et al., 2019) affirme que l'éclairage adéquat est essentiel non seulement pour la performance visuelle mais aussi pour la santé mentale. Un éclairage insuffisant ou mal conçu peut provoquer de la fatigue oculaire, des maux de tête, et même des troubles de l'humeur, selon (Berto et al., 2023). Par ailleurs, une exposition appropriée à la lumière naturelle a été associée à des effets positifs sur le bien-être émotionnel et la productivité (Reinhart & Wienold, 2011). L'intégration de stratégies de conception qui favorisent l'accès à la lumière naturelle peut donc contribuer à une amélioration significative du confort intérieur et, par conséquent, à un mieux-être général des occupants.

Ces observations mettent en lumière l'importance d'une approche intégrée du design architectural, qui prend en compte les besoins en confort thermique et visuel pour optimiser la qualité de vie des occupants. Les outils paramétriques, en permettant une analyse fine et adaptable des conditions de confort, offrent des solutions pour créer des environnements qui favorisent à la fois la santé physique et mentale des usagers.

II.3.1.2. Confort et bâtiment résidentiels.

Le confort dans les bâtiments résidentiels est un aspect fondamental de la qualité de vie des occupants. Il ne se limite pas uniquement aux conditions thermiques, mais englobe également le confort visuel, acoustique et la qualité de l'air intérieur. Comme l'expliquent (Bluyssen, 2010), un environnement confortable permet aux habitants de mieux s'adapter aux variations climatiques et d'améliorer leur bien-être quotidien. Par ailleurs, le confort thermique et visuel, en particulier, joue un rôle clé dans les bâtiments résidentiels, où des facteurs tels que l'orientation, l'isolation et l'apport de lumière naturelle influencent directement le ressenti des occupants (Leaman & Bordass, 1999). En combinant une conception intelligente avec des technologies durables, il est possible de créer des espaces qui non seulement réduisent la

consommation d'énergie, mais améliorent également le confort des résidents, ce qui est essentiel pour une approche durable et respectueuse de l'environnement.

II.3.2. Confort thermique : caractérisation.

Le confort thermique est défini comme "un état d'esprit exprimant la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique" (Volkov et al., 2014). Cette condition reflète le degré de confort que ressent un individu par rapport à son environnement thermique, et elle est cruciale dans la conception des bâtiments, en alignement avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) relatifs à la santé, à l'énergie propre et au développement urbain durable (Hensen, 1991). L'évaluation du confort thermique repose sur une combinaison de facteurs physiques et personnels influençant la perception de la chaleur.

En se basant sur les travaux (Berto et al., 2023; Volkov et al., 2014), le niveau de confort thermique est influencé par divers facteurs personnels et environnementaux. Les principaux facteurs identifiés sont les suivants :

➤ **Facteurs personnels :**

- Taux métabolique : Il s'agit du taux de transformation de l'énergie chimique en chaleur et en travail mécanique à l'intérieur du corps.
- Isolation vestimentaire : Cette mesure évalue la résistance fournie par les vêtements au transfert de chaleur sensible.

➤ **Facteurs environnementaux :**

- Température de l'air : Connue sous le nom de température sèche, elle représente la température de l'air environnant.
- Température radiante : C'est la température d'une enceinte noire imaginaire dans laquelle un corps échangerait une quantité équivalente de chaleur radiante.
- Vitesse de l'air : Ce facteur indique le taux de mouvement de l'air à un point donné.
- Humidité : Il s'agit du rapport de la vapeur d'eau présente dans un volume donné d'air.

Ensemble, ces variables déterminent la sensation thermique ressentie par les individus dans leur environnement.

Comme le souligne (Berto et al., 2023) dans ses travaux, Trois approches principales sont utilisées pour évaluer le confort thermique. La première, basée sur les études expérimentales, se concentre sur l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement. La seconde approche, dite adaptative, suggère que les individus peuvent s'adapter à leur environnement thermique par des ajustements comportementaux et une acclimatation, ce qui leur permet de se sentir confortables dans une gamme plus large de conditions, Comme le précise le standard de la Société Américaine des Ingénieurs en Chauffage, Réfrigération et Climatisation (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers / (ANSI/ASHRAE Addendum d to ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, s. d.) et (the American National Standards Institute/ANSI). La troisième approche, le modèle personnel de confort thermique, utilise des technologies avancées comme l'Internet des objets (IoT) et l'apprentissage automatique pour prédire les réponses de confort basées sur les données individuelles, améliorant ainsi la précision des prévisions. (S. Liu et al., 2019)

Comme l'a souligné (Lan et al., 2011) dans son travail. Les mécanismes d'adaptation jouent un rôle crucial dans le maintien du confort thermique. Les adaptations comportementales comprennent des ajustements personnels dans les vêtements ou les comportements, tandis que les adaptations physiologiques se réfèrent à l'acclimatation au fil du temps, et les adaptations psychologiques sont influencées par les expériences passées. Ces mécanismes permettent aux individus de conserver leur confort malgré les variations des conditions environnementales.

L'importance du confort thermique va au-delà du simple bien-être personnel ; elle impacte également la consommation énergétique des bâtiments. Les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC)¹⁷, principalement régis par les besoins de confort thermique, représentent une part significative de la consommation énergétique des bâtiments (Khaoula, s. d.; Toutou et al., 2018). Par conséquent, une gestion efficace du confort thermique est essentielle pour améliorer le bien-être des occupants et promouvoir l'efficacité énergétique.

II.3.3. Critères et indicateurs de confort thermique

Le confort thermique est un concept complexe influencé par divers facteurs environnementaux et personnels. Pour évaluer ce confort, plusieurs modèles peuvent être utilisés, chacun étant adapté à différents types d'environnements et besoins de confort. Parmi les modèles notables, on trouve le Modèle de Vote Moyen Prévu (PMV)¹⁸/Modèle de Pourcentage de Mécontents Prévu (PPD)¹⁹ et le Modèle Adaptatif. Comme adopté par (Song et al., 2019).

II.3.3.1. Modèle de Vote Moyen Prévisible (PMV).

Comme l'a souligné (Song et al., 2019), ce modèle, développé par Fanger (1970), repose sur l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement. Il prend en compte quatre facteurs environnementaux principaux—la température radiante moyenne, la température de l'air, l'humidité relative, et la vitesse de l'air—ainsi que deux facteurs personnels—l'isolation des vêtements et le taux métabolique. Ce modèle utilise des données issues d'expériences contrôlées pour prédire la sensation thermique d'un large groupe de personnes. Il est largement utilisé dans la conception des bâtiments et offre une approche systématique pour évaluer les niveaux de confort. Selon Fanger, ce modèle est particulièrement utile dans les environnements équipés de systèmes mécaniques. Cependant, (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023) souligne que le modèle PMV peut présenter des limites dans les environnements à variations importantes de température. Les normes ISO 7730 et ASHRAE 55 reposent sur le modèle du Vote Moyen Prévu (PMV). Ce modèle prédit la valeur moyenne des évaluations d'un large groupe de personnes sur une échelle de sept points, basée sur l'équilibre thermique entre le corps et l'environnement.

Comme le précise (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023), selon les normes ASHRAE, dans les bâtiments climatisés, les évaluations de sensation thermique entre -1 et +1 indiquent une satisfaction thermique, tandis que celles en dehors de cette plage signalent une insatisfaction (voir tableau II.3). Pour les bâtiments naturellement ventilés, le modèle de Pourcentage de Mécontents Prévu (PPD) est essentiel pour mesurer l'inconfort des occupants. Cette attention

¹⁷ En Anglais: Heating, Ventilation, and Air Conditioning». Ce terme désigne les systèmes utilisés pour réguler la température, l'humidité, et la qualité de l'air dans les bâtiments.

¹⁸ the Predicted Mean Vote: En Anglais.

¹⁹ Predicted Percentage of Dissatisfied: En Anglais.

aux modèles PMV et PPD souligne l'approche rigoureuse d'ASHRAE 55 en matière de confort thermique dans la conception et l'exploitation des bâtiments.

Tableau II.3. Indice de Vote Moyen Prédit. Source : (Volkov et al., 2014)

Froid	Frais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement Chaud	Chaud	Très chaud
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

II.3.3.2. Modèle de pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD).

Complémentaire au modèle PMV, le PPD prédit le pourcentage de personnes qui pourraient être insatisfaites de leur condition thermique, que ce soit parce qu'elles se sentent trop chaudes ou trop froides, en fonction des valeurs de PMV (Song et al., 2019). Cet indicateur est essentiel pour évaluer la satisfaction générale des occupants et est généralement utilisé avec le modèle PMV pour obtenir une vue complète du confort thermique. Comme l'a souligné (Volkov et al., 2014), le modèle PPD offre une évaluation précieuse de la satisfaction thermique.

II.3.3.3. Modèle de Vote Moyen prévisible Étendu (ePMV)²⁰.

Ce modèle étendu du PMV a été proposé pour améliorer la satisfaction dans les bâtiments sans systèmes de climatisation ou de ventilation, particulièrement dans les climats chauds et humides. Il vise à améliorer la précision des évaluations de confort thermique dans les espaces à ventilation naturelle. La contribution de (Song et al., 2019) a encore affiné ce modèle pour mieux capter les niveaux de confort sous diverses conditions climatiques. Selon (De La Hoz-Torres et al., 2024), le modèle ePMV est adapté aux environnements sans systèmes mécaniques de conditionnement de l'air.

Ces modèles offrent des perspectives précieuses sur le confort thermique, chacun étant adapté à différents types d'environnements intérieurs et besoins des occupants. Le choix du modèle approprié dépend du système de conditionnement du bâtiment et des exigences spécifiques de confort des habitants.

II.3.3.4. Modèle Adaptatif.

Développé par (Nicol & Humphreys, 2002), ce modèle est conçu pour les bâtiments à ventilation naturelle, où les occupants peuvent ajuster leur environnement en modifiant des éléments tels que les vêtements, les fenêtres ou les ventilateurs. Il relie la température intérieure de confort à la température extérieure, en prenant en compte les comportements adaptatifs des occupants. (Nguyen et al., 2012) a élargi ce modèle pour inclure une gamme plus large de stratégies d'adaptation et de conditions climatiques, améliorant ainsi sa pertinence dans divers environnements.

Comme mentionné précédemment, la théorie du "confort thermique : PMV et PPD" proposée par Fanger a servi de fondement aux normes internationales de confort thermique, telles que l'ISO 7730 et l'ASHRAE 55, pour prédire la sensation thermique des individus dans des environnements climatisés ou à climat contrôlé. Cependant, comme l'a souligné (Nguyen et al., 2012), plusieurs études de terrain ont démontré que ce modèle échoue à prédire avec précision la sensation thermique des occupants dans des bâtiments en "libre fonctionnement", aussi bien dans les climats chauds que tempérés. Cette limitation découle du fait que le modèle PMV ne

²⁰ Extended Predicted Mean Vote: En Anglais.

tient pas compte des interactions complexes entre les occupants et leur environnement, notamment l'adaptation progressive à travers des ajustements de comportement, des attentes et des préférences.

(Nicol & Humphreys, 2002) ont remis en cause cette théorie du confort "statique", en introduisant le concept d'adaptation des occupants et en soulignant les limites de cette approche dans les environnements contrôlés. Depuis, plusieurs modèles de confort adaptatif ont été développés, tels que ceux intégrés dans la norme ASHRAE 55-2004 et la norme EN15251. Des recherches approfondies (Rawal et al., 2022) ont également montré que l'adoption des normes de confort adaptatif dans les bâtiments réels permet de réaliser des économies d'énergie significatives, pouvant atteindre environ 30 % de la charge de refroidissement, comparativement aux modèles de confort classiques basés sur un point de consigne de température fixe.

D'autres études, telles que celles de (Abdullah & Kamara, 2013; López-López et al., 2023) ont confirmé l'efficacité du modèle adaptatif dans les bâtiments naturellement ventilés, où les occupants utilisent des ajustements personnels pour maintenir un confort thermique tout en réduisant les besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation.

II.3.4. Normes et règlements internationaux

Les normes internationales relatives au confort thermique, telles que l'ASHRAE Standard 55, l'ISO et l'EN 15251, constituent des cadres essentiels pour garantir le confort thermique des occupants dans les bâtiments, tout en optimisant l'efficacité énergétique.

II.3.4.1. ASHRAE.

L'ASHRAE a développé la **Norme 55**, qui définit les conditions environnementales thermiques acceptables pour les occupants humains. Cette norme repose sur les modèles de **PMV** et de **PPD** pour évaluer et prédire le confort thermique en fonction de plusieurs facteurs environnementaux, tels que la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air (*ANSI/ASHRAE Addendum d to ANSI/ASHRAE Standard 55-2017*, s. d.).

(Nicol & Humphreys, 2002) ont étendu cette norme en intégrant le **modèle de confort adaptatif**, particulièrement pertinent pour les bâtiments naturellement ventilés, où les occupants peuvent contrôler certains aspects de leur environnement. Introduit dans la norme ASHRAE 55 en 2004

II.3.4.2. Organisation internationale de normalisation (ISO).

L'ISO²¹ définit des normes pour la mesure et l'évaluation des ambiances thermiques, couvrant des conditions allant des ambiances chaudes aux froides, ainsi que le contact avec les surfaces solides. Ces normes sont cruciales pour l'évaluation et la conception des environnements thermiques (ISO 7730) (Olesen, 2004). Comme l'a souligné (Yasmina BESBAS, 2019), dans son travail, ces normes sont fondamentales pour améliorer les conditions thermiques existantes et concevoir de nouveaux environnements adaptés aux besoins des occupants.

²¹ The International Organization for Standardization: En Anglais.

Les normes ISO fournissent des directives précises pour évaluer les ambiances thermiques dans divers contextes. Parmi ces normes L'ISO 7243 utilise l'indice WBGT²² pour les conditions chaudes, tandis que l'ISO 7730 mesure le confort thermique avec les indices PMV et PPD pour des environnements modérés (Olesen & Parsons, 2002). Pour les conditions froides, l'ISO 11079 détermine l'isolement vestimentaire, et l'ISO 13732 évalue la réponse au contact avec des surfaces à différentes températures (Yasmina BESBAS, 2019). Les normes ISO 8996 et 7726 concernent respectivement le métabolisme humain et les instruments de mesure. Ces normes sont cruciales pour garantir un confort thermique optimal.

II.3.4.3. EN 15251 / EN 16798-1.

La norme EN 15251, mise à jour sous le nom d'EN 16798-1, émise par le Comité Européen de Normalisation (CEN), fournit des directives pour la qualité environnementale intérieure, en mettant l'accent sur le contrôle de la température dans les bâtiments ventilés naturellement ou mécaniquement. Elle intègre également le modèle de confort adaptatif, semblable à celui de l'ASHRAE, permettant des plages de température variables en fonction de l'adaptation des occupants et des températures extérieures (Energies et Avenir, 2016).

(Nicol & Humphreys, 2002) ont grandement contribué au développement de ce modèle adaptatif, largement adopté dans les normes européennes.

II.3.4.4. Réglementation thermique en France (La RT).

La RT 2012, introduite en 2012, fixe une consommation énergétique maximale de 50 kWh/m²/an pour les bâtiments neufs, couvrant chauffage, refroidissement, éclairage et eau chaude sanitaire. (Le Grenelle de l'Environnement.2006.)

En 2021, la RE 2020 a remplacé la RT 2012 avec des exigences plus strictes pour le confort thermique, notamment en été. Elle évalue la capacité des bâtiments à éviter la surchauffe en utilisant des indicateurs comme la température intérieure conventionnelle (TIC) et encourage des solutions passives telles que l'isolation thermique et la ventilation naturelle. (Le Grenelle de l'Environnement.2006.)

II.3.5. Réglementation thermique en Algérie.

Comme l'a souligné (Yasmina BESBAS, 2019). En Algérie, la loi n°99-09 du 28 juillet 1999, relative à la maîtrise de l'énergie, marque le début d'une politique d'optimisation de la gestion des ressources énergétiques. Cette politique est renforcée par le décret exécutif n° 2000-90 du 24 avril 2000, qui établit des normes pour la réglementation thermique des bâtiments neufs. Selon cette réglementation, l'isolation thermique est obligatoire pour les nouveaux bâtiments, mais son application a été entravée par l'absence d'organismes de contrôle et d'outils opérationnels adéquats pour les bureaux d'études en architecture (C.D.E.R).

Pour accompagner cette réglementation, le Centre National de la Recherche de l'Industrie du Bâtiment a élaboré plusieurs documents techniques destinés aux professionnels du secteur. Ces documents incluent :

²² Wet bulb globe température : En Anglais.

Le DTR.C 3-2 : Ce document précise les méthodes de calcul des déperditions thermiques en hiver pour les bâtiments résidentiels. (DTR C3 2 Règlement thermique des batimen. s. d.)

Le DTR.C 3-4 : Il fournit des règles pour calculer les apports calorifiques estivaux dans les bâtiments. (DTR.C 3-4 climatisation, s. d.).

Le DTR.C 3-31 : Ce guide traite de la ventilation naturelle dans les espaces résidentiels.

Ces documents visent à fournir un cadre technique pour la conception des bâtiments en tenant compte du confort thermique et de l'efficacité énergétique, malgré les défis liés à la mise en œuvre pratique.

Malheureusement, ces réglementations n'ont pas encore été mises en œuvre en raison de l'absence d'un organisme de surveillance et de contrôle adéquat, ainsi que du manque d'outils opérationnels permettant aux bureaux de conception architecturale d'appliquer ces normes de manière efficace dans le processus de conception des bâtiments. Cette situation constitue un frein aux efforts visant à améliorer la qualité des conceptions et à garantir le respect des critères de durabilité environnementale. Il est donc crucial d'établir des instances de régulation et de fournir les ressources nécessaires pour soutenir les architectes dans l'application des exigences de ces réglementations.

II.3.6. Confort visuel.

Le confort visuel, selon la norme européenne UNI EN 12665, désigne une condition subjective de bien-être visuel, influencée par l'environnement lumineux. Cette perception dépend de la physiologie de l'œil humain, des propriétés physiques telles que la quantité et la distribution de la lumière dans l'espace, ainsi que de l'émission spectrale de la source lumineuse. Les recherches sur ce sujet se sont concentrées sur plusieurs facteurs, notamment la quantité de lumière, son uniformité, la qualité du rendu des couleurs et l'éblouissement, qui peuvent altérer considérablement le confort des occupants. (Della Crociata et al., 2012). définit l'éblouissement comme « la sensation provoquée par une luminance excessive dans le champ visuel, entraînant un inconfort ou une baisse des performances visuelles » (Della Crociata et al., 2012)

Comme l'a observé (Berto et al., 2023), pour garantir une bonne visibilité dans un espace, il est crucial de disposer d'un éclairage adéquat, permettant aux utilisateurs de réaliser leurs tâches efficacement. L'uniformité de la lumière aide à éviter la fatigue oculaire, en réduisant la nécessité d'adaptation constante entre des zones trop et insuffisamment éclairées. Un autre aspect important du confort visuel est le rendu des couleurs. L'indice de rendu des couleurs (IRC) mesure la capacité d'une source lumineuse à reproduire les couleurs des objets de manière fidèle.

Selon (Nadji Maachi et al., 2019), l'apport de lumière naturelle joue un rôle clé dans le confort visuel, car elle contribue à une perception visuelle agréable et réduit la dépendance à l'éclairage artificiel. Des facteurs architecturaux et humains, tels que la vue sur l'extérieur, la diversité des conditions lumineuses et le contrôle que les occupants ont sur leur environnement, participent également à l'amélioration de ce confort. Les préférences individuelles, les jugements esthétiques, ainsi que le besoin biologique d'informations visuelles, influencent aussi cette perception.

II.3.7. Critères d'Éclairage et de Confort Visuel.

Comme l'a souligné (Nadji Maachi et al., 2019). Un bon confort visuel privilégie un éclairage naturel adéquat, bien que l'éclairage artificiel soit nécessaire pour répondre aux besoins spécifiques des espaces intérieurs. En général, l'éclairage à l'intérieur varie entre 100 et 1000 lux, en fonction de la fonction de l'espace. La conception de l'éclairage repose principalement sur la distribution de la luminance, qui est plus simple à évaluer que la distribution de l'éclairage. Chaque tâche à accomplir dans un espace nécessite des niveaux de lumière spécifiques pour être réalisée de manière optimale.

Comme l'a mentionné (Carlucci et al., 2015), le confort visuel a généralement été étudié à travers l'évaluation de plusieurs facteurs qui décrivent la relation entre les besoins humains et l'environnement lumineux. Parmi ces facteurs :

➤ **Quantité de Lumière : l'éclairage.**

Une bonne visibilité est assurée par une quantité adéquate de lumière pour les tâches à accomplir. Une lumière insuffisante ou excessive peut entraîner un inconfort. L'éclairage, mesure de la lumière atteignant une surface, est couramment utilisé pour quantifier les niveaux de lumière, souvent en comparant les conditions réelles avec des plages optimales prédéfinies basées sur les activités des occupants. (Carlucci et al., 2015).

➤ **Uniformité de la Lumière.**

L'uniformité fait référence à la répartition homogène de la lumière sur une surface. Une haute uniformité réduit la fatigue oculaire en minimisant les ajustements fréquents entre les zones bien éclairées et celles moins éclairées, améliorant ainsi le confort visuel global. Cela se mesure par l'uniformité de l'éclairage, car des moyennes uniformes peuvent masquer des variations significatives dans la distribution de la lumière (Andersen et al., 2008).

➤ **Éblouissement.**

Selon l'IESNA, l'éblouissement est causé par une lumière excessive qui affecte la visibilité. Il peut prendre la forme d'un éblouissement d'incapacité (physiologique) ou d'un éblouissement de gêne (psychologique). L'éblouissement d'incapacité nuit immédiatement aux performances visuelles, tandis que l'éblouissement de gêne entraîne une fatigue oculaire et une gêne au fil du temps. Si l'éblouissement par incapacité est plus facile à détecter, l'éblouissement par gêne reste subjectif et étroitement lié à la satisfaction intérieure globale.

➤ **Qualité de la Lumière dans la Rendu des Couleurs.**

La lumière naturelle est généralement préférée dans les espaces de vie et de travail en raison de ses bénéfices pour la santé et le bien-être. Elle améliore la qualité visuelle, le rendu des couleurs et la productivité, tout en reliant les occupants au moment de la journée (Cantin & Dubois, 2011). Cependant, un excès de lumière du jour peut conduire à des conditions visuelles non optimales, telles que des niveaux de lumière excessifs et un manque d'uniformité.

➤ **Luminance des surfaces environnantes :** La quantité de lumière réfléchiée par des surfaces, exprimée en candelas par mètre carré.

- **Caractéristiques de modélisation :** Les propriétés de l'éclairage qui améliorent l'apparence des objets en trois dimensions.
- **Facteur de contraste :** La capacité de l'éclairage à rendre distincts les contrastes. (Song et al., 2019).

Bien qu'une variété de paramètres évalue divers aspects du confort visuel, aucun ne parvient à fournir une évaluation exhaustive de tous les facteurs impliqués. Comme l'a souligné (Carlucci et al., 2015), l'éblouissement demeure l'élément le plus étudié, représentant 50 % des recherches. (Voir Figure.II.7). Suivi par la quantité de lumière à 26 %, la qualité à 21 %, et l'uniformité à seulement 3 % (Cantin & Dubois, 2011). Au fil des décennies, l'attention des chercheurs s'est principalement portée sur l'éblouissement et la quantité de lumière, laissant encore un manque de métriques fiables capables de résumer le confort visuel en une seule valeur.

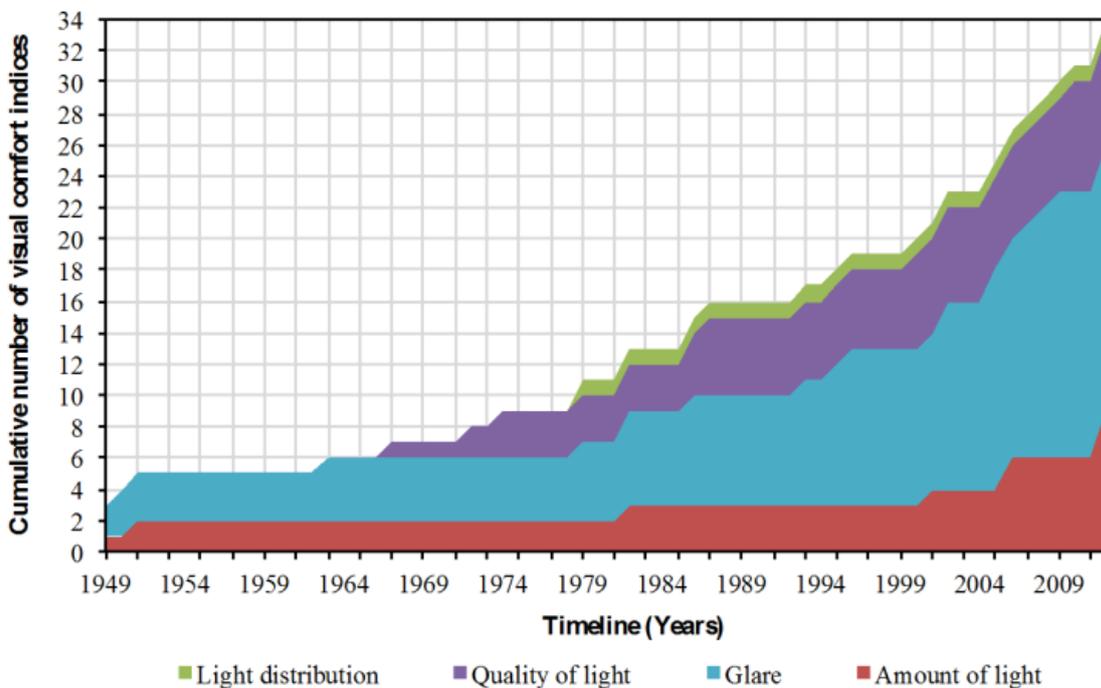


Figure.II.7. Le nombre cumulatif d'indices de confort visuel proposés au fil du temps. Source : (Carlucci et al., 2015)

II.3.8. Critères de sélection des métriques de lumière du jour.

Il est crucial de bien choisir les métriques appropriées pour évaluer la lumière naturelle dans un espace. Cette section présente les étapes essentielles pour sélectionner les indicateurs les plus adaptés, en tenant compte des caractéristiques spatiales, des besoins des occupants et des objectifs de conception.

II.3.8.1. Choix des points de mesure.

Le choix du nombre et de l'emplacement des capteurs est primordial. Généralement, une grille de capteurs est utilisée avec une résolution de 0,5 m x 0,5 m à la hauteur du plan de travail (0,8 m). Ces capteurs d'éclairage, parfois appelés "noyaux du plan de travail", sont placés près des zones les plus occupées (Nabil & Mardaljevic, 2006). Si d'autres critères comme la luminance sont utilisés, les capteurs seront ajustés en conséquence.

II.3.8.2. Base temporelle.

Comme l'a souligné (Reinhart & Wienold, 2011). Deux critères sont possibles pour la base temporelle : les heures de lumière naturelle ou les périodes d'occupation. Utiliser les heures de lumière naturelle est plus lié au site, tandis que les profils d'occupation sont plus adaptés aux besoins des utilisateurs. Les auteurs recommandent d'utiliser ces derniers, car ils reflètent mieux l'interaction entre la lumière naturelle et l'usage de l'espace. Un bâtiment qui respecte ces exigences obtiendrait une performance de 100 %.

Une fois que les emplacements des capteurs et la période de temps ont été définis, l'étape suivante consiste à établir les métriques qui détermineront si les conditions de lumière naturelle à un capteur donné sont jugées « adéquates » à un moment précis. Divers standards ont été proposés par le passé, chacun étant adapté à différents objectifs de conception et besoins des occupants. Ces métriques sont essentielles pour garantir que la performance de l'éclairage naturel soit en accord avec les exigences fonctionnelles et de confort au sein de l'espace.

II.3.9. Description des métriques de confort visuel.

Il est essentiel de disposer des indices fiables dans le processus de conception pour évaluer la qualité de l'environnement visuel. Bien que plusieurs revues concernant les métriques de confort visuel soient présentes dans la littérature (Bellia et al., s. d.; Reinhart et al., 2006; Reinhart & Wienold, 2011), aucune d'entre elles n'aborde de manière conjointe les quatre facteurs qui interviennent dans le confort visuel. De plus, il n'existe pas de consensus général sur la méthodologie et les métriques à utiliser pour évaluer chacun des facteurs individuels liés au confort visuel. En conséquence, une analyse des travaux de recherche et des normes a été réalisée afin d'explorer les métriques de confort visuel, en mettant en lumière les avantages et les limitations qui leur sont associés.

II.3.9.1. Éclairement

L'éclairement à un point P d'une surface est une quantité physique mesurée en lux, définie comme le rapport entre le flux lumineux incident sur une surface infinitésimale et la surface de celle-ci. Selon (Reinhart et al., 2006), des indices tels que le Nouvel indice de gêne due à l'éblouissement (DGIN) et la Probabilité de gêne due à l'éblouissement (DGP) évaluent le confort visuel dans divers contextes (naturel ou artificiel, local ou zonal, à court ou long terme).

Cette définition, indépendante des sources lumineuses, permet de construire un indice local et à court terme. Les seuils d'éclairement varient selon les typologies de bâtiments, avec des recommandations de 500 lx pour les bâtiments résidentiels selon la norme européenne EN dans cité dans le (Manuel pratique de l'éclairage. 2017), bien que d'autres seuils, tels que 425 lx ou 300 lx, soient également considérés comme suffisants.

L'évaluation de l'éclairement présente des avantages en termes de simplicité et de rapidité de mesure, comme le souligne (Carlucci et al., 2015), mais elle présente des limitations : elle est locale, ne prend pas en compte les variations temporelles, ignore la nature de la lumière et ne peut pas évaluer l'éblouissement, étant indépendante de l'observateur. Donc, il est crucial de la compléter par d'autres indicateurs et méthodes pour obtenir une évaluation plus complète du confort visuel.

II.3.9.2. Facteur de lumière du jour.

Selon (Reinhart et al., 2006). Le facteur de lumière du jour (FLJ) est défini comme le rapport entre l'éclairement intérieur à un point d'un bâtiment et l'éclairement horizontal externe non ombragé sous un ciel couvert selon la norme CIE. Cette notion remonte à 1909 avec Waldram, qui a introduit des techniques de mesure basées sur ce ratio pour éviter les fluctuations d'intensité lumineuse (Reinhart et al., 2006).

Bien que le FLJ soit largement utilisé pour évaluer la performance de l'éclairage naturel, il n'était pas destiné à mesurer la qualité d'un bon design d'éclairage. En effet, il ne prend pas en compte divers facteurs comme l'orientation des façades, les conditions saisonnières ou les problèmes d'éblouissement. Le FLJ a le mérite d'être intuitif et facile à communiquer, mais ses limites incluent le fait qu'il n'informe pas sur les stratégies de prévention de l'éblouissement et ne s'adapte pas aux variations de lumière naturelle. Comme l'a souligné (Carlucci et al., 2015).

Ainsi, même si le FLJ reste un outil prédominant dans la pratique de l'éclairage naturel, son utilisation exclusive peut mener à des conceptions inadaptées, notamment dans des bâtiments à façades entièrement vitrées qui souffrent souvent de problèmes de confort et d'énergie.

II.3.9.3. Autonomie de la lumière naturelle (Daylight Autonomy DA).

Comme l'a souligné (Carlucci et al., 2015). L'Autonomie de la Lumière Naturelle (ALN) a été initialement proposée par l'Association Suisse des Électriciens en 1989 et a été affinée par (Reinhart et al., 2006). Elle est définie comme le pourcentage des heures occupées au cours de l'année durant lesquelles un seuil d'éclairement minimum est atteint uniquement par la lumière naturelle. Mathématiquement, cela peut être exprimé comme suit :

$$DA = \frac{\sum_{i=1}^n w f_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

Où t_i représente chaque heure occupée dans l'année, et $w f_i$ est un facteur de pondération dépendant des valeurs E_{Daylight} et E_{limit} , qui désignent respectivement l'éclairement horizontal à un point donné dû uniquement à la lumière naturelle et la valeur limite d'éclairement. Bien que l'ALN ne soit pas accompagnée d'une valeur seuil spécifiée, (Carlucci et al., 2015; Reinhart et al., 2006) recommandent de fixer le seuil E_{limit} à 500 lx.

L'ALN est un indice local, unidirectionnel et à long terme, qui fait référence à la quantité de lumière naturelle disponible à un point donné de l'espace durant les heures d'occupation. Elle permet d'appréhender la performance visuelle à travers une valeur unique exprimée en pourcentage et prend en compte les conditions météorologiques réelles sur le site.

Cependant, plusieurs auteurs, dont (Nabil & Mardaljevic, 2006), soulignent certaines limitations de l'ALN : (i) elle ne tient pas compte des valeurs d'éclairement de la lumière naturelle en dessous du seuil, qui peuvent pourtant être appréciées par les occupants et contribuer à réduire les besoins en éclairage électrique ; (ii) étant unidirectionnelle, elle ne considère pas l'ampleur par laquelle le seuil est dépassé, ce qui peut potentiellement causer une gêne visuelle due à un excès de lumière. (Reinhart et al., 2006)

Dans le cadre de mon travail, j'ai choisi d'utiliser l'ALN car elle représente un indicateur pertinent pour évaluer la performance de l'éclairage naturel dans les bâtiments résidentiels. L'ALN permet d'analyser l'efficacité de l'éclairage naturel en fonction des variations climatiques, offrant ainsi une approche intégrée pour la conception d'espaces intérieurs confortables. De plus, en incluant des recommandations basées sur des recherches antérieures (Nadji Maachi et al., 2019; Toutou et al., 2018), Cette démarche vise à mettre en évidence l'importance de l'utilisation de cet indice pour optimiser les conditions d'éclairage et le confort visuel dans les environnements bâtis.

II.3.9.4. Autonomie spatiale de la lumière naturelle (sDA).

Comme mentionné par (Carlucci et al., 2015). sDA est un indice qui évalue la suffisance annuelle de l'éclairage ambiant dans les espaces intérieurs. Elle détermine le pourcentage de points d'une zone d'analyse qui atteignent un niveau d'éclairage minimum pendant une fraction spécifiée des heures d'occupation au cours de l'année. Le calcul consiste à évaluer l'ALN à chaque point d'une grille spatiale sur la zone considérée, en n'incluant que ceux dont l'ALN dépasse une valeur de référence définie.

L'équation de sDA peut être formulée comme suit :

$$sDA = \frac{\sum_{i=1}^n DA_i}{n} \times 100 \quad (2)$$

Où DA_i représente l'Autonomie de Lumière Naturelle pour chaque point i et n est le nombre total de points analysés.

La société **Illuminating Engineering Society (IES)** recommande un seuil de sDA de 300 lx pour au moins 50 % des heures occupées, indiquant ainsi le pourcentage de points qui atteignent ou dépassent ce seuil. Bien que sDA présente un chiffre unique qui résume la performance de l'ensemble de la zone analysée, il ne prend pas en compte l'intensité par laquelle le seuil d'éclairage est dépassé. (Ies Lighting Handbook).

Cet indice est crucial dans le contexte de ma recherche, car il permet de quantifier l'efficacité de l'éclairage naturel et d'identifier des solutions de conception pour optimiser l'utilisation de la lumière naturelle tout en prévenant l'éblouissement. Plusieurs chercheurs, comme (Nabil & Mardaljevic, 2006), ont également souligné l'importance de sDA pour garantir un environnement de travail lumineux et confortable.

II.3.9.5. Éclairage utile de la lumière du jour (UDI).

D'après (Nabil & Mardaljevic, 2006) dans son travail intitulé « *Useful Daylight Illuminances: A Replacement for Daylight Factors* », il a affirmé que l'UDI est définie comme la fraction du temps, au cours d'une année, pendant laquelle l'éclairage horizontal naturel à un point donné se situe dans une plage spécifique. Pour analyser cette plage, des valeurs limites d'éclairage inférieures et supérieures sont établies, permettant de diviser la période examinée en trois catégories. La catégorie supérieure représente le pourcentage de temps durant lequel un excès d'éclairage naturel peut entraîner une gêne visuelle. La catégorie inférieure, quant à elle,

indique le pourcentage de temps où l'éclairage est insuffisant, tandis que la catégorie intermédiaire correspond au pourcentage de temps où le niveau d'éclairage est approprié. (Carlucci et al., 2015).

Les valeurs limites d'éclairage varient selon les auteurs, comme l'indiquent les données suivantes : (Voir tableau II.4).

Tableau II.4. Valeurs limites d'éclairage UDI. Source : (Carlucci et al., 2015).

Source	Limite d'éclairage inférieure (lx)	Limite d'éclairage supérieure (lx)
(Nabil & Mardaljevic, 2006)	100	2000
(Mardaljevic et al., 2009)	100	2500
(Olbina & Beliveau, 2009)	500	2000

L'UDI est un indice local, à long terme et bilatéral, qui quantifie la disponibilité de la lumière naturelle. Selon (Nabil & Mardaljevic, 2006), cet indice non seulement évalue les niveaux d'éclairage de jour utiles, mais il permet également de déterminer la fréquence d'apparition de niveaux excessifs d'éclairage pouvant engendrer une gêne pour les occupants, telle que l'éblouissement, ainsi que des gains solaires indésirables. Toutefois, certaines limites sont à considérer : (i) l'absence de consensus total sur les valeurs limites d'éclairage ; (ii) l'UDI fournit trois valeurs pour chaque point de l'espace, ce qui peut compliquer l'interprétation des résultats.

II.3.9.6. Autonomie Continue de Lumière Naturelle (DA_{CON}),

Selon (Mardaljevic et al., 2009), La DA_{CON} est Développée par Rogers et Goldman, améliore l'ALN en attribuant des crédits partiels lorsque l'éclairage naturel (E_{daylight}) est inférieur à la limite fixée (E_{limit}). Cette métrique valorise la contribution partielle de la lumière naturelle, supposant un bénéfice croissant proportionnellement au niveau d'éclairage. DA_{CON} est un indice local à long terme mesurant la quantité de lumière naturelle disponible à un point précis pendant les heures d'occupation.

II.3.10. Évaluation du confort visuel dans les bâtiments résidentiels.

Le confort visuel est un aspect primordial de la conception des bâtiments résidentiels, influençant significativement le bien-être et la satisfaction des occupants. Plusieurs méthodologies peuvent être employées pour évaluer le confort visuel, chacune offrant des avantages et des limites distincts.

II.3.10.1. Évaluations sur site.

Les évaluations sur site, comme suggéré par (Nadji Maachi et al., 2019), impliquent une observation directe du bâtiment pour évaluer les niveaux d'éclairage naturel, l'éblouissement et l'uniformité visuelle. De plus, les retours des occupants sont recueillis pour comprendre leurs expériences subjectives de l'environnement visuel. Cette approche fournit des données réelles et capture les nuances de la perception des occupants, mais peut être chronophage et ne pas tenir compte des variations saisonnières ou des conditions d'éclairage spécifiques.

II.3.10.2. Campagnes de mesures (évaluation objective).

Les campagnes de mesures, telles qu'utilisées par (Lakhdari et al., 2021; Nadji Maachi et al., 2019), utilisent des équipements spécialisés pour quantifier les niveaux de lumière, la distribution de l'éclairage et l'éblouissement. Les données recueillies sont ensuite analysées pour identifier les points faibles et les améliorations potentielles. Bien que cette méthode offre des données objectives et quantitatives, elle ne peut pas capturer toute la gamme des expériences des occupants, car elle se concentre principalement sur les mesures physiques.

II.3.10.3. Enquêtes.

Les enquêtes, comme celles menées par (Aslanoğlu et al., 2021), sont des questionnaires administrés aux résidents pour recueillir leurs perceptions du confort visuel. Les sujets abordés dans les enquêtes peuvent inclure l'éclairage naturel, l'éblouissement, l'éclairage artificiel et la satisfaction générale. Cette approche peut fournir de précieuses informations sur les préférences et les préoccupations des occupants, mais repose sur des réponses subjectives et peut être influencée par des facteurs tels que les biais personnels ou les erreurs de rappel. (KHLEDJ Samir, 2021)

II.3.10.4. Simulations numériques.

Les simulations numériques, comme celles utilisées par (Lakhdari et al., 2021; Nadji Maachi et al., 2019; Toutou et al., 2018), utilisent des outils logiciels pour créer des représentations virtuelles du bâtiment et simuler les conditions d'éclairage. Différentes options de conception et stratégies d'éclairage peuvent être testées pour optimiser le confort visuel. Cette méthode permet une expérimentation économique et peut identifier les problèmes potentiels avant la construction, mais elle ne peut pas capturer entièrement les complexités du monde réel en raison du besoin de données d'entrée précises. (KHLEDJ Samir, 2021)

Une évaluation complète du confort visuel nécessite souvent une combinaison de ces méthodes. En intégrant les évaluations sur site, les campagnes de mesures, les enquêtes et les simulations numériques, il est possible d'acquérir une compréhension plus approfondie de l'environnement visuel dans les bâtiments résidentiels et d'identifier des stratégies d'amélioration.

II.3.11. Intensité d'utilisation de l'énergie et confort : un équilibre délicat dans le résidentiel.

L'EUI²³ est un indicateur essentiel pour évaluer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels. Exprimée en kilowattheures par mètre carré par an (kWh/m²/an), elle mesure la consommation énergétique totale d'un bâtiment, incluant le chauffage, la climatisation, l'éclairage, et d'autres usages. Comme le soulignent (Ma & Cheng, 2016a), l'EUI constitue une référence utile pour comparer les performances énergétiques de différents bâtiments, tout en identifiant les domaines où des améliorations peuvent être apportées pour atteindre une plus grande durabilité.

Dans les bâtiments résidentiels, l'EUI est particulièrement pertinente lorsqu'elle est liée au confort des occupants, notamment en termes de confort thermique et visuel. Par exemple, une mauvaise gestion énergétique, visant à maintenir une température intérieure adéquate, peut entraîner une hausse de l'EUI, augmentant la consommation énergétique sans nécessairement

²³ Energy Use Intensity: En Anglais.

améliorer le bien-être des résidents (Ma & Cheng, 2016b). Cela souligne l'importance d'une approche intégrée qui équilibre la réduction de l'EUI avec le maintien du confort intérieur.

L'utilisation de l'EUI dans la conception des bâtiments résidentiels va au-delà d'une simple mesure technique. Elle est également un levier pour améliorer le confort des habitants tout en minimisant l'impact environnemental du bâtiment (Guerra Santin et al., 2009). Grâce à une approche paramétrique, il est possible d'optimiser cette intensité énergétique à travers différents scénarios de conception, garantissant ainsi que les niveaux de confort thermique et visuel soient préservés ou améliorés (Guerra Santin et al., 2009).

II.3.12. Liaison entre intensité énergétique et Confort Intérieur.

L'interaction entre EUI, le confort thermique et le confort visuel dans les bâtiments résidentiels est à la fois un défi complexe et une opportunité essentielle pour une conception intégrée et environnementale. (Lakhdari et al., 2021). Conformément aux travaux (Toutou et al., 2018). L'EUI quantifie la consommation énergétique d'un bâtiment, tandis que le confort thermique et visuel se concentre sur le bien-être des occupants, qui dépend directement des conditions intérieures, telles que la température et la qualité de la lumière naturelle.

Les choix architecturaux jouent ici un rôle crucial. Par exemple, la taille des fenêtres ou l'ajout de dispositifs de protection solaire influencent simultanément l'EUI et le confort des résidents. Des fenêtres plus grandes, par exemple, favorisent une meilleure pénétration de la lumière naturelle, réduisant ainsi le recours à l'éclairage artificiel, ce qui contribue à diminuer l'EUI lié à l'éclairage (Lan et al., 2011). Cependant, cette même ouverture peut causer des gains thermiques excessifs en été ou des pertes de chaleur en hiver, entraînant une consommation accrue pour le chauffage et la climatisation, augmentant ainsi l'EUI thermique. (Lakhdari et al., 2021).

Par ailleurs, des solutions techniques, telles que l'installation de systèmes d'éclairage LED ou l'utilisation de vitrages thermiquement performants, peuvent simultanément améliorer le confort visuel et thermique tout en réduisant l'EUI global. Cela met en lumière l'importance de concevoir des bâtiments qui optimisent l'utilisation de l'énergie tout en assurant le bien-être des occupants (Pérez-Lombard et al., 2008).

II.4. Intégration de l'approche paramétrique pour améliorer le confort intérieur.

L'intégration de l'approche paramétrique dans la conception des bâtiments est devenue une stratégie incontournable pour améliorer le confort intérieur. Cette méthode permet d'optimiser la performance du bâtiment en tenant compte de multiples variables liées aux conditions environnementales, telles que la température, la lumière naturelle et la ventilation. Selon (Méndez Echenagucia et al., 2015), l'approche paramétrique offre une flexibilité accrue en modélisant des scénarios complexes, permettant ainsi de tester et d'ajuster des paramètres de conception pour maximiser le confort thermique et visuel.

Des études menées par (Zhao et al., 2022) ont montré que l'utilisation d'outils de simulation paramétrique permet d'analyser en temps réel l'impact de différents choix architecturaux sur le confort des occupants. Par exemple, en optimisant l'orientation des fenêtres ou en choisissant

des matériaux adaptés aux conditions climatiques locales, il est possible d'améliorer significativement le confort intérieur (Oxman, 2017).

De plus, l'intégration de stratégies de conception basées sur l'approche paramétrique peut également favoriser une gestion plus efficace de l'énergie. En tenant compte des besoins spécifiques des occupants et des caractéristiques du site, cette méthode aide à créer des espaces de vie qui sont à la fois confortables et durables (J. Zhang et al., 2020). Par conséquent, l'approche paramétrique devient un outil clé pour atteindre un équilibre entre confort et durabilité, permettant aux concepteurs de réaliser des bâtiments qui minimisent leur impact environnemental tout en offrant des conditions de vie optimales.

II.4.1. Paramétrisation des facteurs de confort thermique et lumineux.

La paramétrisation des facteurs de confort thermique et lumineux est essentielle pour optimiser les environnements intérieurs des bâtiments. Grâce aux outils de design paramétrique, les concepteurs peuvent identifier et ajuster plusieurs variables clés qui influencent le confort des occupants, notamment :

- **Orientation du Bâtiment** : L'orientation par rapport au soleil affecte la quantité de lumière naturelle et la chaleur solaire reçue. Par exemple, une étude de (Boeke et al., 2019) a démontré qu'une orientation sud pour les fenêtres peut maximiser les gains solaires en hiver tout en minimisant les surchauffes en été.
- **Type de Vitrage** : Le choix du vitrage—simple, double ou triple—et les propriétés thermiques et optiques influencent directement le confort lumineux et thermique. Des recherches menées par (Mardaljevic et al., 2009) ont révélé que les vitrages à faible émissivité permettent de réduire les pertes de chaleur tout en garantissant une bonne transmission de la lumière.
- **Matériaux de Construction des Murs** : Les matériaux utilisés pour les murs ont un impact significatif sur l'isolation thermique et la régulation de l'humidité. Par exemple, l'utilisation de briques légères ou de panneaux isolants peut améliorer la performance thermique du bâtiment. Selon une étude de Ahmed toutou, les murs en matériaux à haute capacité thermique, comme le béton ou la brique, contribuent à stabiliser les fluctuations de température intérieure, ce qui améliore le confort des occupants.
- **Isolation Thermique** : L'efficacité de l'isolation des murs, des toits et des planchers est cruciale pour maintenir une température intérieure confortable. Par exemple, l'étude de (Cabeza et al., 2010). A montré que l'utilisation de matériaux d'isolation performants pouvait réduire de 30 % la consommation énergétique d'un bâtiment.
- **Systèmes de Protection Solaire** : Les auvents, stores et volets peuvent être paramétrés pour contrôler l'apport de lumière et de chaleur. Une recherche de (Lakhdari et al., 2021) a mis en évidence que des systèmes de protection solaire bien conçus peuvent réduire l'éblouissement et améliorer le confort visuel tout en maintenant des températures intérieures agréables.
- **Ventilation Naturelle** : La conception des ouvertures et des flux d'air peut favoriser une ventilation croisée, améliorant ainsi le confort thermique. Des travaux de (Djedjig et al., 2012) ont montré que l'intégration de fenêtres à guillotine pouvait accroître l'efficacité de la ventilation naturelle dans les bâtiments résidentiels.

- **Luminosité et Éclairage** : Les niveaux d'éclairage dans les espaces intérieurs doivent être ajustés en fonction des activités prévues et des préférences des occupants. Une étude de (Eltaweel & Su, 2017). A prouvé que l'optimisation de la disposition des fenêtres et des surfaces réfléchissantes améliore significativement la qualité de l'éclairage naturel, réduisant ainsi la dépendance à l'éclairage artificiel.

En intégrant ces paramètres dans le processus de conception, les architectes peuvent réaliser des simulations qui montrent comment les choix architecturaux impactent la performance énergétique du bâtiment. Par exemple, des recherches réalisées par (Azhar et al., 2015) démontrent que l'adaptation des paramètres de conception en fonction des conditions climatiques locales permet d'améliorer significativement le confort thermique tout en optimisant l'utilisation de la lumière naturelle.

Ainsi, la paramétrisation des facteurs de confort thermique et lumineux se révèle être un levier stratégique pour atteindre une conception intégrée et durable, alliant confort et performance énergétique dans les espaces résidentiels.

II.4.2. Simulation du confort visuel et thermique via le design paramétrique.

La simulation du confort visuel et thermique à travers le design paramétrique représente une approche cruciale pour développer des espaces résidentiels qui soutiennent le bien-être des occupants. En utilisant des outils de modélisation avancés, les architectes peuvent analyser et ajuster divers paramètres influençant l'éclairage naturel et la température intérieure. Comme le souligne (Méndez Echenagucia et al., 2015), cette méthode permet d'anticiper les effets des choix architecturaux sur le confort des usagers.

Des logiciels de design paramétrique tels que Grasshopper facilitent l'exploration de différentes configurations architecturales, simulant les interactions entre lumière et chaleur. Une étude de (Zhao et al., 2022) met en lumière l'importance d'une orientation réfléchie des fenêtres pour maximiser l'apport de lumière naturelle tout en réduisant les risques de surchauffe. De plus, l'utilisation de vitrages à faible émissivité joue un rôle clé dans la régulation des échanges thermiques, favorisant ainsi un équilibre entre confort visuel et thermique (Mardaljevic et al., 2009).

L'intégration de systèmes d'ombrage, tels que des brise-soleils ou des auvents, est également essentielle pour contrôler l'éblouissement tout en maintenant une luminosité agréable. (Nadji Maachi et al., 2019) a démontré que ces dispositifs ne se contentent pas d'améliorer le confort visuel, mais contribuent également à diminuer les besoins en climatisation, optimisant ainsi la consommation énergétique.

Par ailleurs, l'approche paramétrique permet de simuler différents scénarios saisonniers et horaires, garantissant un niveau de confort stable tout au long de l'année. Une recherche menée par (Nguyen et al., 2012) illustre que l'analyse des variations climatiques dans les simulations peut significativement améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment, tout en assurant un éclairage intérieur optimal.

Ainsi, la simulation du confort visuel et thermique via le design paramétrique offre une solution équilibrée, alliant performance énergétique et bien-être des occupants. En ajustant constamment

les paramètres de conception, cette approche promeut une gestion durable des ressources, tout en améliorant la qualité de vie dans les espaces résidentiels, qui présentent leurs propres complexités et limites en matière de conception.

II.5. Approche paramétrique dans le contexte de la conception environnementale intégrée.

L'approche paramétrique appliquée à la conception environnementale intégrée repose sur des principes avancés de modélisation algorithmique permettant de générer des solutions architecturales optimisées en fonction des contraintes environnementales et des besoins de performance énergétique. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de logiciels comme Grasshopper, Rhino ou encore Ladybug et Honeybee, qui permettent de tester différents scénarios en ajustant des paramètres tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux utilisés ou les systèmes de ventilation naturelle et d'éclairage (Lakhdari et al., 2021).

La conception paramétrique permet de simuler de manière détaillée l'impact de plusieurs variables sur les performances énergétiques d'un bâtiment. Par exemple, l'utilisation de vitrages à faible émissivité et de matériaux isolants peut être évaluée en fonction de leur capacité à réduire les pertes thermiques et à maximiser les gains solaires passifs. Des études (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023; Méndez Echenagucia et al., 2015; Toutou et al., 2018) montrent que l'optimisation paramétrique de l'enveloppe du bâtiment peut réduire significativement la consommation énergétique tout en améliorant le confort thermique. Les outils paramétriques permettent aussi de simuler l'influence de l'orientation du bâtiment et de tester les variations climatiques sur la durée de vie de la construction.

Un autre aspect clé de l'approche paramétrique dans la conception environnementale intégrée est l'optimisation de la lumière naturelle. Les logiciels de simulation comme Radiance et Daysim sont utilisés pour analyser la pénétration de la lumière dans le bâtiment en fonction de la taille des fenêtres, des matériaux de vitrage ou encore de l'influence des dispositifs d'ombrage (Eltaweel & Su, 2017). Ces simulations garantissent que les espaces bénéficient d'un éclairage suffisant tout en minimisant les risques d'éblouissement et les besoins en éclairage artificiel, ce qui réduit la consommation énergétique liée à l'éclairage.

L'approche paramétrique peut également optimiser la ventilation naturelle. En ajustant des paramètres comme la position et la taille des ouvertures, les simulations améliorent le confort intérieur tout en réduisant l'utilisation de systèmes de ventilation mécanique. Des études menées par (Etheridge & Stanway, 1988) ont démontré que la conception paramétrique réduit les besoins en climatisation, notamment en intégrant des dispositifs passifs comme des atriums ou des cheminées solaires.

La simulation paramétrique permet de prévoir les effets des changements climatiques futurs sur les performances des bâtiments. En modélisant les scénarios climatiques comme le Pathways RCP 8.5, on peut anticiper les impacts sur les systèmes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage au fil du temps. Cette capacité d'adaptation est cruciale pour une conception durable, car elle permet de concevoir des bâtiments capables de maintenir un niveau de confort stable tout en minimisant leur consommation énergétique à long terme.

L'approche paramétrique dans la conception environnementale intégrée constitue une méthode efficace, combinant des outils de simulation avancés et une optimisation multi-objectifs. Elle permet de gérer durablement les ressources tout en réduisant l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) et en améliorant le confort des occupants dans les bâtiments résidentiels. Le chapitre suivant approfondira cette approche, en détaillant les applications concrètes ainsi que les outils et techniques spécifiques utilisés pour optimiser les performances environnementales et le confort intérieur.

L'intégration des données environnementales dans le processus paramétrique est une étape cruciale pour répondre aux défis de durabilité dans la conception architecturale contemporaine. En utilisant des outils tels que Rhino et Grasshopper, les concepteurs peuvent intégrer des paramètres environnementaux comme l'ensoleillement, le vent, et les conditions climatiques locales, afin de modéliser et optimiser les performances énergétiques des bâtiments. Selon (Attia & Gobin, 2020), cette approche permet de tester diverses configurations architecturales en fonction des données environnementales, améliorant ainsi le confort thermique et visuel des occupants tout en réduisant la consommation énergétique. De plus, (Jabi, 2013) souligne que la modélisation paramétrique rend possible l'évaluation des scénarios saisonniers et leur impact sur le bâtiment, en prenant en compte les éléments tels que l'orientation, les matériaux de façade, et les stratégies d'ombrage. Cette intégration systémique des données, comme le montrent également les travaux de (Turrin et al., 2011), permet une optimisation multi-objectifs des performances énergétiques, renforçant ainsi la capacité à créer des bâtiments plus durables et mieux adaptés aux défis climatiques futurs. En définitive, la capacité à paramétrer et à simuler les données environnementales dans le processus de conception architecturale offre des perspectives innovantes pour améliorer la résilience et le confort des bâtiments résidentiels.

II.6. Conclusion du Chapitre.

En résumé, ce chapitre a souligné l'importance des approches paramétriques dans la conception environnementale des bâtiments résidentiels. Ces méthodologies permettent aux architectes d'optimiser les paramètres influençant le confort intérieur, tout en améliorant la qualité de vie des occupants. L'interaction entre design paramétrique et architectural favorise l'efficacité énergétique et éclaire les effets des facteurs environnementaux sur le bien-être.

Ce chapitre a également mis en avant la nécessité d'une approche systémique, où chaque décision est guidée par des données empiriques et des simulations. Cela permet une meilleure compréhension des relations entre les éléments de conception, l'utilisation énergétique et le confort. Les insights issus de cette exploration serviront de base pour de futures recherches, promouvant des solutions innovantes axées sur la durabilité et le confort des occupants.

Le chapitre suivant se concentrera sur l'optimisation multi-objectifs, l'impact du changement climatique selon le scénario RCP 8.5, et l'application des algorithmes génétiques dans la conception environnementale architecturale. Cette thématique permettra d'approfondir la compréhension des défis contemporains en matière de durabilité et d'efficacité énergétique, tout en explorant des solutions innovantes adaptées aux exigences complexes des bâtiments de demain.

**Chapitre III : Optimisation multi-
objectif et scénarios climatique
pour une éco-conception
architecturale.**

Introduction.

La nécessité d'optimiser la conception architecturale, en particulier dans le cadre du changement climatique, est devenue un enjeu essentiel pour assurer la durabilité et l'efficacité des bâtiments. Les effets du changement climatique, de plus en plus perceptibles, exigent une approche proactive qui intègre non seulement les performances énergétiques immédiates, mais également les répercussions à long terme sur notre environnement. Ce chapitre examine les enjeux liés au changement climatique ainsi que les scénarios de concentration représentative (RCP), en mettant un accent particulier sur le scénario RCP 8.5, qui anticipe un avenir marqué par une poursuite de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

L'analyse des stratégies d'adaptation des bâtiments face à ces défis climatiques est cruciale pour concevoir des solutions architecturales résilientes. En outre, l'optimisation multi-objectifs (MOO) se présente comme un cadre pertinent pour équilibrer les divers impératifs de conception, allant des performances environnementales aux exigences esthétiques et fonctionnelles. À travers des concepts clés tels que la dominance, le front de Pareto et les interactions entre objectifs, ce chapitre vise à établir les fondements d'une compréhension approfondie des méthodes d'optimisation applicables à l'architecture durable.

Les algorithmes génétiques, considérés comme des outils d'optimisation puissants, seront également analysés pour leur capacité à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. En parallèle, l'identification des variables et des indicateurs pertinents permettra d'adopter une approche analytique afin d'évaluer l'impact des décisions de conception. Ce chapitre mettra ainsi en exergue l'importance d'une optimisation paramétrique face aux défis climatiques à venir, tout en ouvrant la voie à des applications pratiques qui seront explorées dans la section suivante.

III.1 Contexte du changement climatique et des scénarios RCP.

III.1.1. Présentation des principaux enjeux liés au changement climatique global.

Le changement climatique, devenu une préoccupation mondiale ces dernières décennies, affecte profondément les systèmes environnementaux, économiques et sociaux. Les enjeux liés à ce phénomène global représentent des défis considérables pour l'avenir de notre planète, comme l'a mentionné le (*Changements climatiques 2014*, 2015). Selon leurs rapports, l'une des conséquences les plus préoccupantes est l'augmentation des températures moyennes mondiales, qui pourrait atteindre jusqu'à 1,5°C d'ici 2050 si les émissions de gaz à effet de serre (GES) ne sont pas significativement réduites (IPCC, 2018). Cette élévation des températures a déjà provoqué des phénomènes climatiques extrêmes, une réalité soulignée dans les travaux de (Cooper et al., 2002) est confirmée plus récemment par (Stern Review, 2006), avec des vagues de chaleur, des inondations, et des sécheresses plus fréquentes.

Comme l'ont noté (Nicholls, R.J. 2011), la montée du niveau des mers est également un enjeu crucial. Les recherches de (DJELLOULI Yamna, 2020) ont mis en lumière les risques accrus pour les populations vivant dans des zones côtières, qui sont désormais confrontées à des phénomènes d'érosion côtière plus fréquents. Ces événements menacent directement les

infrastructures et les moyens de subsistance, accentuant les inégalités entre les pays développés et les régions plus vulnérables.

D'autre part, la sécurité alimentaire est gravement menacée par le changement climatique, comme l'ont souligné (Lobell et al., 2011). La réduction des ressources en eau, en particulier dans les régions agricoles sensibles, affecte la production et met en danger l'approvisionnement alimentaire global. Cette situation est exacerbée dans les régions déjà touchées par la sécheresse et la désertification.

En outre, les migrations climatiques représentent un autre défi majeur, un point fréquemment mis en avant dans les recherches de (Dugoua & Dumas, 2021). En raison de la dégradation progressive des écosystèmes et de l'intensification des catastrophes naturelles, des millions de personnes sont contraintes de se déplacer. Comme le souligne (Stern Review, 2006), ces migrations pourraient entraîner des tensions sociales croissantes dans les régions d'accueil, nécessitant des réponses politiques et sociales adaptées.

Ainsi, face à ces enjeux complexes, il est indispensable de développer des stratégies d'atténuation et d'adaptation. Comme le mentionne (Stern Review, 2006), l'intégration des politiques climatiques dans les plans de développement durable à l'échelle mondiale et locale est cruciale pour minimiser les impacts à long terme du changement climatique.

III.1.2. Définition et objectifs des scénarios RCP (Representative Concentration Pathways).

Les scénarios de Trajectoires Représentatives de Concentration (RCP pour *Representative Concentration Pathways*) sont des projections climatiques qui décrivent les différentes évolutions possibles des concentrations de GES en fonction des décisions politiques et des actions menées à l'échelle mondiale. Développés par le (*Changements climatiques 2014*, 2015), ces scénarios permettent d'anticiper les impacts futurs du réchauffement climatique. Comme l'indiquent les travaux de (Moss et al., 2010), les RCP offrent une base pour comprendre comment les décisions d'aujourd'hui influenceront les conditions climatiques à long terme.

Parmi les quatre principaux scénarios RCP, chacun illustre un futur différent selon le niveau de réduction des émissions de GES. Par exemple, le RCP 2.6 représente une situation dans laquelle des efforts ambitieux sont mis en œuvre pour limiter le réchauffement à environ 1,5°C d'ici la fin du siècle. Ce scénario repose sur des technologies avancées comme la capture et le stockage du carbone (CSC) et la diminution significative de l'utilisation des combustibles fossiles, comme l'ont mentionné (Van Vuuren et al., 2011). En revanche, le RCP 8.5 suppose une absence de réduction substantielle des émissions, ce qui pourrait provoquer une hausse des températures globales entre 3,2°C et 5,4°C d'ici 2100, exacerbant ainsi les phénomènes météorologiques extrêmes et leurs conséquences, selon les conclusions de (Meinshausen et al., 2011) (Voir figure III.1).

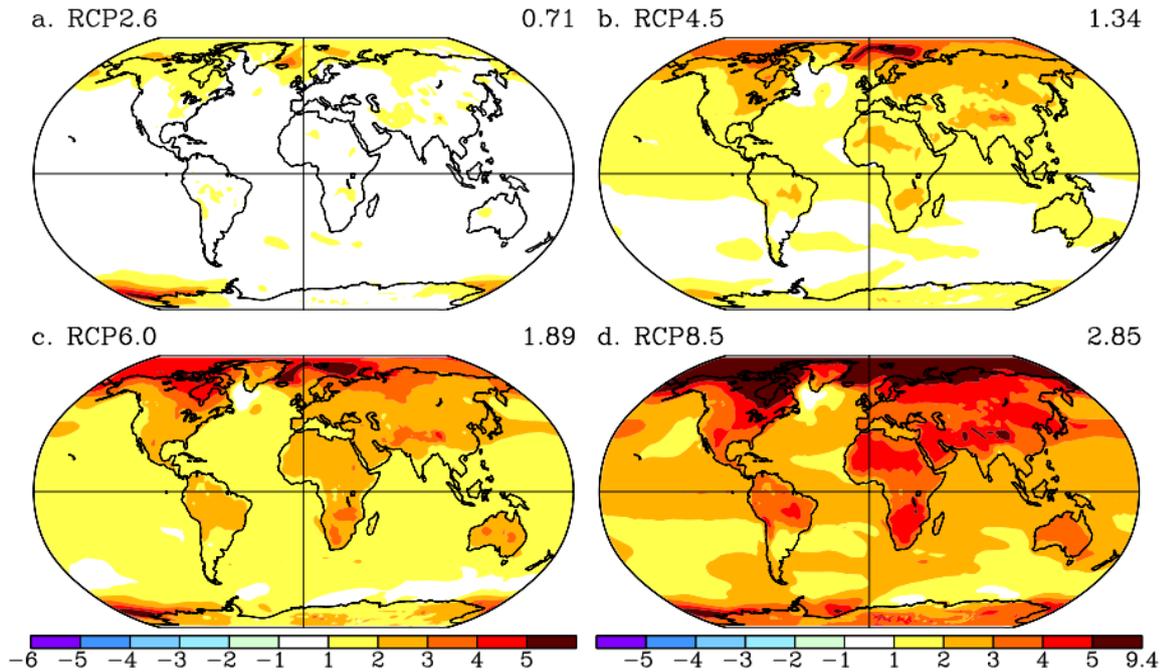


Figure III.1. Écart de température de l'air en surface (°C) pour la fin du XXI^e siècle (2081-2100) par rapport à la période historique de référence (1986-2005). Source : (Nazarenko et al., 2015).

La figure présente les variations de température de l'air en surface entre la fin du XXI^e siècle (2081-2100) et la période de référence historique (1986-2005) dans le cadre du modèle climatique NINT. Quatre scénarios RCP sont illustrés : (a) RCP2.6, montrant un faible réchauffement global ; (b) RCP4.5, avec un réchauffement modéré ; (c) RCP6.0, qui présente une hausse plus marquée des températures ; et (d) RCP8.5, illustrant le scénario de réchauffement le plus intense. Les différences géographiques de réchauffement, notamment la forte amplification polaire, sont visibles dans chaque scénario, les terres se réchauffant davantage que les océans.

Les scénarios RCP permettent également d'explorer l'impact des futures trajectoires d'émissions sur divers secteurs, y compris le secteur résidentiel. Comme l'a montré (Thomas F. Stocker et al., 2013), ces trajectoires sont essentielles pour la mise en place de politiques climatiques, puisqu'elles permettent de comprendre les futurs possibles en fonction des actions prises. Par exemple, dans le cadre du RCP 4.5, qui implique des réductions modérées des émissions, les concentrations de GES se stabiliseraient autour de 650 ppm de CO₂, limitant ainsi le réchauffement à environ 2,5°C à 3°C. Ce type de scénario pourrait aider à anticiper les mesures à prendre dans le domaine de la construction, notamment pour adapter les bâtiments résidentiels aux changements climatiques.

En plus de fournir une vision à long terme des risques climatiques, les objectifs des scénarios RCP consistent également à informer les décideurs politiques. Comme l'a relevé (Stern Review, 2006), intégrer ces scénarios dans les stratégies de réduction des émissions et d'adaptation est essentiel pour limiter les impacts environnementaux, économiques et sociaux du changement climatique. Les modèles basés sur les RCP, selon (Meinshausen et al., 2011), permettent d'estimer les effets des modifications climatiques sur divers aspects, notamment les

précipitations, les températures, et la fréquence des événements extrêmes, et ce, sur différents secteurs tels que l'agriculture et l'infrastructure.

En fin de compte, les RCP sont des outils indispensables pour la planification des politiques climatiques. Ils permettent de visualiser plusieurs futurs possibles et d'adopter des stratégies visant à atténuer les risques liés au changement climatique. Comme l'a souligné (Moss et al., 2010), leur utilisation aide à prévoir les défis à venir et à mieux orienter les décisions actuelles pour minimiser les conséquences environnementales et économiques du réchauffement global.

Sélection du scénario RCP 8.5 et comparaison avec des scénarios alternatifs

La voie de concentration représentative (RCP) 8,5 est reconnue comme un scénario à fortes émissions, projetant un avenir caractérisé par des augmentations substantielles des gaz à effet de serre tout au long du 21^e siècle. Plus précisément, ce scénario prévoit un niveau de forçage radiatif d'environ 8,5 watts par mètre carré d'ici à 2100, ce qui correspond à des augmentations significatives de la température mondiale allant de 2,6 à 4,8 degrés Celsius. (GIEC, 2023)

III.1.2.1. Choix du scénario RCP 8.5 et comparaison avec d'autres scénarios.

Le scénario RCP 8.5 est souvent choisi pour l'analyse en raison de sa représentation d'une trajectoire « business as usual », marquée par des politiques climatiques minimales et une dépendance continue à l'égard des combustibles fossiles pour la croissance économique. Le scénario de référence le plus élevé, où les émissions continuent d'augmenter tout au long du XXI^e siècle, comme l'a noté (Pulkkinen et al., 2024), (voir figure III.2). Comme l'a noté (Çağla Meral Akgül et al., 2020), ce scénario fournit un point de référence essentiel pour évaluer les impacts potentiels du changement climatique dans des conditions extrêmes, soulignant ainsi le besoin urgent de stratégies efficaces de gestion de la vulnérabilité et des risques (Pulkkinen et al., 2024). Des chercheurs comme (Gibberd, 2020; Tomrukcu & Ashrafian, 2024) ont souligné l'importance de ce scénario pour évaluer la résilience des bâtiments aux conditions climatiques futures.

▪ Analyse comparative avec d'autres scénarios RCP.

RCP 2.6 : Ce scénario propose une trajectoire de faibles émissions visant à limiter le réchauffement climatique à bien moins de 2 degrés Celsius, s'alignant ainsi sur les objectifs de l'Accord de Paris. Il nécessite de vastes mesures d'atténuation, notamment une transition rapide vers les sources d'énergie renouvelables et des réductions substantielles de la consommation de combustibles fossiles (Rogelj et al., 2016). Contrairement au RCP 8.5, le RCP 2.6 représente une voie plus durable, nécessitant une action mondiale immédiate et coordonnée. Selon (Hasan, 2023), l'exploration de ce scénario peut fournir des indications sur les innovations architecturales potentielles qui peuvent faciliter la transition vers des pratiques durables.

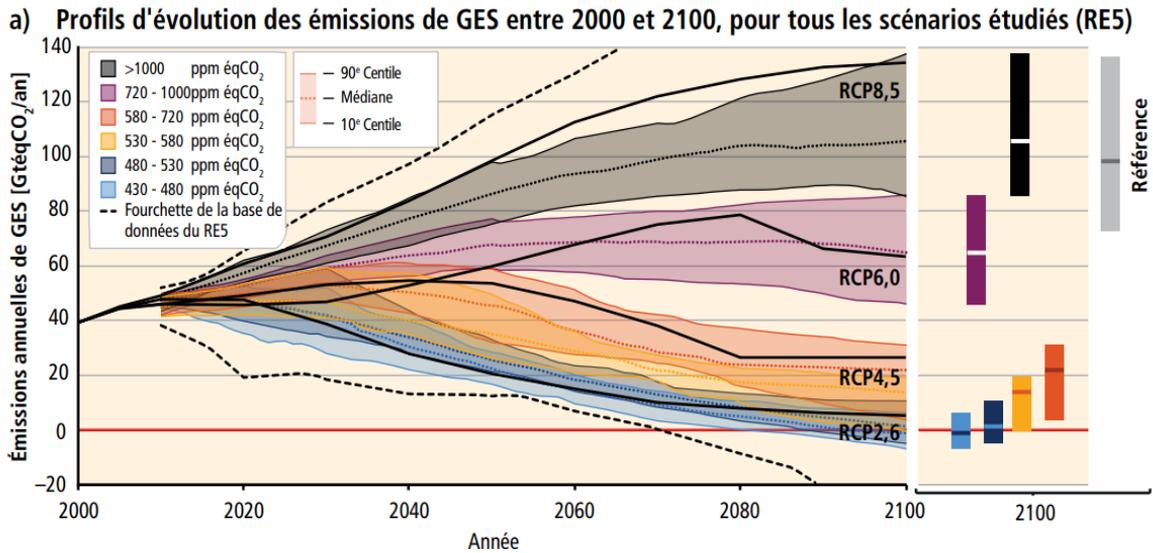


Figure III.2. Émissions mondiales de gaz à effet de serre (GtécCO₂/an) dans divers scénarios de référence et d'atténuation pour différents niveaux de concentration à long terme. Source : (Changements climatiques 2014, 2015).

RCP 4.5 : En tant que scénario intermédiaire, le RCP 4.5 suppose une stabilisation du forçage radiatif à 4,5 watts par mètre carré grâce à une combinaison de stratégies d'atténuation. Cette voie reflète un niveau modéré d'intervention politique et de progrès technologique. Bien qu'elle anticipe des augmentations de température plus faibles que le RCP 8.5, elle prévoit toujours des impacts climatiques significatifs, bien qu'à une échelle réduite (Rogelj et al., 2016). Les recherches menées par des architectes comme (Goldhagen, s. d.) ont mis en évidence la nécessité d'adopter des stratégies de conception adaptatives qui tiennent compte de ces scénarios.

RCP 6.0 : Défini par un forçage radiatif de 6,0 watts par mètre carré d'ici la fin du siècle, ce scénario illustre un équilibre entre des émissions élevées et des efforts d'atténuation modérés. Le RCP 6.0 sert d'approche transitoire ; cependant, ses conséquences à long terme présentent encore des risques climatiques considérables par rapport à des scénarios plus stricts comme le RCP 2.6 (Van Vuuren et al., 2011). La compréhension du RCP 6.0 peut aider les professionnels du bâtiment à élaborer des stratégies qui atténuent les risques associés à l'évolution des conditions climatiques.

Le choix du RCP 8.5 souligne le besoin critique de préparation face aux scénarios climatiques extrêmes potentiels. La recherche fondée sur cette voie peut apporter des informations essentielles aux décideurs politiques, en soulignant les graves répercussions de l'inaction et en soutenant l'élaboration de stratégies d'adaptation pour les populations et les écosystèmes vulnérables. Comme l'a fait remarquer (Meinshausen et al., 2011), la comparaison de ce scénario avec des alternatives à plus faibles émissions permet une évaluation complète des futurs possibles, ce qui renforce l'importance urgente des efforts d'atténuation pour renforcer la résilience climatique (GIEC, 2021).

En conclusion, si le RCP 8.5 sert de référence importante pour évaluer la gravité potentielle du changement climatique, il souligne en même temps la nécessité d'explorer des scénarios alternatifs qui donnent la priorité à la durabilité et à la résilience. Un tel examen permet aux chercheurs et aux décideurs politiques de naviguer efficacement dans les complexités posées par un climat changeant, favorisant une approche plus informée des défis futurs.

III.1.3. Impact du climat futur sur les bâtiments résidentiels.

L'impact du changement climatique sur les bâtiments résidentiels représente un défi majeur pour les décennies à venir. Les modifications climatiques, telles que l'élévation des températures moyennes, l'augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes, et la montée du niveau de la mer, affecteront profondément les bâtiments, en particulier les structures résidentielles qui constituent le tissu de la vie quotidienne. En effet, ces impacts nécessitent une adaptation urgente dans la conception et la construction pour minimiser les risques environnementaux et économiques liés à ces phénomènes. (Evelyn Lami Ashelo Allu, 2014)

Selon (Evelyn Lami Ashelo Allu, 2014), l'élévation des températures globales provoquera une augmentation des îlots de chaleur urbains, notamment dans les villes densément peuplées où les surfaces imperméables et les matériaux absorbant la chaleur exacerbent ces effets. Les bâtiments mal isolés, principalement ceux construits avant les récentes réglementations thermiques, subiront des surcharges thermiques, affectant directement le confort des occupants et nécessitant une hausse significative de la demande en climatisation, augmentant ainsi la consommation énergétique (Robert & Kummert, 2012). Il est donc impératif d'adopter des stratégies de conception passive, telles que l'utilisation de matériaux à haute capacité thermique, la ventilation naturelle, et l'ombrage optimisé, qui permettent de réduire la dépendance aux systèmes de refroidissement mécaniques (Robert & Kummert, 2012).

Pour les habitations situées dans les zones côtières, l'élévation du niveau de la mer et l'intensification des tempêtes menacent les fondations et les infrastructures essentielles, telles que les routes d'accès, les systèmes d'égouts et d'alimentation en eau (Meehl & Tebaldi, 2004). Des études montrent que les risques d'inondation dans ces zones entraîneront la nécessité de réévaluer la position des bâtiments résidentiels et d'intégrer des solutions telles que l'élévation des fondations, l'utilisation de matériaux résistants à l'eau, et l'installation de digues pour protéger les zones habitées (Emmanuel, 2005). Par exemple, dans le sud de la France, certaines habitations côtières ont déjà mis en œuvre des systèmes de pilotis pour surélever les bâtiments et prévenir les dommages liés aux vagues de tempête (Evelyn Lami Ashelo Allu, 2014).

En outre, dans les régions arides et semi-arides, comme celles rencontrées dans plusieurs régions d'Afrique du Nord, le changement climatique accentue les phénomènes de sécheresse et de désertification. Ces conditions entraînent une diminution des ressources en eau, une perte de la productivité agricole et des mouvements de sol qui affectent les fondations des bâtiments (Milly et al., 2002). Les sols argileux, sensibles aux variations hydriques, provoquent des fissures dans les fondations des habitations. Afin de pallier ces problèmes, il est recommandé de privilégier des matériaux de construction adaptés à ces conditions extrêmes, tels que le béton cellulaire et les matériaux naturels à faible conductivité thermique, qui résistent mieux aux variations climatiques (Adegbile, s. d.). De plus, l'adoption de techniques de captage et de

stockage des eaux pluviales devient essentielle pour garantir l'approvisionnement en eau dans ces régions.

Les incendies de forêt, aggravés par la hausse des températures et la sécheresse, représentent un danger supplémentaire pour les bâtiments résidentiels situés en zones forestières. Les résidences construites avec des matériaux combustibles, tels que le bois, sont particulièrement vulnérables (Himes & Busby, 2020). Des études récentes recommandent l'utilisation de matériaux ignifuges pour la construction des toitures et des façades, ainsi que la création de zones tampons végétales moins inflammables autour des habitations pour limiter la propagation des incendies (Dawei Qin et al., 2001).

La corrélation entre le changement climatique et l'environnement bâti est de plus en plus importante, car la littérature montre que des phénomènes tels que la hausse des températures et les événements météorologiques extrêmes ont un impact direct sur la performance énergétique des bâtiments. Dans le travail de (Rahif et al., 2022), qui examine l'interaction entre le changement climatique et l'environnement bâti, l'accent est mis sur la façon dont la hausse des températures et les phénomènes météorologiques extrêmes affectent la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels. La recherche met en évidence l'augmentation de la demande de chauffage et de climatisation, étayée par des études de (Nik & Sasic Kalagasidis, 2013).

Dans le contexte britannique, les travaux de (Gaterell & McEvoy, 2005) ont examiné les effets du changement climatique sur l'efficacité énergétique des maisons individuelles, soulignant que les conceptions qui ne tiennent pas compte de l'escalade des conditions climatiques pourraient entraîner des problèmes de confort thermique pour les résidents.

Des recherches récentes (Andric et al., 2020) soulignent que le changement climatique amplifie les demandes opérationnelles dans les bâtiments, exhortant les architectes et les concepteurs à prendre en compte les scénarios climatiques extrêmes dans leur planification. Les systèmes de ventilation naturelle et les conceptions durables sont essentiels pour relever ces défis.

Ainsi, l'adaptation au changement climatique dans la conception des bâtiments résidentiels est devenue une nécessité urgente. Cette adaptation nécessite l'utilisation de matériaux de construction appropriés qui renforcent la durabilité, tels que les matériaux renouvelables qui favorisent l'isolation thermique. Les pratiques environnementales peuvent également contribuer à réduire la consommation d'énergie et à améliorer le confort thermique, ce qui permet en fin de compte de réduire les émissions de carbone. (Rahif et al., 2022)

(Le tableau III.1) donne une vue d'ensemble des recherches qui ont étudié l'impact du changement climatique sur plusieurs aspects de la construction des bâtiments résidentiels, tels que la demande de chauffage et de climatisation et les émissions de gaz à effet de serre (GES). L'étude réalisée par (Sajjadian, 2017) et ses collègues est particulièrement intéressante car elle fournit un contexte important pour cette discussion, en soulignant les liens complexes entre les fluctuations climatiques et l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels.

Tableau III.1. Un résumé des recherches récentes sur la manière dont le changement climatique affecte la demande de chauffage, de refroidissement et de ventilation, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (GE) dans les bâtiments résidentiels. Source : (Rahif et al., 2022).

Auteur(s)	Réf.	Année.	Type de bâtiment	Location
-----------	------	--------	------------------	----------

Chapitre III

Mady Olonscheck	(Olonscheck et al., 2011)	2011	Bâtiments résidentiels (échelle du parc immobilier)	Allemagne
Seyed Masoud Sajjadian	(Sajjadian, 2017)	2017	Unité résidentielle de quatre étages (échelle du bâtiment)	Londres ; Royaume-Uni
Amin Moazami	(Moazami et al., 2019)	2019	16 types de bâtiments, y compris des immeubles de grande et moyenne hauteur Unités résidentielles (échelle du bâtiment)	Genève, Suisse
Shady Attia	(Attia & Gobin, 2020)	2020	Maison individuelle à trois étages (échelle du bâtiment) Échelle du bâtiment)	Eupen, Belgique
Yuchen Yang	(Yang et al., 2021)	2021	Bâtiments résidentiels (échelle du parc immobilier)	38 villes européennes
Luka pajek	(Pajek et al., 2022)	2022	Unité unifamiliale isolée (échelle du bâtiment)	Moscou, Russie & Ljubljana, Slovénie & Milan, Italie & Athènes, Grèce & Porto, Portugal

Les études énumérées dans ce tableau apportent un éclairage important sur la façon dont les changements de conditions météorologiques rendent les gens plus mal à l'aise et les obligent à utiliser plus fréquemment les systèmes de chauffage et de refroidissement. Cette dépendance se répercute sur le cycle du changement climatique en augmentant la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Les résultats soulignent la nécessité d'une architecture adaptable et de solutions d'architecture qui tiennent compte de l'évolution des problèmes environnementaux.

Pour réduire les effets néfastes du changement climatique sur les structures résidentielles, il faut améliorer les connaissances et mettre en place des mesures d'atténuation, ce qui est mis en évidence par la synthèse des données provenant de plusieurs sources citées dans ce travail, en particulier dans le tableau III.1. En plus d'éduquer les législateurs et les architectes, cette compilation permet également d'améliorer les connaissances du public sur la façon dont le changement climatique affecte l'efficacité énergétique des bâtiments et le confort des occupants.

En Algérie, la littérature révèle une insuffisance notable dans la recherche concernant les impacts du futur changement climatique spécifiquement sur les bâtiments résidentiels. Par exemple, le travail de (BENSEHLA Sofian, 2021).traite de l'impact du changement climatique sur l'énergie à l'échelle de la forme urbaine, mais ne s'étend pas au secteur des bâtiments résidentiels. De même, la recherche de (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023) porte sur le besoin urgent d'améliorer le confort thermique dans les logements sociaux à Guelma, en Algérie. Cette étude utilise un cadre d'étude de cas pour explorer l'influence du changement climatique par le biais d'une analyse de sensibilité et d'une approche paramétrique.

Le travail de (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023) examine comment les différents scénarios climatiques, les niveaux d'isolation et les caractéristiques des fenêtres affectent le confort thermique, en utilisant des outils avancés tels que Rhinocéros, Grasshopper, Ladybug et Honeybee, ainsi que le tableau de données à deux variables d'Excel. Les résultats indiquent que la hausse des températures prévue pour les années 2050 et 2080 aura un impact significatif sur le confort thermique, soulignant le rôle critique de l'isolation et de la conception des fenêtres. Une meilleure isolation et des vitrages spécialisés peuvent créer des environnements intérieurs stables, réduisant ainsi l'inconfort des occupants.

Malgré ces informations précieuses, les études existantes ont une portée relativement limitée, ce qui souligne le besoin urgent d'une recherche plus complète dans ce domaine. Reconnaître l'importance de ces concepts dans la recherche algérienne est essentiel pour développer des stratégies efficaces qui répondent aux défis liés au climat dans le secteur résidentiel. En donnant la priorité à ces recherches, les chercheurs peuvent contribuer de manière significative à la promotion de pratiques de construction durables et résistantes au climat en Algérie.

III.1.4. Stratégies d'adaptation des bâtiments face au changement climatique.

Face à l'accélération des changements climatiques, il est devenu impératif de développer des stratégies efficaces pour adapter les bâtiments aux nouvelles conditions climatiques. Ces solutions peuvent englober des systèmes architecturaux et techniques avancés visant à améliorer les performances des bâtiments, que ce soit par le biais de nouvelles conceptions ou de la modernisation des structures existantes. L'adaptation au climat nécessite une approche globale à plusieurs niveaux, de la planification urbaine aux mesures micro-architecturales à l'intérieur des bâtiments. (Saifudeen & Mani, 2024)

III.1.4.1. Définitions de l'adaptation et de l'atténuation dans le contexte architectural

Selon Le GIEC, l'atténuation est un outil essentiel pour réduire le changement climatique en diminuant les émissions de carbone grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et à la réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles (Saifudeen & Mani, 2024). À l'inverse, l'adaptation est une mesure proactive visant à faire face aux changements climatiques inévitables, tels que la hausse continue des températures et l'augmentation des inondations. L'adaptation vise à réduire la vulnérabilité des bâtiments et des communautés aux effets néfastes de ces changements en offrant un cadre de vie plus résilient et plus durable. (Sajjadian, 2017)

III.1.4.2. Principales stratégies d'adaptation architecturale.

Comme l'a souligné (Saifudeen & Mani, 2024) dans sa recherche. Les stratégies d'adaptation architecturale anticipent les effets des changements climatiques en optimisant la conception des bâtiments. Elles intègrent des solutions passives et des matériaux durables pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort intérieur, tout en renforçant la résistance aux conditions climatiques extrêmes. En synthétisant les travaux de (Saifudeen & Mani, 2024) il apparaît que certaines stratégies d'adaptation peuvent être identifiées et s'organisent de la manière suivante

- **Choix du site et analyse des conditions climatiques locales.**

Le choix stratégique du site est fondamental pour minimiser les effets négatifs du changement climatique. L'évaluation des facteurs climatiques locaux, tels que le régime des vents,

l'exposition au soleil et les risques environnementaux (comme les inondations), permet d'orienter la conception des bâtiments en fonction de ces conditions. Par exemple, dans les climats chauds, l'orientation des bâtiments vers le nord peut réduire l'exposition directe au soleil, tandis que dans les régions plus froides, une orientation vers le sud peut maximiser l'ensoleillement pendant l'hiver (Kwok & Rajkovich, 2010).

- **Une conception architecturale intelligente et efficace.**

Une conception efficace intègre des solutions architecturales innovantes pour améliorer les performances thermiques et visuelles des bâtiments. L'utilisation de surfaces réfléchissant la chaleur et de doubles vitrages permet d'obtenir une isolation thermique et d'éviter les gains de chaleur excessifs en été. En outre, les façades dynamiques qui s'adaptent aux conditions météorologiques assurent une ventilation naturelle et atténuent la chaleur intérieure, réduisant ainsi la dépendance à l'égard des systèmes de refroidissement mécaniques (Kwok & Rajkovich, 2010).

- **Améliorer l'utilisation de l'éclairage naturel.**

L'utilisation accrue de l'éclairage naturel permet de réduire la consommation d'énergie associée à l'éclairage artificiel. Cet objectif peut être atteint grâce à la conception de fenêtres à haute performance dotées d'un verre à isolation thermique qui laisse passer la lumière sans augmenter la chaleur à l'intérieur. En outre, les puits de lumière et l'emplacement stratégique des fenêtres peuvent diriger la lumière naturelle vers les zones peu éclairées du bâtiment, améliorant ainsi la qualité de l'environnement intérieur (Calama-González et al., 2023)

- **Techniques de chauffage et de refroidissement passifs.**

Ces techniques fournissent des méthodes naturelles pour contrôler la température intérieure sans systèmes mécaniques. Par exemple, les murs thermiques ou les toits isolés peuvent stocker l'énergie solaire pendant la journée et la redistribuer progressivement la nuit. Les planchers thermiques peuvent également retenir la chaleur ou la fraîcheur, améliorant ainsi le confort thermique intérieur (Kwok & Rajkovich, 2010).

- **Améliorer l'enveloppe du bâtiment.**

L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment passe par l'utilisation de matériaux isolants à haut rendement, tels que l'isolation thermique extérieure ou les murs et toits à double peau. En outre, l'utilisation de surfaces réfléchissant la chaleur ou de toits verts peut abaisser les températures ambiantes autour du bâtiment et atténuer les effets des îlots de chaleur urbains dans les zones densément peuplées (Ferdyn-Grygierek et al., 2021).

- **Systèmes de ventilation naturelle efficaces.**

Les systèmes de ventilation naturelle reposent sur des ouvertures intelligemment conçues qui facilitent l'entrée de l'air frais et l'expulsion de l'air chaud sans ventilation mécanique. Parmi les exemples les plus courants, on peut citer les cheminées thermiques, qui utilisent les différences de température pour diriger l'air chaud hors du bâtiment, créant ainsi des courants d'air naturels (Kwok & Rajkovich, 2010).

Les stratégies d'adaptation nécessitent une compréhension détaillée des conditions climatiques locales, car les solutions varient, selon (Saifudeen & Mani, 2024) dans son livre « *Adapting Buildings and Cities for Climate Change : A 21st Century Survival Guide* ». Pour faire face aux changements de température entre l'été et l'hiver, par exemple, les solutions d'adaptation saisonnières sont généralement choisies dans les climats méditerranéens. Dans les régions tropicales, en revanche, l'accent est mis sur la réduction de l'humidité intérieure et l'augmentation de la ventilation naturelle. C'est pourquoi les caractéristiques climatiques spécifiques de chaque lieu jouent un rôle majeur dans la détermination des meilleures options d'adaptation.

III.1.5. Organisations Clés Actives dans la Recherche sur le Changement Climatique.

La liste suivante des principales organisations engagées dans la recherche sur le changement climatique est tirée d'un aperçu complet fourni par (BENSEHLA Sofian, 2021). Et (GIEC, 2023). Ces organismes jouent un rôle essentiel dans l'avancement de notre compréhension des dynamiques climatiques, de leurs impacts et des stratégies d'atténuation :

- **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** : Cet organe des Nations Unies évalue les informations scientifiques relatives au changement climatique, publiant des rapports globaux qui orientent les politiques et les actions au niveau international et national. Selon la dernière évaluation du GIEC, le changement climatique présente des risques considérables pour les écosystèmes et les sociétés humaines ((*rechauffement-climatique-selon-le-giec-quel-role-le-batiment-et-ses-industries-peuvent-ils-jouer.pdf*, s. d.)).
- **Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA)** : La NASA mène des recherches approfondies sur le changement climatique par le biais d'observations satellitaires, de modélisation climatique et d'études sur les impacts du changement climatique sur les systèmes terrestres. Comme l'a souligné le Dr. James Hansen, un éminent scientifique du climat à la NASA, « *la crise climatique est déjà là, et nous devons agir immédiatement pour atténuer ses effets* »²⁴
- **Administration nationale océanique et atmosphérique (NOAA)** : La NOAA se concentre sur la compréhension de la variabilité et du changement climatique grâce à des recherches sur les conditions océaniques et atmosphériques. Selon le Dr. Rick Spinrad, Administrateur de la NOAA, « *nous devons donner la priorité à la recherche climatique pour prédire et nous adapter aux changements que nous subissons* » (Spindar,2023).
- **Organisation météorologique mondiale (OMM)** : Cette agence spécialisée de l'ONU assure le leadership et l'expertise en météorologie, climatologie et hydrologie. Comme l'a souligné Petteri Taalas, Secrétaire général de l'OMM, « *le changement climatique est la question déterminante de notre époque, et nous devons répondre avec urgence* »²⁵
- **Global Carbon Project** : Cette organisation suit les émissions de carbone mondiales et les recherches sur le cycle du carbone. Selon les chercheurs du Global Carbon Project, « *les émissions de carbone doivent être considérablement réduites pour atteindre les objectifs fixés par l'Accord de Paris* ».²⁶

²⁴ Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace, (<https://www.nasa.gov/>). Consulté le : 28.05.2024.

²⁵ Organisation météorologique mondiale, (<https://wmo.int/fr>). Consulté le : 28.05.2024.

²⁶ Global Carbon Project. (<https://www.globalcarbonproject.org/>). Consulté le : 28.05.2024.

- **World Resources Institute (WRI)** : Le WRI se concentre sur la gestion durable des ressources et propose des analyses sur les politiques climatiques. Comme l'affirment les chercheurs de cette organisation, « une action climatique efficace nécessite une approche multifacette, intégrant des perspectives économiques et environnementales ». ²⁷
- **Climate Research Network (CRN)** : Ce réseau favorise la collaboration entre chercheurs à l'échelle mondiale. Selon le CRN, « la collaboration interdisciplinaire est essentielle pour développer des solutions climatiques innovantes ». ²⁸
- **The Carbon Trust** : Basée au Royaume-Uni, cette organisation accélère la transition vers une économie durable. Comme l'indique le Dr. Adrian W. Williams, « investir dans les technologies à faible émission de carbone est crucial pour la résilience économique future ». ²⁹
- **International Institute for Environment and Development (IIED)** : L'IIED met l'accent sur les besoins des pays en développement. Comme le souligne le Dr. Camilla Toulmin, ancienne directrice de l'IIED, « l'adaptation au climat doit donner la priorité aux communautés vulnérables pour garantir des solutions équitables ». ³⁰
- **Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)** : Le PIK effectue des recherches interdisciplinaires sur les impacts du changement climatique. Selon le Dr. Hans Joachim Schellnhuber, « relever le défi du changement climatique nécessite une transformation de notre compréhension du risque et de l'adaptation ». ³¹

Ces organisations collaborent avec des gouvernements, des ONG et le secteur privé pour élaborer des stratégies et des politiques climatiques efficaces, contribuant ainsi aux efforts mondiaux pour lutter contre le changement climatique.

III.2. Optimisation multi-objectifs en conception environnementale

III.2.1. Concepts d'optimisation multi-objectifs en architecture.

III.2.1.1. Optimisation multi-objectifs : Définition et implications.

Selon (Jozefowicz, s. d.), L'optimisation multi-objectifs (Multi-Objectif Optimization : MOO) est une méthode mathématique qui vise à résoudre des problèmes avec plusieurs objectifs souvent conflictuels, tels que le confort, la performance et l'impact environnemental. Contrairement à l'optimisation à objectif unique, qui recherche une solution optimale pour un seul critère, la MOO permet d'explorer un ensemble de solutions connues sous le nom de front de Pareto. Une solution est considérée comme Pareto optimale si aucune amélioration d'un objectif ne peut être réalisée sans détériorer un autre. (Jozefowicz, s. d.)

L'optimisation multi-objectifs (MOO) a suscité un intérêt croissant dans divers domaines, en particulier dans l'architecture. (Ameur et al., 2020; Z. Li et al., 2020; Mani & Nicolini, 2022;

²⁷ World Resources Institute. (https://www.wri.org/paying-for-paris?utm_source=google&utm_medium=paid-search-google-grants&utm_campaign=paying-for-paris&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwgL-3BhDnARIsAL6KZ6-Ryf9mHmU4QBtFhsIUWw6FJhRLSIUKWW4b6EXNjVPd80gL-NrxvicaAm_NEALw_wcB), Consulté le : 28.05.2024.

²⁸ Climate research network. (<https://www.climate.ox.ac.uk/home>), Consulté le : 28.05.2024

²⁹ The carbon Trust, (<https://www.climate.ox.ac.uk/home>). Consulté le : 28.05.2024.

³⁰ International Institute for Environment and Development, (<https://www.ied.org/>); consulté le :28.05.2024.

³¹ Potsdam Institute for Climate Impact Research , (<https://www.pik-potsdam.de/en>). Consulté le 24.05.2024

Zou et al., 2021). Cette approche est particulièrement pertinente pour le développement de bâtiments plus durables, caractérisés par une consommation d'énergie réduite, une diminution des émissions de dioxyde de carbone, tout en maintenant la viabilité économique. Ces critères sont en accord avec les dimensions fondamentales de la durabilité : considérations environnementales, sociales et économiques (Méndez Echenagucia et al., 2015).

Des études précédentes ont exploré une large gamme de types de bâtiments, tels que les espaces commerciaux, les unités résidentielles et les musées, dans le cadre des optimisations multi-objectifs (Ameur et al., 2020; Bakmohammadi & Noorzai, 2020; Chegari et al., 2021; Delgarm et al., 2016; Lakhdari et al., 2021; Lin & Yang, 2018; Lu et al., 2022; Manni & Nicolini, 2022; Pajek et al., 2022; Toutou et al., 2018; Yu et al., 2015; Zou et al., 2021). Dans certains cas, les cadres utilisés n'étaient pas spécifiquement adaptés à un usage particulier des bâtiments (Jozefowicz, s. d.). Cette méthodologie a été appliquée tant aux bâtiments existants (Lakhdari et al., 2021), où des stratégies de mise à niveau ont été analysées, qu'aux nouveaux bâtiments.

Dans la conception environnementale de bâtiments, il est essentiel d'optimiser à la fois la performance et la consommation d'énergie dès la phase préliminaire de la conception. Comme l'expliquent (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023), ce processus s'appuie fortement sur des simulations de performance environnementale, qui utilisent les données climatiques locales pour développer des modèles mathématiques qui prédisent les résultats en matière de performance. Selon (Mukkavaara & Shadram, 2021) ces simulations donnent un aperçu complet des conditions environnementales intérieures et extérieures en tenant compte d'un large éventail de variables environnementales.

La conception des bâtiments implique des défis complexes, souvent formulés comme des problèmes d'optimisation multi-objectifs où des objectifs de performance multiples, et parfois opposés, doivent être équilibrés. Comme le souligne (Toutou et al., 2018), l'optimisation multi-objectifs est particulièrement utile car elle traite plusieurs objectifs à la fois, en fournissant aux concepteurs une sélection de solutions optimales qui servent de médiateur entre des objectifs conflictuels. Par exemple, (Bakmohammadi & Noorzai, 2020) souligne que l'équilibre entre le confort thermique et visuel est un défi fréquent pour atteindre une performance optimale des bâtiments, et la résolution de ces conflits est essentielle pour une optimisation multi-objectifs réussie.

L'intégration de l'optimisation multi-objectifs (MOO) dans les processus de conception des bâtiments offre une opportunité précieuse d'améliorer les pratiques architecturales durables en abordant efficacement les complexités et les compromis impliqués dans l'optimisation de l'efficacité énergétique.

Comme l'a souligné (Delgarm et al., 2016). L'optimisation des bâtiments permet d'évaluer efficacement les alternatives de conception, en se concentrant sur des aspects tels que l'enveloppe du bâtiment, les conditions de consigne internes, les appareils à haut rendement énergétique et les systèmes d'énergie renouvelable. Le but est d'obtenir des solutions optimales pour des objectifs spécifiques, notamment la viabilité économique, la durabilité environnementale, l'efficacité énergétique. Ces objectifs consistent à minimiser les émissions de gaz à effet de serre, à réduire la consommation d'énergie, à diminuer les coûts

d'investissement et à maximiser l'efficacité énergétique et exégétique, tout en respectant des contraintes telles que le confort thermique et la conformité aux réglementations. (Delgarm et al., 2018).

Comme l'a souligné (Harkouss et al., 2018), l'optimisation multi-objectifs (MOO) permet de relever le défi de l'optimisation simultanée de fonctions objectives conflictuelles. Les résultats de l'optimisation multi-objectifs produisent des solutions non dominées, appelées solutions optimales de Pareto, qui sont représentées par la frontière de Pareto. Cette frontière se présente sous la forme d'une courbe dans l'optimisation bi-objectif et d'une surface dans les scénarios tridimensionnels, chaque point indiquant une solution optimale potentielle. Un grand nombre de recherches ont exploré les effets de l'optimisation sur l'amélioration de la performance énergétique zéro des bâtiments, ainsi que la mise en œuvre d'algorithmes et de techniques modernes de MOO.

En s'appuyant sur le travail de (Manni & Nicolini, 2022) intitulé « *Multi-Objective Optimization Models to Design a Responsive Built Environment : A Synthetic Review* », une étude complète a été menée pour mettre en évidence les applications des modèles de MOO dans la conception de bâtiments intégrés. Cette étude a porté sur des articles scientifiques qui examinent l'optimisation des performances des bâtiments et des quartiers, en se concentrant sur des aspects tels que l'efficacité énergétique, le confort thermique et visuel. Les articles ont été sélectionnés dans les bases de données Scopus et Web of Science en raison de leur fiabilité. Le processus de recherche a commencé par les termes « building », « multi-objective » et « optimisation », puis les termes « design » et « architectural » ont été ajoutés pour identifier les résultats concernant les applications de la MOO dans la conception des bâtiments. À l'aide de l'outil VOS Visualiser, les mots-clés ont été regroupés et seuls les articles classés dans la catégorie « articles » ont été sélectionnés afin de garantir une analyse ciblée. (Voir Figure III.3)

D'après les travaux de (Manni & Nicolini, 2022), la recherche sur l'optimisation des performances des bâtiments est notamment concentrée en Chine, en Italie et en Iran, ce qui reflète la force des collaborations universitaires et industrielles dans ces régions. L'accent mis sur les bâtiments résidentiels, les bureaux et les établissements d'enseignement souligne leur importance pratique. Toutefois, les recherches limitées sur les installations commerciales et sportives suggèrent un domaine à explorer à l'avenir. Le développement des études dans ces secteurs pourrait accroître la polyvalence et l'applicabilité des modèles d'optimisation multi-objectifs (MOO) dans différents types de bâtiments.

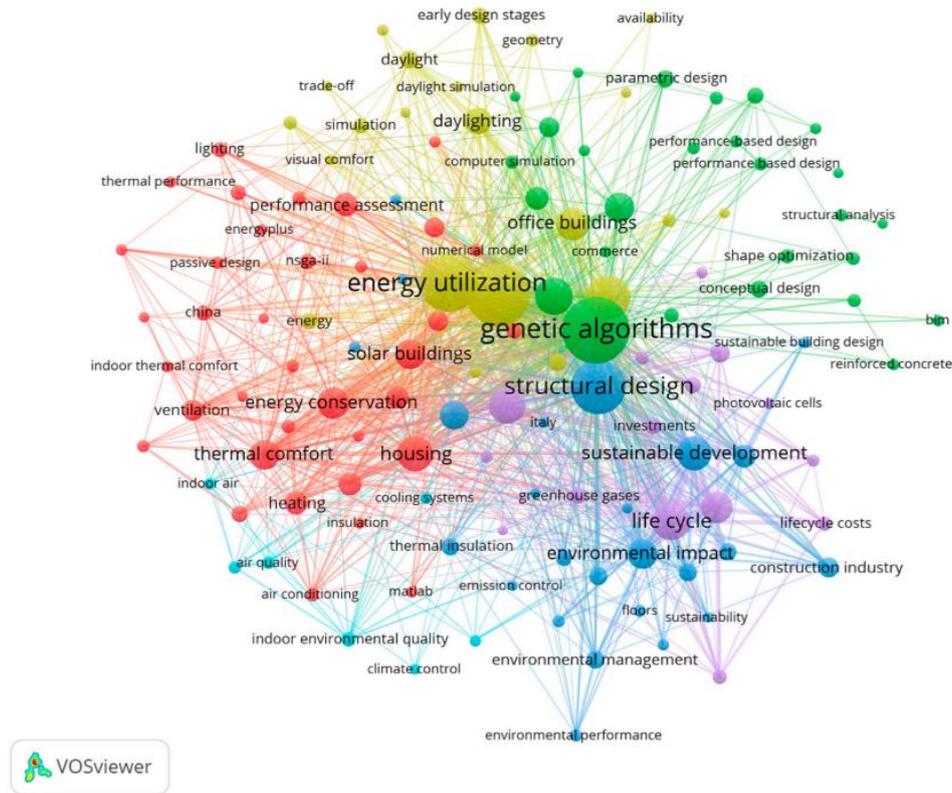


Figure III.3. Visualisation de la densité des mots dans les titres, les résumés et les mots-clés des auteurs des articles de revues sélectionnés. Source : (Manni & Nicolini, 2022).

En Algérie, comme l'a noté (Semahi et al., 2021), plusieurs études ont évalué des variables de conception spécifiques ou des stratégies passives dans différentes zones climatiques pour optimiser la consommation d'énergie et améliorer le confort thermique intérieur (Ali-Toudert & Weidhaus, 2017; Badeche & Bouchahm, 2020; Berghout & Forgues, 2019; Hamdani et al., 2014; Imessad et al., 2014; Mokhtara et al., 2019; Rahmouni & Smail, 2019; Soufiane et al., 2019). Cependant, il y a un manque relatif d'études utilisant des approches d'optimisation multi-objectifs. Une exception notable est le travail de (Lakhdari et al., 2021), qui démontre l'utilisation efficace des algorithmes génétiques pour résoudre des problèmes de conception complexes. En employant une approche paramétrique et une optimisation évolutionnaire multi-objectifs via le plugin Octopus pour Grasshopper, cette étude optimise les performances thermiques, d'éclairage et énergétiques d'une salle de classe de collège située dans un climat chaud et aride, mettant en évidence le potentiel de ces méthodes pour améliorer les performances des bâtiments.

III.2.1.2. Réconcilier confort et durabilité : le rôle de la moo dans la conception environnementale.

Dans le domaine de la conception environnementale, l'optimisation multi-objectifs (MOO) joue un rôle essentiel en permettant la prise en compte simultanée d'objectifs contradictoires, tels que l'efficacité énergétique, le confort thermique et l'impact environnemental, tout en respectant des contraintes telles que le coût, l'espace et les exigences réglementaires. Comme le notent (J. Zhang et al., 2020), la conception environnementale vise à minimiser l'empreinte écologique

négligence des bâtiments tout en améliorant la qualité de l'environnement intérieur. Le MOO permet aux concepteurs d'y parvenir en identifiant les compromis optimaux entre des objectifs concurrents, tels que la réduction de la consommation d'énergie et la minimisation des émissions de gaz à effet de serre, qui sont essentiels pour relever les défis croissants du changement climatique (Wang et al., 2005).

De plus, comme l'ont souligné (Toutou et al., 2018), la consommation énergétique des bâtiments représente une part significative de l'utilisation mondiale d'énergie, ce qui met en évidence la nécessité de stratégies visant à améliorer la performance des bâtiments. La MOO facilite ce processus en fournissant une approche structurée permettant de concilier plusieurs objectifs, tels que la performance énergétique, la réduction des coûts et le confort, qui sont essentiels pour développer des solutions durables et résilientes dans le domaine du bâtiment (Evins, 2013). Les pressions réglementaires croissantes et l'évolution des normes environnementales rendent l'utilisation de MOO d'autant plus cruciale pour atteindre une durabilité et une efficacité à long terme dans l'environnement bâti (Attia & Gobin, 2020)

III.2.1.3. Concepts clés en optimisation.

Pour guider les concepteurs et fournir des retours, les outils de conception peuvent utiliser l'optimisation, qui consiste à trouver la meilleure solution parmi plusieurs options, contraintes par des variables et des restrictions mathématiques. Les outils basés sur l'optimisation orientent ainsi les concepteurs vers les meilleures alternatives de conception. Un problème d'optimisation inclut plusieurs éléments formels, expliqués ici pour clarification, avec des termes clés en gras utilisés dans cette thèse.

III.2.1.3.1. Variables de décision.

Selon (J. Zhang et al., 2020), les variables de décision représentent les paramètres ajustables dans un modèle d'optimisation. Dans la conception d'un bâtiment, ces variables peuvent inclure des choix tels que les matériaux d'isolation, les systèmes de chauffage et de refroidissement, la configuration des fenêtres ou l'intégration de sources d'énergie renouvelables. Ces points de décision sont essentiels pour déterminer les solutions optimales, car ils influencent directement les performances énergétiques et environnementales du bâtiment. Par exemple, des variables de décision bien optimisées peuvent réduire de manière significative la consommation d'énergie d'un bâtiment tout en garantissant le confort et les normes de durabilité. (J. Zhang et al., 2020)

III.2.1.3.2. Fonctions objectives.

Basées sur les travaux de (Toutou et al., 2018), les fonctions objectives définissent mathématiquement les objectifs que le processus d'optimisation cherche à atteindre. Ces fonctions expriment les résultats souhaités, tels que la minimisation de la consommation d'énergie, la maximisation du confort thermique ou la réduction des coûts. Dans le contexte de l'MOO, plusieurs objectifs contradictoires sont optimisés simultanément. Par exemple, si l'amélioration de l'isolation peut réduire la consommation d'énergie, elle peut aussi augmenter les coûts des matériaux, ce qui nécessite un équilibre entre la performance énergétique et les coûts de construction.

III.2.1.3.3. Contraintes.

Selon (Lakhdari et al., 2021), les contraintes jouent un rôle crucial en imposant des limites aux solutions possibles. Ces contraintes peuvent être de nature physique, économique ou réglementaire. Par exemple, les normes de performance thermique ou les codes de construction peuvent restreindre le choix des matériaux ou des techniques de construction. Les contraintes aident à définir l'espace des solutions, en veillant à ce que le processus d'optimisation respecte des exigences spécifiques telles que la conformité avec les réglementations locales ou les limites budgétaires.

III.2.1.3.4. Solution optimale.

Le concept de solution optimale, tel que discuté par (Yu et al., 2015), se réfère à la meilleure combinaison de variables de décision qui satisfont les contraintes tout en maximisant ou minimisant les fonctions objectives. Dans l'optimisation multi-objectifs, il n'existe pas toujours une solution optimale unique, mais plutôt un ensemble complet de solutions non dominées, appelées solutions Pareto-optimales. Ces solutions représentent des compromis optimaux entre des objectifs concurrents, où l'amélioration d'un objectif (par exemple, la consommation d'énergie) peut avoir un effet négatif sur un autre (par exemple, le coût).

III.2.1.3.5. Algorithmes d'optimisation.

Selon (Bakmohammadi & Noorzai, 2020), les algorithmes d'optimisation sont des techniques informatiques utilisées pour explorer l'espace des solutions et trouver des résultats optimaux. Des algorithmes tels que les algorithmes génétiques (Nous examinerons cela en détail dans la section suivante), l'optimisation par essais de particules (PSO) et la programmation linéaire ou non linéaire sont couramment appliqués à la conception des bâtiments. Ces algorithmes simulent des processus tels que la sélection naturelle ou le comportement en essaim pour converger vers des solutions qui optimisent la consommation d'énergie, les coûts et le confort dans les projets de construction.

III.2.1.3.6. A Priori, A Posteriori et Optimisation Interactive.

D'après les travaux de (Cheriet, s. d.), les décideurs peuvent introduire leurs préférences dans le processus d'optimisation de différentes manières :

A priori : les préférences sont définies avant le début du processus d'optimisation, ce qui nécessite des objectifs clairs dès le départ.

A posteriori : le décideur choisit une solution après avoir évalué l'ensemble des solutions optimales. Cette approche offre une certaine souplesse en permettant un examen approfondi de toutes les options.

Interactive : Comme le soulignent (Cheriet, s. d.), cette méthode permet au décideur de s'engager dans le processus d'optimisation de manière itérative, en ajustant ses préférences sur la base des résultats intermédiaires.

III.2.1.3.7. Problème de MOO.

D'après (Diakaki et al., 2008), Dans les applications pratiques, de nombreux problèmes réels nécessitent l'optimisation simultanée de plusieurs mesures ou objectifs de performance. Cependant, cette tâche est souvent compliquée par la présence d'objectifs contradictoires qui évaluent différents aspects de la qualité de la solution. Ainsi, l'efficacité d'une solution donnée est mieux représentée sous la forme d'un vecteur que sous la forme d'une valeur scalaire unique. Par exemple, des objectifs tels que la performance, la fiabilité et le coût sont souvent en concurrence, en particulier dans le contexte de la conception architecturale ou du développement de systèmes énergétiques durables. Cette interdépendance met en évidence les défis auxquels sont confrontés les concepteurs et les ingénieurs pour trouver un équilibre entre des indicateurs de performance concurrents.

Selon les travaux du chercheur (Jozefowicz, s. d.), un problème de MOO peut être formellement articulé comme suit :

$$F(x)=\{F1(x), F2(x)\dots, Fm(x)\} \dots (3)$$

M représente le nombre total de fonctions à optimiser.

Sous réserve de contraintes :

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0, & i &= 1, \dots, q \\ h_j(x) &= 0, & j &= 1, \dots, l \\ x &\in X \end{aligned} \dots (4)$$

Ici, x est un vecteur de n variables de décision, et $g(x)$ et $h(x)$ sont les fonctions de contraintes qui délimitent l'espace de solution réalisable, désigné par X . (Diakaki et al., 2008).

III.2.1.3.8. Espace de recherche et l'espace objectif.

Les problèmes de recherche multi-objectifs sont généralement analysés à travers deux domaines principaux : l'espace de recherche et l'espace objectif. Selon (Tomás Méndez Echenagucia, 2013) dans sa thèse : « *Computational Search in Architectural Design* ».

L'espace de recherche représente les solutions potentielles basées sur les valeurs des variables de décision, organisées de manière à mettre en évidence leur ampleur et leur distance relative. Sa dimensionnalité correspond au nombre de variables du problème d'optimisation, limitées à leurs plages spécifiques. En revanche, l'espace objectif reflète les solutions basées sur les valeurs des fonctions objectives qui leur sont associées. Chaque solution est cartographiée en fonction des résultats obtenus à partir de plusieurs objectifs, la dimensionnalité correspondant au nombre d'objectifs. Les limites de l'espace objectif dépendent de ces fonctions objectives. (Tomás Méndez Echenagucia, 2013).

Par exemple, pour le problème test B, la figure III.4 montre l'espace de recherche et l'espace objectif. Ici, la solution 1 est marquée par un point rouge, la solution 2 par un point bleu et la solution 3 par un point vert, les autres valeurs étant représentées par de petits points noirs.

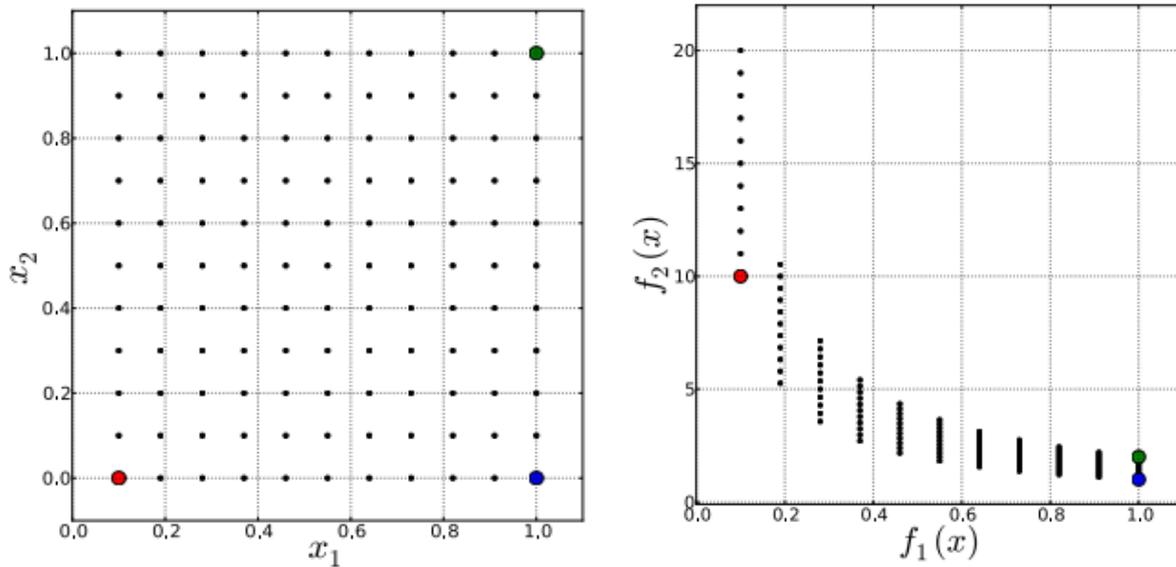


Figure III.4. Espace de recherche et espace objectif pour le problème test B. Source : (Tomás Méndez Echenagucia, 2013).

Cette représentation met en lumière la relation entre les différentes fonctions objectives. Un point essentiel à considérer est que, lorsque les solutions tendent à minimiser f_1 , elles peuvent perdre leur optimalité par rapport à f_2 . Le front de Pareto illustre les compromis entre ces objectifs concurrents, facilitant ainsi la sélection de solutions préférées pour les décideurs. Cette approche est essentielle pour naviguer dans les complexités des problèmes d'optimisation multi-objectifs. (Tomás Méndez Echenagucia, 2013).

III.2.1.4. Objectifs d'optimisation en conception architecturale.

Dans le domaine de l'optimisation de la conception architecturale, les chercheurs poursuivent un éventail d'objectifs grâce à diverses approches innovantes. Par exemple, dans le domaine de l'efficacité énergétique, (Lin & Yang, 2018) a utilisé des outils de conception paramétrique pour optimiser l'orientation des bâtiments et la configuration des fenêtres, ce qui a entraîné des réductions notables de la consommation d'énergie. En outre, l'accent mis sur le confort intérieur a été illustré par (J. Zhang et al., 2020), qui ont utilisé des techniques de simulation avancées pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments résidentiels, montrant que les dispositifs d'ombrage adaptatifs peuvent améliorer de manière significative la satisfaction des occupants. En termes de durabilité. L'objectif de cette approche d'MOO, comme l'explique (Ascione et al., 2019), est d'améliorer la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment en minimisant la consommation d'énergie primaire (CEP), le coût global lié à l'énergie (CG) et les heures d'inconfort (HH). En utilisant un algorithme génétique, cette approche optimise les variables de conception, y compris les températures de consigne, les propriétés des matériaux, les types de fenêtres et l'orientation du bâtiment, afin d'atteindre un équilibre entre l'efficacité énergétique et le confort des occupants.

Ces exemples soulignent les diverses applications des objectifs d'optimisation dans la recherche architecturale, en mettant l'accent sur l'importance d'une approche globale dans les pratiques de conception modernes. Sur la base des travaux précédents, j'ai organisé certains de ces objectifs dans un tableau (Tableau III.2) pour une meilleure présentation.

Chapitre III

Tableau III.2. Résumé des objectifs clés de l'optimisation multi-objectifs. Source : Elaboration personnelle.

Objectifs d'Optimisation	Description
Efficacité énergétique.	Réduire au maximum la consommation d'énergie des bâtiments en améliorant l'isolation, en sélectionnant des matériaux appropriés et en optimisant les systèmes de CVC.
Confort des Occupants	Améliorer le bien-être des utilisateurs en se concentrant sur le confort thermique, acoustique et visuel, avec une attention particulière aux apports solaires et à la ventilation naturelle.
Durabilité Environnementale	Créer des structures durables qui prennent en compte l'impact écologique sur l'ensemble de leur cycle de vie, en privilégiant les matériaux renouvelables et la gestion efficace des déchets.
Optimisation des Coûts	Minimiser les dépenses initiales liées à la construction tout en assurant la qualité et la longévité, en choisissant stratégiquement les matériaux et les techniques de construction.
Attractivité Visuelle	Trouver l'équilibre entre la fonctionnalité et l'esthétique, en intégrant des éléments visuels qui respectent le contexte culturel et urbain.
Flexibilité Spatiale	Concevoir des environnements adaptables, capables de répondre aux besoins évolutifs des utilisateurs au fil du temps.
Harmonie Environnementale	Garantir une intégration fluide du bâtiment dans son environnement, en considérant des aspects comme l'orientation, le paysage naturel et les infrastructures environnantes.
Inclusivité et Accessibilité	S'assurer que l'ensemble du bâtiment soit accessible à tous les utilisateurs, y compris les personnes ayant des besoins spécifiques.

III.2.1.5. Différence entre objectifs uniques et objectifs multiples.

Comme l'a souligné (Tomás Méndez Echenagucia, 2013). La principale distinction entre les recherches mono-objectives et multi-objectives réside dans le nombre d'objectifs pris en compte. Alors qu'une approche mono-objective se concentre sur l'optimisation d'un seul critère, l'optimisation multi-objectifs nécessite une attention particulière lorsque les objectifs sont contradictoires.

Les deux équations mentionnées ci-dessous représentent un problème de MOO, où l'on cherche à minimiser deux fonctions $f_1(x)$ et $f_2(x)$, qui dépendent des variables x_1 et x_2 .

$$\text{\color{red}\backslash minimize } f_1(x) = x_1 \quad \dots (5)$$

Cette équation indique que l'objectif est de minimiser x_1 . Dans ce cas, la fonction f_1 est directement égale à x_1 , ce qui signifie que la plus petite valeur possible pour f_1 se produira lorsque x_1 sera aussi petit que possible dans sa plage autorisée, qui se situe entre 0,1 et 1. La valeur optimale pour f_1 est donc $x_1=0,1$.

$$\text{\color{red}\backslash minimize } f_2(x) = \frac{1 + x_2}{x_1} \quad \dots (6)$$

Ici, nous cherchons à minimiser la deuxième fonction f_2 , qui dépend à la fois de x_1 et de x_2 . À mesure que x_1 diminue, f_2 augmente, car le dénominateur devient plus petit, ce qui rend f_2 plus grand. La plus petite valeur pour f_2 est atteinte lorsque x_1 est grand (proche de 1) et que x_2 est également grand (proche de 1).

Conflit entre les objectifs : Pour f_1 , l'objectif est de rendre x_1 aussi petit que possible (proche de 0,1). Pour f_2 l'objectif est de rendre x_1 aussi grand que possible (proche de 1) et x_2 également grand. Cela crée un conflit entre les deux objectifs. Si vous minimisez f_1 , vous rendez f_2 plus grand, et vice-versa. Le défi est de trouver un équilibre entre ces objectifs conflictuels.

Solution avec somme pondérée : Pour résoudre ce problème, une approche de somme pondérée est utilisée :

$$\text{\textbackslash minimize } f_w(x) = x_1 \cdot w_1 + \left(\frac{1 + x_2}{x_1} \right) \cdot w_2 \quad \dots (7)$$

w_1 et w_2 sont des poids attribués à chaque objectif en fonction de leur importance relative. En ajustant les valeurs de w_1 et w_2 , nous pouvons prioriser un objectif par rapport à l'autre ou essayer de trouver un équilibre entre eux. Dans des applications pratiques, cette méthode permet de traduire un problème multi-objectifs en un problème à objectif unique en combinant les deux objectifs conflictuels dans une seule équation. (Tomás Méndez Echenagucia, 2013).

Comme l'a souligné (Z. Li et al., 2020), tous les énoncés et définitions seront présentés dans le cadre de problèmes de minimisation, et un problème de maximisation peut être converti en un problème de minimisation en utilisant l'équivalence suivante :

$$\text{Maximiser } \bar{F}(\bar{x}) \Leftrightarrow \text{Minimiser } -\bar{F}(\bar{x}) \quad \dots (8)$$

III.2.1.6. Le concept de dominance.

Le concept de dominance est un élément clé de MOO. Il fait référence à une situation dans laquelle une solution particulière est considérée comme supérieure à une autre si elle atteint mieux au moins un objectif, tout en restant égale ou supérieure aux autres objectifs. Lorsque l'on compare deux solutions, si aucune n'est dominante, les deux sont considérées comme non dominantes. Dans le monde réel, il peut exister un grand nombre de solutions non dominées, ce qui ralentit les techniques d'optimisation multi-objectifs. C'est pourquoi des modèles simplifiés de dominance ont été proposés dans la littérature afin d'accélérer le processus de convergence et d'améliorer l'efficacité (Bandyopadhyay et al., 2015)

Comme l'a attesté (Bandyopadhyay et al., 2015; Tomás Méndez Echenagucia, 2013). Dans le contexte de la conception architecturale, le concept de dominance se manifeste par l'évaluation des solutions en fonction de critères multiples, ce qui renforce la capacité à identifier les alternatives les plus efficaces. Le concept d'optimalité de Pareto est lié à l'idée qu'une solution est optimale de Pareto s'il n'y a pas d'autre solution qui puisse optimiser un objectif sans affecter négativement les autres objectifs. L'ensemble des solutions Pareto-optimales est connu sous le nom de frontière de Pareto, et les architectes cherchent à explorer cette frontière pour atteindre

un équilibre optimal entre des objectifs concurrents, tels que le coût, l'efficacité énergétique et l'attrait esthétique (J. Zhang et al., 2020).

Grâce au cadre décisionnel fondé sur la dominance, les architectes peuvent prendre des décisions éclairées sur la base d'une analyse minutieuse. Ce cadre fournit un moyen systématique de filtrer et de classer les options de conception, permettant aux architectes de se concentrer sur les alternatives les plus prometteuses, ce qui est vital dans les processus de conception collaborative où les priorités et les objectifs des parties prenantes sont divers (Ascione et al., 2019). Enfin, les outils informatiques jouent un rôle important dans le soutien des processus de conception basés sur la dominance. Les algorithmes, y compris les algorithmes génétiques, sont utilisés pour évaluer rapidement les solutions et identifier les solutions dominantes, améliorant ainsi l'efficacité du processus de conception (Diakaki et al., 2008; Q. Liu et al., 2023; J. Zhang et al., 2020).

En résumé, le concept de dominance dans l'optimisation d'objectifs multiples guide les architectes vers la réalisation de conceptions équilibrées qui intègrent l'efficacité, la fonctionnalité et l'esthétique, répondant ainsi aux besoins des différentes parties prenantes.

III.2.1.6.1. Solutions non dominées dans la conception architecturale.

Dans le domaine de la conception architecturale, une solution non dominante désigne une conception qui optimise certains objectifs sans en compromettre d'autres. Par exemple, la conception d'un bâtiment peut améliorer l'éclairage naturel tout en préservant l'efficacité énergétique et en respectant le budget. Selon (Jozefowicz, s. d.), les solutions non dominées sont essentielles pour offrir aux architectes des alternatives viables qui équilibrent les différents critères de performance. Ces solutions permettent aux décideurs de donner la priorité à des facteurs tels que la durabilité ou le confort des occupants, en fonction des objectifs spécifiques du projet.

III.2.1.7. Front de Pareto.

Le concept de front de Pareto est un élément clé de MOO, qui joue un rôle central dans la conception architecturale contemporaine, où de nombreux objectifs contradictoires tels que l'efficacité énergétique, le coût, l'esthétique et le confort de l'utilisateur doivent être équilibrés. Le front de Pareto reflète un ensemble de solutions non contrôlées, où l'amélioration d'un objectif conduit à des compromis sur d'autres objectifs. Ce concept est particulièrement important dans la conception de bâtiments durables, car il permet aux architectes d'équilibrer les compromis pour obtenir des performances optimales. Selon (Limleamthong & Guillén-Gosálbez, 2017), le front de Pareto est un outil indispensable pour guider la prise de décision dans des environnements de conception complexes.

Le front de Pareto est généralement visualisé dans un espace multidimensionnel, où chaque axe représente un critère de conception distinct, tel que la consommation d'énergie, le coût ou l'éclairage naturel. Les points situés le long de ce front représentent les solutions de conception qui permettent d'obtenir des compromis optimaux. (Tomás Méndez Echenagucia, 2013) Comme illustré dans (la figure III.4), qui présente le front de Pareto, les simulations ont engendré six générations distinctes. L'axe des abscisses représente l'EUI, tandis que l'axe des

ordonnées affiche le sDA. La solution idéale se situe près de la courbe du front de Pareto, indiquant un équilibre entre les deux objectifs. Cependant, comme l'a mis en évidence le travail de (Toutou et al., 2018), la relation conflictuelle entre l'éclairage naturel et la performance énergétique entraîne des compromis. Certaines solutions peuvent exceller dans un domaine tout en obtenant de faibles performances dans l'autre, illustrant ainsi la complexité d'optimiser simultanément ces deux aspects. Cet équilibre est essentiel pour parvenir à un résultat de conception optimal.

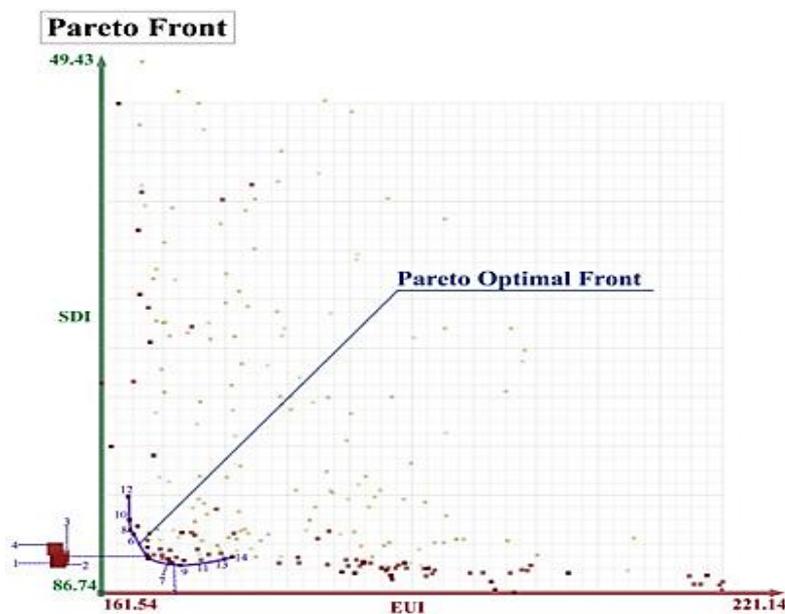


Figure III.5. Front de Pareto. Source : (Toutou et al., 2018)

Dans les grands projets architecturaux, plusieurs fronts de Pareto peuvent être créés pour représenter des solutions qui respectent certaines contraintes de conception. Ce concept permet aux architectes d'explorer plusieurs niveaux d'optimisation et d'affiner les solutions. Comme l'ont noté (Li et al., 2022; Tomás Méndez Echenagucia, 2013), les fronts de Pareto à plusieurs niveaux sont utiles dans les projets complexes, en particulier ceux qui impliquent des bâtiments à usage mixte ou la planification urbaine, où les différents objectifs de conception interagissent de manière complexe. En créant des fronts de Pareto secondaires, les architectes peuvent s'assurer que les solutions qui n'apparaissent pas sur le front primaire restent optimales compte tenu de leurs contraintes, ce qui offre une plus grande flexibilité dans le processus de prise de décision.

Les projets architecturaux réels comportent souvent plus de trois objectifs, tels que la conformité réglementaire, la durabilité du cycle de vie et la santé des utilisateurs. La prise en compte de ces questions multidimensionnelles nécessite des techniques d'optimisation avancées. Selon (Panichella, 2022; Son & Kim, 2016), les fronts de Pareto de dimension supérieure, gérés par des algorithmes évolutionnaires, permettent aux architectes de faire face à la complexité croissante de la conception des bâtiments modernes. Dans ce contexte, les fronts de Pareto constituent un outil puissant pour explorer les compromis dans des scénarios où la visualisation directe peut être difficile. En s'appuyant sur la modélisation mathématique et la

simulation, les architectes peuvent naviguer à travers une variété de facteurs de conception multiples, en s'assurant qu'aucun objectif n'est négligé.

III.2.1.7. Interaction entre objectifs : conflits et résolutions.

Dans la conception architecturale, la recherche de l'éclairage naturel, du confort thermique et de l'efficacité énergétique conduit souvent à des objectifs contradictoires, en particulier dans le contexte des pratiques de construction durable. L'éclairage naturel, qui améliore l'attrait esthétique et le bien-être psychologique des occupants, peut nuire au confort thermique s'il n'est pas soigneusement intégré à la conception du bâtiment. Par exemple, un excès d'ensoleillement peut entraîner une surchauffe, ce qui peut nécessiter une augmentation de la consommation d'énergie pour les systèmes de refroidissement, compromettant ainsi l'efficacité énergétique prévue du bâtiment (Song et al., 2019; Yu et al., 2015).

Les recherches menées par (Hamdy et al., 2016), mettent l'accent sur l'équilibre critique entre l'éclairage naturel et le confort thermique. Elles abordent les défis de la conception intégrée des bâtiments en tant que problème d'optimisation multi-objectifs, en se concentrant sur les objectifs conflictuels qui doivent être pris en compte simultanément. Il évalue les performances de sept algorithmes d'optimisation évolutionnaire multi-objectifs appliqués à la conception d'un bâtiment à consommation d'énergie quasi nulle (nZEB), avec plus de 1 610 solutions potentielles. De même, (Lyu et al., 2024) a exploré une approche d'optimisation multi-objectifs (NSGA-II) pour minimiser la consommation d'énergie tout en maximisant le confort thermique. Les études de cas démontrent une réduction de 40 % des coûts énergétiques et une amélioration du confort des occupants, soulignant le potentiel des techniques d'IA dans l'optimisation des bâtiments.

La nécessité d'adopter des approches de conception paramétrique est évidente dans les travaux de (Lakhdari et al., 2021), qui préconisent l'utilisation d'outils de simulation permettant aux architectes de visualiser l'interaction entre l'éclairage naturel, le confort thermique et la consommation d'énergie. Leur recherche souligne qu'une compréhension globale de ces dynamiques peut conduire à de meilleures solutions de conception qui satisfont simultanément les trois objectifs.

Dans le travail (Ameur et al., 2020), un ensemble de paramètres de conception passive a été sélectionné pour optimiser les performances thermiques et d'éclairage du bâtiment. L'étude a utilisé une méthodologie d'optimisation multi-objectifs pour traiter les objectifs conflictuels et identifier les meilleures solutions de conception. Les résultats ont montré que l'utilisation d'une isolation extérieure avec une couche dense de masse thermique améliore la performance thermique, tout en suggérant que l'augmentation de la surface vitrée peut avoir un effet négatif sur la consommation d'énergie. L'étude a également souligné l'importance de la ventilation nocturne naturelle pour le refroidissement estival, reflétant un équilibre nécessaire entre le confort thermique et l'efficacité énergétique, et constitue une référence importante pour les concepteurs de bâtiments dans le nord du Maroc. Cette approche est conforme aux conclusions de (Gou et al., 2018; Z. Li et al., 2020; Manni & Nicolini, 2022; Toutou et al., 2018; J. Zhang et al., 2020) qui ont démontré que l'intégration de techniques de modélisation avancées dans la phase de conception peut conduire à des bâtiments plus efficaces sur le plan énergétique sans compromettre le confort des occupants.

L'interaction entre l'éclairage naturel, le confort thermique et la consommation d'énergie représente un défi complexe pour la conception architecturale. Pour parvenir à un équilibre optimal, il faut une compréhension nuancée de ces objectifs contradictoires et un engagement en faveur de stratégies de conception intégrées qui tiennent compte des facteurs climatiques et contextuels uniques qui influencent chaque projet.

III.3. Introduction aux algorithmes génétiques.

III.3.1. Algorithmes génétiques : Concepts et principes.

Les algorithmes génétiques (AG), proposés par John Holland dans les années 1970, comme cela est cité dans le travail de (Tomás Méndez Echenagucia, 2013), sont des outils puissants dans divers domaines, dont l'architecture et la construction. Basés sur le principe de la sélection naturelle et de la génétique, ils sont utilisés pour développer de nouvelles solutions en combinant des éléments des solutions les plus réussies des générations précédentes.

Selon (Ciardiello et al., 2020). Les algorithmes génétiques se caractérisent par le fait qu'ils sont basés sur des ensembles de solutions, ce qui leur permet de rechercher plusieurs points à chaque itération. Cette caractéristique renforce leur capacité à surmonter les minima locaux, un problème courant avec les algorithmes traditionnels. Ces algorithmes sont puissants lorsqu'ils s'attaquent à des problèmes multi objectifs, ce qui les rend aptes à concevoir des solutions complexes impliquant de multiples variables. Ainsi, les algorithmes génétiques représentent un outil puissant pour la recherche de solutions nouvelles et innovantes dans un large éventail d'applications. (Tomás Méndez Echenagucia, 2013).

L'AG est un outil puissant pour optimiser la performance énergétique dynamique de la conception des bâtiments, car il est incorporé dans les modèles de simulation numérique. Il a été largement utilisé dans la recherche sur l'optimisation de la conception des bâtiments, y compris les villas méditerranéennes (Ascione et al., 2019), les bâtiments résidentiels (Gou et al., 2018) ainsi que les logements publics (Jafari & Valentin, 2017). Cette utilisation diversifiée démontre la capacité de l'AG à résoudre des problèmes de conception complexes nécessitant la réalisation simultanée de plusieurs objectifs (Son & Kim, 2016).

Les algorithmes génétiques font partie de la catégorie des algorithmes évolutionnaires, une technique avancée utilisée dans la recherche de solutions optimales dans divers domaines, y compris l'architecture. Des recherches récentes indiquent l'efficacité des algorithmes NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) et NSGA-III dans l'optimisation multi-objectifs, car ces algorithmes ont montré leur capacité à identifier des solutions optimales compétitives (Deb et al., 2014). L'utilisation de ces algorithmes montre la capacité à équilibrer différents objectifs dans la conception des bâtiments, en améliorant leur durabilité et leur efficacité énergétique (Brownlee & Wright, 2015; Carlucci et al., s. d.; Chaturvedi et al., 2020; Haidar et al., s. d.).

III.3.1.1. Équilibrer l'exploration et l'exploitation dans les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques s'appuient sur deux processus fondamentaux pour optimiser les solutions : l'exploration et l'exploitation.

L'exploration implique une recherche approfondie de l'espace de solution afin de maintenir la diversité de la population et d'empêcher l'algorithme de rester bloqué dans des optima locaux (Tomás Méndez Echenagucia, 2013). En explorant des zones moins évidentes, l'algorithme augmente ses chances de découvrir des solutions plus optimales.

L'exploitation, quant à elle, se concentre sur le raffinement et l'amélioration des solutions les plus prometteuses identifiées par l'exploration (Holland, 1975). Ce processus réduit l'espace de recherche, en orientant l'algorithme vers les régions présentant le plus grand potentiel d'amélioration.

Selon (Coley, 1999), dans son livre intitulé « *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers* » « *Introduction aux algorithmes génétiques pour les scientifiques et les ingénieurs* », Ces processus sont intrinsèquement opposés : l'exploration élargit la recherche, tandis que l'exploitation la rétrécit. L'efficacité des algorithmes génétiques découle de leur capacité à trouver un équilibre entre ces deux processus. Contrairement aux algorithmes basés sur le gradient qui privilégient l'exploitation, les algorithmes génétiques conservent le pouvoir exploratoire nécessaire à la résolution de problèmes multimodaux.

Comme l'affirme (Coley, 1999). Le succès de cet équilibre dépend fortement des opérateurs génétiques - tels que le croisement et la mutation - et des paramètres qui les contrôlent. La sélection et le réglage appropriés de ces éléments sont essentiels pour gérer l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation et améliorer la robustesse et l'efficacité de l'algorithme dans la recherche de solutions optimales.

III.3.1.2. Structure des Algorithmes Génétiques.

Les AGs sont basés sur l'imitation de processus biologiques et utilisent donc la terminologie de la biologie. Toutefois, les entités des algorithmes génétiques sont beaucoup plus simples que leurs homologues biologiques. À la suite d'une compilation des informations provenant des travaux de (Carr, s. d.; Coley, 1999; Tomás Méndez Echenagucia, 2013), les tableaux (III.3 et III.4) présentés ci-dessous illustrent les composants et les processus des algorithmes génétiques.

Tableau III.3. Composants essentiels des algorithmes génétiques. Source : élaboration personnelle.

Composant	Description	Réf.
Fonction de fitness	Fonction mathématique utilisée pour évaluer la performance de chaque solution potentielle en mesurant sa "fitness" par rapport aux objectifs d'optimisation.	
Population de chromosomes	Ensemble de solutions potentielles, où chaque solution est représentée par un chromosome, généralement codé sous forme de tableau de valeurs numériques.	(Carr, s. d.; Coley, 1999; Tomás Méndez Echenagucia, 2013)
Sélection	Processus de sélection des chromosomes pour la reproduction en fonction d'une distribution de probabilité, où la probabilité de sélection est influencée par les valeurs de fitness.	
Croisement	Opérateur génétique qui combine des segments de deux chromosomes parents pour produire une descendance, imitant ainsi les processus de recombinaison biologique.	
Mutation	Opérateur génétique qui introduit des modifications aléatoires dans les chromosomes, favorisant la diversité génétique au sein de la population.	

Chapitre III

Tableau III.4. Processus dans les algorithmes génétiques. Source : élaboration personnelle.

Processus	Description	Réf.
Initialisation	Le processus débute par la création d'un ensemble aléatoire de chromosomes, formant ainsi la population initiale de l'algorithme génétique.	
Évaluation	Chaque chromosome est évalué à l'aide de la fonction de fitness pour déterminer son efficacité à résoudre le problème d'optimisation.	
Sélection	Les chromosomes sont choisis pour la reproduction en fonction de leurs valeurs de fitness, avec une probabilité accrue pour les solutions les plus performantes.	
Croisement	Les chromosomes sélectionnés participent à des opérations de croisement pour produire une descendance, facilitant ainsi le partage d'informations génétiques entre les solutions parentales.	(Carr, s. d.; Coley, 1999; Tomás Méndez Echenagucia, 2013)
Mutation	Des mutations aléatoires sont appliquées à la nouvelle descendance pour garantir la diversité de la population et éviter un rapprochement précoce.	
Remplacement	La nouvelle génération de chromosomes remplace entièrement la génération précédente, bien que certains membres ayant un fort fitness puissent être conservés pour les générations suivantes.	
Itération	Le cycle d'évaluation, de sélection, de croisement, de mutation et de remplacement se répète jusqu'à ce que les valeurs de fitness se stabilisent au fil des générations.	

III.3.2. Rôle des algorithmes génétiques dans l'optimisation architecturale

III.3.2.1. Synergie des algorithmes génétiques et des processus d'optimisation dans l'architecture paramétrique.

L'intégration des AGs avec les processus d'optimisation dans le domaine de l'architecture paramétrique représente une avancée significative dans la conception architecturale. Cette synergie permet non seulement de surmonter les défis liés à l'exploration des espaces de solutions, mais également de générer des configurations de design innovantes et performantes. (Turrin et al., 2011); Comme le souligne (Latifi et al., 2016), les AGs sont des techniques informatiques inspirées du principe de l'évolution. Ils ont récemment été appliqués dans le domaine de l'architecture pour analyser les complexités de la forme et de la fonction.

Alors que d'autres domaines ont adopté des outils informatiques basés sur les principes de la biologie évolutive, les processus évolutifs n'ont pas été largement appliqués à la conception architecturale jusqu'à récemment. Il y a eu un changement notable dans la façon dont les architectes explorent de plus en plus ces techniques pour relever des défis complexes. Comme le souligne (Turrin et al., 2011), l'un des principaux défis de l'architecture aujourd'hui est la quantité écrasante d'informations et le niveau de complexité associé au processus de la conception architecturale. Dans ce contexte, les AGs apparaissent comme une solution efficace pour relever ces défis, en permettant aux concepteurs d'explorer une gamme de solutions potentielles grâce à des mécanismes d'optimisation et de recherche.

Les AGs interviennent dans l'architecture de deux manières principales : en tant qu'outils d'optimisation et en tant qu'outils de génération de formes. Dans le premier cas, les AG sont utilisés pour résoudre des problèmes de construction bien définis, tels que les performances

structurelles, thermiques et d'éclairage. Selon (Fasoulaki, s. d.), l'optimisation de la conception a été introduite dans l'industrie du bâtiment comme un moyen d'atteindre des performances optimales, garantissant une grande fiabilité tout en minimisant les coûts. La performance des bâtiments englobe divers attributs, notamment les caractéristiques structurelles, acoustiques, énergétiques et spatiales.

L'objectif premier de l'optimisation de la conception est de minimiser le poids total des matériaux utilisés, ce qui contribue à réduire les coûts. Avec la demande croissante de bâtiments complexes et efficaces, l'application des AG est devenue impérative, en particulier pour les structures à grande échelle comportant des milliers de composants, où les calculs manuels ne suffisent pas à répondre à la demande croissante. (Fasoulaki, s. d.)

Pour illustrer l'efficacité des AG, nous pouvons examiner le cas du Centre sportif olympique de Hangzhou. (Voir figure III.5). Comme le soulignent (Miller, 2011), l'approche automatisée de la sélection des dimensions des sections et de leur vérification par rapport aux codes de conception pour l'ensemble des 25 000 sections d'acier a été cruciale pour la faisabilité de la toiture du projet. C'est un exemple de processus dans lequel de nouveaux outils de conception ont été inventés, développés, intégrés, coordonnés, modifiés et partagés afin de réaliser un projet d'une valeur civique particulière en Chine.

La plupart des problèmes d'optimisation se composent de trois éléments fondamentaux : la fonction objective, un ensemble de variables de conception qui affectent la valeur de la fonction objective, et un ensemble de contraintes régissant les valeurs admissibles des variables de conception. Par exemple, lors de l'évaluation des performances structurelles d'un panneau, nous déterminons ce que nous voulons minimiser, par exemple les contraintes dans une zone particulière, puis nous identifions les variables, qui peuvent inclure la géométrie et le matériau du panneau, et enfin nous établissons des contraintes qui peuvent impliquer la minimisation du poids du panneau. (Carr, s. d.; Coley, 1999; Méndez Echenagucia et al., 2015).



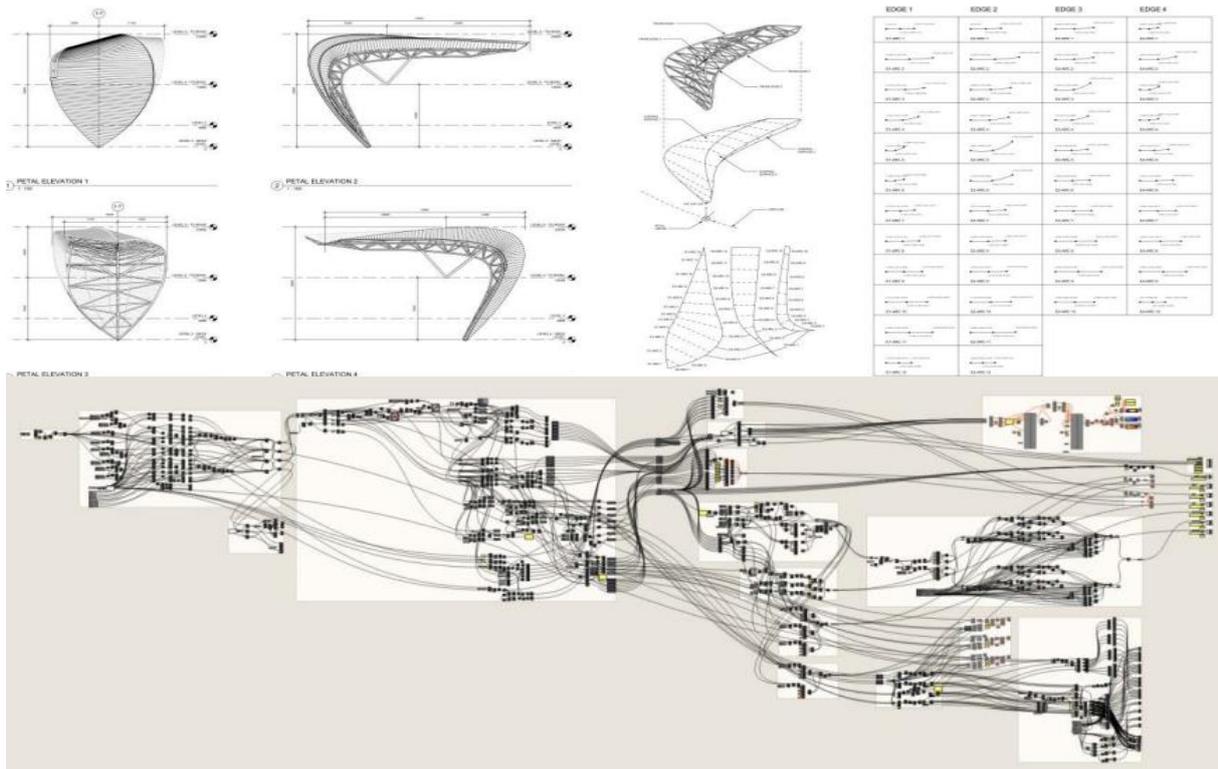


Figure III.6. Tenu Studiam de Hangzhou : Géométrie pilotée par des algorithmes. Source : (Miller, 2011).

III.3.2.1.1. Processus de synergie.

Selon (Turrin et al., 2011). La synergie entre les AGs et les processus d'optimisation fonctionne de plusieurs manières :

Exploration Efficace des Espaces de Solutions : Grâce à la capacité des AG à naviguer dans de vastes espaces de solutions, ils permettent une exploration systématique qui va au-delà de l'évaluation de solutions individuelles. En optimisant simultanément plusieurs paramètres, les architectes peuvent identifier des configurations qui répondent mieux aux exigences de performance.

Flexibilité et Adaptabilité : Les AG sont particulièrement adaptés aux environnements complexes et non linéaires souvent rencontrés en architecture. Cette flexibilité permet aux concepteurs d'intégrer des changements et des ajustements en temps réel, rendant le processus de conception plus interactif et adaptatif (Turrin et al., 2011).

Révélation de Solutions Non-Optimales : Contrairement aux méthodes d'optimisation traditionnelles qui privilégient les solutions parfaites, l'approche combinée encourage l'exploration de solutions suboptimales. Ces solutions peuvent offrir des perspectives précieuses et révéler des opportunités d'innovation que des méthodes plus restrictives pourraient négliger. (Turrin et al., 2011).

En somme, la synergie des algorithmes génétiques avec les processus d'optimisation dans l'architecture paramétrique ouvre de nouvelles voies pour la conception. Elle permet aux architectes et aux ingénieurs de dépasser les limitations des approches traditionnelles, en leur

offrant des outils puissants pour explorer des solutions innovantes et adaptées aux défis contemporains. Cela favorise une approche de conception plus holistique, intégrant des considérations esthétiques, fonctionnelles et environnementales dans le processus créatif. (Fasoulaki, s. d.)

III.3.2.2. Optimisation de l'efficacité de la conception des bâtiments

L'utilisation d'AG pour optimiser la performance énergétique des bâtiments repose sur leur capacité à explorer et à évaluer simultanément de multiples solutions, en sélectionnant les plus efficaces. Inspirés par les principes de l'évolution naturelle, les AGs testent divers paramètres architecturaux, tels que l'isolation, l'orientation et les matériaux, afin de minimiser la consommation d'énergie tout en garantissant un confort optimal. Comme le souligne (Latifi et al., 2016), « *les algorithmes génétiques permettent l'optimisation simultanée de plusieurs variables, ce qui est crucial pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments* ». Leur flexibilité et leur capacité à traiter des problèmes complexes en font des outils puissants pour affiner les choix architecturaux, ce qui permet d'obtenir des bâtiments plus durables et plus efficaces sur le plan énergétique (Turrin et al., 2011).

D'après de nombreux chercheurs qui ont utilisé les AGs dans l'optimisation architecturale. Les travaux de (Baños et al., 2011) portent sur les techniques d'optimisation énergétique dans les bâtiments, en mettant l'accent sur les méthodes stochastiques combinées à la simulation des performances des bâtiments. Les études ont porté sur des aspects spécifiques tels que la conception des fenêtres pour l'éclairage naturel et l'optimisation de la performance énergétique. Dans ce contexte, (Wang et al., 2005) ont utilisé un algorithme génétique multi-objectif pour évaluer les alternatives de conception en fonction de critères économiques et environnementaux.

(Magnier & Haghghat, 2010) donnent un exemple de variables de conception qui affectent les performances solaires passives, telles que la taille des fenêtres et la masse thermique, ainsi que les systèmes de chauffage et de ventilation. (Diakaki et al., 2008) s'attachent à aider les concepteurs à trouver des solutions optimales basées sur leurs préférences tout en tenant compte de la consommation d'énergie, du coût et des émissions de carbone.

En ce qui concerne les approches interdisciplinaires, (Wright & Farmani, s. d.) ont mis au point des algorithmes génétiques pour la conception de bâtiments et de systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ajoutant ainsi une intégration qui manquait dans les études précédentes qui se concentraient uniquement sur les aspects thermiques. (Chen et al., 2008) ont abordé le confort thermique extérieur à l'aide d'algorithmes génétiques, tentant d'optimiser l'environnement extérieur en été en simulant des changements dans la distribution des bâtiments et de la végétation.

Dans ces études, les techniques d'optimisation ont souvent été utilisées pour résoudre des problèmes de conception spécifiques en recherchant des solutions optimales. Toutefois, bon nombre de ces études n'explorent pas les solutions non optimales qui peuvent fournir des informations importantes. Dans ce contexte, les algorithmes génétiques peuvent être considérés comme utiles non seulement pour l'optimisation, mais aussi pour l'exploration de solutions de conception plus larges (Turrin et al., 2011). Les algorithmes génétiques sont utilisés pour rechercher des combinaisons indépendantes de variables qui conduisent à de bonnes solutions

dans l'espace de conception. Ces algorithmes permettent d'optimiser les performances souhaitées, ce qui les rend adaptés à l'exploration de divers facteurs architecturaux tels que l'esthétique et la motivation. Cette méthode soutient le développement de solutions architecturales et ouvre la voie à la découverte de nouvelles options de conception ou de voies précédemment inexplorées.

Comme le montre la figure (III.6), ce flux de travail, développé par (Chen et al., 2008), décrit l'optimisation de la conception d'un bâtiment à l'aide d'un algorithme génétique (AG) pour équilibrer des objectifs multiples.

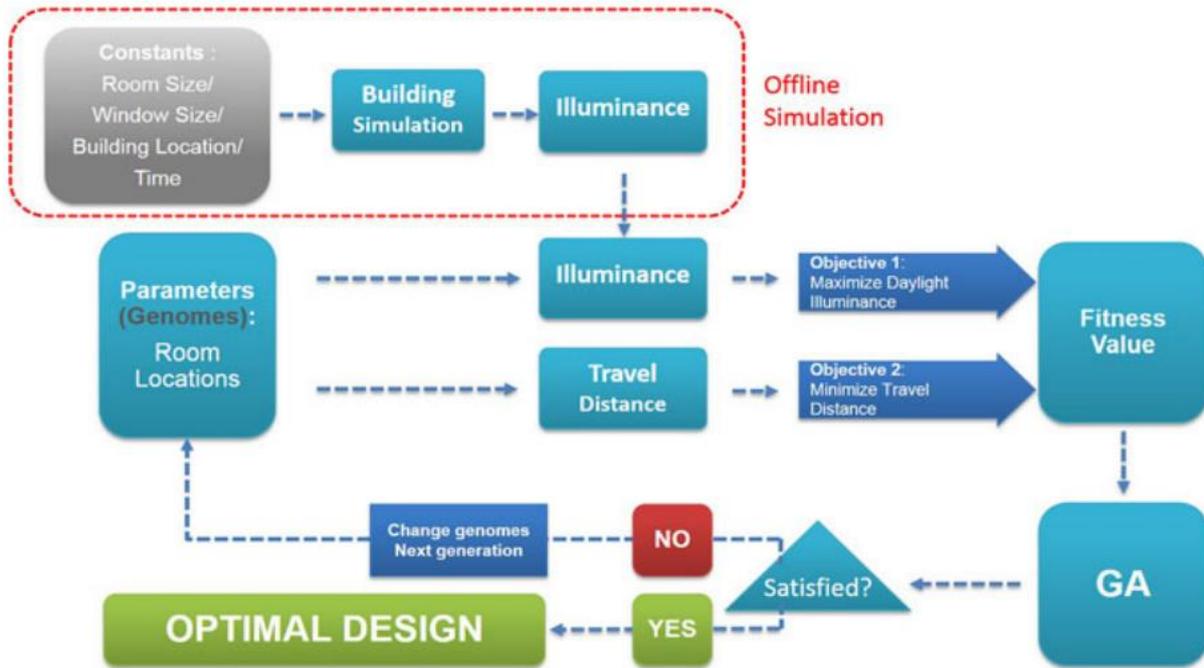


Figure III.7. Le flux de travail amélioré pour l'optimisation des algorithmes génétiques par le biais de la simulation hors ligne. Source : (Su & Yan, 2015).

Le processus commence par des constantes d'entrée, qui comprennent des paramètres fixes tels que la taille de la pièce, la taille de la fenêtre, l'emplacement du bâtiment et l'heure, qui sont tous intégrés dans une simulation du bâtiment. La simulation calcule ensuite l'éclairage, qui reflète la quantité de lumière naturelle disponible à l'intérieur du bâtiment.

Les paramètres, ou génomes, tels que l'emplacement des pièces, sont ajustés pour influencer à la fois l'éclairage et la distance de déplacement. L'optimisation se concentre sur deux objectifs principaux : maximiser l'éclairage naturel et minimiser la distance de déplacement. Ces objectifs sont évalués pour produire une valeur d'aptitude, qui est introduite dans l'AG. L'algorithme génétique génère de nouvelles configurations de salles en modifiant les génomes. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce qu'une conception optimale soit atteinte, assurant un équilibre entre l'amélioration de la lumière naturelle et la minimisation des déplacements à l'intérieur du bâtiment. En fin de compte, cette méthodologie permet d'affiner la conception architecturale grâce à des simulations efficaces et à l'application d'algorithmes génétiques.

III.4. Variables et indicateurs pour une optimisation environnementale.

III.4.1. Identification des variables et des indicateurs clés pour une optimisation efficace.

Dans l'optimisation de la conception environnementale, la sélection et l'identification des variables et des indicateurs de performance appropriés sont essentielles pour atteindre un équilibre entre l'efficacité énergétique, le confort des occupants et l'impact environnemental. En modifiant les variables, les concepteurs peuvent évaluer différents scénarios de conception, tandis que les indicateurs de performance permettent d'évaluer dans quelle mesure ces scénarios s'alignent sur des objectifs tels que la durabilité et la satisfaction de l'utilisateur. (Carlucci et al., s. d.).

Inspiré par le travail de (Harshalatha et al., 2024), qui a analysé 46 articles publiés entre 2016 et 2023 concernant les méthodes d'optimisation multi-objectifs dans la conception de bâtiments, on constate que la majorité des recherches se sont axées sur l'optimisation des bâtiments. En effet, 46 % des études se concentraient sur les bâtiments résidentiels, tandis que 22 % portaient sur les bureaux. La modélisation climatique, comme celle explorée par (Harshalatha et al., 2024), a été essentielle pour déterminer les cibles d'optimisation.

Les études récentes sur l'MOO dans la conception des bâtiments se sont principalement concentrées sur l'optimisation de deux à cinq objectifs fonctionnels, avec plus de 70 % de la recherche entrant dans cette catégorie. Plus de 60 objectifs fonctionnels distincts, portant sur des paramètres tels que la charge de refroidissement annuelle, la demande de chauffage et les coûts énergétiques, qui ont été analysés dans de nombreux articles. Les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment et la disposition jouent un rôle crucial dans l'influence de la consommation d'énergie et du confort des occupants, ce qui nécessite une optimisation simultanée de facteurs tels que la géométrie, l'orientation et les spécifications des fenêtres. (Harshalatha et al., 2024)

Le tableau III.5 présente une synthèse des principaux facteurs affectant la performance des bâtiments ainsi que les indicateurs qui leur sont liés, montrant ainsi une compréhension approfondie du sujet. Les facteurs sont judicieusement regroupés en catégories telles que l'énergie, le confort et le coût, ce qui permet une meilleure clarté et une comparaison aisée des informations.

Tableau III.5. Facteurs influençant la performance des bâtiments et indicateurs associés tirés de 46 revues de recherche. Source : (Harshalatha et al., 2024).

Facteurs de performance des bâtiments	Indicateurs.
Performance énergétique	Demande annuelle d'énergie, Consommation annuelle d'énergie, Charge de chauffage, Charge d'éclairage, Éclairage annuel total, Degrés-jours de refroidissement, Charge de refroidissement, Charge climatique, Coût énergétique, Efficacité énergétique, Performance énergétique, Économies d'énergie, Degrés-jours de chauffage, Charge de chauffage, Technologie d'éclairage, Demande totale d'énergie
Performance environnementale de confort	Climatisation, Inconfort perçu annuel cumulé, Dioxyde de carbone, Éclairement naturel, Niveau d'éclairement naturel, Disponibilité de la lumière naturelle, Émissions de gaz à effet de serre, Confort thermique intérieur, Température intérieure, Température extérieure, Vote moyen prédit, Inconfort perçu, Rayonnement solaire, Syndrome du bâtiment malade, Confort thermique, Inconfort thermique, Niveau de température, Indice universel d'inconfort, Ventilation, Performance visuelle, Confort, Heures-degrés de refroidissement, Performance de l'efficacité énergétique des espaces pendant la saison estivale, Éclairement naturel, Heures d'inconfort, Impact de la

Chapitre III

	demande énergétique sur le confort en été, Heures-degrés de chauffage, Impact sur le confort en été, Inconfort d'éclairage, Nombre minimal d'heures d'inconfort, Émissions polluantes, Inconfort thermique, Temps d'inconfort thermique, Nombre total d'heures-degrés d'inconfort, Vote moyen prédit total sur une année entière
Facteur de coût	Construction verte, Coût d'investissement initial, Coût d'installation, Évaluation du cycle de vie, Coût du cycle de vie, Coût total de possession, Coût énergétique, Optimisation complète du coût énergétique, Économie, Économies de construction verte, Coût d'exploitation pour le conditionnement des espaces, Coûts de construction et d'installation

(Le tableau III.6) présente une classification des variables de conception des bâtiments, illustrant l'importance des aspects architecturaux et environnementaux. Les paramètres d'aménagement, tels que le climat et l'orientation, sont cruciaux pour optimiser l'efficacité énergétique et le confort des occupants, en maximisant la lumière naturelle tout en réduisant les besoins en chauffage et en refroidissement.

Les éléments de l'enveloppe, comme les configurations géométriques et les dispositifs d'ombrage, influencent directement la régulation thermique et la consommation énergétique globale. La diversité des types de fenêtres et de murs est particulièrement pertinente pour améliorer la performance énergétique (Delgarm et al., 2018; Z. Li, Zou, et al., 2022). Les propriétés des matériaux, telles que l'absorbance du rayonnement solaire et la conductivité thermique, sont déterminantes pour l'efficacité thermique des bâtiments. Des indicateurs comme la transmittance thermique et la valeur U des murs et fenêtres jouent un rôle clé dans cette évaluation (Ascione et al., 2019; Lu et al., 2022).

Les détails de construction, notamment les types de murs et les spécifications des surplombs, affectent également l'efficacité énergétique et la durabilité. Une construction bien conçue améliore l'étanchéité à l'air et réduit les pertes thermiques. (Delgarm et al., 2018; L. Zhang et al., 2021). Enfin, les paramètres fonctionnels, incluant les stratégies de CVC et les taux de ventilation naturelle, sont essentiels pour garantir le confort des occupants tout en minimisant l'empreinte carbone. L'intégration de stratégies passives contribue à améliorer l'efficacité énergétique.

En somme, le tableau démontre la complexité des interactions entre les variables de conception et leur impact sur la performance des bâtiments, soulignant l'importance de ces facteurs pour atteindre des objectifs de durabilité et de confort.

Tableau III.6. Variables de conception des bâtiments identifiées dans les articles examinés.

Source : (Harshalatha et al., 2024).

Variables de conception des bâtiments	
Paramètres d'aménagement de l'espace	Climat, orientation du bâtiment, géométrie du bâtiment, superficie totale, largeur du bâtiment, hauteur des étages, nombre d'étages, espace central, rotation des pièces
Enveloppe (périmètre de l'espace)	Aspects de conception : Configurations géométriques des enveloppes, Dispositifs d'ombrage - angle d'installation, profondeur, dimensions, emplacement, système, forme, contrôle, volets, Fenêtres - types, WWR, taille (hauteur, largeur), orientation, types de toiture, types de murs externes/internes
Propriétés des matériaux	Absorbance du rayonnement solaire pour chaque toit/mur extérieur, mur extérieur, matériau d'ombrage, Isolation de l'enveloppe, type d'isolation, Isolations pour le sol/toit/mur extérieur, masse thermique interne, propriétés radiatives des enduits, masse thermique. Propriétés thermiques des toits/murs opaques, transmittance thermique du toit, propriétés thermo physiques de l'enveloppe, SHGC, VT de la fenêtre extérieure, Densité du matériau du mur, Absorption solaire du mur, Chaleur

	spécifique du mur, Conductivité thermique du mur, Valeur U du mur, Transmittance de la fenêtre, Vitrage de la fenêtre, Matériaux de la fenêtre, Taux d'infiltration des stores, Type de mur extérieur, Type de vitrage, Matériaux du vitrage, Spécifications des surplombs, Épaisseur du mur/toit
Détails de construction	Types de murs extérieurs, construction de toiture plate, propriétés des matériaux de vitrage, types de vitrage, spécifications des surplombs, construction des cloisons, épaisseur du mur, du toit, différentes épaisseurs de béton
Paramètres fonctionnels (caractère de l'espace)	Stratégies actives, grade d'étanchéité à l'air, intensité du carbone, point de consigne de refroidissement/chauffage, CVC, taux de ventilation naturelle, stratégies passives, points de consigne du thermostat

III.5. Algorithmes d'optimisation multi-objectifs et outils de simulation

Les méthodes d'optimisation du design architectural évoluent pour devenir des outils efficaces visant une haute efficacité énergétique répondant à divers objectifs. Face à la multitude d'options disponibles pour améliorer les caractéristiques du design des bâtiments, la recherche de la combinaison optimale se transforme en un défi complexe, surtout lorsqu'il s'agit de satisfaire des normes de performance multiples (Manni & Nicolini, 2022). La stratégie d'optimisation des simulations de bâtiments repose sur l'intégration des modèles énergétiques avec des algorithmes d'optimisation, dans le but de déterminer les paramètres optimaux qui atteignent les objectifs fixés.

III.5.1. Outils de simulation.

Le processus d'optimisation des simulations de bâtiments se compose de deux éléments principaux : les modèles énergétiques et les algorithmes d'optimisation. Les algorithmes d'optimisation explorent l'espace architectural à la recherche de solutions de design, chaque solution étant évaluée à l'aide de modèles énergétiques qui analysent le comportement du bâtiment durant sa phase d'exploitation. Des outils tels qu'EnergyPlus, DOE-2, TRNSYS, IDA-ICE et Radiance sont parmi les logiciels couramment utilisés pour la modélisation énergétique et l'optimisation de la performance des bâtiments. Par ailleurs, des logiciels tels que DB, Rhino Grasshopper et Open Studio sont des outils clés permettant aux concepteurs de développer des modèles de simulation énergétique selon les objectifs définis et les variables étudiées. (Harshalatha et al., 2024)

La synthèse de la littérature effectuée par (Harshalatha et al., 2024) indique que MATLAB est le plus utilisé dans l'analyse et l'optimisation, suivi d'outils mathématiques tels que GenOpt, JEPPlus, BeOpt, mode FRONTIER et ENEROPT. Des études ont démontré que plus de 10 chercheurs ont recours à EnergyPlus SE en collaboration avec MATLAB comme outil efficace dans la plupart des algorithmes, tels que GA, NSGA-II, MOGA et MOPSO. Environ huit chercheurs ont utilisé EnergyPlus avec DB comme outil de visualisation dans leurs études, soulignant l'avantage de DB dans la définition de l'ingénierie du bâtiment et le découpage des zones thermiques. Open Studio, bien qu'il soit un programme open-source intégré à EnergyPlus, est jugé moins fiable que DB.

Au cours des cinq dernières années, l'utilisation de Rhino Grasshopper et de ses plugins, notamment Octopus, a considérablement augmenté en raison de sa nature paramétrique et de sa flexibilité de conception. Octopus est un plugin d'optimisation multi-objectifs pour

Grasshopper, utilisé pour explorer simultanément plusieurs solutions de conception en fonction de divers critères de performance. Des études ont révélé que Rhino Grasshopper est largement adopté dans diverses recherches, en particulier pour analyser la performance énergétique et le confort des utilisateurs. (Harshalatha et al., 2024)

III.5.2. Algorithmes d'optimisation multi-objectifs.

Une analyse approfondie des algorithmes d'optimisation multi-objectifs a été réalisée dans le but d'évaluer leur efficacité en matière d'atteinte des objectifs de performance associés à l'énergie, à l'environnement et aux coûts. Diverses études (Bre et al., 2020; K. Li et al., 2017; Zhai et al., 2019), ont recouru aux algorithmes NSGA-II et aNSGA-II pour examiner la performance énergétique des systèmes, tandis que d'autres, comme MOPSO et MOGA, ont été employés pour étudier la performance environnementale ainsi que le confort des utilisateurs. (K. Li et al., 2017; L. Zhang et al., 2021) Les résultats de ces recherches mettent en évidence que NSGA-II se distingue comme l'algorithme le plus performant pour atteindre les objectifs de conception, avec MOPSO suivant de près dans cette hiérarchie de performance.

(Ascione et al., 2019) Ont proposé une méthode d'optimisation en plusieurs étapes, utilisant MATLAB en conjonction avec EnergyPlus pour analyser les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) dans les bâtiments résidentiels. Leur approche a permis de modéliser efficacement la performance énergétique de ces systèmes, tout en tenant compte des coûts associés. De plus, ils ont développé le cadre CASA, qui utilise des réseaux de neurones artificiels pour optimiser les coûts, ouvrant ainsi de nouvelles avenues pour une évaluation fine des systèmes CVC.

Parallèlement, (Dino & Üçoluk, 2017) ont suggéré l'application d'algorithmes génétiques (GA) à la fois mono-objectif et bi-objectif pour l'optimisation du design thermique, renforçant l'idée que les algorithmes d'optimisation peuvent s'adapter à divers besoins en matière de performance. D'autre part, (Delgarm et al., 2018) Ont appliqué NSGA-II pour analyser les dimensions du design et leur impact sur la consommation énergétique, illustrant l'interdépendance entre les choix de conception et les performances énergétiques.

En conclusion, NSGA-II émerge clairement comme l'algorithme de choix parmi les chercheurs pour l'optimisation de la conception des bâtiments. Son utilisation généralisée contribue significativement à l'amélioration de l'efficacité de la performance, du confort des utilisateurs et des coûts, favorisant ainsi des conceptions durables. Cela souligne l'importance croissante de l'intégration de techniques d'optimisation avancées dans le domaine de l'architecture et de l'ingénierie, visant à créer des environnements bâtis qui répondent aux défis contemporains en matière de durabilité et d'efficacité énergétique. En adoptant une approche multi-objectifs, il devient possible d'harmoniser les besoins environnementaux, économiques et sociaux, ce qui est essentiel pour répondre aux exigences d'un développement durable.

La figure (III.7) compare la performance de quatre algorithmes d'optimisation (NSGA-II, MOPSO, MOGA, aNSGA-II) selon trois critères : performance énergétique, performance environnementale et analyse des coûts. Voici les principales observations :

NSGA-II excelle en performance énergétique, étant le plus efficace pour optimiser les bâtiments en réduisant la consommation d'énergie.

MOPSO et MOGA présentent des performances similaires sur les trois critères, tandis que aNSGA-II offre un bon compromis sans dominer dans un critère particulier.

Le coût est généralement moins optimisé par rapport aux critères énergétiques et environnementaux.

En conclusion, NSGA-II est idéal pour prioriser la performance énergétique, tandis que aNSGA-II est mieux adapté aux solutions équilibrées. Le choix de l'algorithme dépendra des priorités du concepteur. Des informations supplémentaires sur les méthodologies et critères d'évaluation des algorithmes pourraient affiner l'analyse.

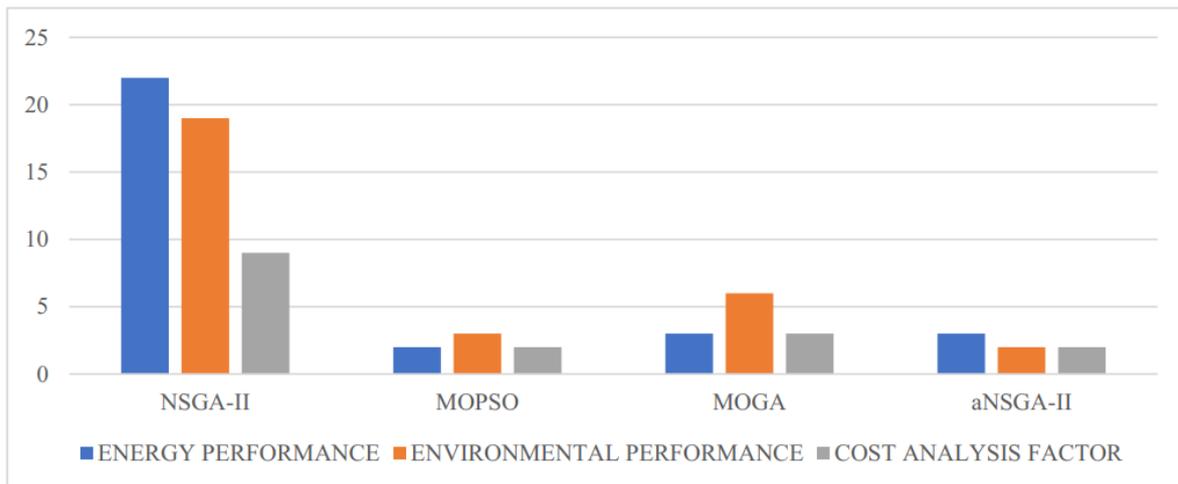


Figure III.8. Comparaison des Algorithmes d'Optimisation Multi-Objectifs. Source : (Harshalatha et al., 2024)

III.6. Optimisation paramétrique des bâtiments face au changement climatique futur.

Selon la revue systématique réalisée par (Manni & Nicolini, 2022), plusieurs insuffisances de connaissance ont été identifiées concernant les modèles d'optimisation multi-objectifs (MOO) pour la conception intégrée des bâtiments. Tout d'abord, la plupart des articles scientifiques n'ont pas pris en compte les effets du changement climatique dans leurs modèles MOO, ce qui constitue un manque important, surtout compte tenu de l'impact considérable du changement climatique sur la durabilité des bâtiments à long terme. Les études s'appuient souvent sur des fichiers météorologiques statistiques basés sur des valeurs moyennes calculées sur les 15 dernières années ou sur des données de surveillance limitées, conduisant ainsi à des résultats d'optimisation biaisés et peu réalistes. Ce biais est particulièrement visible lorsque l'on considère le cycle de vie complet du bâtiment, qui est généralement estimé à environ 60 ans (Ji et al., 2021), durant lesquels les variables climatiques, telles que la température de l'air proche de la surface et le rayonnement solaire, peuvent changer de manière significative.

Cela signifie que les stratégies et technologies optimisées pourraient devenir moins efficaces au fil du temps, notamment en ce qui concerne les systèmes de refroidissement et d'adaptation thermique. Cependant, certaines recherches récentes, telles que les études (Allouhi, 2020; Zou et al., 2021) commencent à combler cette insuffisance en proposant des procédures

d'optimisation dynamiques dans le temps qui intègrent l'optimisation des performances des bâtiments (BPO) et l'évaluation des impacts à moyen et long terme du changement climatique.

Il est donc essentiel de concevoir des modèles d'optimisation qui intègrent les évolutions climatiques afin d'assurer la durabilité et l'efficacité des bâtiments au fil du temps. De plus, il est impératif de promouvoir des recherches qui analysent les performances à différentes échelles, en tenant compte des interactions entre les bâtiments et leur environnement immédiat. Une telle approche contribuera non seulement à accroître l'efficacité énergétique des bâtiments, mais aussi à réduire les impacts négatifs du changement climatique sur les communautés urbaines. En prenant en compte ces facteurs, les recherches futures pourraient aboutir à des solutions de conception plus résilientes, adaptées aux défis environnementaux à venir.

III.7. Conclusion du chapitre.

L'optimisation multi-objectifs (MOO) constitue un outil essentiel pour assurer la durabilité des bâtiments face aux défis croissants du changement climatique. Dans ce contexte, il est impératif de prendre en compte des scénarios climatiques, comme le scénario RCP 8.5, afin d'anticiper les impacts futurs sur la conception architecturale. L'intégration de ces facteurs dans les pratiques de conception permet non seulement d'améliorer l'efficacité énergétique, mais aussi de développer des solutions adaptées aux exigences évolutives de notre environnement.

En examinant les enjeux liés au changement climatique, il devient évident que les modèles d'optimisation doivent s'adapter pour inclure les effets prévisibles des changements climatiques durant la durée de vie des bâtiments, généralement estimée à 60 ans. L'absence de données climatiques actualisées dans ces modèles a entraîné des résultats biaisés, mettant en lumière l'urgence d'intégrer des informations dynamiques et pertinentes.

Les principes de l'optimisation multi-objectifs, tels que la distinction entre objectifs uniques et multiples, ainsi que des concepts clés tels que la domination et le front de Pareto, sont cruciaux pour gérer les compromis inhérents à la conception. L'application des algorithmes génétiques s'avère également prometteuse pour optimiser la performance énergétique des bâtiments, offrant ainsi une réponse novatrice aux défis posés par le changement climatique.

Par ailleurs, l'identification des variables pertinentes et l'utilisation d'outils de simulation adéquats sont indispensables pour garantir une optimisation efficace. Cette approche intégrée doit tenir compte des interactions complexes entre les bâtiments et leur environnement afin de réduire les impacts négatifs du changement climatique sur les communautés urbaines.

Ainsi, la prochaine section de cette étude se concentrera sur l'application pratique de ces concepts, permettant d'évaluer l'efficacité des stratégies d'optimisation proposées et de vérifier leur pertinence face aux défis environnementaux à venir.

**Deuxième Partie : Approche
Méthodologique, Analyse Et Processus
d'Optimisation.**

**Chapitre IV : Étude du Contexte
Climatique et Présentation d'étude de
cas.**

Introduction.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse de la ville de Guelma, en Algérie, en mettant en lumière le contexte géographique, climatique et socio-économique qui influence le logement social collectif. Située dans une région au climat méditerranéen chaud, Guelma fait face à des défis particuliers liés à ses conditions climatiques, notamment des températures estivales élevées et un rayonnement solaire significatif. Ces éléments sont cruciaux pour la conception architecturale, car ils affectent directement le confort thermique et visuel des résidents.

Dans cette étude, nous examinerons les caractéristiques climatiques spécifiques de Guelma, en analysant leur impact sur les conditions de vie dans les logements collectifs. La compréhension de ces facteurs environnementaux est essentielle pour identifier les besoins des occupants et pour développer des solutions architecturales adaptées.

Nous nous appuyerons sur une étude de cas approfondie du complexe résidentiel LPL, où des mesures d'éclairement naturel et thermique seront réalisées dans plusieurs appartements situés à des étages différents. Cette méthodologie permettra de mettre en évidence les variations d'éclairement et de température, ainsi que leur influence sur le confort des occupants. Les résultats obtenus fourniront des informations clés sur la façon dont les conditions climatiques peuvent être prises en compte dans le processus de conception architecturale.

Ainsi, ce chapitre vise à offrir une compréhension globale des enjeux liés au logement social collectif à Guelma, tout en établissant un cadre d'analyse pour les chapitres suivants. En intégrant ces considérations climatiques et socio-économiques, nous pourrions mieux appréhender les spécificités locales et proposer des pistes d'amélioration pour le confort intérieur dans les logements sociaux.

IV.1. Ville de Guelma : objet de l'étude.

IV.1.1 Présentation de la ville de Guelma.

La wilaya de Guelma se situe dans la région nord-est de l'Algérie et revêt une importance historique, culturelle et géographique. Elle est bordée au nord par les wilayas de Souk Ahras, Annaba et Skikda, tandis qu'Oum El Bouaghi et Constantine se trouvent à l'ouest et au sud. Avec une superficie d'environ 4 101 km², la commune de Guelma, qui est également la ville principale de la wilaya, sert de capitale administrative et économique de cette région. Elle se trouve à une distance relativement courte des frontières de la wilaya, ce qui facilite l'accès aux autres communes environnantes.

IV.1.2. Situation de la ville de Guelma.

La ville de Guelma se trouve au centre de la wilaya de Guelma. Elle est délimitée au nord par la commune d'Héliopolis, au sud par la commune de Bendjerah, à l'est par la commune de Belkheir et à l'ouest par la commune de Hammam Debagh. (SAYAD Boutheina et al., s. d.). Guelma présente un relief varié, caractérisé par des collines et des vallées, et est située à environ 36,4° de latitude nord et 7,4° de longitude est. Avec une altitude d'environ 288 mètres au-dessus

du niveau de la mer, elle est entourée par des zones dont l'altitude moyenne atteint 455 mètres. (Semahi et al., 2019).

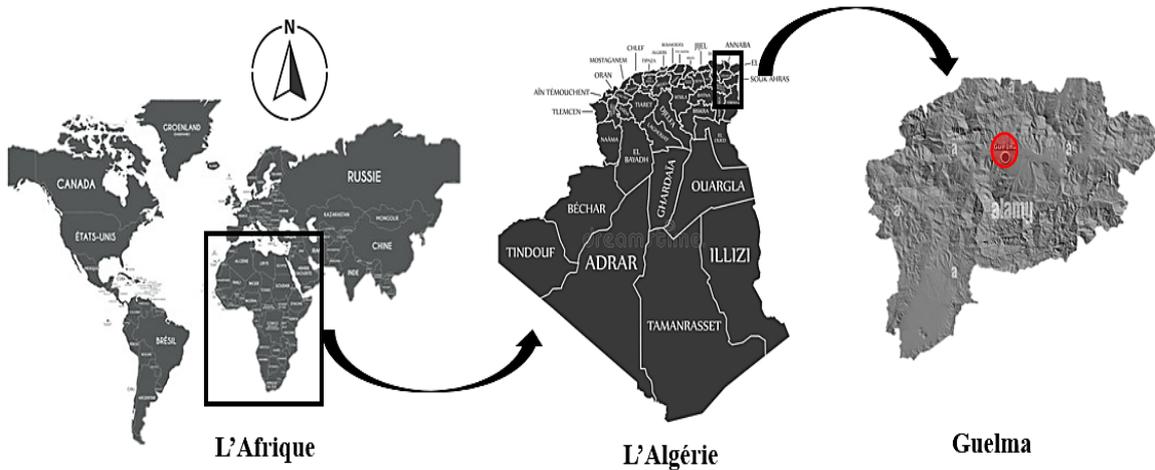


Figure IV.1. Situation géographique de la ville de Guelma. Source : générée par l'IA et adaptée par l'auteur.

IV.1.3. Étude climatique de la ville de Guelma.

IV.1.3.1. Interprétation du climat.

Guelma, située dans le nord-est de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen à été chaud (Csa) selon la classification de Köppen (Update World Köppen-Geiger Climate Classification Map, 2007), avec une influence semi-aride. Ce climat, également présent dans certaines régions d'Europe du Sud, d'Afrique du Nord et du Sud, ainsi que dans plusieurs grandes villes d'Asie et d'Amérique du Nord, se caractérise par des étés chauds et secs, où les températures varient entre 35 et 40°C, et des hivers doux, avec des minimales comprises entre 5 et 10°C et des maximales autour de 17°C. Les précipitations, essentiellement concentrées en automne et en hiver, oscillent entre 400 et 600 mm par an. Le taux d'humidité moyen est de 67 %, témoignant de la différence saisonnière marquée entre des étés secs et des hivers pluvieux. La région peut également être exposée à des vents chauds, comme le sirocco, qui accentuent les périodes de sécheresse estivale. (Medjeldi, Dechaicha, et al., 2023).

Le logiciel « Grasshopper » ainsi que Meteonorm.8 ont été employés pour créer des graphiques représentant les données météorologiques de la ville de Guelma, en utilisant un fichier climatique au format « EPW » couvrant une période de 15 ans (2007-2021). Cette approche permet d'analyser les variations climatiques sur une durée significative, fournissant des informations essentielles pour les études de conception architecturale et les projets d'aménagement urbain. En intégrant des données précises sur la température, les précipitations et l'humidité, les concepteurs peuvent mieux anticiper les conditions climatiques et optimiser le confort thermique des occupants tout en respectant les normes environnementales. Pour obtenir des informations plus détaillées sur les caractéristiques climatiques de la ville de Guelma, créées par Meteonorm, veuillez-vous référer à (l'Annexe A).

IV.1.3.2. Température.

La figure A.1 examine les températures de bulbe sec à Guelma sur une période d'un an, montrant des cycles diurnes distincts. Les températures sont généralement plus basses durant la nuit et atteignent leur maximum l'après-midi, soulignant l'importance de comprendre ces fluctuations pour le confort intérieur. Les variations saisonnières révèlent que les hivers sont froids, avec des températures souvent en dessous de 12 °C, tandis que le printemps marque une hausse progressive. L'été est caractérisé par des températures maximales dépassant 36 °C, tandis qu'à l'automne, les températures diminuent et se rapprochent des valeurs printanières.

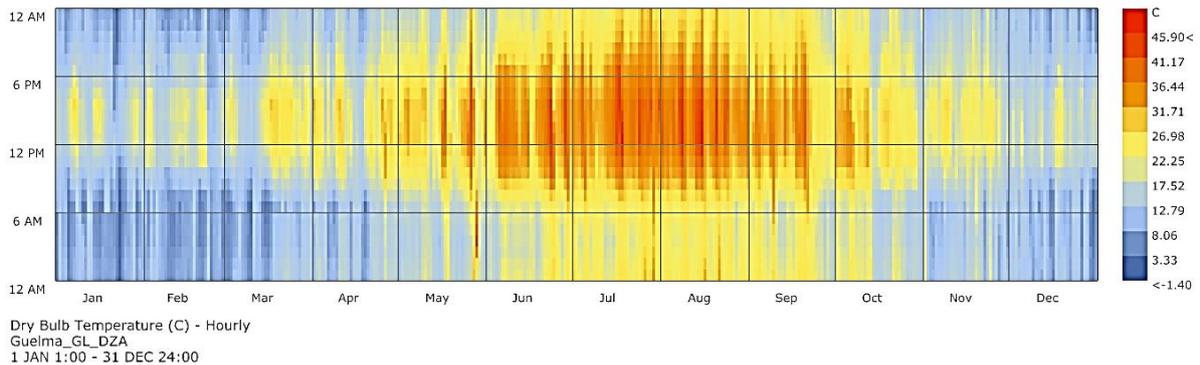


Figure IV.2. Les températures de bulbe sec à Guelma. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.

L'amplitude thermique quotidienne, indiquant des écarts significatifs entre températures maximales et minimales, est cruciale pour la conception architecturale. Cela nécessite d'adopter des stratégies de conception passive, telles que l'orientation des bâtiments et l'utilisation de matériaux isolants. En conclusion, cette analyse fournit des données essentielles pour le développement de solutions architecturales adaptées au climat local, visant à optimiser le confort intérieur et l'efficacité énergétique des bâtiments.

La figure A.2 montre les températures du point de rosée à Guelma sur une année, de janvier à décembre. Les données révèlent des variations diurnes et saisonnières significatives qui influencent le confort intérieur des bâtiments.

En hiver, les températures du point de rosée sont généralement basses, souvent inférieures à 8 °C, ce qui entraîne une atmosphère plus sèche. Cela peut améliorer le confort dans les espaces intérieurs, mais pourrait également poser des problèmes pour ceux sensibles à la sécheresse. Avec l'arrivée du printemps, on observe une augmentation des températures du point de rosée, signalant une humidité accrue. L'été se caractérise par des températures élevées, dépassant 19 °C, rendant l'air lourd et nécessitant des solutions de climatisation efficaces. En automne, les températures commencent à diminuer, indiquant un retour à des conditions plus sèches similaires à celles de l'hiver.

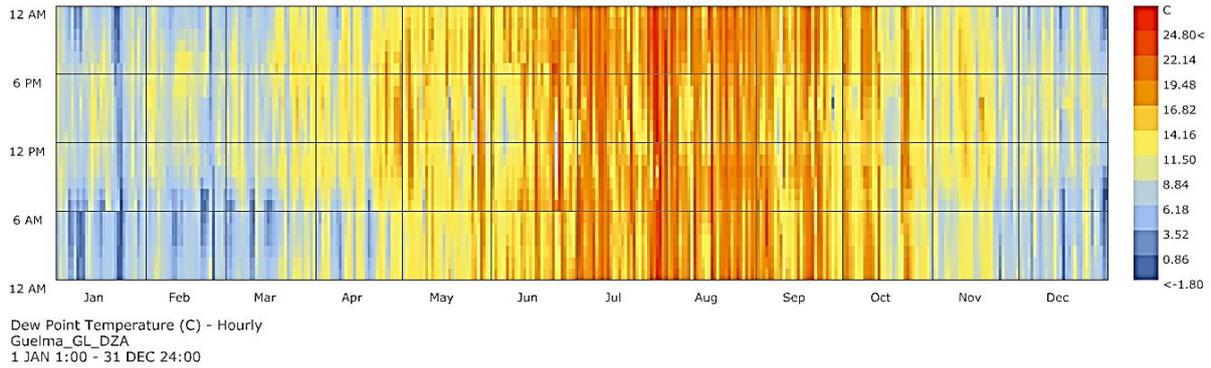


Figure IV. 3. Les températures du point de rosée à Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.

Les fluctuations diurnes, avec des températures plus basses la nuit et des pics l'après-midi, soulignent la nécessité de concevoir des bâtiments adaptés aux variations climatiques. En intégrant ces données dans la conception architecturale, il est possible d'optimiser le confort thermique et l'efficacité énergétique à Guelma.

IV.1.3.3. Vent.

Le thermogramme présenté dans la figure IV.3 représente la vitesse du vent à Guelma, en Algérie, sur une période d'un an. Les couleurs chaudes signalent des vitesses élevées, tandis que les teintes froides correspondent à des vents faibles. L'axe horizontal indique les mois de l'année, tandis que l'axe vertical représente les heures de la journée.

L'analyse révèle que la vitesse du vent à Guelma ne présente pas de cycle saisonnier marqué. Contrairement aux températures, les vents n'ont pas de période où ils sont systématiquement plus forts. Une variabilité significative est observée, avec des phases de vents forts alternant avec des périodes de calme. Il n'y a pas de direction de vent dominante, ce qui indique une influence complexe de systèmes météorologiques divers.

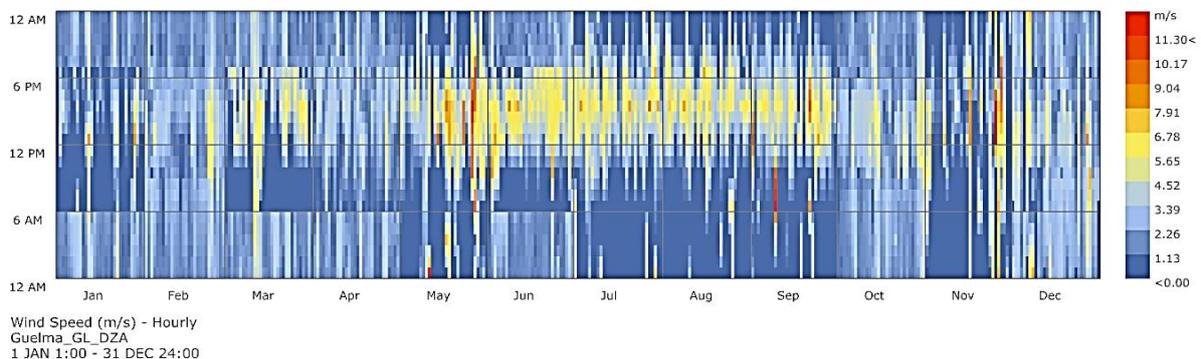


Figure IV.4. La vitesse du vent à Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.

Des pics de vent sont notés principalement en automne et en hiver, probablement en raison de systèmes dépressionnaires. La topographie locale, notamment les montagnes et vallées, pourrait

influencer ces régimes de vent, tandis que le passage de différentes masses d'air contribue également aux variations observées. En somme, le régime des vents à Guelma est caractérisé par une grande variabilité et une absence de cycle saisonnier net. Des études supplémentaires, en croisant ces données avec d'autres paramètres météorologiques, seraient nécessaires pour mieux comprendre les dynamiques de vent dans la région.

IV.1.3.3.1. Analyse de la Rose des Vents de Guelma.

La rose des vents de Guelma (voir figure IV.4), illustre la fréquence et la direction des vents, montrant une absence de direction dominante et une uniformité dans les origines des vents. Les couleurs froides (bleues) indiquent des vitesses généralement faibles à modérées, tandis que quelques secteurs aux couleurs plus chaudes (jaunes, oranges) révèlent des vents occasionnellement plus forts, souvent liés à des systèmes dépressionnaires.

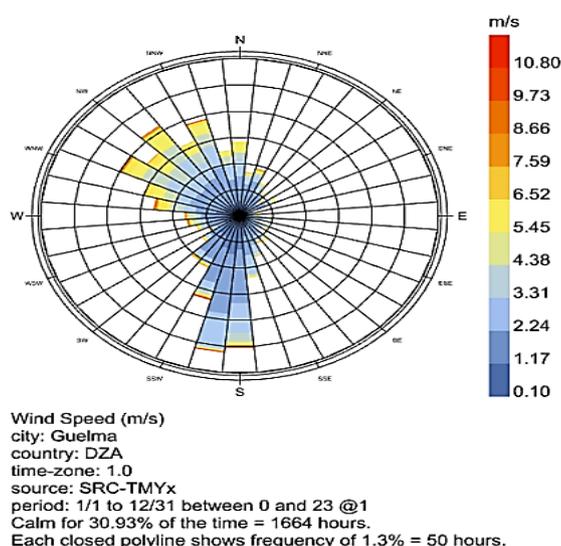


Figure IV.5. La rose du vent de Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper. Avec 30,93 % de périodes calmes, la rose indique que le vent est souvent absent. La topographie locale et l'influence de la Méditerranée peuvent également jouer un rôle dans ces caractéristiques.

IV.1.3.4. Rayonnement solaire.

L'analyse des diagrammes de rayonnement solaire pour la ville de Guelma se base sur trois graphiques polaires (voir figure IV.5), qui visualisent la distribution annuelle du rayonnement solaire. Chaque graphique est dédié à un type de rayonnement particulier : le rayonnement global, le rayonnement diffus et le rayonnement direct. Le rayonnement global correspond à la somme de tous les rayonnements qui atteignent la surface terrestre, y compris les composantes directes et diffuses. Le rayonnement diffus, quant à lui, est la partie du rayonnement solaire dispersée dans l'atmosphère en raison de la présence de nuages et de particules. Le rayonnement direct désigne la quantité d'énergie solaire qui arrive directement au sol sans subir de diffusion atmosphérique.

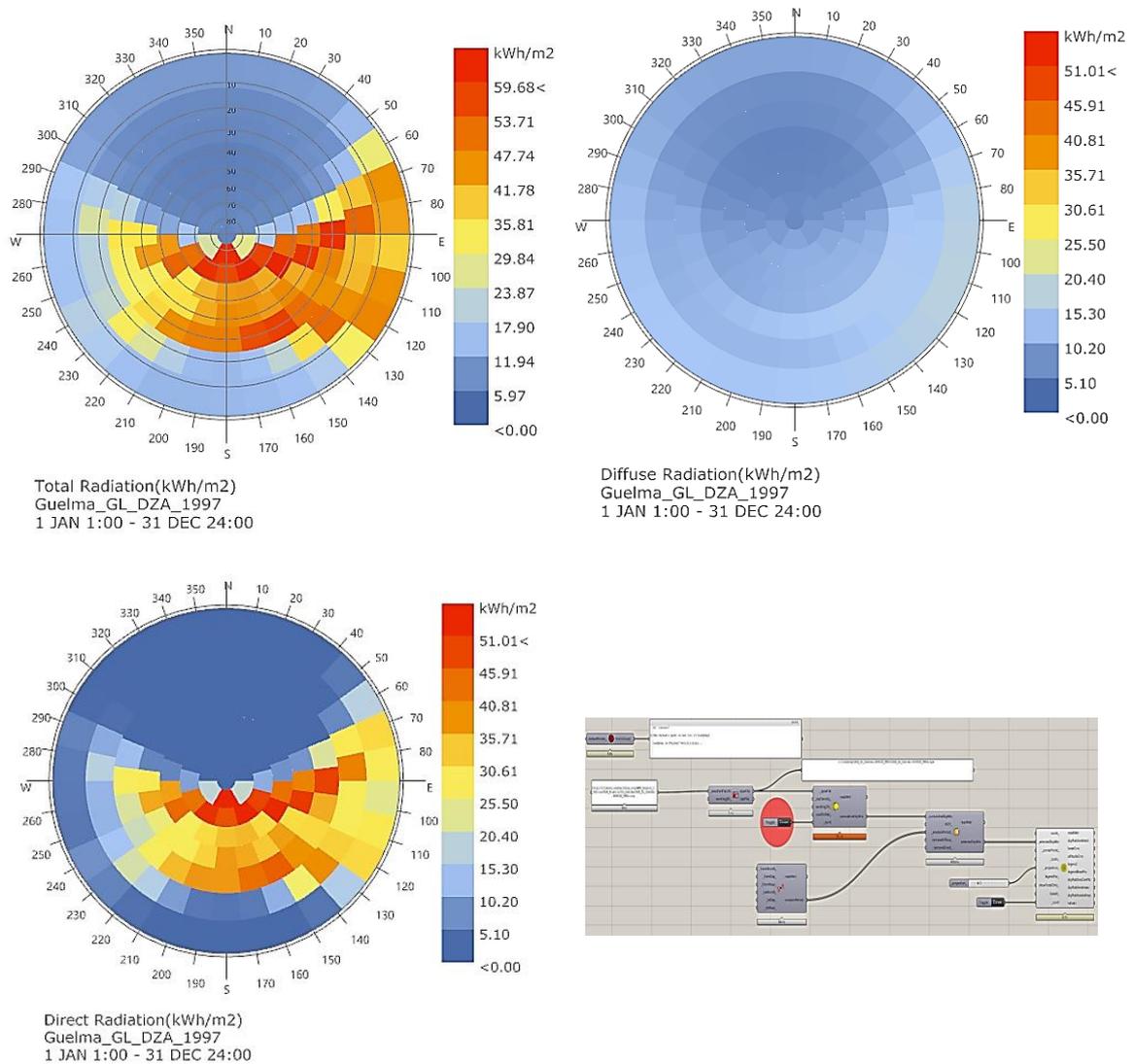


Figure. IV.6. Rayonnement solaire pour la ville de Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.

L'interprétation des résultats met en lumière des tendances saisonnières distinctes. Le rayonnement global est plus intense durant les mois d'été (juin, juillet, août), ce qui s'explique par une plus grande durée d'ensoleillement et un angle d'incidence des rayons solaires plus important. En revanche, cette valeur diminue en hiver (décembre, janvier, février), conséquence de jours plus courts et d'un angle d'incidence réduit. De plus, une légère asymétrie entre les hémisphères nord et sud est détectée, avec des valeurs plus élevées dans le sud, probablement en raison de la situation géographique de Guelma dans l'hémisphère nord.

Le rayonnement diffus se manifeste de manière notable tout au long de l'année, en particulier pendant les périodes nuageuses. Il atteint son apogée en hiver, période durant laquelle les nuages sont plus fréquents, tandis qu'il est plus faible en été, quand le ciel est généralement dégagé. Pour sa part, le rayonnement direct montre un comportement opposé, atteignant son maximum en été et son minimum en hiver. La nébulosité joue un rôle clé dans la répartition de ce type de rayonnement, les zones de faible couverture nuageuse correspondant à une intensité accrue du rayonnement direct.

IV.1.4. Analyse bioclimatique.

Réaliser une analyse bioclimatique dans une ville permet d'optimiser la conception des bâtiments et des espaces urbains en s'adaptant aux conditions climatiques locales, tout en réduisant la consommation d'énergie et en améliorant le confort des habitants. Cette approche favorise l'exploitation des ressources naturelles, telles que l'éclairage solaire et la ventilation naturelle, pour minimiser la dépendance aux systèmes énergétiques conventionnels. Elle contribue à la durabilité des constructions en choisissant des matériaux et des techniques adaptés, augmentant ainsi leur longévité et réduisant les coûts de maintenance. L'analyse bioclimatique aide également à anticiper les effets du changement climatique, en intégrant des stratégies pour rendre les villes plus résilientes face aux vagues de chaleur ou aux précipitations intenses, tout en réduisant l'effet d'îlot de chaleur urbain grâce à des solutions comme les toitures végétalisées et les espaces verts. De plus, elle permet une meilleure gestion des ressources naturelles, en optimisant l'utilisation de l'eau et en favorisant l'autonomie des quartiers en énergie. Enfin, cette démarche assure la conformité avec les normes environnementales et les réglementations thermiques, tout en soutenant les objectifs de réduction de l'empreinte carbone des villes et en créant des environnements urbains durables et résilients face aux défis climatiques futurs. (Yasmina BESBAS, 2019).

IV.1.4.1. Diagramme psychrométrique.

L'analyse du diagramme psychrométrique (voir figure IV.6) de la ville de Guelma offre une perspective claire des conditions climatiques locales, telles que la température, l'humidité et le point de rosée. Cet outil est précieux pour évaluer les niveaux de confort thermique, calibrer les besoins en climatisation, et comprendre les effets de l'humidité ambiante. La température sèche, présentée sur l'axe horizontal, correspond à la température mesurée sans prendre en compte l'humidité, tandis que l'humidité spécifique, affichée sur l'axe vertical, indique la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air. Les courbes d'enthalpie constante et les lignes de température de bulbe humide fournissent des informations supplémentaires sur l'énergie thermique et la saturation en eau de l'air. En ce qui concerne le confort thermique, le diagramme montre que dans un climat comme celui de Guelma, atteindre des conditions de confort est particulièrement difficile pendant la majeure partie de l'année en raison des grandes variations de température et de la faible humidité relative, caractéristiques des climats semi-arides. Le climat de Guelma est marqué par des périodes de sécheresse avec une humidité relative basse, ce qui accentue la sensation de chaleur lors des mois les plus chauds. D'un point de vue pratique, ce diagramme permet d'optimiser la conception des systèmes de climatisation, d'ajuster les besoins en irrigation dans l'agriculture, d'améliorer les procédés de séchage, et de concevoir des espaces intérieurs offrant un meilleur confort thermique. Néanmoins, il convient de souligner les limites de cet outil : bien qu'il présente un aperçu des conditions climatiques à un moment précis, il ne tient pas compte de facteurs externes comme le vent ou le rayonnement solaire, qui influencent également le confort thermique. L'échelle du diagramme peut parfois restreindre la précision nécessaire pour certaines applications. Pour enrichir l'analyse, il serait pertinent de comparer les données climatiques sur plusieurs années, d'intégrer d'autres indicateurs météorologiques tels que les précipitations et le rayonnement solaire, et d'explorer des modèles climatiques

prospectifs pour anticiper les impacts potentiels du changement climatique sur les conditions futures à Guelma.

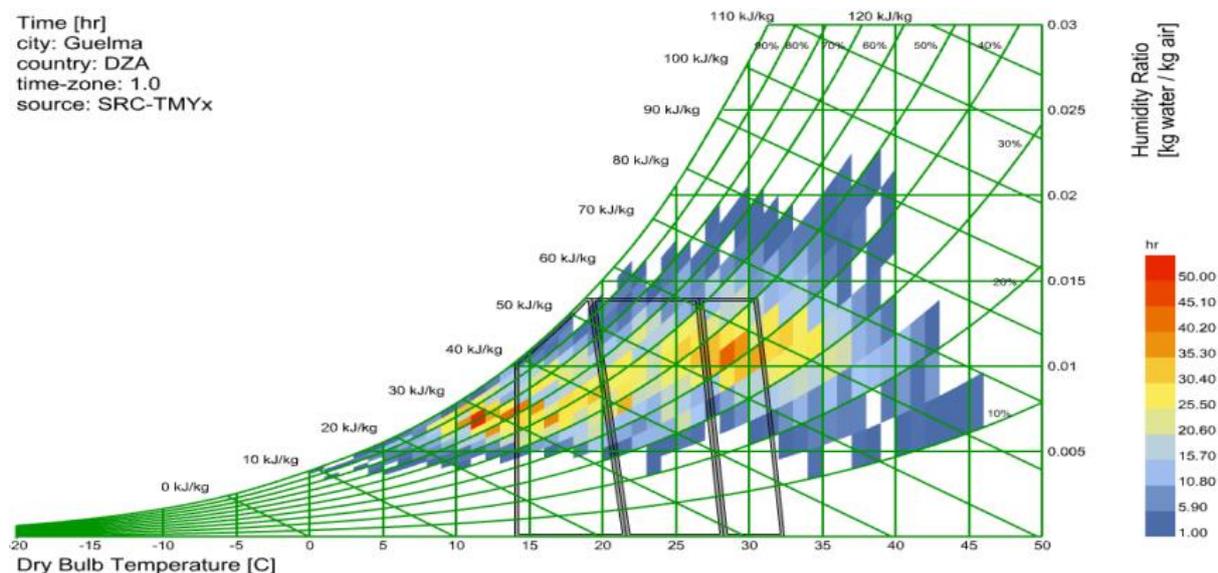


Figure IV.7. Diagramme psychométrique de la ville de Guelma. Source : Créé par l'auteur à l'aide du logiciel Grasshopper.

IV.1.4.2. Diagramme Ombrothermique.

Le diagramme ombrothermique présenté (voir figure IV.7) est un outil essentiel en climatologie, permettant de visualiser les variations mensuelles des températures et des précipitations d'une région spécifique. Il offre une synthèse des caractéristiques climatiques. La courbe des températures moyennes mensuelles révèle une amplitude thermique annuelle significative, avec des températures maximales durant les mois d'été (juillet et août) et des températures plus fraîches en hiver (janvier et février). En parallèle, les barres verticales illustrent les précipitations mensuelles, mettant en évidence une saisonnalité marquée, avec des précipitations concentrées en hiver et au printemps, tandis que l'été se caractérise par une sécheresse accrue. Ce diagramme indique clairement une saison sèche (été), durant laquelle l'évaporation potentielle dépasse les précipitations, et une saison humide (hiver et printemps). Ces caractéristiques sont représentatives d'un climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et pluvieux. L'alternance entre ces saisons a des répercussions notables sur la végétation, les sols et les activités humaines dans la région, soulignant l'importance des dynamiques climatiques locales dans l'aménagement du territoire et l'utilisation des ressources.

Chapitre IV

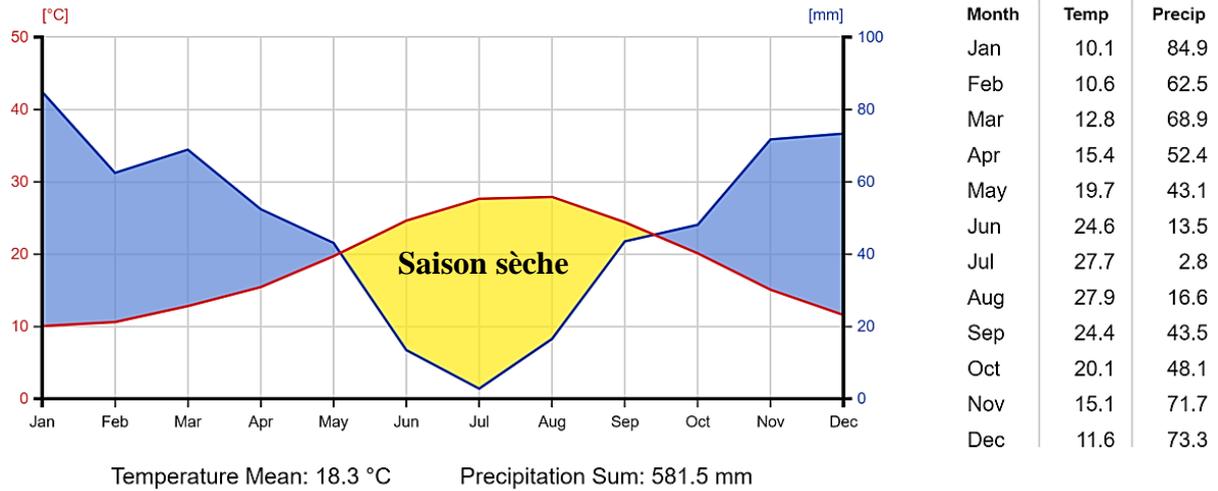


Figure IV.8. Diagramme Ombrothermique de la ville de Guelma. Source : climat charts³², données traitées par l'auteur.

IV.1.4.3. Carte thermique de Guelma.

La carte thermique de Guelma (voir figure IV.8) est un outil visuel essentiel pour représenter les variations de température sur une année. Elle utilise une palette de couleurs allant du rouge (températures élevées) au bleu (températures basses) pour identifier les périodes de chaleur intense et de froid. Les variations saisonnières sont marquées, avec des étés chauds et des hivers froids, et un cycle diurne qui montre des températures plus élevées en milieu de journée.

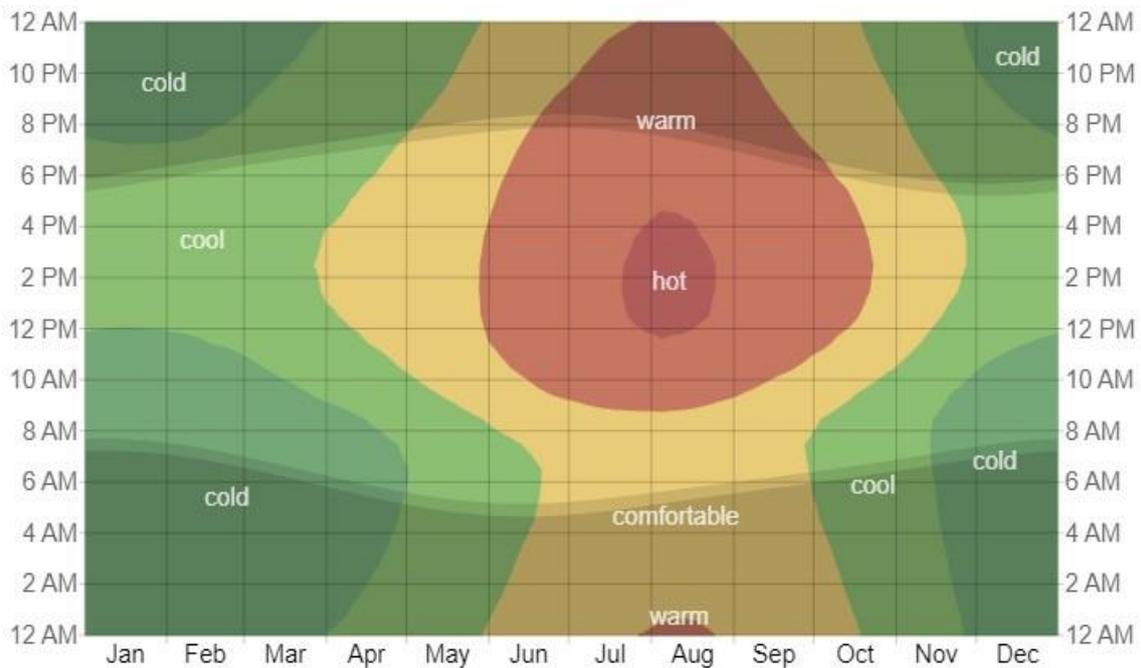


Figure IV.9. Carte thermique de la ville de Guelma. Source : Climat chart

Les zones en jaune et orange indiquent des températures agréables, correspondant à des zones de confort thermique, tandis que le rouge signale des conditions de surchauffe. En résumé, cette

³² Climat Chart.net, <https://climatecharts.net/>, Consulté le : 26/07/2024.

carte aide à planifier des activités, optimiser la consommation d'énergie, et comprendre les tendances climatiques locales, tout en identifiant les zones de confort et de surchauffe essentielles au bien-être des habitants.

IV.1.5. Typologies de l'habitat collectif en Algérie.

IV.1.5.1. Évolution de l'habitat collectif en Algérie.

Selon la thèse de (Amira et al., 2022). En Algérie, le logement collectif a vu le jour durant la période coloniale française, entre 1950 et 1962, à travers la construction d'ensembles d'habitation en hauteur tels que les HBM (Habitation à bon marché) et les HLM (Habitation à loyer modéré), destinés en priorité aux populations européennes. Ces projets d'habitat étaient principalement concentrés dans les zones urbaines et visaient à répondre aux besoins de logement des classes sociales européennes résidant en Algérie. Cependant, l'idée de développer des logements sociaux pour la population locale se heurtait à des obstacles structurels, notamment l'absence de législations adaptées et les coûts élevés des terrains nécessaires à la construction de ces ensembles.

Après l'indépendance en 1962, l'Algérie a dû faire face à une crise du logement sans précédent, accentuée par une forte croissance démographique et un exode rural massif vers les zones urbaines. Cette situation a poussé les autorités à chercher des solutions rapides et massives pour absorber le déficit en logements, en continuant les modèles occidentaux de préfabrication lourde qui avaient été importés. Malgré la volonté de répondre à cette crise par la construction de logements en quantité, ces approches ont souvent échoué à garantir une qualité de vie satisfaisante pour les résidents. Comme le souligne Haridi (2007), cité par (Amira et al., 2022)

En 1975, pour répondre à l'urgence de la demande en logements, les zones d'habitat collectif (ZHUN) ont commencé à proliférer à la périphérie des villes. Inspirées des zones françaises ZUP (zones à urbaniser en priorité), ces nouvelles zones visaient à produire des logements en masse, en privilégiant la rapidité d'exécution. Toutefois, cette approche axée sur la quantité a souvent conduit à la construction de quartiers d'une qualité médiocre, qui manquaient de confort et de services adéquats. Ces zones ont rapidement été associées à des problèmes de ségrégation sociale, transformant les espaces résidentiels collectifs en des lieux de dépaysement pour les habitants, loin des promesses initiales de créer des centres de vie dynamiques et intégrés. En outre, ces projets ont profondément modifié le paysage urbain algérien, tant au niveau social qu'environnemental. Le développement rapide et souvent mal planifié de ces zones a bouleversé les structures sociales et économiques des villes, tout en contribuant à une ségrégation accrue entre les différents groupes sociaux. Les espaces résidentiels collectifs, au lieu d'être des solutions viables pour tous, sont devenus des symboles de disparités sociales, avec un impact durable sur le tissu urbain algérien. Comme le souligne Haridi (2007), cité par (Amira et al., 2022).

IV.1.5.2. Description des principaux types de logements collectif résidentiels.

Dans le cadre de l'étude des conditions de logement en Algérie, il est essentiel d'examiner les différents types de logements disponibles, leurs caractéristiques et leur impact sur les ménages. En s'appuyant sur les recherches menées par (Amira et al., 2022; Mehibel, Mia, 2018.), le tableau ci-dessous (Tableau IV.1) présente une description détaillée des principaux types de

Chapitre IV

logements en Algérie. Chaque catégorie est analysée en termes de conditions, de caractéristiques et de modalités d'accès, offrant ainsi une vue d'ensemble des politiques et des initiatives visant à améliorer l'accès au logement pour les différentes couches de la population.

Tableau IV.1. Type de logement en Algérie. Source : données collectées et analyse personnelle inspirées des travaux (Amira et al., 2022 ; Mehibel, Mia, 2018.)

Type de Logement	Description	Conditions et Caractéristiques
Logement aidé ou participatif	Ce type de logement est construit ou acquis grâce à un soutien financier de l'État, facilitant ainsi l'accès à la propriété pour les ménages à revenus intermédiaires.	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie moyenne : Environ 40 m², avec un espace habitable variant entre 50 et 70%. - Coût : Supérieur à 1 600 000 dinars (environ 16 000 euros). - Modes de réalisation : Intégré dans des programmes de logements collectifs, semi-collectifs ou individuels, il vise à garantir l'accessibilité et la diversité des options offertes.
Logement évolutif	Conçu avec une construction initiale d'une ou deux chambres, ce logement inclut un terrain destiné à des extensions futures, répondant ainsi aux besoins changeants des familles.	<ul style="list-style-type: none"> - Extension : Les bénéficiaires ont la possibilité d'agrandir leur logement en fonction de l'évolution de leurs besoins, ce qui contribue à une amélioration continue de leur cadre de vie. - Construction : L'État s'occupe principalement de la superstructure (dalles et poteaux), tandis que le reste des travaux est à la charge du bénéficiaire, favorisant ainsi son implication dans le projet.
Logement participatif	Ce modèle implique la contribution financière de la Caisse Nationale du Logement (CNL), facilitée par l'État pour soutenir la réalisation de logements.	<ul style="list-style-type: none"> - Montant de participation : L'État contribue avec des montants variant de 30 000 à 70 000 dinars, en fonction de la nature du projet. - Remboursement : La participation de l'État est soumise à des modalités de remboursement spécifiques, permettant aux bénéficiaires d'accéder à des logements à coût réduit tout en préservant la viabilité financière de l'ensemble du programme.
Programme de logement social locatif	Établi par le décret exécutif n° 01-105 du 23 avril 2001, ce programme cible les familles à faible revenu vivant dans des conditions précaires.	<ul style="list-style-type: none"> - Critères d'accès : Réservé aux ménages dont le revenu mensuel ne dépasse pas cinq fois le salaire national minimum garanti (SNMG) et qui n'ont pas bénéficié d'un logement public ou d'aides au logement auparavant. - Aide de l'État : Les bénéficiaires peuvent recevoir jusqu'à 500 000 dinars sous forme de don non remboursable, facilitant ainsi leur accès au logement.
Programmes de location-vente	Ce modèle permet aux ménages d'acquérir un bien immobilier à travers des paiements échelonnés, rendant ainsi l'accession à la propriété plus accessible.	<ul style="list-style-type: none"> - Institutions financières : Inclut la CNEP, le CPA, la BDL, l'ALGERU, et l'AADL, chacune jouant un rôle spécifique dans le soutien à la production de logements. - Conditions de financement : Les prêts sont adaptés en fonction des revenus des ménages, avec des taux d'intérêt variant

		selon que le bénéficiaire est épargnant ou non.
Habitat collectif promotionnel	Chaque bénéficiaire est responsable du financement de son logement, qu'il soit public ou privé, contribuant ainsi à la diversité de l'offre de logements.	- Habitat promotionnel public : Initié par des organismes publics, ces programmes visent à assurer la qualité des constructions dans le cadre de la promotion publique. - Habitat promotionnel privé : Impliquant des promoteurs privés, ce type d'habitat répond à la demande de logements en garantissant et en finançant la construction d'immeubles de qualité.

IV.1.5.3. Logements sociaux : conception et défis.

IV.1.5.3.1. Défis et évolution des exigences du logement social collectif en Algérie.

L'Algérie a rencontré des difficultés persistantes pour offrir des logements adéquats à sa population, principalement en raison des obstacles économiques, sociaux et politiques. En réponse, l'État a mis en place différents modèles de logements, tels que les logements évolutifs et le logement social locatif. Cependant, ce dernier a connu de graves problèmes, avec un écart croissant entre la forte croissance démographique et la production de nouvelles habitations. Cela a engendré une double crise : d'une part, la demande en logements dépasse largement l'offre, et d'autre part, les conceptions de ces logements négligent souvent les besoins réels des occupants. (Hadda, 2015).

(Hadda, 2015) souligne également que la crise du logement en Algérie ne se résume pas à un simple déséquilibre entre l'offre et la demande ; elle révèle une déconnexion plus profonde entre la qualité des logements construits et les besoins réels des résidents. De nombreux projets de logements manquent d'infrastructures essentielles, ce qui a entraîné des dysfonctionnements dans les quartiers concernés. Malgré les interventions de l'État, les projets de logements n'ont souvent pas atteint les objectifs tant sur le plan quantitatif que qualitatif. La transition vers une économie de marché a encore aggravé la situation, réduisant les investissements publics dans le logement social collectif, laissant ainsi les populations à faibles revenus en difficulté pour accéder à un logement décent. (Hadda, 2015)

De plus, les initiatives de l'État dans ce domaine ont constamment ignoré l'évolution des besoins de la population. Avec la diminution de la taille des ménages et l'augmentation du nombre de personnes vivant seules, le parc de logements actuel n'est plus adapté. Le sociologue Chombart de Lauwe souligne que la crise du logement ne résulte pas uniquement de contraintes économiques ou techniques, mais d'une incapacité à répondre aux nouveaux besoins de la société. Pour remédier à cette situation, il est crucial de mieux comprendre ces exigences émergentes et de concevoir des logements qui répondent aux attentes actuelles et futures en matière de confort et de satisfaction.

IV.1.5.3.2. Principaux enjeux liés au confort thermique et visuel dans ces logements.

La question des logements sociaux en Algérie est marquée par des défis importants en matière de confort thermique et visuel, qui influencent directement la qualité de vie des résidents. L'uniformité architecturale et la standardisation des constructions conduisent à une uniformité visuelle qui affecte l'identité des quartiers. Comme l'indique l'architecte Khaled Bencheikh, « l'homogénéité des ensembles d'habitation crée une perception négative de l'espace urbain » (Bencheikh, 2018). Ce constat est particulièrement préoccupant dans un pays où les besoins résidentiels sont en constante évolution.

La conception des logements sociaux, souvent réalisée sans tenir compte des particularités climatiques de l'Algérie, constitue un obstacle majeur au confort thermique. Les problèmes d'isolation entraînent une surconsommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation. Selon le rapport du Ministère de l'Habitat, « près de 60 % des ménages algériens rencontrent des difficultés pour maintenir une température intérieure confortable » (rapport national de mise en œuvre 2021). Il est crucial d'intégrer des systèmes de ventilation naturels dans les conceptions architecturales afin d'améliorer la circulation de l'air et d'assurer une qualité de l'air intérieur satisfaisante.

De plus, le choix de matériaux de construction adéquats joue un rôle essentiel dans la régulation thermique des habitations. Des études montrent que l'utilisation de matériaux avec de bonnes propriétés d'isolation thermique peut considérablement réduire les coûts énergétiques (Semahi & Djebri, 2023). Ainsi, le choix des matériaux doit être soigneusement considéré, car il a un impact direct sur le confort des occupants.

Le confort visuel est également affecté par les choix architecturaux. L'optimisation de l'entrée de la lumière naturelle dans les logements est fondamentale pour diminuer la dépendance à l'éclairage artificiel. Comme l'affirme le designer urbain Amine Ziani, « *la lumière naturelle est une question non seulement d'esthétique, mais aussi de bien-être psychologique pour les habitants* » (Nadji Maachi et al., 2019). Par conséquent, l'orientation des bâtiments doit être réfléchie pour maximiser l'ensoleillement tout en minimisant les éblouissements.

En conclusion, l'amélioration du confort thermique et visuel dans les logements sociaux en Algérie nécessite une approche intégrée qui prend en compte les spécificités climatiques, les matériaux de construction, l'optimisation de la lumière naturelle et l'adaptation des conceptions aux besoins des utilisateurs. Une telle démarche pourrait non seulement améliorer la qualité de vie des habitants, mais également contribuer à un développement urbain plus durable et harmonieux. Une réévaluation des normes architecturales et une collaboration étroite avec les communautés locales sont essentielles pour créer des espaces de vie qui répondent véritablement aux attentes des résidents.

IV.1.5.4. Logements collectifs à Guelma.

L'analyse typologique de l'habitat à Guelma révèle une grande diversité de formes résidentielles, reflétant les dynamiques historiques, géographiques et économiques de la ville. Le centre-ville, hérité de l'époque coloniale, est dominé par des villas pavillonnaires et des immeubles à plusieurs étages, conçus selon des principes d'urbanisme rigoureux, avec des infrastructures de qualité, des rues bien tracées et un plan orthogonal. À l'origine à vocation résidentielle, ce noyau colonial connaît aujourd'hui une transformation progressive avec la

conversion des logements en bureaux et commerces, renforçant ainsi son rôle de centre d'affaires. Cette mutation fonctionnelle s'accompagne toutefois de problèmes de densification excessive, de gestion des flux de circulation et de dégradation des espaces publics, en raison de l'absence de politiques de préservation patrimoniale. (Amira et al.,2022)

Selon (Cheraitia & Makhlouf, 2018) l'urbanisation présente un développement moins structuré. L'habitat individuel spontané, souvent qualifié d'informel, s'est largement développé sans planification préalable, notamment dans les quartiers situés au nord et à l'ouest d'Oued Skhoun, tels que Bourara, Benchehib, Hadj Embarek et Bourdjiba. Ces zones se caractérisent par une densité élevée de logements, une absence d'infrastructures de base, et une occupation non régularisée des sols, souvent en dehors des normes urbanistiques. Ces quartiers souffrent d'un manque de réseaux d'assainissement, de routes non asphaltées et d'un accès limité aux services publics, mettant en lumière l'insuffisance du contrôle exercé par les autorités compétentes.

(Amira et al., 2022.) Elle a souligné, qu'à partir des années 1980, des projets d'habitat individuel planifié ont vu le jour à travers des lotissements structurés, principalement au nord et au sud de l'agglomération, comme le lotissement du 19 juin. Ces lotissements ont permis de répondre à une demande croissante en logements et sont caractérisés par une voirie bien définie, des réseaux d'eau et d'électricité, ainsi que des espaces réservés aux équipements publics, bien que leur mise en œuvre ait parfois souffert de retards ou d'incohérences.

L'habitat collectif, introduit à Guelma dans les années 1970 à travers des opérations de logements sociaux, a joué un rôle déterminant dans l'urbanisation. Les premières ZHUN (Zones d'Habitat Urbain Nouvelles), telles que Ain Defla, Champ de Manœuvre et Guehdour-Tahar, ont constitué les premiers ensembles de logements collectifs de grande envergure, planifiés selon les normes de densité, de ventilation naturelle et d'ensoleillement. Toutefois, ces ensembles ont souvent souffert d'un manque d'entretien, entraînant une dégradation progressive du bâti. (Amira et al.,2022)

À partir de 1996, de nouvelles formules de logements collectifs, comme le LSP (Logement Social Participatif) et l'AADL (Agence de l'Amélioration et du Développement du Logement), ont vu le jour dans les nouvelles zones périphériques de Guelma, notamment à « Calama » et « Hedjer Mangoub ». Ces projets plus modernes disposent d'infrastructures mieux adaptées aux besoins actuels, comme des réseaux de transport, des écoles et des équipements sanitaires. Cependant, leur intégration urbaine a été critiquée pour leur éloignement des centres d'activités et leur connexion insuffisante avec les réseaux de transport urbain. (Cheraitia & Makhlouf, 2018).

L'analyse de l'habitat à Guelma ne peut être complète sans aborder les statistiques récentes et les dynamiques actuelles de la population et du logement. Au 31 décembre 2019³³, le parc de logements de la wilaya est estimé à 143 347 unités pour une population de 556 671 habitants, ce qui correspond à un taux d'occupation de 3,88 habitants par logement. Ce chiffre révèle un

³³ Intérieur Gov.dz, <https://interieur.gov.dz/>, consulté le 25/09/2024.

certain équilibre, bien que des segments d'habitat témoignent de disparités importantes dans la répartition et la qualité des logements.

Les statistiques indiquent une prédominance des logements publics, avec 80 420 unités, suivis par les logements privés qui comptent 62 927 unités. Cependant, des logements précaires, au nombre de 729, persistent, soulignant l'urgence de la régularisation foncière et de l'amélioration des conditions de vie dans certaines zones défavorisées. D'autres programmes tels que l'AADL (300 logements) et les logements sociaux (21 926 unités) jouent un rôle essentiel dans la réduction du déficit en matière de logement pour les populations à revenu moyen et faible. L'habitat rural représente également une part significative du parc, avec 34 682 unités, témoignant de l'importance du secteur rural dans la région.

L'urbanisme, quant à lui, est marqué par le développement de nouvelles villes et zones d'expansion urbaine pour faire face à la pression démographique et au besoin croissant en logements. Trois nouveaux pôles urbains ont ainsi été planifiés dans le cadre des nouveaux schémas d'occupation des sols. La zone POS Sud et Sud extension, située dans la commune de Guelma, s'étend sur 215 hectares et comprend un total de 10 939 logements. À Hdjar Mengoub, dans la commune de Belkheir, une superficie de 152 hectares est consacrée à la construction de 7 313 logements. Enfin, le pôle de Djebel Ansel, dans la commune d'Oued Zenati, occupe une superficie de 128 hectares, avec un programme de 4 250 logements. Ces projets de développement visent à structurer l'urbanisation future de la région, tout en répondant aux besoins de logement et en intégrant des infrastructures modernes.³⁴

IV.4.3.3. Pourquoi le logement social collectif à Guelma ?

Le choix de Guelma comme cas d'étude pour les logements sociaux repose sur plusieurs raisons socio-économiques, urbaines et environnementales, qui rendent cette ville particulièrement intéressante pour analyser les politiques d'habitat en Algérie. Le logement social collectif, dans le contexte algérien, occupe une place centrale dans le secteur de l'habitat national. Il représente 31 % des constructions résidentielles multifamiliales, ce qui en fait l'une des typologies d'habitat les plus répandues à l'échelle nationale. De plus, le parc de logements publics s'accroît chaque année, confirmant le rôle crucial de ces infrastructures dans la satisfaction des besoins en logement, notamment pour les populations à faible revenu.

En parallèle, le secteur du bâtiment en Algérie est le plus grand consommateur d'énergie fossile, et les bâtiments résidentiels en représentent la part la plus importante avec 37 % (*bilan énergétique 2022*). Cela fait du logement social collectif un sujet incontournable pour toute étude visant à améliorer la performance énergétique des bâtiments en Algérie. Étudier les logements sociaux à Guelma permet d'analyser les spécificités locales en matière de consommation d'énergie et d'envisager des solutions adaptées aux réalités climatiques et géographiques de cette région.

Au 31 décembre 2019, le parc de logements à Guelma était estimé à 143 347 unités pour une population de 556 671 habitants, soit un taux d'occupation de 3,88 habitants par logement. Ce parc se répartit comme suit :

³⁴ Intérieur Gov.dz, <https://interieur.gov.dz/>, consulté le 25/09/2024.

Logements publics : 80 420 Logements

Logements privés : 62 927 Logements

Logements précaires : 729 Logements

Logements AADL : 300 Logements

Logements sociaux : 21 926 Logements

Logements ruraux : 34 682 Logements

Ces chiffres montrent que Guelma offre une diversité de typologies de logements, et que les logements sociaux représentent une part significative de l'offre. Cela en fait un cas pertinent pour étudier l'efficacité des politiques publiques dans ce domaine. Analyser l'impact des projets de logements sociaux à Guelma permet d'évaluer leur intégration dans le tissu urbain, leur influence sur les dynamiques sociales locales et la qualité de vie des résidents. Ces aspects sont cruciaux pour comprendre les défis liés à la construction et à la gestion de ces logements.

En outre, les transformations urbanistiques récentes de Guelma constituent un terrain favorable à l'étude des projets d'habitat social dans un contexte de développement urbain en pleine mutation. Il est important d'évaluer comment ces projets affectent non seulement l'aménagement du territoire, mais aussi les interactions sociales entre les habitants des nouveaux logements. Cette dimension sociale, couplée à l'analyse des infrastructures de services associées, permet de mieux cerner les faiblesses et les opportunités pour améliorer les futurs projets de logements sociaux.

Guelma, en tant que ville au patrimoine architectural et culturel riche, présente également un intérêt particulier dans le cadre de cette étude. L'examen de la manière dont les nouveaux logements s'intègrent dans l'identité locale, tout en respectant les normes contemporaines de confort et de durabilité, est essentiel pour un développement urbain équilibré. Avec les défis croissants liés au changement climatique, il est crucial d'analyser la performance environnementale des logements sociaux de Guelma, en particulier leur efficacité énergétique et leur résilience face aux aléas climatiques.

En somme, choisir les logements sociaux à Guelma comme cas d'étude se justifie par les multiples enjeux socio-économiques, environnementaux et urbanistiques qu'ils soulèvent. Cette recherche permet de mieux comprendre les défis actuels du logement en Algérie et d'apporter des recommandations pour la mise en œuvre de politiques plus adaptées, durables et centrées sur le bien-être des habitants.

IV.2. Choix méthodologique et analyse de l'échantillon d'étude.

Les ensembles de logements sociaux situés dans la ville de Guelma ont été retenus en tant qu'objet d'étude, en raison de leur représentativité comme échantillon pertinent permettant d'analyser les conditions de confort et les caractéristiques architecturales spécifiques au contexte du logement social collectif.

Le travail de terrain a débuté par une phase d'investigation prospective visant à recenser l'ensemble des projets de logements sociaux dans la ville. Le choix de se focaliser sur les projets

les plus récents de logements sociaux à Guelma s'explique par la nécessité d'analyser les réponses aux défis contemporains en matière d'habitat. Ces constructions récentes témoignent des besoins actuels des habitants en matière de confort et d'adaptation aux spécificités locales. L'analyse de ces projets permet d'évaluer les solutions architecturales mises en œuvre pour répondre à des problématiques telles que l'accessibilité, l'intégration sociale et l'amélioration des conditions de vie, des aspects souvent moins bien représentés dans les constructions plus anciennes. Par ailleurs, ces nouveaux bâtiments constituent un terrain d'étude pertinent pour explorer les pratiques actuelles de planification urbaine et d'aménagement, tout en éclairant les évolutions des attentes des usagers.

Cette étape a impliqué une collecte d'informations préliminaires incluant des visites d'archives et des consultations auprès des autorités locales pour obtenir des plans architecturaux et des documents techniques. Une analyse typologique a ensuite été réalisée pour classifier les différents ensembles selon leur période de construction et les stratégies architecturales employées.

Pour approfondir l'analyse, des visites sur site ont été menées dans les quatre cités de logements sociaux les plus récemment construites à Guelma. Ces cités ont été sélectionnées en raison de leur représentativité par rapport à l'ensemble du parc de logements sociaux de la ville. Au cours de ces visites, des relevés architecturaux ont été effectués afin de compléter les informations manquantes provenant des documents graphiques. Des photographies ont également été prises pour documenter l'état actuel des bâtiments et des infrastructures environnantes, permettant ainsi de capturer les conditions de vie réelles des résidents.

Cette analyse préliminaire visait à établir une base solide pour la suite de l'étude, en identifiant les éléments architecturaux et environnementaux clés influençant le confort thermique et visuel dans ces logements. Le but était de sélectionner un échantillon de bâtiments représentatif, afin de servir de corpus pour les analyses plus poussées sur les performances environnementales et les solutions paramétriques pouvant être envisagées dans le cadre de la réhabilitation ou de la conception future de logements sociaux à Guelma. Finalement, quatre cités de logements sociaux ont été visitées et étudiées en profondeur, ce qui a permis d'obtenir une vue d'ensemble des défis et opportunités dans le domaine du logement social collectif dans la région (Figure IV.9).

Pour évaluer les particularités de chaque bâtiment analysé, divers critères ont été adoptés, incluant la configuration des structures, les caractéristiques architecturales des logements, ainsi que les spécificités des fenêtres. Ces éléments jouent un rôle crucial dans la performance et le confort des habitations. Par exemple, la configuration des bâtiments influe sur leur exposition au soleil et la circulation de l'air, affectant ainsi le confort thermique des occupants. Les propriétés architecturales, telles que la hauteur sous plafond et la disposition des pièces, contribuent également à la qualité de vie des résidents. De même, les caractéristiques des fenêtres, comme leur taille, leur type de vitrage et leur orientation, sont déterminantes pour la lumière naturelle entrant dans les espaces de vie et pour l'efficacité énergétique du bâtiment.

Chapitre IV

En se basant sur ces critères, le Tableau IV.2 offre une représentation claire des spécificités observées dans chaque bâtiment, permettant une compréhension approfondie des facteurs influençant leur performance environnementale et leur adéquation aux normes de confort. L'analyse de ces éléments est essentielle pour formuler des recommandations visant à améliorer la qualité des logements, tant du point de vue de la conception que de la durabilité.

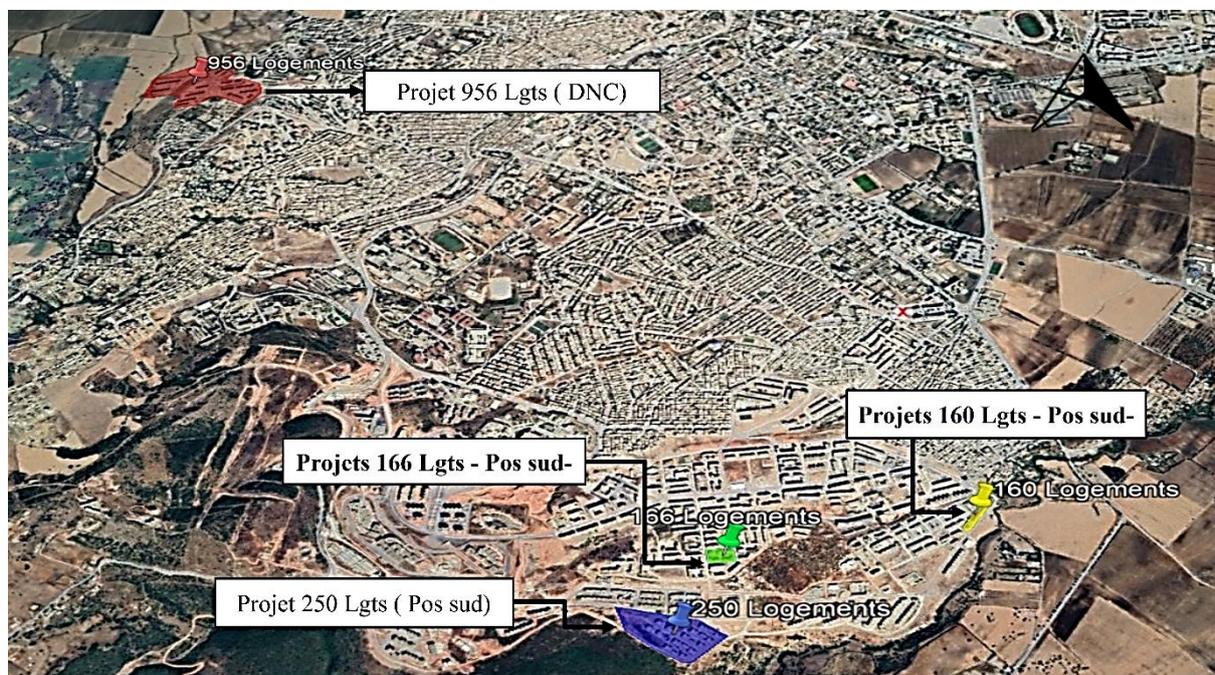


Figure IV.10. Localisation des sites choisis sur la carte de la ville de Guelma. Source : Google Earth traité par l'auteur, 2024).

Tableau IV.2. Critères d'analyse typologique des logements. Source : Auteur.

Le bâtiments	Les pièces (Séjour/ Chambre/ Cuisine)	Les Fenêtres
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Année de construction ▪ Typologie ▪ Nombre des étages ▪ Orientation de bâtiment ▪ Forme de Bâtiment ▪ Matériaux de construction 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Orientation du Fenêtres ▪ Epaisseur des murs extérieurs ▪ Couleur des murs intérieurs et extérieurs ▪ La géométrie des pièces 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hauteur des fenêtres ▪ Position Horizontal ou Verticale ▪ Protection solaire ▪ Type de vitrage ▪ Forme de la fenêtre ▪ Surface Fenêtres ▪ Ratio Fenêtres/ Plancher ▪ Ratio Fenêtres/ murs extérieurs

Après avoir examiné les cahiers de charges des quatre cités de logements sociaux, un tableau récapitulatif des exigences techniques et architecturales a été établi. Ce tableau présente les

Chapitre IV

critères relatifs aux hauteurs sous plafond, aux dimensions des pièces, à l'éclairage, à la ventilation, ainsi qu'à d'autres aspects essentiels à respecter lors de la construction de ces logements. Il constitue un outil utile pour comprendre les normes qui régissent la conception et la construction de logements sociaux dans la ville de Guelma. (Voir Annexe B).

L'analyse typologique des diverses configurations des blocs de logements sociaux, ainsi que des caractéristiques des appartements et des fenêtres (Tableau IV.3), permet d'effectuer une comparaison entre les exemples étudiés et de dégager des catégories et des types prédominants. Cette approche facilite la sélection des logements à considérer comme cas d'étude, en identifiant ceux qui répondent le mieux aux objectifs de la recherche.

Modèle 1 : Projet de 956 logements.

Ce modèle, qui comprend 956 logements, souffre d'un manque de confort et de durabilité, ne répondant pas adéquatement aux besoins des résidents en termes de qualité de vie.

Modèle 2 : Projet de 166 logements.

Le projet de 166 logements met en lumière des insuffisances en matière de durabilité et de bien-être, laissant les habitants insatisfaits de leurs conditions de vie.

Modèle 3 : Projet de 160 logements.

Avec 160 logements, ce modèle présente des défauts en matière de confort et d'adaptabilité, ne garantissant pas un environnement de vie propice au bien-être.

Modèle 4 : Projet de 250 logements.

Bien que ce projet de 250 logements soit ambitieux, il néglige les aspects essentiels de confort et de durabilité, compromettant ainsi le bien-être des futurs résidents.

Tableau IV.3. Analyse typologique des différentes configurations des ensembles de logements sociaux. Source : Auteur.

Critères	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
Situation	Nord-est de la ville de Guelma	Pos sud.	Pos sud.	Pos sud.
Année de construction	2021	2007	2017	2008
Typologie	Appartement T3	Appartement T4	Appartement T3	Appartement T3
Nombre d'étages	5	5	5	5
Orientation de bâtiment	Nord-est	Nord-est	Sud-Est	Nord-ouest
Forme de Bâtiment	Rectangulaire	Rectangulaire	L-forme	Rectangulaire
Matériaux de construction	Béton, parpaing	Béton, parpaing	Béton, parpaing	Béton, parpaing
Orientation des Fenêtres	Nord-est	Ouest, Nord	Est, Sud	Sud
Épaisseur des murs extérieurs	30 cm	25 cm	30 cm	25 cm

Chapitre IV

Couleur des murs intérieurs	Blanc	Beige	Jaune	Blanc
Couleur des murs extérieurs	Blanc	Beige	Gris	Beige
Géométrie des pièces	Rectangulaire	Quadratique	Rectangulaire	Rectangulaire
Hauteur des fenêtres	1,20 m	1,20 m	1,30 m	1,20 m
Position (Horizontal ou Verticale)	Verticale	Verticale	Horizontale	Verticale
Protection solaire	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Type de vitrage	Simple vitrage	Simple vitrage	Simple vitrage	Simple vitrage
Forme de la fenêtre	Rectangulaire	Carrée	Rectangulaire	Rectangulaire
Nombre de fenêtres par pièce.	1	1	1	1
Surface des fenêtres	2 m ²	1 m ²	1,5 m ²	2 m ²
Ratio Fenêtres/Plancher	1/8	1/6	1/10	1/8
Ratio Fenêtres/Murs extérieurs	1/5	1/4	1/6	1/5

IV.2.1. Synthèse des résultats de l'analyse typologique.

L'étude d'un seul bâtiment pour représenter des logements sociaux similaires à Guelma est justifiée par plusieurs raisons. Tout d'abord, ces bâtiments partagent des caractéristiques architecturales, structurelles et fonctionnelles homogènes, permettant ainsi d'extrapoler les données obtenues à d'autres modèles. Cela réduit significativement les coûts et le temps nécessaires à la réalisation de simulations, car une étude approfondie d'un seul bâtiment est plus efficace que des analyses multiples. De plus, des recherches antérieures démontrent que les résultats d'une étude de cas peuvent être représentatifs d'une typologie entière, renforçant l'idée qu'une analyse approfondie sur un bâtiment spécifique fournit des informations pertinentes pour d'autres. En concentrant l'effort sur un modèle, on facilite également l'utilisation des outils de simulation, rendant l'analyse des performances thermiques et visuelles plus précise. Cette approche permet d'affiner les paramètres de simulation, évitant ainsi les complications liées à la diversité des configurations. En outre, l'analyse détaillée des données d'un seul bâtiment offre des insights précieux qui pourraient être perdus dans une étude de plusieurs bâtiments. Enfin, les résultats obtenus peuvent servir de base pour développer des stratégies de conception applicables à d'autres projets, en incluant des recommandations sur les matériaux, l'orientation, et d'autres aspects impactant le confort thermique et visuel. En somme, cette approche permet de gagner en efficacité tout en assurant la validité des résultats pour l'ensemble des logements sociaux étudiés.

IV.3. Cas pratique : intégration dans un bâtiment sélectionné.

IV.3.1. Présentation de l'étude de cas.

Le bâtiment de l'étude de cas fait partie d'un complexe de logements résidentiels collectifs connu sous le nom de Logement Social collectif LPL, situé à Guelma, en Algérie. Le complexe résidentiel a des coordonnées géographiques spécifiques, incluant une latitude de 36°46'2"

Chapitre IV

Nord, une longitude de $7^{\circ}40'6''$ Est, et une élévation de 228 mètres au-dessus du niveau de la mer. La région bénéficie d'un climat méditerranéen chaud et est classée selon la classification de Köppen comme Csa. (Updated World Köppen-Geiger Climate Classification Map, 2007).

L'étude est basée sur un complexe résidentiel de 956 logements, qui est divisé en 32 bâtiments de cinq étages, avec quatre appartements résidentiels à chaque étage. Comme illustré dans (la Figure IV.10), chacun de ces appartements couvre une superficie de 72 mètres carrés et est composé de deux chambres, d'un salon, d'une cuisine, d'un couloir et de deux salles de bains. En raison du temps de simulation et de la symétrie du bâtiment, ainsi que pour évaluer l'impact des différents niveaux de plancher, nous avons choisi de concentrer notre recherche sur trois pièces (Pièce 1, 2, et 3) situées dans trois appartements différents du même bâtiment, l'un au troisième étage, l'autre au rez-de-chaussée, et le dernier au dernier étage. Ces deux derniers sont les étages les plus affectés par les facteurs environnementaux externes. De plus, les pièces sélectionnées sont orientées vers le nord-est et ont un agencement identique, mais varient en hauteur par rapport au sol. L'annexe C détaille les plans et les façades de bâtiment sélectionné.

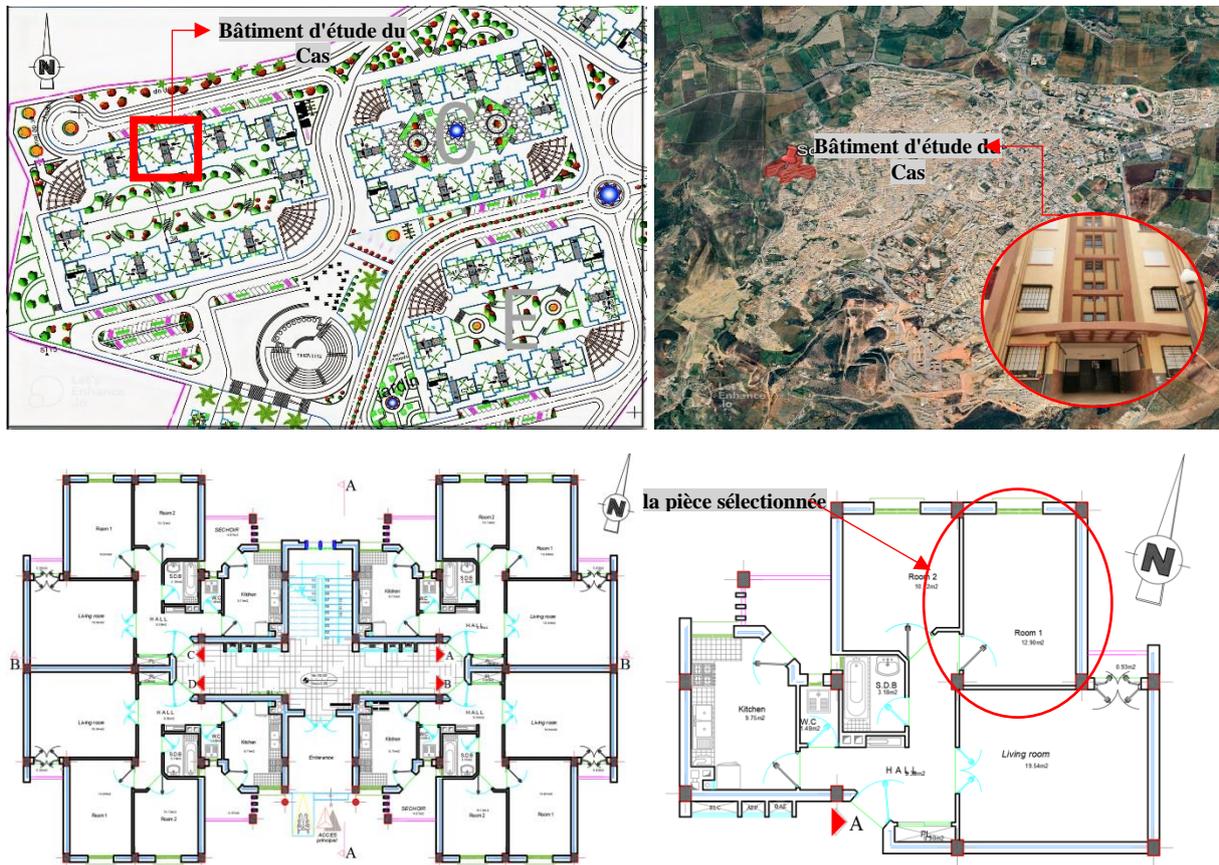


Figure IV.11. (a) Plan de situation du bâtiment, (b) Localisation de l'étude de cas, (c) Plan du bâtiment étudié, (d) Plan de l'appartement étudié.

IV.3.2. Procédure expérimentale de mesure sur le terrain.

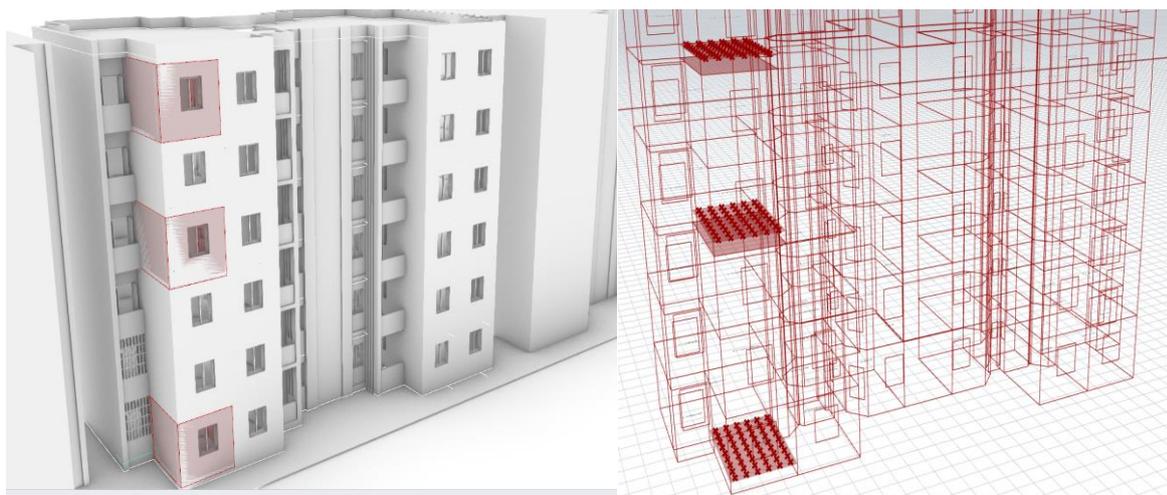
Des mesures sur le terrain ont été réalisées afin de collecter des données nécessaires à la validation du modèle de simulation et à l'évaluation de la performance du bâtiment, notamment en ce qui concerne l'éclairage naturel.

IV.3.2.1. Procédure de mesure de l'éclairage naturel.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les niveaux d'éclairage naturel, à l'intérieur des logements sociaux, ce qui est essentiel pour analyser la qualité de l'éclairage naturel et le confort visuel des occupants. Un éclairage adéquat contribue non seulement à un environnement de vie agréable, mais elle influence également la productivité et le bien-être des résidents. En mesurant ces niveaux, nous visons à déterminer si les espaces de vie offrent un éclairage suffisant tout au long de l'année, en tenant compte des variations climatiques et de l'orientation des bâtiments.

IV.3.2.1.1. Méthodologie de mesure.

Les niveaux d'éclairage naturel ont été mesurés à 56 points spécifiques dans les pièces étudiées. La disposition de chaque pièce a été soigneusement segmentée en 56 rectangles de taille égale, comme illustré à la Figure IV.11. Les niveaux d'illumination ont été mesurés au centre de chaque rectangle pour garantir une évaluation représentative de la lumière disponible dans l'espace. le nombre de points est calculé selon la norme (Light and Lighting, 2011).



*Figure IV.12. Situation des pièces sélectionnées, (b) Grille des points de mesure dans les pièces sélectionnées.
Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.*

Hauteur de Mesure : Les mesures ont été prises à une hauteur de 0,8 mètre au-dessus du sol, ce qui correspond à la hauteur typique d'une surface de travail. Cette hauteur a été choisie pour simuler les conditions réelles d'utilisation par les occupants et fournir des données pertinentes pour l'analyse de la qualité de l'éclairage.

Espacement des Points : Un espacement de 0,5 mètre entre les points a été maintenu afin de s'aligner avec le module de mesure du photomètre utilisé. Cette disposition assure une

couverture uniforme des zones à évaluer, permettant de saisir les variations d'éclairement au sein des pièces.

IV.3.2.1.2. Équipement de mesure.

Pour réaliser les mesures d'éclairement naturel, un luxmètre (Multimetrix LM76) a été utilisé. Cet appareil est capable de mesurer des niveaux de lumière variant de 0 à 200 000 Lux, ce qui le rend particulièrement adapté à des conditions d'éclairage variées. Sa précision et sa sensibilité permettent de capturer des données fiables, cruciales pour l'évaluation des performances d'éclairage naturel dans les logements. (Voir photo IV.12)



Figure IV.13. Multimetrix LM 76. Source : Fiche des données techniques de l'appareil)

IV.3.2.1.3. Conditions de mesure.

Étant donné la complexité de la tâche et le temps nécessaire pour réaliser cette évaluation, celle-ci a été effectuée une fois par an, plus précisément le 26 janvier, qui correspond à la semaine la plus froide de l'année. Ce choix de date a été délibéré, car il permet d'obtenir des données dans des conditions climatiques rigoureuses, notamment sous un ciel nuageux. Ces conditions sont particulièrement représentatives des défis auxquels les occupants peuvent être confrontés en matière d'éclairage naturel pendant les mois d'hiver.

Les mesures d'éclairement ont été prises à quatre moments différents de la journée, ce qui a permis de capturer la variation des niveaux d'éclairage naturel tout au long des heures diurnes. Les intervalles de mesure ont été définis comme suit : de 08h00 à 10h00, de 10h00 à 12h00, de 12h00 à 14h00 et de 14h00 à 16h00. Cette approche a permis d'optimiser les données recueillies, en tenant compte des différents angles de lumière et des variations d'ensoleillement qui peuvent survenir au cours de la journée.

Durant ces périodes de mesure, toutes les lumières artificielles ont été éteintes pour s'assurer que seules les contributions de la lumière naturelle soient évaluées. De plus, les fenêtres des pièces ont été laissées fermées et sans stores, afin d'éviter toute interférence dans les niveaux d'éclairement mesurés. Cette méthodologie rigoureuse a permis d'obtenir des données fiables sur l'éclairage naturel à l'intérieur des logements, contribuant ainsi à une analyse précise du confort visuel des occupants.

IV.3.2.2. Procédure de mesures thermiques intérieures.

IV.3.2.2.1. Méthodologie de mesure.

Pour analyser les caractéristiques thermiques de l'intérieur des pièces, nous avons réalisé des mesures de température de l'air à huit reprises, à des intervalles de deux heures, allant de 08h00 à 00h00. Cette méthodologie est conforme aux exigences de la norme (ANSI/ASHRAE Standard 55-2017), qui stipule que les mesures de température doivent être effectuées au centre de l'espace, à une hauteur d'un mètre au-dessus du sol. Cette approche garantit que les données recueillies sont représentatives des conditions thermiques vécues par les occupants.

Les sessions de mesure ont été programmées pour avoir lieu deux fois par an, spécifiquement le 26 janvier et le 6 août, qui correspondent respectivement aux semaines les plus froides et les plus chaudes de l'année. Ce choix de dates permet de capturer les variations extrêmes de température, fournissant ainsi un aperçu complet du confort thermique dans les logements étudiés. En procédant de la sorte, nous pouvons évaluer comment les différentes saisons et les variations climatiques influencent les conditions intérieures.

Le choix de ne retenir qu'une seule journée de mesure durant les périodes les plus froides et les plus chaudes de l'année repose sur la sélection de journées représentatives des conditions climatiques extrêmes, une pratique couramment admise dans les études conformes aux normes de l'ASHRAE. Par ailleurs, en raison de contraintes matérielles, les mesures ont été effectuées dans un intervalle de temps réduit, soit sur une période de deux heures, en alternance dans les trois pièces étudiées.

IV.3.2.2.2. Analyse des performances thermiques lors des journées extrêmes de l'année.

Les sessions de mesure d'éclairage ont été programmées pour se dérouler deux fois par an, précisément le 26 janvier et le 6 août. Ces dates ont été choisies stratégiquement, car elles correspondent aux journées les plus froides et les plus chaudes de l'année, respectivement.

En effet, le 26 janvier, représentant le cœur de l'hiver, est généralement marqué par des températures basses, ce qui peut influencer la perception de l'éclairage naturel et la nécessité de sources lumineuses artificielles pour compenser le manque de lumière. À cette période, les habitants ressentent souvent une baisse de confort thermique, ce qui nécessite une attention particulière lors de l'évaluation du bien-être intérieur.

D'autre part, le 6 août est typiquement l'un des jours les plus chauds de l'année, avec des températures élevées et un ensoleillement accru. À ce moment-là, la lumière naturelle atteint son maximum, entraînant des niveaux d'éclairage plus élevés et une sollicitation accrue des systèmes de contrôle de l'éclairage et de la température intérieure pour garantir le confort des occupants.

Ces observations sont corroborées par le diagramme psychométrique réalisé par Grasshopper, qui illustre comment les variations saisonnières de température et d'humidité influencent les conditions intérieures. En utilisant ces dates, l'étude vise à capturer une image complète des performances d'éclairage et de confort à travers des saisons contrastées, permettant ainsi

d'optimiser les stratégies de conception architecturale en fonction des conditions climatiques spécifiques.

Pour assurer la cohérence et la fiabilité des données, il était impératif de désactiver tous les systèmes de ventilation, de chauffage et de climatisation pendant les mesures. Cela permet d'éliminer toute influence externe sur les niveaux de température mesurés, garantissant que les résultats reflètent uniquement l'impact des conditions environnementales sur le confort thermique. En adoptant cette rigueur méthodologique, nous avons pu obtenir des données précises et exploitables, essentielles pour une analyse approfondie des performances thermiques des espaces résidentiels.

Les résultats obtenus permettront non seulement de caractériser les performances thermiques des logements, mais aussi d'identifier d'éventuelles recommandations d'amélioration en matière de confort thermique, ce qui est crucial pour le bien-être des occupants et la durabilité des bâtiments.

IV.3.2.2.3. Équipement de mesure.

Pour évaluer les caractéristiques thermiques intérieures des logements, l'utilisation d'équipements de mesure appropriés, tels que le thermohygromètre portable HI-9565 et l'anémomètre à hélice TROTEC BA16, est cruciale (voir figure IV.13). Le HI-9565 permet de mesurer simultanément **la température ambiante intérieure**, conformément aux normes comme l'ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Il est particulièrement efficace lors des relevés saisonniers, capturant les variations de conditions intérieures. L'anémomètre TROTEC BA16, quant à lui, mesure la vitesse et le débit d'air, aidant à identifier les zones de stagnation ou de courants d'air indésirables.



Figure IV.14. a. Anémomètre à hélice TROTEC BA16, b. HI-9565 Portable Thermo-Hygrometer

IV.4. Interprétation des résultats de la campagne de mesures.

IV.4.1. Interprétation des mesures d'éclairage.

Les valeurs d'éclairage indiquées ci-dessous (voir tableau IV.4) représentent la moyenne des mesures effectuées sur 57 points dans chaque pièce, fournissant ainsi un aperçu du niveau de lumière naturelle présent dans ces espaces. Ces données résultent de relevés réalisés in situ dans

Chapitre IV

trois pièces distinctes, situées au rez-de-chaussée, au troisième étage et au cinquième étage. Les mesures ont été effectuées à des horaires précis : de 8h à 10h, de 10h à 12h, de 12h à 14h, et de 14h à 16h.

Tableau IV.4. *Éclairage Mesuré par Étage et Intervalle Horaire. Source : Auteur.*

Étage	Période Horaire	Éclairage Moyen (Lux)
Rez-de-chaussée	8h - 10h	93,92 Lux
	10h - 12h	220,30 Lux
	12h - 14h	250,67 Lux
	14h - 16h	190,10 Lux
Troisième Étage	8h - 10h	119,03 Lux
	10h - 12h	211,50 Lux
	12h - 14h	290,19 Lux
	14h - 16h	242,72 Lux
Cinquième Étage	8h - 10h	102,59 Lux
	10h - 12h	239,38 Lux
	12h - 14h	290,82 Lux
	14h - 16h	232,39 Lux

L'analyse des données d'éclairage moyen, mesurées à différents étages et à divers intervalles horaires, révèle des variations significatives qui peuvent influencer le confort visuel à l'intérieur du bâtiment.

Au rez-de-chaussée, l'éclairage moyen commence à 93,92 Lux entre 8h et 10h, ce qui indique un niveau de lumière relativement faible. Cependant, une augmentation notable est observée entre 10h et 12h, atteignant 220,30 Lux. Ce pic se poursuit, atteignant 250,67 Lux entre 12h et 14h, témoignant d'une optimisation de l'éclairage naturel au cours des heures centrales de la journée. En revanche, l'éclairage diminue à 190,10 Lux entre 14h et 16h, ce qui pourrait être attribué à la position du soleil et à l'angle de la lumière entrant dans l'espace.

Pour le troisième étage, les niveaux d'éclairage suivent une tendance similaire. Entre 8h et 10h, la mesure est de 119,03 Lux, indiquant également un faible éclairage naturel. Cependant, une forte progression est enregistrée, atteignant 211,50 Lux entre 10h et 12h, puis culminant à 290,19 Lux entre 12h et 14h. Cette élévation notable peut être expliquée par une exposition directe au soleil durant les heures les plus ensoleillées. Toutefois, comme au rez-de-chaussée, une diminution de l'éclairage à 242,72 Lux est observée entre 14h et 16h.

Quant au cinquième étage, les niveaux d'éclairage montrent également des variations intéressantes. L'éclairage commence à 102,59 Lux entre 8h et 10h, puis augmente à 239,38 Lux entre 10h et 12h. Ce niveau se maintient relativement élevé avec 290,82 Lux entre 12h et 14h, avant de redescendre à 232,39 Lux entre 14h et 16h. Cela indique que, malgré une exposition optimale durant la journée, l'éclairage peut encore fluctuer selon la position du soleil et les caractéristiques architecturales du bâtiment.

En résumé, ces données montrent que l'éclairage naturel varie considérablement selon l'heure et l'étage. Les niveaux d'éclairage les plus élevés sont atteints lors des heures centrales de la journée, ce qui souligne l'importance de la conception architecturale pour maximiser l'apport de lumière naturelle, tout en tenant compte des fluctuations qui peuvent affecter le confort

visuel à différentes heures. Ces informations peuvent être cruciales pour optimiser le design intérieur et améliorer le bien-être des occupants.

IV.4.2. Interprétation des mesures thermiques intérieures.

L'analyse des données de température relevées aux différents étages d'un bâtiment (voir tableau IV.5), à savoir le rez-de-chaussée, le troisième et le cinquième étage, montre des variations notables en fonction des heures de la journée et de la hauteur. Le 26 janvier et le 6 Aout, les mesures enregistrées révèlent plusieurs observations intéressantes sur le comportement thermique du bâtiment en fonction de l'altitude et de l'heure.

Tableau IV.5. Données de température relevées aux différents étages d'un bâtiment. Source : Auteur.

Période Horaire	Cinquième étage (27 janvier)	Troisième étage (27 janvier)	Rez-de-chaussée (27 janvier)	Cinquième étage (27 août)	Troisième étage (27 août)	Rez-de-chaussée (27 août)
8h - 10h	12,10°C	11,10°C	10,10°C	32,90°C	31,50°C	29,90°C
10h - 12h	12,40°C	11,40°C	10,40°C	33,60°C	32,20°C	30,70°C
12h - 14h	14,40°C	13,40°C	12,40°C	35,10°C	33,70°C	32,10°C
14h - 16h	16,90°C	15,90°C	14,90°C	36,90°C	35,50°C	33,90°C
16h - 18h	17,70°C	16,70°C	15,70°C	38,60°C	37,20°C	35,60°C
18h - 20h	17,50°C	16,50°C	15,50°C	34,50°C	33,10°C	31,50°C
20h - 22h	15,90°C	14,90°C	13,90°C	32,00°C	30,60°C	29,00°C
22h - 24h	11,50°C	10,50°C	9,50°C	30,30°C	28,90°C	27,30°C

Les données relevées les 26 janvier et 06 août révèlent des différences importantes de températures, illustrant les écarts saisonniers et les variations selon les étages. Cette analyse met en évidence l'impact des conditions climatiques sur le confort thermique des occupants et souligne l'importance de stratégies efficaces en matière de gestion thermique, notamment dans les bâtiments résidentiels.

En hiver, les températures restent relativement basses tout au long de la journée, avec une hausse modérée entre le matin et l'après-midi. Par exemple, au cinquième étage, la température la plus élevée est de 17,70°C entre 16h et 18h, tandis que la plus basse en soirée avoisine les 11,50°C. Cette faible variation de température entre le jour et la nuit reflète une certaine inertie thermique, bénéfique pour maintenir une stabilité à l'intérieur du bâtiment. Cette inertie est plus perceptible au rez-de-chaussée, où la proximité du sol contribue à limiter les fluctuations thermiques.

En été, les variations de température sont beaucoup plus marquées. Au cinquième étage, les températures atteignent un pic de 38,60°C entre 16h et 18h, indiquant une surchauffe significative. La différence entre les températures maximales en journée et minimales en soirée est importante, avec une chute de plus de 8°C. Même en soirée, la température reste élevée,

avoisinant 30,30°C après 22h. Ces amplitudes estivales montrent la nécessité d'adapter la conception des bâtiments pour mieux gérer la surchauffe en période chaude.

L'analyse montre également que les températures varient selon les étages, avec une tendance à l'augmentation de la chaleur aux niveaux supérieurs. Le cinquième étage, étant le plus exposé au rayonnement solaire, enregistre systématiquement les températures les plus élevées. En hiver, la différence entre les étages est moins prononcée, avec des écarts modérés. Cependant, en été, les écarts sont plus significatifs, avec une différence de 2 à 3°C entre le cinquième étage et le rez-de-chaussée. Cette variation met en lumière l'importance de mettre en place des solutions architecturales spécifiques pour les étages supérieurs, telles que l'intégration de protections solaires ou l'amélioration de la ventilation naturelle pour limiter la surchauffe.

En revanche, le rez-de-chaussée bénéficie de conditions plus stables grâce à la régulation thermique naturelle du sol. En hiver, cet étage affiche des températures plus constantes, tandis qu'en été, il reste nettement plus frais que les étages supérieurs, offrant un confort thermique accru pour les occupants pendant les périodes de chaleur intense.

Les résultats soulignent l'impact des saisons sur le confort thermique des bâtiments, avec des variations modérées en hiver et des pics de surchauffe préoccupants en été, surtout dans les étages les plus exposés. Cela justifie la nécessité d'adopter des stratégies de conception adaptées aux conditions climatiques, telles que l'amélioration de l'isolation, l'utilisation de matériaux à forte inertie thermique, et l'optimisation des systèmes de ventilation. Ces solutions permettent non seulement d'améliorer le confort intérieur, mais aussi de réduire la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation, rendant ainsi les bâtiments plus durables et efficaces.

IV.5. Conclusion du chapitre.

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur le contexte géographique, climatique et socio-économique de la ville de Guelma, révélant ainsi les enjeux cruciaux associés au logement social collectif dans cette région au climat méditerranéen chaud. L'analyse des conditions climatiques a mis en lumière des températures estivales élevées, une faible circulation des vents et un rayonnement solaire intense, ce qui souligne l'urgence d'adopter une approche architecturale appropriée pour garantir le confort thermique et visuel des habitants. En effet, il est primordial d'intégrer ces éléments dans le processus de conception afin de créer des espaces de vie adaptés aux spécificités climatiques locales.

L'analyse typologique des logements collectifs, couplée à l'évaluation des performances en matière d'éclairage naturel et thermique au sein du complexe résidentiel LPL, a permis d'identifier des conclusions significatives. Les mesures effectuées dans trois appartements situés à des étages différents ont révélé des variations notables d'éclairage et de température. Ces résultats illustrent l'impact direct des conditions climatiques sur le confort des occupants, mettant en évidence des différences marquées en fonction de l'heure de la journée et de l'étage. Cela démontre clairement que les facteurs environnementaux jouent un rôle déterminant dans les conditions de vie et qu'il est essentiel de les prendre en compte lors de la conception des logements.

Chapitre IV

En résumé, ce chapitre met en évidence que la prise en compte des éléments climatiques et des besoins socio-économiques est fondamentale pour la conception des logements sociaux à Guelma. L'étude de cas présentée offre une compréhension approfondie des spécificités locales et des défis associés au logement social collectif. De plus, elle fournit un cadre d'analyse qui servira de référence pour les chapitres suivants. Cette recherche met donc en avant l'importance d'intégrer des approches paramétriques dans la conception environnementale, visant non seulement à optimiser le confort intérieur, mais aussi à améliorer la qualité de vie des résidents. Tout en fournissant un cadre d'analyse pour les chapitres suivants. En somme, cette recherche met en avant l'importance d'intégrer des approches paramétriques dans la conception environnementale, visant à optimiser le confort intérieur et à améliorer la qualité de vie des résidents. Le chapitre suivant se penchera sur les choix méthodologiques et l'analyse de l'échantillon d'étude, poursuivant ainsi l'exploration des implications de ces résultats.

Chapitre V :
Validation des mesures et étude
paramétrique.

Introduction.

Ce chapitre présente une approche intégrée combinant la validation des mesures in situ avec une étude paramétrique du bâtiment. Dans un premier temps, nous examinerons la validation des données collectées sur le terrain à l'aide d'outils de simulation numérique, une étape cruciale pour garantir la fiabilité des résultats et des conclusions tirées dans le cadre de notre étude de cas.

La validation des données in situ permet d'établir une base solide de comparaison entre les conditions réelles observées dans le bâtiment et les prédictions issues des simulations numériques. Cette étape est essentielle pour identifier toute divergence entre la modélisation et la réalité, et pour ajuster les modèles si nécessaire. Une simulation fiable est la clé pour prendre des décisions éclairées concernant la conception environnementale et les améliorations potentielles des bâtiments. Sans cette validation, les conclusions tirées à partir des simulations pourraient être biaisées, compromettant ainsi les stratégies proposées pour améliorer la performance énergétique et le confort des occupants.

Ensuite, nous aborderons la simulation paramétrique du bâtiment, un outil puissant pour explorer une large gamme de scénarios de conception. Grâce à cette approche, nous analyserons les performances thermiques, visuelles et énergétiques à travers divers scénarios, en tenant compte de l'impact de différentes variables, telles que l'orientation, la composition de l'enveloppe du bâtiment et les matériaux utilisés. Cette analyse paramétrique permet d'explorer les interactions complexes entre ces différents paramètres et de mieux comprendre comment des choix spécifiques influencent le confort intérieur et la consommation énergétique.

L'importance de cette simulation réside également dans l'intégration du changement climatique futur. En particulier, nous utiliserons les données de simulation sous les scénarios climatiques de référence TMY ainsi que ceux du RCP 8.5 pour les années 2050 et 2080. Ces scénarios permettent d'anticiper les effets des évolutions climatiques futures, en simulant l'impact des hausses de température, des changements dans les modèles de précipitation et d'autres paramètres climatiques sur le confort thermique et énergétique des bâtiments. Par exemple, une augmentation des températures pourrait accroître la demande de refroidissement en été, tandis qu'une réduction des périodes froides pourrait diminuer les besoins en chauffage. En simulant ces scénarios climatiques, nous serons en mesure de mieux anticiper les défis auxquels les bâtiments seront confrontés à l'avenir.

Enfin, cette approche intégrée, alliant validation in situ et simulation paramétrique, permettra d'identifier des solutions de conception plus résilientes et durables, capables de répondre aux exigences environnementales présentes et futures. Elle offrira également des recommandations pour améliorer la performance énergétique et le confort des occupants, tout en s'assurant que ces solutions sont adaptées aux conditions climatiques changeantes. En anticipant les impacts du changement climatique, nous pouvons proposer des stratégies de conception qui non seulement répondent aux besoins actuels des résidents, mais qui sont également prêtes à faire

face aux défis futurs, contribuant ainsi à la création de bâtiments plus durables et respectueux de l'environnement.

V.1. Processus de simulation : exploration du modèle de base.

Dans le domaine de la conception architecturale et de l'évaluation des performances, un large éventail d'outils logiciels est utilisé pour simuler le comportement des bâtiments, certains étant particulièrement performants en matière d'optimisation computationnelle. Dans le cadre de notre étude de cas, nous avons adopté une approche novatrice en utilisant le plugin Honeybee et Ladybug pour Grasshopper. Cette combinaison s'est progressivement imposée comme l'une des plateformes les plus populaires et prisées par les concepteurs contemporains en raison de sa capacité à intégrer à la fois la simulation énergétique et l'analyse de l'éclairage naturel.

Au cours de ce processus complet, Rhinoceros 3D a été employé pour modéliser les surfaces du bâtiment, tandis que Grasshopper s'est chargé de la modélisation paramétrique en intégrant des matériaux compatibles avec EnergyPlus. Les caractéristiques du bâtiment, incluant l'enveloppe thermique et les spécificités des vitrages, sont résumées dans les tableaux V.1 et V.2. Parallèlement, Ladybug et Honeybee agissent comme des outils essentiels pour la simulation et la visualisation des performances du bâtiment. Dans ce cadre, EnergyPlus et Open Studio sont responsables de la simulation énergétique et thermique, tandis que Radiance et Daysim se consacrent à l'analyse de l'éclairage naturel.

Les simulations thermiques ont été spécifiquement réalisées aux dates du 26 janvier et du 6 août, afin de correspondre aux conditions de mesure thermique observées. Au cours de ces simulations, les systèmes de chauffage, de ventilation sont restés désactivés, et toutes les portes et fenêtres ont été fermées pour simuler les conditions internes du bâtiment. Pour permettre une simulation précise du bâtiment dans le contexte de Guelma, un fichier de données météorologiques a été élaboré. Ce fichier représente l'année météorologique typique (TMY), au format EPW, contenant des ensembles de données climatiques couvrant la période de 2007 à 2021.

Les résultats obtenus de l'analyse de l'éclairage naturel et de la validation thermique seront présentés dans la section suivante. Cette approche méthodologique met en lumière l'importance d'une modélisation intégrée qui non seulement évalue les performances actuelles du bâtiment, mais prend également en compte les scénarios climatiques futurs, notamment en référence au scénario RCP8.5 pour les années 2050 et 2080. Cela permet de mieux anticiper l'impact du changement climatique sur le confort intérieur et la durabilité des espaces de vie. En intégrant ces considérations, notre étude vise à proposer des recommandations concrètes pour une conception architecturale résiliente et adaptée aux défis environnementaux à venir.

Tableau V.1. Propriétés des matériaux de l'enveloppe du bâtiment. Source : (DTR C3.2 Règlement thermique des bâtiment.)

Éléments de construction	Matériaux	Épaisseur (M)	Conductivité (W/M-K)	Densité (Kg/M3)	Chaleur spécifique (J/Kg-K)	Absorbance thermique
Rez-de-chaussée						

Chapitre V

	Dalle de compression	0.2	2.30	2322.01	831.46	0.9
	Mortier	0.04				
	Revêtement de sol	0.02				
Toit						
	Étanchéité	0.04				
	Forme de pente	0.04				
	Isolation	0.07	0.04	265	836.26	0.9
	Dalle de compression	0.04				
	Dalle en béton	0.2	2.30	2322.01	831.46	0.9
	Plaque de plâtre	0.01	0.15	800	1090.02	0.9
Mur extérieur						
	Ciment extérieur	0.02				
	Brique creuse	0.15	0.9	1920	790	0.9
	Vide d'air du mur	0.05	0.667	1.28	1000	0.9
	Brique creuse	0.10	0.9	1900	790	0.9
	Plaque de plâtre	0.009	0.57	800	1089.29	0.9
Mur intérieur						
	Plaque de plâtre	0.009	0.57	800	1089.29	0.9
	Brique creuse	0.10	0.9	1900	790	0.9
	Plaque de plâtre	0.009	0.57	800	1089.29	0.9

Tableau V.2. Caractéristiques des vitrages.

Type de vitrage	Matériaux	Épaisseur (M)	Coefficient U (W/M ² -K)	Coefficient de gain de chaleur solaire	Transmittance visible	Transmittance solaire
Vitrage simple	Verre clair simple	0.006	5.6	0.86	0.88	0.77

V.2. Validation des mesures in-situ à l'aide de la simulation.

Pour valider les résultats de la simulation, trois pièces, comme indiqué dans le tableau V.3, ont été modélisées à différents niveaux : le rez-de-chaussée, le dernier étage et un niveau intermédiaire au troisième étage. Cette approche permet d'étudier comment les variations d'étage influencent les conditions d'éclairage mesurées. La modélisation a été réalisée à l'aide

de Rhinoceros Grasshopper, ainsi que des plugins Ladybug et Honeybee, qui facilitent l'analyse de la performance énergétique et lumineuse des bâtiments.

Les conditions d'éclairage mesurées dans ces trois espaces sont essentielles pour comprendre comment l'orientation, l'altitude et la conception architecturale impactent la lumière naturelle à l'intérieur des locaux. En intégrant ces facteurs dans le processus de simulation, nous pouvons mieux évaluer l'efficacité des conceptions architecturales et leur adéquation avec les besoins des occupants. Les résultats obtenus permettront également de faire des recommandations pour améliorer le confort lumineux et, par conséquent, la qualité de vie des résidents.

Tableau V.3. Détails sur le modèle réel utilisé pour la validation du logiciel. Source : Auteur.

Paramètres	Valeur
Orientation	Nord-est
Hauteur	3,06 m
Largeur	2,50 m
Longueur	4,55 m
Fenêtre	140 cm x 160 cm
Type de ciel	Ciel nuageux
Mur (Coefficient de réflexion)	0,70
Sol (Coefficient de réflexion)	0,50
Plafond (Coefficient de réflexion)	0,85

V.2.1. Validation des mesures d'éclairage naturel.

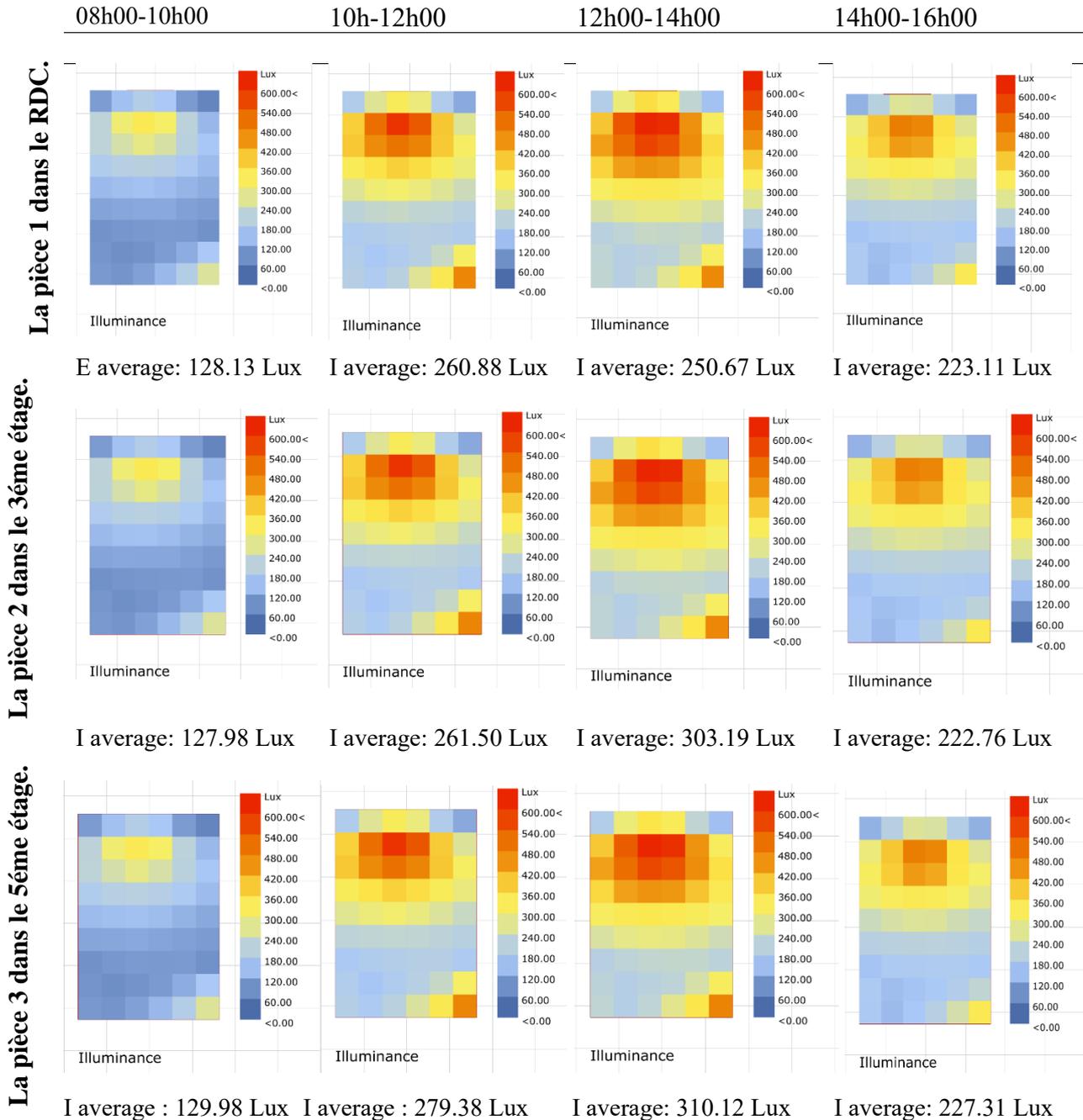
L'analyse des valeurs d'éclairage dans les pièces sélectionnées révèle que les niveaux moyens d'éclairage dans la plupart des zones restent généralement en dessous de 300 lux, comme l'indiquent les graphiques du Figure V.1 montrant l'éclairage intérieur simulé. Parmi ces observations, la valeur la plus élevée enregistrée est de 626 lux au cinquième étage, ce qui indique un environnement beaucoup plus lumineux par rapport aux autres niveaux. En revanche, la valeur la plus basse, de 43 lux, a été constatée au rez-de-chaussée, soulignant les différences significatives dans la disponibilité de la lumière naturelle selon les étages au sein du bâtiment.

Les mesures d'éclairage in situ ont été réalisées à l'aide d'appareils de mesure de la lumière portables, et des relevés ont été effectués à différents moments de la journée pour évaluer l'impact des variations de lumière naturelle sur les conditions intérieures. Les mesures ont été prises à plusieurs points dans chaque pièce, et les moyennes pour chaque zone ont été calculées. Les résultats ont montré que les étages supérieurs bénéficiaient d'un meilleur éclairage en raison de leur exposition directe aux rayons du soleil pendant de plus longues périodes, tandis que les niveaux inférieurs souffraient d'un manque d'éclairage dû aux ombres projetées par les bâtiments voisins.

Ces motifs de distribution d'éclairage correspondent étroitement aux données de mesure obtenues sur le site, mettant en avant l'efficacité du modèle pour produire des résultats précis et fiables. Cette relation entre l'éclairage simulé et mesuré indique que le modèle de simulation peut être un outil précieux pour évaluer la performance de la lumière naturelle dans les espaces résidentiels.

Chapitre V

De plus, les conditions d'éclairage ont des implications importantes pour la conception du bâtiment. Les zones qui restent constamment en dessous des niveaux d'éclairage recommandés peuvent contribuer à l'inconfort des occupants, affectant ainsi leur bien-être et leur productivité. Les résultats soulignent la nécessité d'une conception architecturale réfléchie qui maximise l'apport de lumière naturelle, en particulier dans les niveaux inférieurs où l'éclairage a tendance à être insuffisant. Des stratégies telles que l'optimisation des emplacements des fenêtres, l'utilisation de surfaces réfléchissantes et l'intégration de puits de lumière pourraient améliorer l'éclairage dans ces zones, contribuant ainsi à une meilleure qualité de l'environnement intérieur.



Chapitre V

Figure V.1. La visualisation des niveaux d'éclairage simulés et de leur distribution dans les pièces sélectionnées. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Nous avons utilisé la même zone géographique avec un climat modéré à Guelma, en Algérie, pour effectuer ces simulations. Afin de procéder à une validation et à une analyse approfondie, le Tableau V.5 compare les données de simulation et de mesure. Après avoir confronté les valeurs mesurées et simulées, nous avons constaté que celles-ci sont similaires, avec une faible marge de différence qui peut être attribuée à divers facteurs, tels que la résolution de l'instrument de mesure et la plage d'erreur inhérente au logiciel de simulation.

Tableau V.4. Comparaison des valeurs obtenues à partir des mesures et des simulations. Source : Auteur.

Étage	Données Mesurées			Activités Données Simulées		
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
L'éclairage (Lux)						
RDC	38.7	540.0	210.9	43.3	575.5	215.7
3ème étage	47.0	599.1	216.5	43.4	625.0	228.8
5ème étage	119	601.4	236.6	127.9	626.6	226.6

Il est essentiel de faire correspondre les données simulées obtenues avec celles mesurées dans cette section pour garantir la validité et obtenir des résultats précis et fiables. Cette démarche de validation est cruciale, car elle renforce la crédibilité des résultats de simulation, permettant ainsi une meilleure compréhension des performances éclairantes dans les bâtiments. En effet, des écarts minimes entre les valeurs mesurées et simulées peuvent être considérés comme des indicateurs de la qualité de la simulation et de la représentativité des modèles utilisés. Par conséquent, en assurant une concordance entre les données, nous pouvons établir une base solide pour des analyses futures et des améliorations potentielles dans la conception architecturale.

Pour garantir la robustesse et la crédibilité de nos résultats, il est essentiel de s'aligner sur des études antérieures qui ont suivi des méthodes similaires (Nasrollahi et al., 2020). Dans cette optique, nous avons choisi d'examiner la validité de nos données en calculant avec soin le coefficient de corrélation entre les mesures expérimentales et les résultats des simulations. Pour ce faire, nous avons utilisé le test de Pearson, également connu sous le nom de Pearson's r, qui est un outil statistique reconnu pour évaluer la force et la direction de la relation linéaire entre deux ensembles de données.

Cette approche méthodologique rigoureuse nous a permis d'évaluer le degré de similitude ou d'erreur entre nos deux ensembles de données. En calculant le coefficient de corrélation, nous avons pu quantifier la manière dont les résultats simulés se rapprochent des mesures réelles. Un coefficient proche de 1 ou -1 indiquerait une forte corrélation positive ou négative, tandis qu'un coefficient proche de 0 suggérerait peu ou pas de relation. Cela nous a permis non seulement de valider nos résultats, mais également de mettre en lumière des potentiels écarts qui pourraient être explorés plus en profondeur.

Chapitre V

Pour réaliser cette analyse, nous avons utilisé le logiciel SPSS (IBM SPSS Statistics 26), qui est un outil puissant et largement utilisé dans le domaine de la recherche statistique. Ce logiciel nous a permis de traiter nos données avec une grande précision, de mener les calculs nécessaires et de générer des visualisations utiles pour interpréter les résultats. La facilité d'utilisation de SPSS et ses capacités avancées nous ont été d'une grande aide pour effectuer des tests d'hypothèses, des analyses de variance et d'autres évaluations pertinentes.

L'analyse des relations entre les données mesurées et simulées, comme l'indiquent les coefficients de corrélation de Pearson présentés dans le Tableau V.6, révèle des connexions remarquablement solides et positives dans les trois pièces examinées. Un coefficient de corrélation de 0,994 pour la pièce 1, 0,996 pour la pièce 2, et 0,978 pour la pièce 3 témoigne de l'excellente concordance entre les valeurs réelles et simulées.

Tableau V.5. Analyse des résultats de la corrélation de Pearson pour trois pièces. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel IBM SPSS Statistics 26.

		Corrélations	
		Niveaux d'éclairément mesurés	Niveaux d'éclairément simulés
Niveaux d'éclairément mesurés pour la pièce 1 au rez-de-chaussée	Pearson	1	,994*
	Correlation		
	Sig. (2-tailed)		,022
Niveaux d'éclairément mesurés pour la pièce 2 au troisième étage.	Pearson	1	,996*
	Correlation		
	Sig. (2-tailed)		,004
Niveaux d'éclairément mesurés pour la pièce au cinquième étage.	Pearson	1	,978*
	Correlation		
	Sig. (2-tailed)		,02

*. La corrélation est significative au niveau de 0,01 (bilatéral).

Particulièrement, la pièce 2 se distingue par un coefficient de 0,996, ce qui suggère que les valeurs simulées y sont presque identiques aux valeurs mesurées. Cela souligne non seulement la précision du modèle de simulation utilisé, mais également l'efficacité des conditions expérimentales dans cette pièce. Cette forte association statistique, significative au niveau de 0,01, suggère que les résultats obtenus peuvent être généralisés avec un degré élevé de confiance.

En revanche, bien que les pièces 1 et 3 affichent également des coefficients de corrélation élevés (respectivement 0,994 et 0,978), les niveaux de signification statistique associés sont légèrement inférieurs. La pièce 1 se situe à un niveau de 0,01, ce qui indique une forte association, tandis que la pièce 3, avec une signification de 0,05, montre une connexion significative, mais avec une certaine marge d'incertitude. Cela pourrait s'expliquer par des

facteurs environnementaux spécifiques ou des variations dans la configuration de chaque pièce qui influencent les résultats mesurés.

Dans l'ensemble, ces résultats renforcent la validité de l'approche de simulation employée dans cette étude. En montrant que les modèles simulés correspondent étroitement aux données réelles, cette recherche établit un cadre fiable pour l'évaluation des performances d'éclairage et peut guider des efforts futurs dans la conception de bâtiments résilients et durables. Les résultats mettent également en lumière l'importance de la prise en compte des caractéristiques spécifiques des pièces lors de la modélisation, afin d'optimiser les performances énergétiques et le confort intérieur.

Il est courant d'utiliser une combinaison de différentes méthodes et métriques pour valider les ensembles de données de simulation par rapport aux données mesurées, afin d'acquérir une compréhension approfondie de la correspondance entre les simulations et les données observées ou mesurées. Les techniques suivantes doivent être incluses après l'utilisation du coefficient de corrélation de Pearson (r) :

Selon les approches reconnues dans des études antérieures (Lakhdari et al., 2021; Nadji Maachi et al., 2019), l'erreur entre les valeurs prédites et mesurées a été évaluée dans ce contexte. L'erreur moyenne de biais (MBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV RMSE) ont été calculés à l'aide des équations suivantes (Eq. (1)) et (Eq. (2)) (Lakhdari et al., 2021).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \% \quad (1).$$

$$CM(RMSE) = \frac{1}{y} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}} \% \quad (2).$$

Où : n est le nombre total de valeurs de données utilisées dans le calcul, M_i et S_i représentent les données mesurées et simulées à l'intervalle de temps i . Y est la valeur moyenne des données mesurées.

Après avoir calculé l'erreur moyenne de biais (MBE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour trois pièces distinctes, il est évident qu'il y a une bonne concordance entre les données observées et simulées. Les résultats ne sont pas seulement rationnels, mais se situent également bien dans les limites considérées comme acceptables.

Dans le cas de la pièce 1, le MBE et le CV (RMSE) sont respectivement de -5,48 % et 8,64 %. Pour la pièce 2, le MBE est de -12,55 %, et le RMSE est de 13,84 %. Les pourcentages pour la troisième pièce sont respectivement de -10,97 % et 17,83 %. Cela montre qu'il existe un haut degré de concordance entre les résultats mesurés et simulés. Ces résultats peuvent être considérés comme satisfaisants et appropriés pour les objectifs de l'étude.

V.2.1. Validation des mesures thermiques par simulation numérique.

Dans le cadre du processus de validation thermique, une analyse approfondie a été réalisée pour vérifier la précision des simulations par rapport aux données réelles mesurées. Les simulations

Chapitre V

ont été effectuées toutes les deux heures, de 8h00 à minuit, à deux moments clés de l'année, le 26 janvier (hiver) (voir figure V.2) et le 6 août (été) (voir figure V.3). Ces périodes permettent de capturer les variations saisonnières des conditions thermiques, offrant ainsi une analyse représentative des comportements thermiques à différentes périodes de l'année.

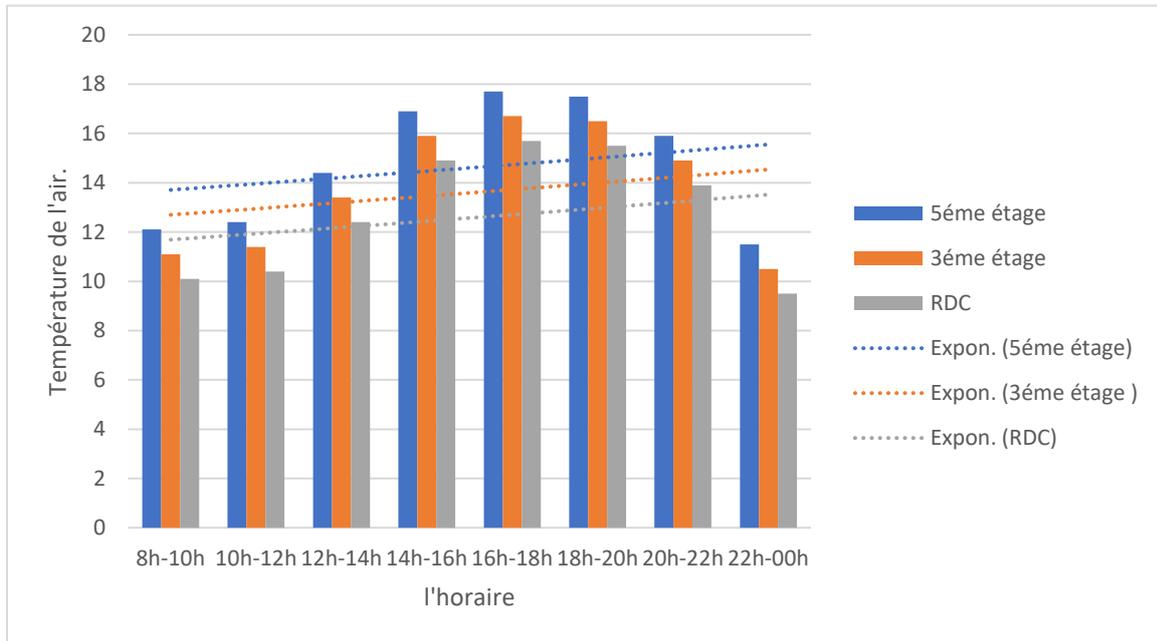


Figure.V.2. Comparaison des températures intérieures mesurées en Hiver entre les différents étages. Source : Auteur.

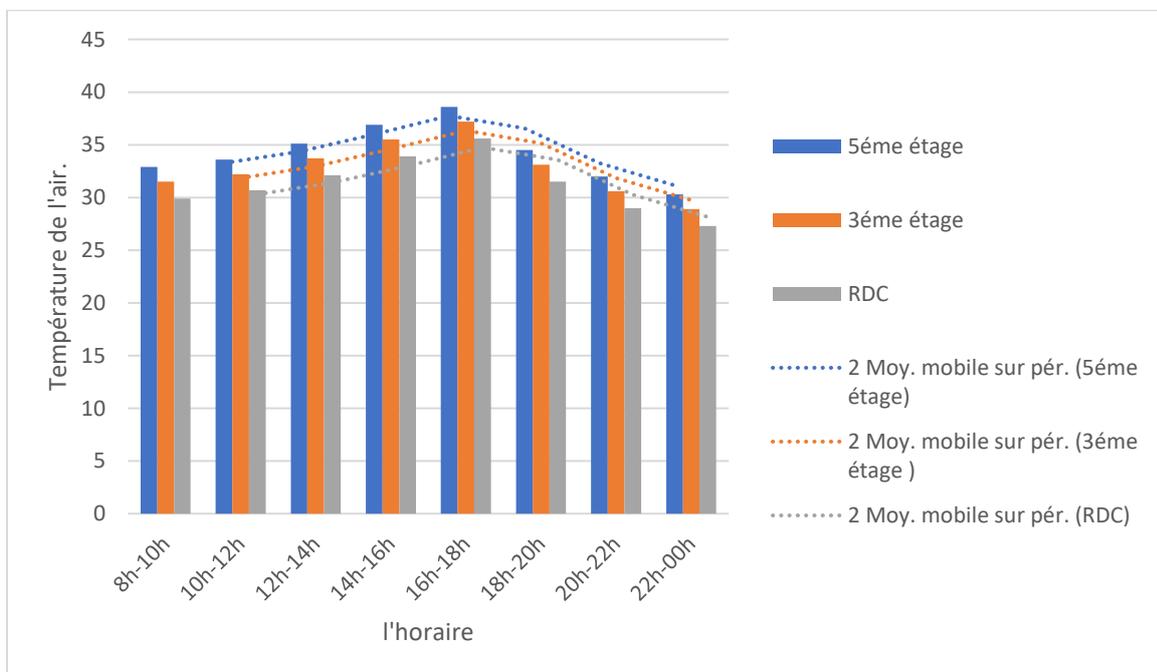


Figure V.3. Comparaison des températures intérieures mesurées en Hiver entre les différents étages. Source : Auteur.

L'utilisation du coefficient de corrélation de Pearson pour évaluer la relation entre les données mesurées et simulées révèle une forte concordance entre les deux jeux de données. En hiver,

les coefficients de corrélation observés sont particulièrement élevés : 0,923 pour la pièce 1, 0,905 pour la pièce 2, et un impressionnant 0,987 pour la pièce 3. Ces valeurs indiquent une relation linéaire positive très forte, ce qui suggère que les simulations reflètent de manière précise les conditions réelles dans les pièces étudiées. En été, les résultats sont également très cohérents, avec des coefficients de corrélation de 0,899 pour la pièce 1, 0,935 pour la pièce 2, et 0,875 pour la pièce 3.

Selon l'analyse du tableau V.7 utilisant le coefficient de Pearson. Ces résultats soulignent non seulement la robustesse des modèles de simulation utilisés, mais aussi leur capacité à capter fidèlement le comportement thermique des pièces dans des conditions réelles, tant en hiver qu'en été. Cette forte cohérence entre les données mesurées et simulées démontre la fiabilité des simulations et valide leur utilisation dans des études d'optimisation et de conception environnementale. Ces simulations peuvent donc être considérées comme des outils pertinents pour prévoir les performances thermiques des bâtiments et pour informer les décisions de conception dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique dans les espaces résidentiels.

En conclusion, la validation thermique réalisée à l'aide de ces simulations a montré une précision remarquable, ce qui renforce la confiance dans les modèles utilisés et justifie leur application dans l'évaluation des performances thermiques des bâtiments dans divers scénarios climatiques.

Tableau V.6. Résultats de l'analyse de corrélation de Pearson pour les trois pièces. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel IBM SPSS Statistics 26.

		Corrélations		
		Température intérieure mesurée	Température intérieure simulée	
			En hiver	En été
Température intérieure mesurée pour la pièce 1 au rez-de-chaussée	Pearson	1	,923*	,994*
	Correlation Sig. (2- tailed)			,001
Température intérieure mesurée pour la pièce 2 au troisième étage	Pearson	1	,905*	,935*
	Correlation Sig. (2- tailed)			,002
Température intérieure mesurée pour la pièce 3 au cinquième étage	Pearson	1	,987*	,875*
	Correlation Sig. (2- tailed)			,005

*. La corrélation est significative au niveau de 0,01 (bilatéral).

Pour approfondir l'analyse des écarts entre les données mesurées et simulées, nous avons appliqué les formules de l'erreur moyenne biaisée (MBE) et du coefficient de variation de

l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)). Ces indicateurs permettent d'évaluer avec précision la qualité et la fiabilité des simulations par rapport aux données expérimentales. Les résultats obtenus révèlent une cohérence remarquable entre les deux ensembles de données, tant en hiver qu'en été, ce qui témoigne de la robustesse des modèles de simulation employés.

En hiver, les valeurs de MBE pour les trois pièces, comprises entre 1,079 % et 2,567 %, indiquent un faible biais dans les prévisions du modèle par rapport aux mesures réelles. Ce faible pourcentage d'erreur montre que les modèles simulent correctement les conditions réelles, avec une légère sous- ou surestimation des températures intérieures. Les valeurs de CV(RMSE), qui varient entre 1,549 % et 2,301 %, soulignent également la précision des simulations, car ces valeurs se situent bien en deçà des seuils d'acceptabilité définis par les normes internationales, telles que l'ASHRAE-55. Ces résultats renforcent la fiabilité des simulations thermiques pour la période hivernale.

En été, les écarts entre les simulations et les mesures sont tout aussi faibles, avec des valeurs de MBE allant de 0,286 % à 0,963 %. Cela montre que les modèles sont capables de reproduire fidèlement les variations de température intérieure même dans des conditions climatiques plus extrêmes, comme celles rencontrées durant l'été. Les valeurs de CV(RMSE), bien qu'un peu plus élevées en été, restent néanmoins dans une fourchette acceptable, notamment avec des pourcentages compris entre 1,221 % et 1,622 %. Cela reflète une précision globalement satisfaisante des simulations dans les trois pièces analysées, confirmant ainsi leur pertinence pour la modélisation thermique.

Ces résultats, conformes aux critères de l'ASHRAE-55, valident non seulement la méthodologie utilisée mais aussi la capacité des simulations à refléter fidèlement les comportements thermiques réels des bâtiments. Ces performances sont cruciales pour garantir que les outils de simulation puissent être utilisés de manière fiable dans la conception environnementale intégrée, en particulier dans des contextes résidentiels où le confort thermique joue un rôle central.

La validation des résultats de consommation énergétique n'a pas été possible en raison de l'absence de données. Cependant, la consommation est calculée à partir des conditions thermiques et lumineuses validées, ainsi que de profils d'occupation constants, ce qui garantit une précision relative. Les valeurs d'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) doivent être considérées comme des indicateurs relatifs, où une EUI plus élevée indique une consommation accrue. Les simulations sont donc cohérentes avec l'approche de l'algorithme génétique visant à minimiser ces valeurs. En somme, le modèle fournit des résultats acceptables pour les conditions thermiques et d'éclairage, utiles pour l'optimisation, sans nécessiter de recalibrage.

V.3. Modélisation des scénarios climatiques futurs.

Pour modéliser les conditions climatiques futures, nous avons utilisé le logiciel Meteonorm pour générer des fichiers de données météorologiques, en intégrant divers scénarios de changement climatique. Ces scénarios sont basés sur les voies de concentration représentatives (RCP), qui illustrent les trajectoires des concentrations de gaz à effet de serre essentielles à la modélisation climatique. Parmi ces scénarios, le RCP 8.5 a été particulièrement marquant, car

Chapitre V

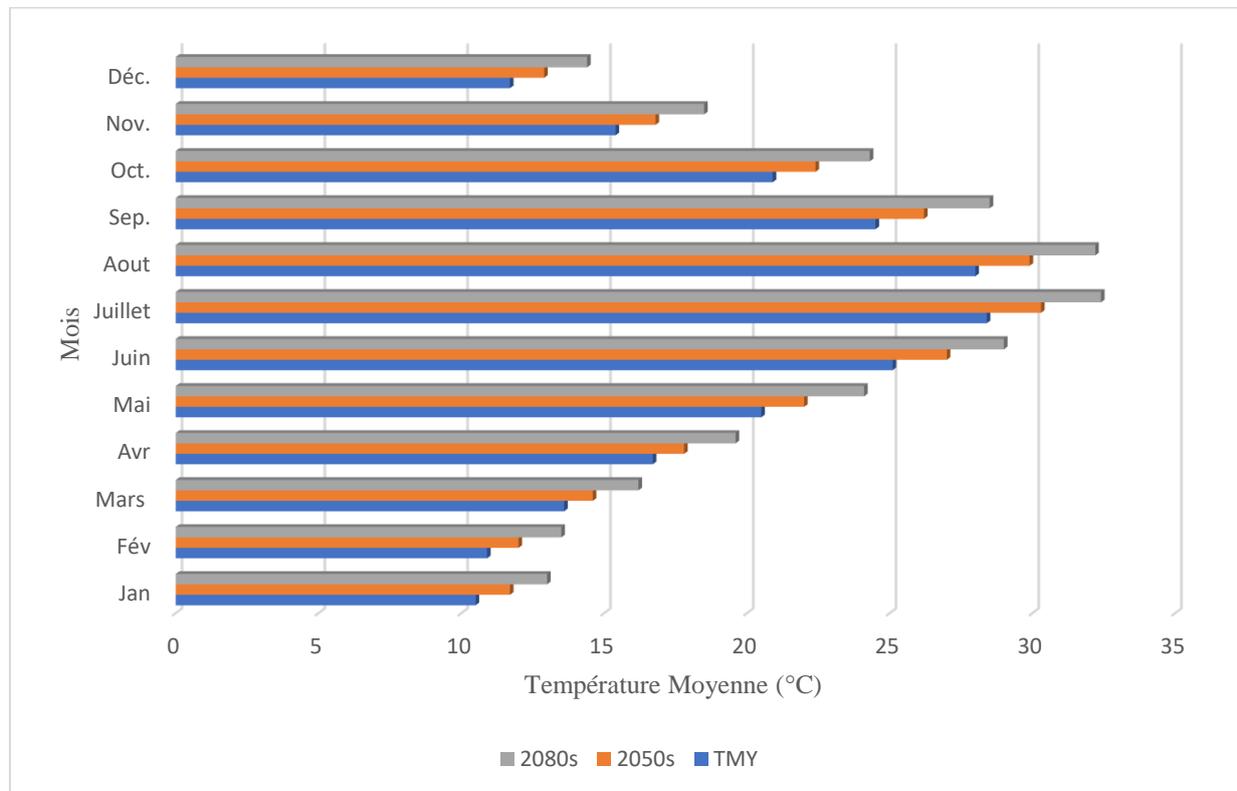
il représente un chemin élevé d'émissions de gaz à effet de serre avec des augmentations prévues tout au long du 21e siècle.

L'utilisation de ce scénario nous a permis d'élaborer des fichiers de données météorologiques pour les années 2050 et 2080 (Voir Tableau V.8), périodes qui coïncident souvent avec l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment, généralement évalué à 60 ans. Cette approche est cruciale car elle nous aide à évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur la performance et l'efficacité énergétique des bâtiments. (Voir Figure V.3)

Il est important de souligner que, pour nos simulations climatiques futures, nous avons maintenu le bâtiment et ses composants inchangés, se concentrant uniquement sur la mise à jour des données climatiques. Cela permet d'analyser comment les changements dans les conditions climatiques affectent les performances des bâtiments sans introduire de variables supplémentaires qui pourraient compliquer l'interprétation des résultats.

*Tableau V.7. Vue comparative de la température moyenne annuelle selon différents fichiers météorologiques.
Source : Auteur traité par le logiciel Meteonorm.*

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc
Température Moyenne (°C)												
TMY	10,5	10,9	13,6	16,7	20,5	25,1	28,4	28,0	24,5	20,9	15,4	11,7
2050s	11,7	12,0	14,6	17,8	22,0	27,0	30,3	29,9	26,2	22,4	16,8	12,9
2080s	13,0	13,5	16,2	19,6	24,1	29,0	32,4	32,2	28,5	24,3	18,5	14,4



*Figure. V.4. L'évolution de la température moyenne annuelle (°C) comparée sur trois scénarios climatiques.
Source : Auteur.*

Ce graphique illustre l'évolution de la température moyenne annuelle (en °C) en comparant trois scénarios climatiques : une année météorologique typique (TMY), une projection pour 2050 et une autre pour 2080. Les températures, réparties sur les 12 mois de l'année, révèlent des tendances claires.

Tout d'abord, on observe une tendance générale au réchauffement climatique. Les courbes pour les années 2050 et 2080 sont constamment plus élevées que celle de l'année typique, indiquant une augmentation progressive des températures au fil du temps. Ce phénomène est particulièrement accentué durant les mois d'été (juin, juillet, août), où les écarts de température sont plus prononcés, suggérant un réchauffement plus marqué pendant cette période. En revanche, en hiver, les différences entre les trois scénarios sont moins importantes, ce qui montre un réchauffement plus modéré durant la saison froide.

Enfin, le réchauffement est observé tout au long de l'année, avec des augmentations de température moyennes chaque mois, bien que l'ampleur de ces augmentations varie. Globalement, ce graphique met en évidence les effets prévus du changement climatique, avec des conséquences potentiellement significatives sur l'environnement, l'agriculture et les activités humaines dans les décennies à venir.

V.4. Approche paramétrique.

Dans le cadre de cette étude de cas, l'approche paramétrique permet d'explorer de manière approfondie les interactions complexes entre les performances du bâtiment, les conditions météorologiques futures et la disposition des pièces à différents niveaux. L'application de cette méthode commence par la modélisation numérique du bâtiment résidentiel, suivie d'une validation rigoureuse des résultats obtenus afin de s'assurer de la précision des simulations.

Une fois cette validation effectuée, l'étape suivante consiste à évaluer les performances du bâtiment de base face à l'évolution des conditions météorologiques. Cette analyse repose sur des simulations annuelles intégrant des scénarios climatiques futurs, comme ceux générés par l'outil *Meteonorm* pour les horizons 2050 et 2080. À ce stade, l'approche paramétrique offre une flexibilité et une précision accrue, car elle permet d'évaluer simultanément plusieurs variables influençant les performances du bâtiment, notamment le confort visuel, le confort thermique et la consommation énergétique.

En intégrant les futures conditions météorologiques dans les simulations, il devient possible d'anticiper les changements dans les besoins énergétiques du bâtiment et d'identifier les stratégies les plus efficaces pour améliorer son efficacité énergétique. Cette approche paramétrique permet donc de dégager des tendances claires, de proposer des optimisations pour améliorer les performances du bâtiment tout en assurant un confort intérieur adéquat, et d'adapter ces optimisations aux conditions climatiques futures. Ainsi, l'approche paramétrique permet d'analyser et d'optimiser les performances du bâtiment de manière dynamique et évolutive, tout en tenant compte des incertitudes liées au climat futur.

V.4.1. Description des modèles numériques.

Sur la base des résultats de l'analyse typologique, une configuration de logement social collectif a été retenue pour mener l'étude paramétrique. Cette étude se concentre sur trois pièces provenant d'appartements situés à différents niveaux du bâtiment : le rez-de-chaussée, le troisième étage et le cinquième étage. L'objectif est d'évaluer l'impact de la position verticale des espaces sur leurs performances environnementales. Comme illustré dans la figure V.4, l'analyse paramétrique se déroulera en trois phases distinctes, chacune portant sur un aspect clé de la performance des espaces : la performance lumineuse, la performance thermique et l'efficacité énergétique.

1. **Performance lumineuse** : Cette étape consistera à évaluer l'éclairage naturel dans chaque pièce en fonction de sa position dans le bâtiment. L'étude tiendra compte de l'exposition à la lumière du jour, de la durée d'ensoleillement, et de la distribution de l'éclairement. L'objectif est de déterminer si les niveaux supérieurs bénéficient d'un meilleur éclairage naturel que le rez-de-chaussée et d'analyser les effets des ouvertures et de l'orientation des pièces sur la qualité de l'éclairage.
2. **Performance thermique** : L'évaluation thermique vise à comprendre comment la position dans le bâtiment influence le confort thermique. Les simulations tiendront compte des gains solaires, des pertes thermiques et de l'inertie thermique des matériaux. En fonction du niveau de l'appartement, les écarts de température pourront être mesurés pour identifier les variations de confort entre les différents étages.
3. **Efficacité énergétique** : Enfin, une analyse énergétique sera effectuée pour mesurer la consommation énergétique de chaque appartement en fonction de sa localisation dans le bâtiment. Cette étape permettra d'évaluer les besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation, ainsi que l'impact potentiel des facteurs tels que l'exposition solaire et l'isolation thermique.

En regroupant les résultats de ces trois analyses, l'étude paramétrique fournira des conclusions précises sur la manière dont la localisation dans un bâtiment résidentiel collectif, en particulier dans le logement social collectif, affecte la performance globale des espaces en termes d'éclairage naturel, de confort thermique et de consommation énergétique.

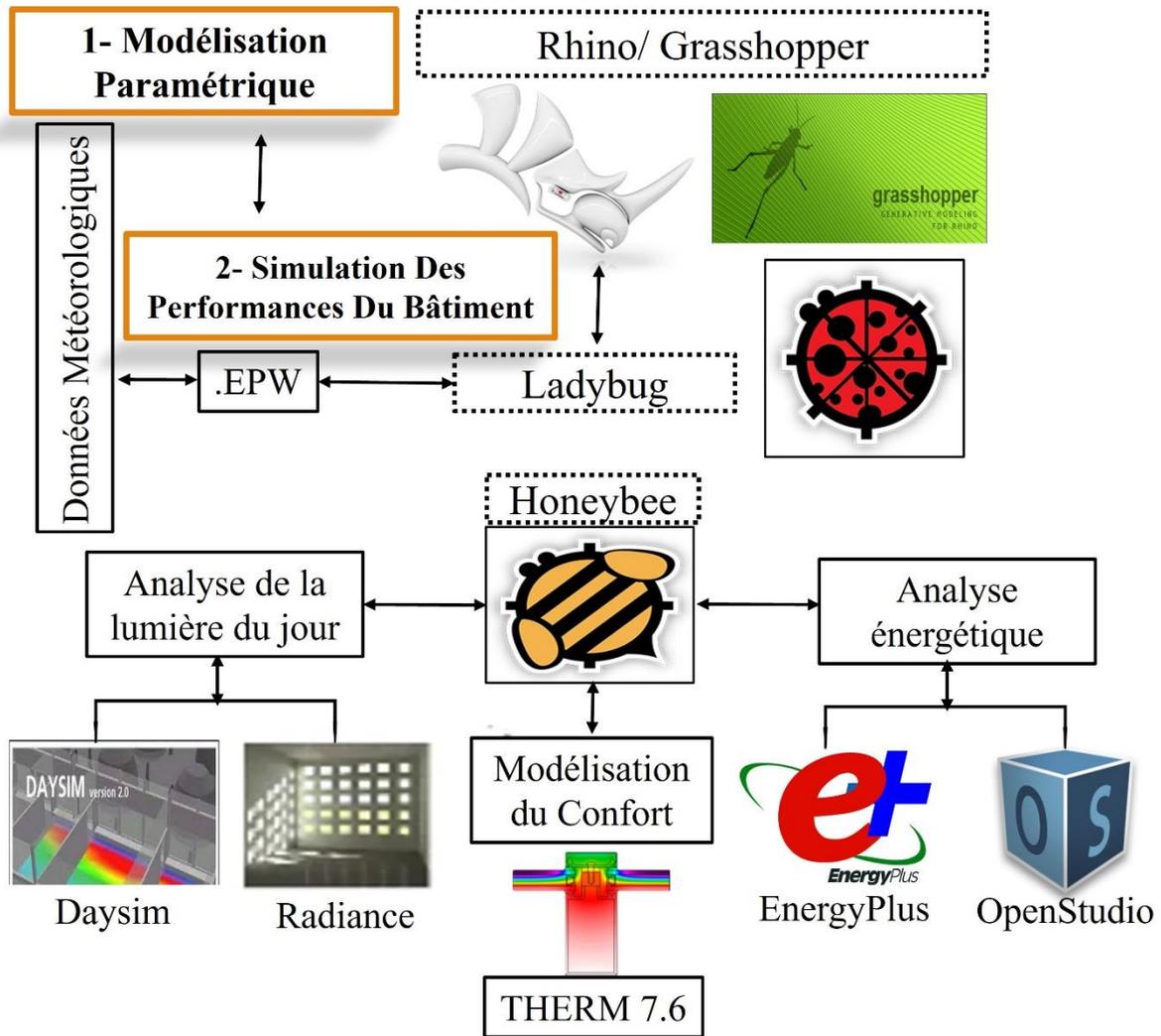


Figure.V.5. L'analyse paramétrique : une approche par la simulation numérique. Source : Auteur.

La figure V.4 illustre un processus de simulation numérique pour évaluer la performance énergétique d'un bâtiment. D'abord, la modélisation paramétrique est réalisée avec Rhino pour créer le modèle 3D, et Grasshopper permet de le paramétrer dynamiquement. Ensuite, les simulations intègrent des données climatiques (EPW) grâce à Ladybug et Honeybee pour analyser l'énergie et la lumière naturelle. L'analyse de la lumière du jour est effectuée avec Daysim et Radiance pour évaluer l'éblouissement et la répartition lumineuse. Pour l'analyse énergétique, EnergyPlus et OpenStudio simulent les besoins en chauffage, refroidissement, et consommation énergétique, tandis que THERM 7.6 effectue le calcul thermique et évalue le confort thermique des occupants. Ce processus global permet d'évaluer l'éclairage naturel, la consommation énergétique, et le confort thermique d'un bâtiment.

V.4.2. Paramétrisation des facteurs de confort.

Pour mener une analyse paramétrique complète et fiable, nous avons pris en compte une série de paramètres influençant le confort thermique et lumineux, ainsi que les performances énergétiques du bâtiment résidentiel. Ces paramètres comprennent des variables précises issues des programmes de simulation de bâtiments résidentiels de Honeybee, ainsi que des

caractéristiques matérielles et des scénarios climatiques basés sur le RCP 8.5. Voici les principaux éléments inclus dans notre simulation :

V.4.2.1. Orientation du bâtiment.

L'orientation par rapport au soleil joue un rôle crucial dans l'optimisation de la lumière naturelle et des gains solaires. Une orientation sud permet de maximiser les gains solaires en hiver de 20 %, tout en limitant la surchauffe estivale de 15 %. Dans notre étude de cas, le bâtiment est orienté à -14° vers le nord-est, ce qui influence les performances en termes d'éclairage naturel et de confort thermique, en particulier en réduisant l'exposition directe au soleil pendant les heures les plus chaudes de la journée.

V.4.2.2. Type de vitrage.

Le choix du vitrage a un impact significatif sur le confort thermique et lumineux des occupants. Dans notre étude de cas, le bâtiment utilise un vitrage simple en verre clair. (Voir tableau V.2). Ce type de vitrage présente une transmittance visible élevée (0,88), permettant à une quantité significative de lumière naturelle de pénétrer dans les espaces intérieurs, ce qui favorise le confort visuel. Toutefois, son U-Factor relativement élevé ($5,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) indique une performance thermique limitée, entraînant des pertes de chaleur importantes en hiver. De plus, le coefficient de gain de chaleur solaire de 0,86 suggère que ce vitrage capte une quantité considérable de chaleur solaire, ce qui pourrait entraîner une surchauffe pendant les mois d'été si des mesures de protection solaire ne sont pas mises en place.

V.4.2.3. Matériaux de construction des murs.

Les matériaux choisis pour la construction des murs influencent fortement l'isolation thermique et la gestion des variations de température à l'intérieur des bâtiments. Dans notre étude de cas, les murs sont composés (comme le montre le tableau V.2). Ce tableau présente les différentes couches composant les murs extérieurs et intérieurs de notre bâtiment. Par exemple, la brique creuse utilisée dans les murs extérieurs offre une conductivité thermique de $0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, tandis que le vide d'air permet de réduire les transferts thermiques, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment.

V.4.2.4. Isolation thermique.

L'isolation des parois, des toitures et des planchers joue un rôle crucial dans la réduction des besoins énergétiques d'un bâtiment. Dans notre cas d'étude, il est important de noter qu'aucune isolation thermique traditionnelle n'a été utilisée. Cependant, un vide d'air a été intégré dans la conception du mur extérieur, situé entre les différentes couches du mur. Ce vide d'air contribue à améliorer l'efficacité énergétique en réduisant les transferts thermiques, ce qui peut atténuer les fluctuations de température intérieure. Bien que l'absence d'une isolation conventionnelle puisse sembler désavantageuse.

V.4.2.5. Systèmes de protection solaire.

Les systèmes de protection solaire, tels que les brise-soleils et les stores, jouent un rôle essentiel dans la régulation de la lumière naturelle et de la chaleur à l'intérieur des bâtiments. Cependant,

dans notre cas d'étude, il est important de noter qu'aucune protection solaire n'a été intégrée dans le bâtiment (voir figure V.5). Cette absence de dispositifs de protection solaire pourrait avoir un impact négatif sur le confort des occupants en augmentant l'éblouissement et en augmentant la charge de climatisation pendant les périodes de forte chaleur. Cela souligne l'importance d'envisager des solutions de protection solaire dans la conception de futurs projets pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort intérieur.



Figure V.6. Représentation du modèle numérique du bâtiment étudié. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

V.4.2.6. Planning énergétique et de confort.

Nous avons utilisé un programme de bâtiment résidentiel de Honeybee pour définir les variables essentielles des simulations thermiques et énergétiques. Les paramètres inclus dans la simulation sont : (voir figure V.6)

Température de consigne de chauffage fixée à 22°C.

Température de consigne de refroidissement à 27°C.

Température de chauffage réduite (set back) à 16°C.

Température de refroidissement réduite à 27°C.

Taux d'occupation de 0,033 personne par mètre carré.

Densité d'éclairage de 6,0 W/m².

Charges d'équipement électrique de 13,09 W/m².

Point de consigne pour la déshumidification fixé à 70 %.

Taux d'infiltration d'air de 0,00015 m³/s·m².

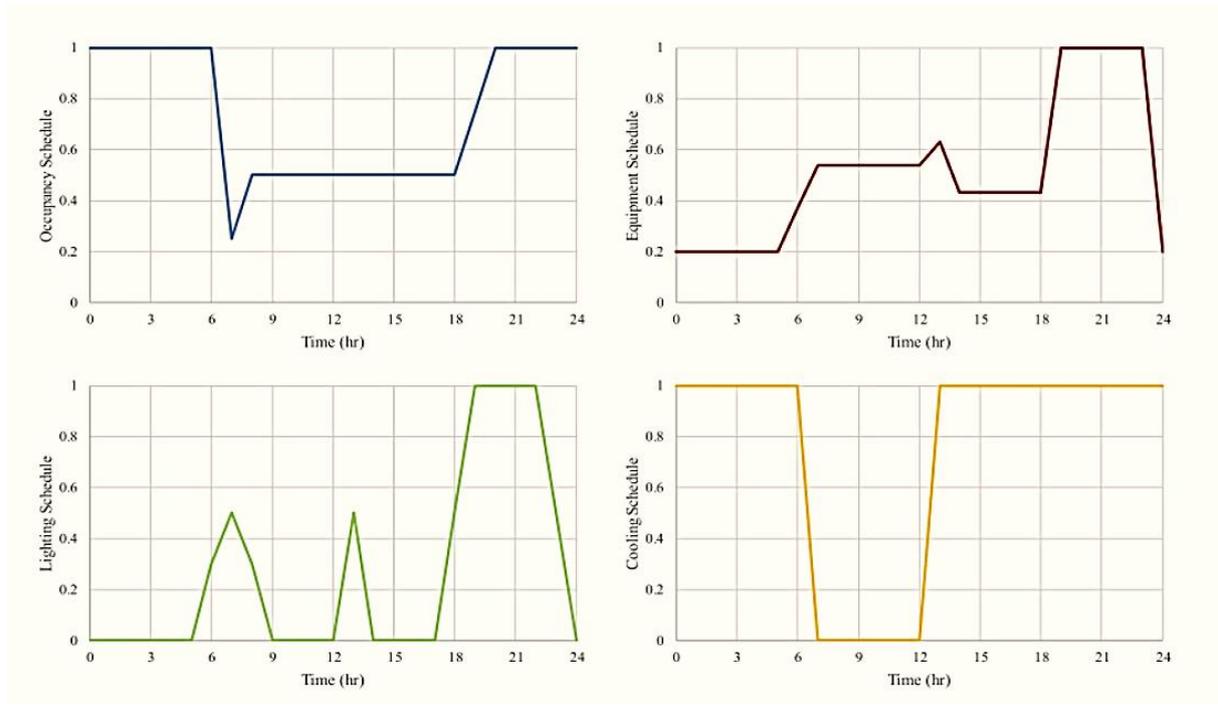


Figure V.7. Programme d'Activités pour les pièces sélectionnées. Source : Auteur.

Ces paramètres permettent de simuler précisément les besoins énergétiques du bâtiment, tenant compte à la fois du climat actuel et des conditions climatiques futures simulées avec le scénario RCP 8.5 (2050s/2080s). Cela inclut les consommations pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage, et les équipements électriques, tout en assurant un confort thermique et lumineux optimal. La section 3.2 de notre étude fournit une analyse détaillée des résultats obtenus en tenant compte de ces facteurs.

Grâce à cette approche globale, nous avons pu obtenir une évaluation précise des performances énergétiques, du confort thermique et lumineux, en lien direct avec les caractéristiques architecturales et les contraintes climatiques futures.

V.4.3. Évaluation des performances du cas de référence face aux changements climatiques.

Pour évaluer l'éclairage naturel, la performance thermique et la consommation énergétique globale sur une année, nous avons réalisé une simulation à l'aide du plug-in Honeybee, après avoir complété le processus de modélisation et de validation. La performance a été évaluée à l'aide des indicateurs suivants :

Nous avons utilisé le modèle d'Autonomie de la Lumière Naturelle Spatiale (sDA300/50%) pour analyser l'éclairage naturel. Ce paramètre indique le pourcentage de la surface du sol qui reçoit au moins 300 lux d'éclairement pendant au moins 50 % des heures occupées (de 8 h à 18 h) tout au long de l'année. Il est important de noter que la Société des Ingénieurs Éclairagistes d'Amérique du Nord (IESNA) recommande qu'au moins 75 % de la surface des pièces satisfasse cette norme.

La consommation énergétique a été évaluée à l'aide du calcul de l'Intensité d'Utilisation Énergétique (EUI), qui détermine l'utilisation annuelle d'énergie par unité de surface pour le refroidissement, le chauffage, l'éclairage électrique et les charges d'équipement. De plus, la performance thermique des pièces a été mesurée à l'aide du pourcentage de confort thermique (TCP), du pourcentage de sensation de chaleur (HSP), du pourcentage de sensation de froid (CSP), suivi des conditions de confort (également appelées confort adaptatif, AC) avec une taille de grille de (0,75 m * 0,75 m). Comme recommandé dans LEED V4, les valeurs sont les suivantes : -1 pour des conditions inacceptablement froides ; 0 pour des conditions neutres (confortables) ; +1 pour des conditions inacceptablement chaudes — similaire aux indices PPD et PMV de Fanger, respectivement.

V.4.3.1. Évaluation de l'autonomie spatiale de la lumière du jour : processus et résultats.

L'état actuel du design a été simulé et analysé, produisant des résultats intéressants illustrés dans (la Figure V.7). L'Autonomie Spatiale de la Lumière du Jour (SDA) dans la pièce 1, située au rez-de-chaussée, était de 32,22 % dans des conditions d'année météorologique typique (TMY) et de 36,52 % dans le scénario RCP 2050. De plus, elle a atteint 37,13 % pour le scénario RCP 2080, ce qui représente des augmentations respectives de 13,34 % et 15,23 %. Il est essentiel de noter que plus de la moitié de la zone simulée n'a pas atteint un score SDA de 50. De plus, la distribution de l'éclairage était inégale, certaines zones proches des fenêtres recevant plus de 2000 lux, tandis que d'autres n'atteignaient même pas 50 lux.

Concernant la pièce 2, située à l'étage intermédiaire, les valeurs de SDA étaient de 34,15 % pour TMY, 37,19 % pour RCP 2050 et 38,63 % pour RCP 2080, représentant des augmentations de 8,90 % et 13,11 %, respectivement. Des observations similaires concernant une distribution inégale de la lumière ont été faites, comme au rez-de-chaussée. En ce qui concerne la pièce 3, au dernier étage, elle a enregistré les niveaux de SDA les plus élevés parmi tous les étages, avec 35,95 % pour TMY, 38,62 % pour RCP 2050 et un impressionnant 39,56 % pour RCP 2080, affichant des augmentations respectives de 7,42 % et 9,12 %.

Il est intéressant de souligner que plus l'étage est élevé, meilleure est la distribution de l'éclairage (Voir Figure V.8), car la lumière pénètre plus profondément dans la pièce, ce qui augmente l'illumination. Cela démontre l'impact de la hauteur des étages sur la performance d'éclairage. Cependant, même si le dernier étage avait en continu les niveaux de SDA les plus élevés, il ne parvient toujours pas à fournir un éclairage naturel minimal à la zone d'étude.

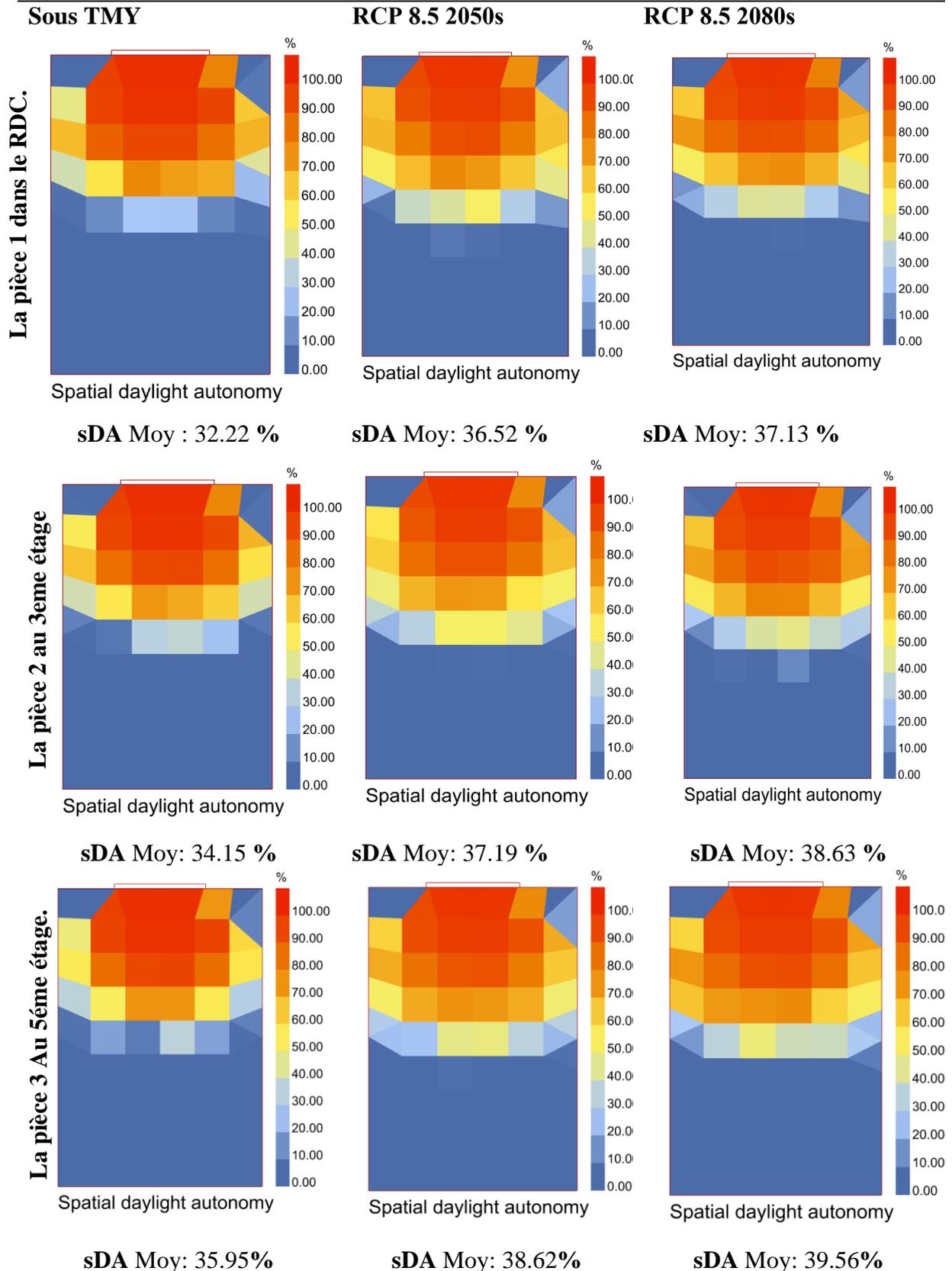


Figure V.8. Autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA300/50%) pour les pièces sélectionnées sous différentes conditions météorologiques. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

La majorité des valeurs d'éclairage ne se situent pas dans la plage définie (300 lux - 50 %), ce qui indique qu'elles ne satisfont que rarement les normes requises. Cela met en évidence les insuffisances du système de fenestration actuel et souligne la nécessité d'améliorations. En conséquence, l'éclairage artificiel est souvent utilisé, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie.

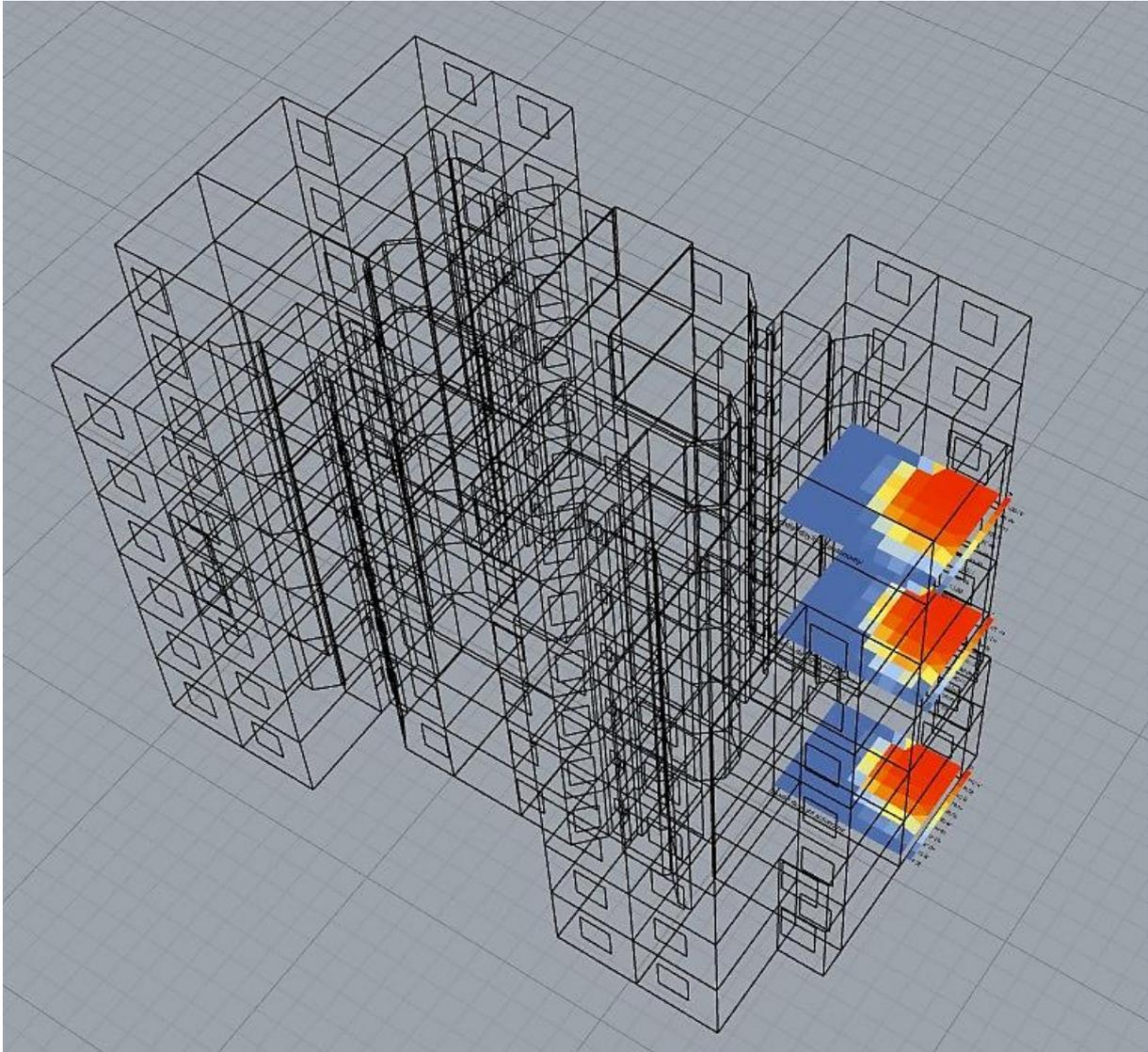


Figure V.9. Distribution de l'Éclairage dans les Trois Pièces Sélectionnées. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Les variations annuelles du SDA pour la performance du bâtiment au cours de son cycle de vie n'étaient pas significatives et demeuraient en dessous d'un seuil particulier, en comparaison avec les résultats des simulations thermiques et énergétiques à venir, qui seront détaillés dans la suite de cette section. Cette situation indique qu'il est crucial de réévaluer et d'optimiser les paramètres de conception et d'orientation pour améliorer le rendement énergétique et la qualité de l'éclairage naturel, ce qui pourrait réduire la dépendance à l'éclairage artificiel et, par conséquent, diminuer la consommation énergétique du bâtiment.

V.4.3.2. Évaluation de l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) : processus et résultats.

La Figure V.9 présente la consommation énergétique mensuelle pour le refroidissement, le chauffage, l'éclairage et les équipements électriques dans les pièces sélectionnées, sous des conditions climatiques actuelles et futures. La pièce 1, située au rez-de-chaussée, présente actuellement une intensité d'utilisation d'énergie (IUE) annuelle d'environ 127,69 kWh/m². Sous le scénario RCP 8.5 pour les années 2050, l'IUE augmente à environ 131,51 kWh/m², et pour les années 2080, elle s'élève à 143,48 kWh/m², ce qui représente des augmentations respectives de 2,99 % et 12,36 %. Il est particulièrement notable de souligner la baisse importante de l'énergie thermique annuelle de chauffage entre le présent et les années 2080, ce qui met en évidence les conséquences du réchauffement climatique et les modifications du comportement thermique du bâtiment. Cette consommation diminue de 43,86 % et 64,85 %, passant de 63,64 kWh/m² dans les conditions actuelles (TMY) à environ 35,74 kWh/m² pour les années 2050, et à 22,38 kWh/m² dans le scénario RCP 8.5 des années 2080. En revanche, l'énergie de refroidissement annuelle connaît une augmentation considérable. Sous les conditions TMY, elle commence à environ 41,46 kWh/m², pour atteindre 73,21 kWh/m² dans les années 2050 et 98,55 kWh/m² dans les années 2080, ce qui correspond à des augmentations d'environ 76,57 % et 137,69 %, respectivement. Cette augmentation est particulièrement marquée pendant la saison estivale.

En ce qui concerne la pièce 2, située à l'étage intermédiaire, l'IUE annuelle actuelle est d'environ 128,21 kWh/m², et passe à 133,07 kWh/m² sous le scénario RCP 8.5 pour les années 2050, et à 145,56 kWh/m² pour les années 2080, avec des augmentations de 3,79 % et 13,53 %, respectivement. Comme pour la pièce 1, la pièce 2 subit des variations similaires en termes d'énergie de chauffage et de refroidissement annuels. Sous les conditions TMY, l'énergie de chauffage commence à 62,98 kWh/m², chute à 35,56 kWh/m² pour les années 2050, et atteint 22,20 kWh/m² dans les années 2080, représentant ainsi des baisses de 43,53 % et 64,75 %. Parallèlement, l'énergie de refroidissement augmente de manière significative, débutant à 42,85 kWh/m² dans les conditions TMY, atteignant 75,12 kWh/m² pour les années 2050, puis 100,97 kWh/m² dans les années 2080, représentant une augmentation de 75,30 % et 135,63 % respectivement.

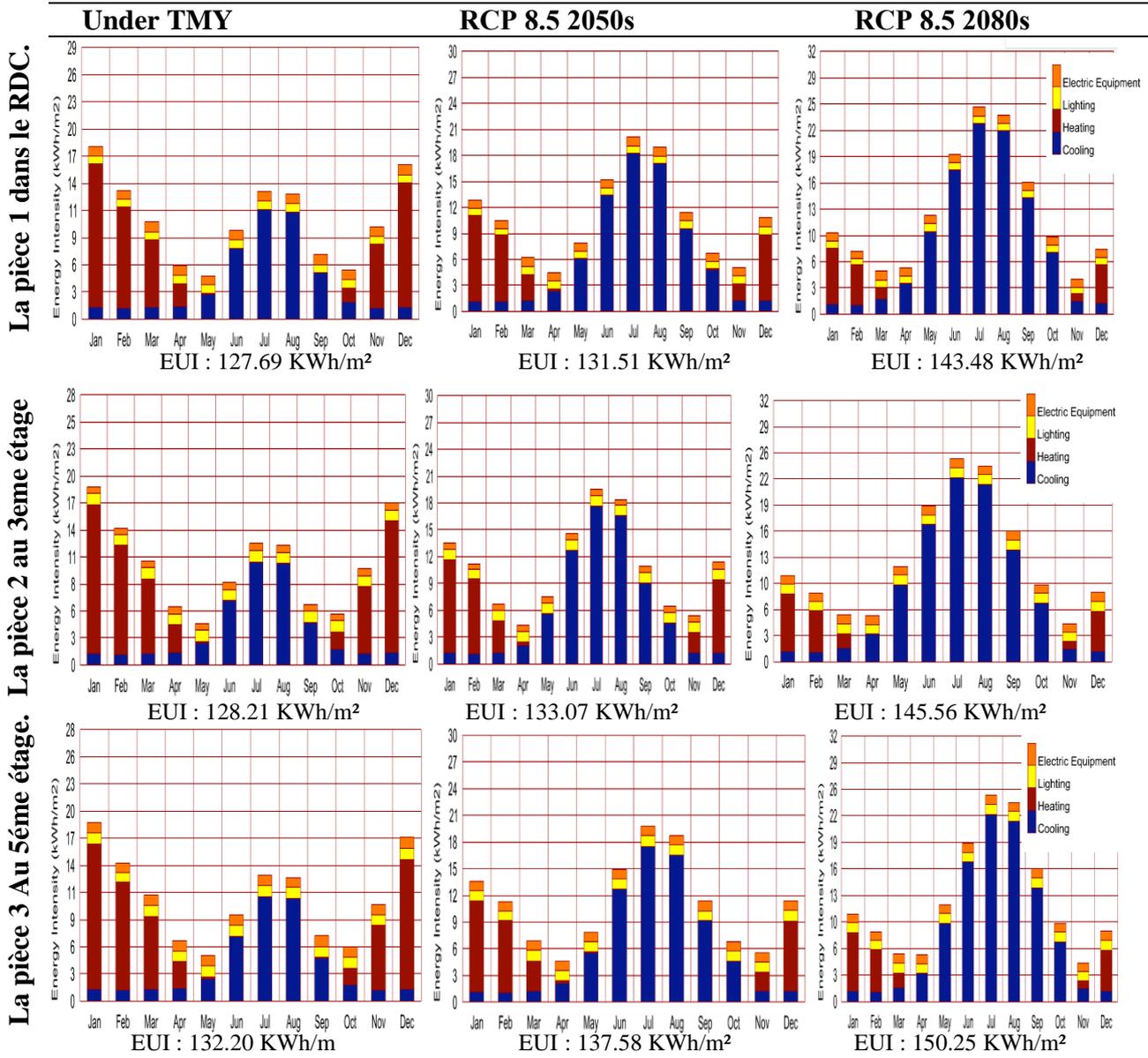


Figure.V.10. Consommation énergétique mensuelle des pièces sélectionnées sous différentes conditions météorologiques. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Pour la pièce située au dernier étage, qui se trouve être la plus énergivore avec une valeur actuelle de 132,23 kWh/m², les besoins pour les années 2050 et 2080 sont de 137,58 kWh/m² et 150,25 kWh/m², ce qui représente des augmentations respectives de 4,06 % et 13,65 %. La baisse des besoins en chauffage hivernal selon les projections climatiques pour les années 2050 et 2080 varie entre 43,81 % et 65,75 %. Il est essentiel de noter que l'ampleur de cette baisse pourrait varier en fonction de l'évolution du réchauffement climatique. D'un autre côté, l'augmentation de l'énergie de refroidissement annuelle dans cette pièce est notable, variant entre environ 74,19 % et 133,34 % sous les climats futurs. Cela suggère qu'au cours des mois d'été plus chauds, le dernier étage enregistre une hausse marquée de la consommation d'énergie pour le refroidissement.

La demande d'énergie pour le refroidissement se manifeste de manière dominante pendant la période d'avril à octobre, avec un pic notable durant les mois d'été dans les conditions météorologiques actuelles (TMY). En revanche, sous les projections climatiques futures, cette domination s'étend de mars à novembre. Ce changement de schéma saisonnier met en évidence l'impact croissant du changement climatique sur la demande énergétique.

Par ailleurs, la consommation d'énergie pour l'éclairage électrique et les équipements reste élevée tout au long de l'année dans chacune des pièces choisies. Ce schéma laisse entendre qu'une augmentation de l'utilisation de la lumière naturelle, notamment en intégrant davantage de vitrages dans la conception du bâtiment, pourrait être bénéfique. De plus, des améliorations de l'enveloppe du bâtiment, telles qu'une meilleure isolation des murs ou une augmentation de la masse thermique, contribueraient probablement à une amélioration notable de l'efficacité énergétique.

Ces résultats soulignent l'importance d'utiliser des données climatiques futures pour évaluer avec précision les performances énergétiques d'un bâtiment, car les données climatiques historiques ne suffisent plus à refléter adéquatement les changements rapides induits par le réchauffement climatique. Il devient alors crucial de réévaluer les paramètres de conception, notamment l'orientation et la conception de l'enveloppe du bâtiment, pour optimiser les performances énergétiques face aux conditions climatiques futures. Cela permettrait non seulement de réduire la dépendance à l'éclairage et au refroidissement artificiels, mais également de limiter la consommation énergétique globale du bâtiment.

V.4.3.3. Évaluation du confort thermique : Processus et Résultats.

Un modèle de confort thermique adaptatif a été employé pour évaluer la performance thermique des pièces sélectionnées. Contrairement aux systèmes classiques qui dépendent fortement des systèmes de chauffage et de refroidissement mécaniques, ce modèle prend en compte la possibilité pour les occupants de réguler la température intérieure par des moyens passifs, comme l'ouverture des fenêtres pour favoriser la ventilation naturelle. Cette approche est cruciale dans le contexte de la conception environnementale, car elle vise à réduire la consommation énergétique tout en améliorant le confort des occupants. Le Tableau V.9 illustre ces résultats, et met en évidence l'importance de considérer des systèmes alternatifs, comme la ventilation naturelle, pour mieux adapter les bâtiments aux besoins changeants des occupants.

Tableau V.8. Analyse du confort thermique pour les pièces sélectionnées dans différentes conditions climatiques. Source : Auteur.

	TMY			RCP8.5 2050S			RCP 8.5 2080S		
	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3
Heures d'inconfort	6179	6161	6089	6259	6368	6424	6192	6325	6373
TCP %	29.46	29.66	30.49	28.55	27.30	26.66	29.31	27.79	27.24
HSP %	32.45	36.96	38.31	44.00	48.43	50.34	49.37	53.90	55.77
CSP %	38.08	33.36	31.19	27.44	24.25	22.92	21.31	18.29	16.97

Les résultats montrent que la pièce 1 a atteint 2580,69 heures de confort thermique (TCH) sur un total de 8760 heure annuel, ce qui correspond à un taux de confort d'environ 29 %. Cela signifie que cette pièce présente un état d'inconfort pendant 71 % du temps annuel, soit 6179,31

Chapitre V

heures. Ce taux de confort, inférieur aux 80 % exigés par la norme ASHRAE 55-2013, est significatif, car il souligne la nécessité d'améliorer les conditions thermiques intérieures pour garantir une qualité de vie acceptable pour les occupants. (La Figure V.10, V.11, V.12) illustre les moments où une personne se sent chaude, froide ou à l'aise, mettant en évidence les diverses sensations thermiques qui peuvent être ressenties par les occupants en fonction des conditions climatiques.

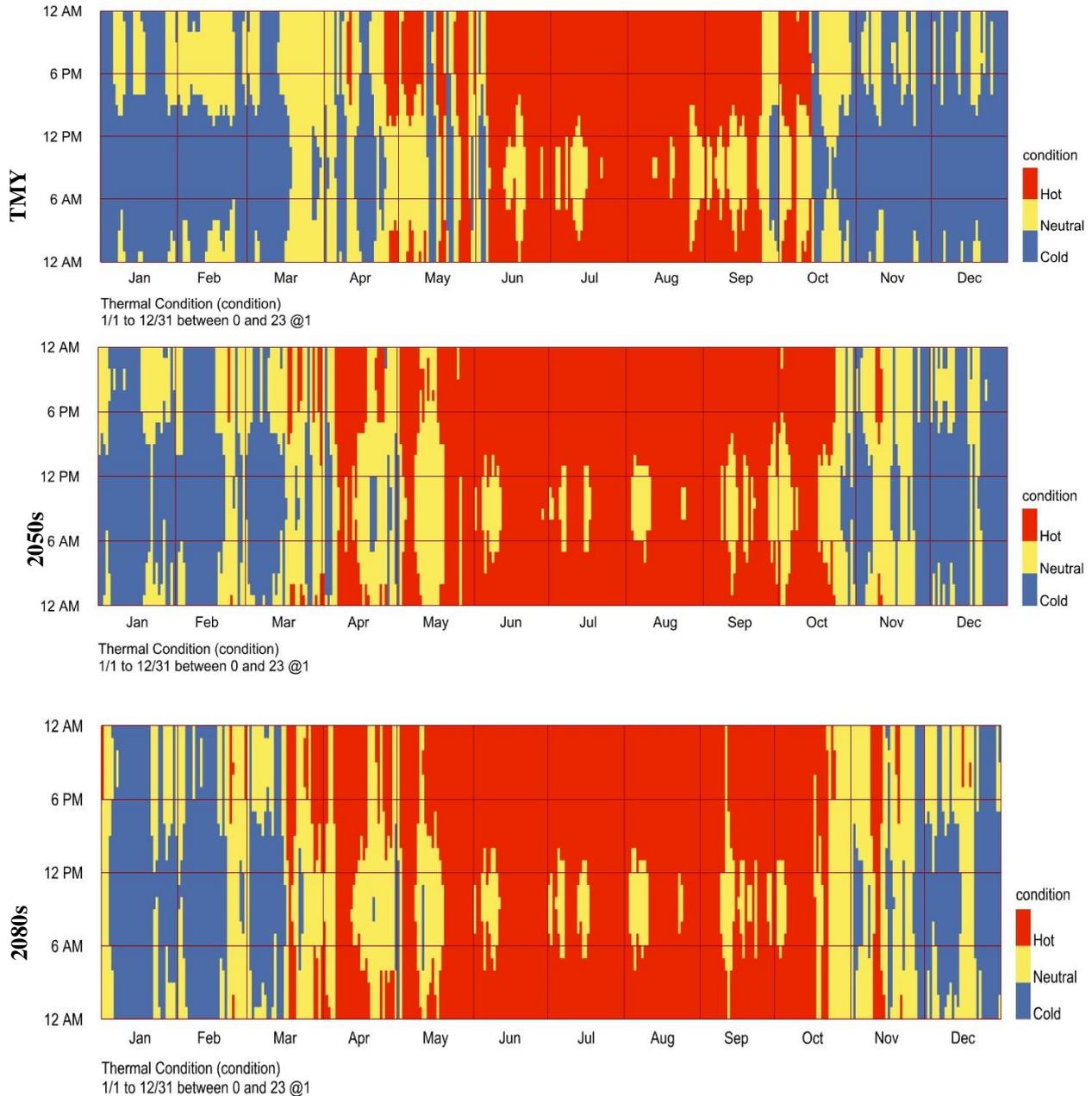


Figure V.11. Diagramme de confort adaptatif dans la première pièce du rez-de-chaussée. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Il est intéressant de noter que sous des conditions climatiques futures, le pourcentage d'heures de confort thermique (TCH) reste relativement stable. Cependant, le scénario climatique RCP8.5 prévoit une augmentation de 35,59 % du pourcentage de sensation de chaleur (HSP) dans les années 2050, et une hausse plus prononcée de 52,14 % d'ici 2080. Cette augmentation s'explique principalement par la montée des températures induite par le réchauffement

climatique. De plus, il y a une diminution parallèle de la sensation de froid (CSP) de 27,94 % en 2050 et de 44,03 % en 2080, ce qui implique que les occupants ressentiraient moins le besoin de se réchauffer, mais plus celui de se rafraîchir.

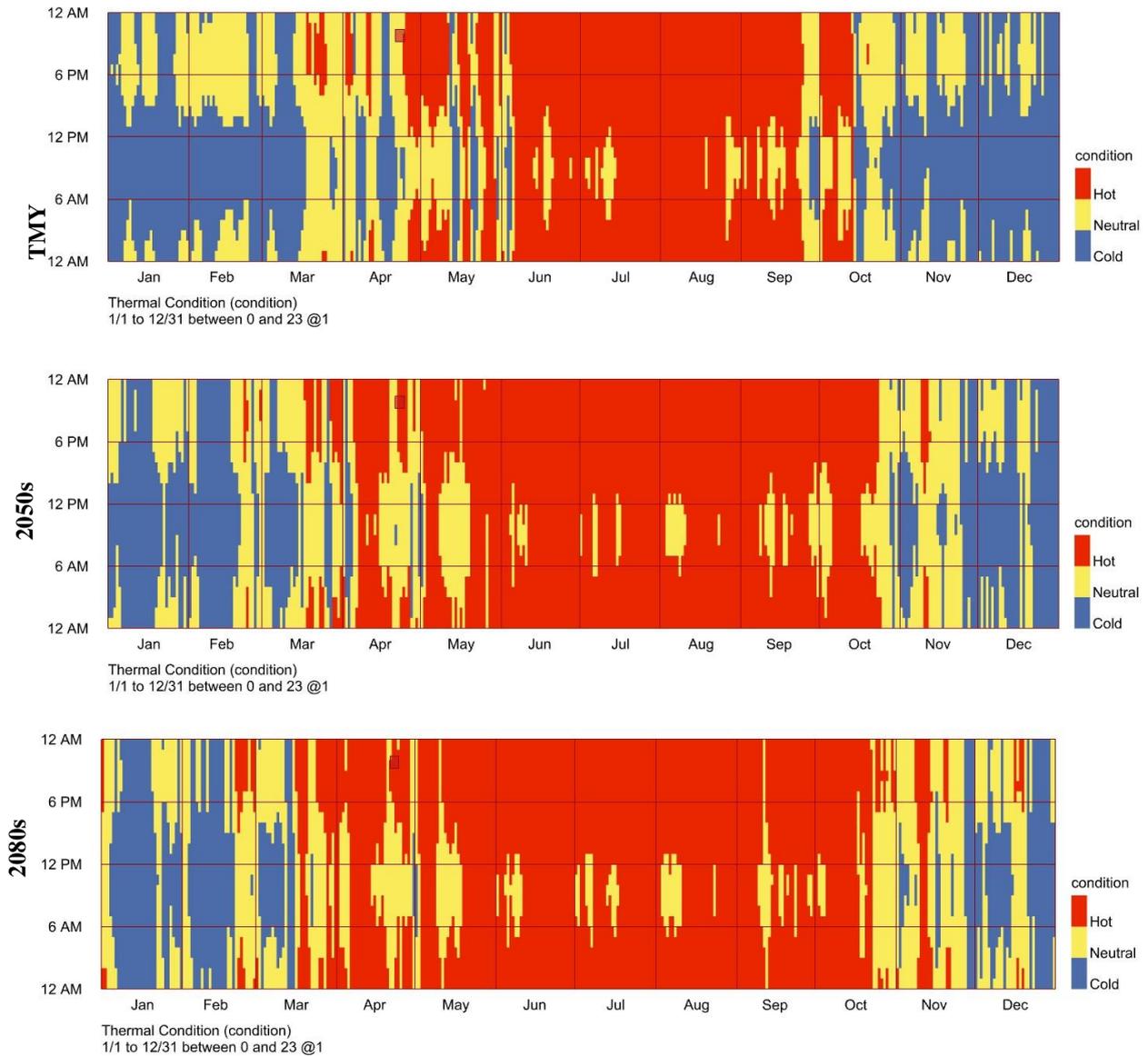


Figure.V.12. Diagramme de confort adaptatif dans la deuxième pièce du 3ème étage. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Ces résultats soulignent les défis croissants en matière de confort thermique dans les bâtiments à mesure que le climat évolue. Si les habitants ressentent davantage de chaleur dans les scénarios climatiques futurs, cela signifie que la demande en énergie pour le refroidissement pourrait augmenter de manière significative, entraînant une consommation accrue d'énergie électrique pour les systèmes de climatisation. Cette tendance s'éloigne de l'objectif d'une réduction de la dépendance aux systèmes mécaniques et montre la nécessité de concevoir des bâtiments plus résilients et mieux adaptés à ces futures conditions climatiques.

Chapitre V

En comparant les différents niveaux du bâtiment (Voir figure V.11 et V.12), les résultats sous des conditions climatiques actuelles (TMY) révèlent des variations notables des sensations de chaleur et de froid. Par exemple, il y a une augmentation de 13,89 % et 18,05 % des sensations de chaleur respectivement entre le rez-de-chaussée et les étages supérieurs. Cela suggère que la répartition de la chaleur dans le bâtiment varie en fonction de l'altitude des pièces, probablement en raison d'une meilleure isolation ou d'une plus grande exposition solaire aux niveaux supérieurs. Inversement, la sensation de froid diminue de 12,39 % et 18,09 % respectivement, ce qui pourrait signifier une meilleure régulation thermique naturelle aux étages plus élevés, réduisant ainsi la sensation de froid en hiver.

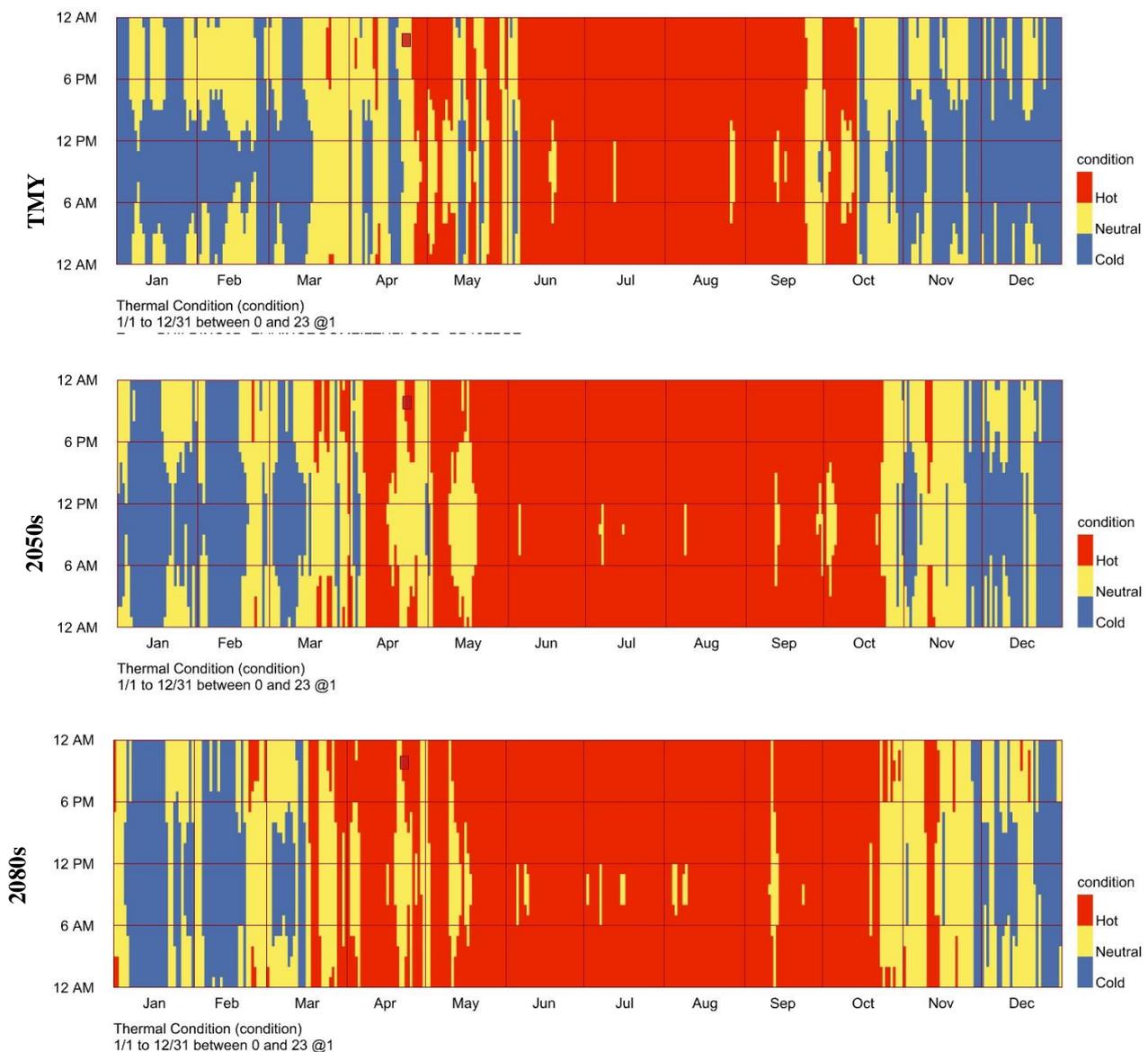


Figure V.13. Diagramme de confort adaptatif dans la troisième pièce du 5^{ème} étage. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Sous les scénarios climatiques RCP8.5, ces tendances se confirment, avec une augmentation de la sensation de chaleur (HSP) de 10,06 % à 14,40 % pour les années 2050, et jusqu'à 12,96 % d'ici 2080. Cette évolution renforce l'idée que les occupants ressentiront davantage de chaleur dans le futur, nécessitant potentiellement un recours accru à des systèmes de refroidissement.

À l'inverse, la sensation de froid diminue de manière significative, jusqu'à 20,36 % en 2080, ce qui indique que les besoins en chauffage pourraient être considérablement réduits à l'avenir.

Ces résultats montrent clairement que la conception actuelle des bâtiments devra être revue pour s'adapter aux conditions climatiques futures. Il sera essentiel d'intégrer des stratégies de conception passives, comme l'utilisation de matériaux à haute inertie thermique, une meilleure isolation, et une gestion intelligente des fenêtres pour maximiser la ventilation naturelle. Ces stratégies peuvent contribuer à réduire la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation tout en garantissant le confort des occupants. De plus, la conception des enveloppes de bâtiment devra être optimisée pour limiter les pertes thermiques en hiver et empêcher les gains excessifs de chaleur en été.

En conclusion, ces résultats illustrent l'importance d'une approche holistique dans la conception des bâtiments, où l'adaptabilité et la résilience face aux futures conditions climatiques sont prioritaires. L'utilisation de modèles de confort thermique adaptatif permet de mieux comprendre les interactions entre l'enveloppe du bâtiment, les systèmes passifs, et le comportement des occupants. Il s'agit d'une étape cruciale pour concevoir des bâtiments capables de répondre aux défis du réchauffement climatique, tout en minimisant l'empreinte énergétique et en assurant le bien-être des occupants à long terme.

V.4.4. Impacts de l'altitude des appartements sur les résultats.

Les résultats obtenus montrent que l'altitude des appartements joue un rôle crucial dans les performances thermique, visuelle et énergétique des espaces intérieurs. En ce qui concerne le confort thermique, les étages supérieurs présentent des niveaux de chaleur plus élevés, en particulier en été, en raison d'une exposition accrue aux rayonnements solaires. Comme observé dans les analyses, la sensation de chaleur (HSP) augmente avec l'altitude, tandis que la sensation de froid (CSP) diminue, en particulier sous les scénarios futurs de réchauffement climatique (RCP8.5). Cela suggère que les occupants des étages supérieurs pourraient faire face à un inconfort accru pendant les périodes de chaleur, nécessitant un recours plus important à des systèmes de refroidissement, tandis que les besoins en chauffage diminueraient en hiver.

Sur le plan visuel, la distribution de la lumière naturelle varie également en fonction de l'altitude des appartements. Les étages plus élevés reçoivent généralement plus de lumière naturelle grâce à une meilleure exposition, ce qui réduit la dépendance à l'éclairage artificiel en journée. Cependant, cette intensité lumineuse peut parfois entraîner un éblouissement excessif, ce qui nécessite des ajustements dans la conception des fenêtres ou des systèmes de protection solaire pour assurer un confort visuel optimal.

Enfin, en matière de performance énergétique, les appartements situés aux étages supérieurs tendent à consommer plus d'énergie pour le refroidissement en été, à mesure que les températures intérieures augmentent avec l'altitude. Inversement, les étages inférieurs, mieux protégés contre la chaleur directe, consomment moins d'énergie pour le refroidissement mais peuvent nécessiter davantage de chauffage en hiver, en raison d'une plus grande sensation de froid.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de l'optimisation des performances énergétiques et de confort en tenant compte de la localisation verticale des appartements dans un bâtiment résidentiel. Des stratégies spécifiques à chaque niveau, comme l'amélioration de l'isolation, la gestion de l'ensoleillement ou la ventilation naturelle, sont nécessaires pour minimiser les impacts énergétiques tout en maximisant le confort des occupants.

V.4.5. Impacts du changement climatique futur sur les résultats.

Les résultats des simulations concernant les performances thermiques, visuelles et énergétiques des bâtiments révèlent que les futurs scénarios climatiques auront un impact majeur sur les conditions intérieures des appartements. En utilisant les projections climatiques basées sur le scénario RCP8.5 (forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre), il est possible d'anticiper des variations importantes dans le confort thermique et les besoins énergétiques des bâtiments résidentiels d'ici les années 2050 et 2080.

L'élévation des températures prévue par le scénario RCP8.5 entraînera une augmentation significative des heures de sensation de chaleur (HSP) pour les occupants. Par exemple, les résultats montrent une hausse de 35,59 % des heures de chaleur ressenties en 2050, atteignant 52,14 % d'ici 2080. Cette montée des températures nécessitera une adaptation des stratégies de gestion thermique des bâtiments, car les systèmes de refroidissement deviendront indispensables pour maintenir un confort acceptable.

D'autre part, la sensation de froid (CSP) diminue considérablement dans les scénarios futurs, avec une réduction de 27,94 % en 2050 et de 44,03 % en 2080. Cela implique que les occupants auront moins besoin de chauffer les espaces intérieurs en hiver, réduisant ainsi la demande énergétique pour le chauffage. Cependant, cette baisse des besoins en chauffage ne compensera probablement pas la forte augmentation des besoins en refroidissement, en particulier pendant les étés plus chauds et plus longs.

Bien que les effets du changement climatique sur la lumière naturelle ne soient pas aussi directement influencés que les aspects thermiques, il est possible que l'augmentation des températures et des phénomènes climatiques extrêmes (tels que des périodes plus longues de chaleur intense) modifie la gestion de l'éclairage dans les bâtiments. Les stratégies de protection solaire deviendront cruciales pour limiter l'impact des apports solaires excessifs sur la température intérieure, sans compromettre la qualité de la lumière naturelle.

Le changement climatique futur aura un impact significatif sur la consommation énergétique des bâtiments. Les résultats des simulations montrent que les besoins en refroidissement augmenteront considérablement sous le scénario RCP8.5, car les températures extérieures plus élevées rendront les systèmes de climatisation essentiels pour garantir le confort des occupants. L'augmentation de la demande en énergie pour le refroidissement pourrait dépasser les économies réalisées grâce à la diminution des besoins en chauffage pendant les mois d'hiver.

Par conséquent, la consommation énergétique globale des bâtiments résidentiels pourrait augmenter dans les futurs scénarios climatiques, en particulier si des mesures d'efficacité

énergétique ne sont pas mises en place. Il sera crucial d'optimiser l'enveloppe du bâtiment, en mettant en œuvre des stratégies de conception passive, comme l'amélioration de l'isolation thermique et l'utilisation de matériaux à forte inertie thermique, afin de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la demande en énergie.

Le changement climatique futur, en particulier sous les scénarios RCP8.5, aura des conséquences importantes sur les performances thermiques et énergétiques des bâtiments résidentiels. L'augmentation des températures entraînera une hausse des besoins en refroidissement, et bien que la demande en chauffage puisse diminuer, les conditions extrêmes de chaleur future exigeront des solutions plus innovantes pour maintenir un confort acceptable tout en minimisant l'empreinte énergétique. Les stratégies de conception devront évoluer pour intégrer ces nouvelles réalités climatiques, notamment à travers l'amélioration des systèmes de ventilation naturelle, l'optimisation de l'enveloppe des bâtiments et l'intégration de technologies de refroidissement plus efficaces.

Il est impératif de prendre en compte ces changements climatiques dans toutes les études environnementales thermiques ou énergétiques des bâtiments. L'intégration de ces facteurs permettrait d'assurer que les bâtiments conçus aujourd'hui puissent répondre aux défis futurs en matière de confort, tout en minimisant la consommation d'énergie et l'impact environnemental.

V.5. Conclusion du chapitre.

Ce chapitre a analysé en détail les performances thermiques, visuelles et énergétiques des appartements en utilisant une approche paramétrique. Cette méthode a permis d'explorer l'impact de différents paramètres environnementaux sur le confort intérieur, en particulier l'altitude des appartements et les scénarios de changement climatique futur. Les résultats montrent que l'altitude influence directement les conditions de confort thermique, avec une augmentation des sensations de chaleur aux étages supérieurs et une réduction des sensations de froid, ce qui nécessite une attention particulière dans la conception des bâtiments.

L'analyse sous l'hypothèse des scénarios climatiques futurs (RCP 8.5) a également révélé des changements significatifs, soulignant l'importance d'intégrer ces prévisions dans toute étude thermique ou énergétique des bâtiments. Il est impératif de prendre en compte ces changements climatiques dans la conception environnementale intégrée afin d'assurer une durabilité à long terme.

Dans un premier temps, une étape cruciale de validation des résultats a permis de confirmer la fiabilité des données obtenues et d'assurer la pertinence des modèles utilisés dans cette analyse. Cela a été fondamental pour valider la démarche paramétrique et garantir que les solutions proposées sont basées sur des données précises et robustes.

Le prochain chapitre se concentrera sur l'optimisation multi-objectifs en utilisant des algorithmes évolutifs, notamment l'algorithme génétique, afin d'améliorer les performances des bâtiments. Cette optimisation permettra de répondre simultanément aux exigences de confort intérieur et de réduction de la consommation énergétique, tout en restant dans le cadre de

l'approche paramétrique. En intégrant de multiples variables environnementales, cette approche optimisera la conception des bâtiments pour qu'ils soient mieux adaptés aux défis climatiques futurs, minimisant ainsi la dépendance aux systèmes mécaniques de chauffage et de refroidissement.

Chapitre VI.
**Optimisation multi-objectifs et
recherche de la solution optimale.**

Introduction.

L'optimisation des performances énergétiques des bâtiments est devenue un enjeu majeur dans le cadre de la lutte contre le changement climatique et de la promotion d'une architecture durable. Face à des exigences de confort croissantes et à la nécessité de réduire l'impact environnemental des constructions, il est essentiel d'adopter des stratégies d'optimisation qui tiennent compte des multiples objectifs en jeu. Ce chapitre se concentre sur la mise en place d'une approche d'optimisation multi-objectifs, visant à améliorer simultanément le confort intérieur et l'efficacité énergétique au sein de notre objet d'étude.

Dans un premier temps, nous aborderons la méthodologie utilisée pour identifier et définir les variables pertinentes à optimiser, telles que les caractéristiques des murs extérieurs, l'orientation du bâtiment, le choix des matériaux des fenêtres et l'intégration de dispositifs d'ombrage. Ces éléments sont cruciaux pour concevoir des espaces habitables qui répondent aux normes contemporaines de performance énergétique tout en garantissant le bien-être des occupants.

Ensuite, nous précisons les objectifs d'optimisation en mettant l'accent sur l'Intensité d'utilisation d'énergie (IUE) et le confort thermique, deux indicateurs fondamentaux pour évaluer l'efficacité d'un bâtiment. En adoptant une démarche paramétrique, nous serons en mesure d'analyser les effets de différentes configurations sur ces objectifs, tout en tenant compte des variations climatiques futures.

Enfin, nous présenterons les outils et méthodologies d'optimisation utilisés dans cette étude, en mettant en lumière leur pertinence et leur efficacité dans le processus de recherche de la solution optimale. En confrontant les résultats obtenus à des scénarios climatiques réalistes, ce chapitre illustre l'importance d'une conception adaptative et innovante pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels.

VI.1. Optimisation Multi-Objectifs et Recherche de la Solution Optimale.

VI.1.1. Mise en place de l'optimisation pour le cas d'étude.

Cette section aborde l'intégration de l'optimisation dans le processus de conception environnementale, appliquée au cas d'étude des appartements résidentiels étudiés. L'objectif est d'améliorer les performances thermiques, visuelles et énergétiques tout en répondant aux exigences de confort des occupants.

L'optimisation consiste à identifier les solutions les plus efficaces en utilisant des algorithmes et des modèles paramétriques pour simuler différentes configurations architecturales. Dans le cadre de ce cas d'étude, plusieurs variables ont été prises en compte, telles que l'épaisseur des murs, la qualité de l'isolation, l'orientation des fenêtres, et la proportion de ventilation naturelle. Ces paramètres sont modifiés à travers des simulations pour identifier les configurations qui minimisent la consommation énergétique tout en maximisant le confort thermique et visuel des habitants.

L'approche repose sur l'utilisation d'un algorithme d'optimisation multi-objectifs, qui permet de concilier des objectifs souvent contradictoires, comme la réduction de la demande en énergie tout en assurant un confort optimal. Par exemple, il s'agit d'optimiser à la fois la réduction des besoins en refroidissement pour les étages supérieurs, plus exposés à la chaleur, tout en améliorant la distribution de la lumière naturelle.

Le processus d'optimisation utilise les données recueillies lors des simulations thermiques et énergétiques du bâtiment sous différentes conditions climatiques, notamment les scénarios futurs de réchauffement climatique (RCP8.5). Ces données sont ensuite traitées pour générer des solutions optimales qui peuvent être appliquées aux caractéristiques architecturales du bâtiment, réduisant ainsi la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation.

Enfin, cette section met en lumière les bénéfices de l'optimisation dans une démarche de conception environnementale. Elle permet d'anticiper les impacts des changements climatiques et de concevoir des bâtiments résilients qui allient efficacité énergétique et confort des occupants, tout en tenant compte des spécificités de l'environnement bâti, comme l'altitude des appartements dans le bâtiment.

VI.1.2. Définition des variables et des objectifs à optimiser.

VI.1.2.1. Variables d'optimisation.

Afin d'améliorer la performance du bâtiment, plusieurs paramètres ont été ajustés tout au long du processus d'optimisation, guidés par des études antérieures (Bakmohammadi & Noorzai, 2020; Toutou et al., 2018) et l'analyse de cas de base décrite dans la section précédente. Les explications détaillées de ces paramètres se trouvent ci-dessous :

VI.1.2.1.1. Rapport Fenêtre-Mur/ Window-to-Wall Ratio (WWR).

Une large gamme de rapports fenêtre-mur (voir figure VI.1) , allant de 0,2 à 0,95 par incréments de 0,1, a été examinée. Cette gamme a été choisie pour optimiser l'éclairage naturel, un aspect essentiel de la conception passive connu pour améliorer l'efficacité du bâtiment. En ajustant le rapport fenêtre-mur, il est possible d'augmenter l'apport de lumière naturelle, réduisant ainsi le

besoin d'éclairage artificiel pendant la journée, ce qui peut se traduire par des économies d'énergie significatives.

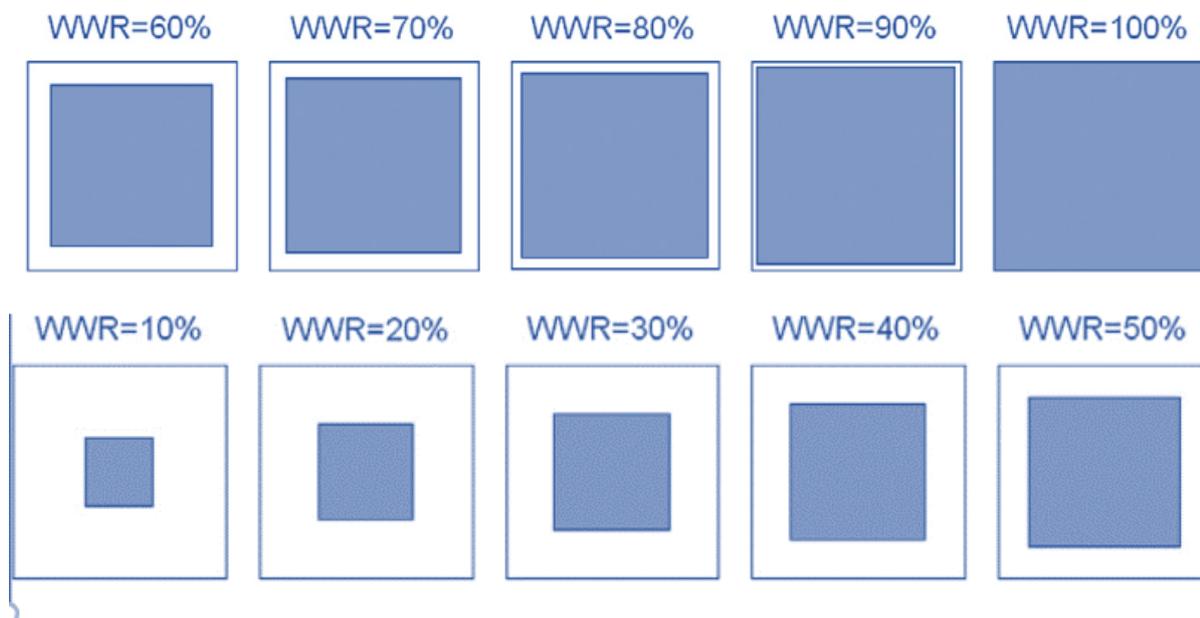


Figure VI.1. Pourcentage du ratio fenêtres. Source : Auteur.

VI.1.2.1.2. Caractéristiques de construction des murs extérieurs.

Les paramètres liés à la construction des murs extérieurs ont été sélectionnés afin de comprendre leur performance. Comme indiqué dans le Tableau VI.1, quatre matériaux distincts pour la construction des murs ont été choisis en tenant compte des coûts, de la disponibilité des matériaux et des performances thermiques. Chaque matériau offre des caractéristiques uniques qui influencent l'isolation thermique, la résistance aux intempéries et la durabilité. L'évaluation de ces matériaux permet d'optimiser non seulement la consommation d'énergie mais aussi le confort thermique des occupants.

Tableau VI.1. *Caractéristiques des matériaux de mur utilisés pour la simulation paramétrique. Source : Auteur.*

Type de mur	Épaisseur (M)	Conductivité (W/M-K)	Densité (Kg/M3)	Chaleur Spécifique (J/Kg-K)	Absorbance Thermique
Construction en blocs de béton avec isolation	0.3				
Stucco	0.02	0.69	1858.00	836.46	0.9
Bloc de béton	0.15	1.31	2240.00	836.26	0.9
Isolation					
Bloc de béton	0.15	1.31	2240.00	836.26	0.9
Platre	0.0095	0.57	800.00	1089.29	0.9
Brique creuse double avec espace d'air	0.3				
Ciment extérieur	0.02				
Brique creuse	0.15	0.9	1920.00	790.00	0.9
isolation	0.05	0.667	1.28	1000.00	0.9

Chapitre VI

brique creuse	0.10	0.9	1900.00	790.00	0.9
Platre	0.009	0.57	800.00	1089.29	0.9
Brique creuse double avec espace d'air	0.3				
Ciment extérieur	0.02				
Brique creuse	0.15	0.9	1920.00	790	0.9
Espace d'air du mur	0.05	0.667	1.28	1000	0.9
Brique creuse	0.10	0.9	1900.00	790	0.9
Platre	0.009	0.57	800.00	1089.29	0.9
Panneaux de béton à noyaux creux	0.3				
Stucco	0.02	0.69	1858.00	836.46	0.9
Panneaux de béton à noyaux creux	0.15	1.95	2239.06	920.50	0.75
Isolation					
Platre	0.009	0.57	800.00	1089.29	0.9

VI.1.2.1.3. Orientation du bâtiment.

L'orientation du bâtiment a été modifiée, passant du nord au sud (Voir figure VI.2), en ajustant son angle d'orientation dans une plage de 0 à 180 degrés. Ce changement de paramètre a un impact significatif sur l'efficacité énergétique, le confort thermique, l'éclairage naturel et la durabilité globale de la construction. Une orientation appropriée peut maximiser l'exposition à la lumière naturelle tout en minimisant les gains thermiques indésirables, ce qui est crucial pour optimiser les performances énergétiques et réduire les besoins en chauffage et en climatisation.

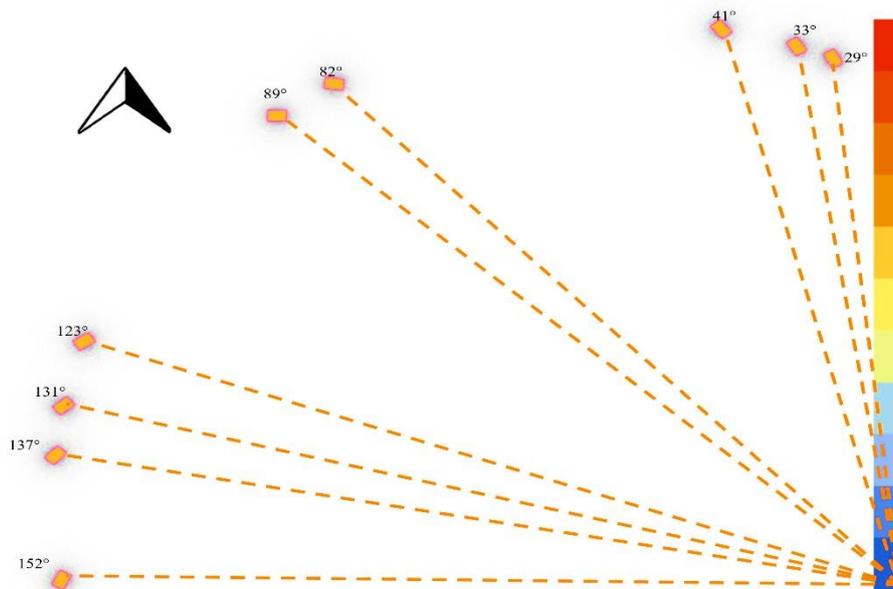


Figure VI.2. Analyse de l'orientation du bâtiment. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

La figure représente graphiquement les différentes orientations d'un bâtiment et les angles de lumière associés, mesurés par rapport au nord. Ces angles, variant de 29° à 152°, démontrent comment l'orientation peut influencer l'exposition à la lumière naturelle. Par exemple, un angle de 29° peut indiquer une exposition réduite, tandis qu'un angle de 152° pourrait signifier une exposition importante. Ce phénomène est essentiel à prendre en compte, car il impacte directement le confort thermique et visuel des occupants. En fonction de l'orientation, certaines façades du bâtiment bénéficieront de niveaux de lumière naturelle plus élevés, améliorant ainsi la qualité de l'espace intérieur.

VI.1.2.1.4. Sélection du matériau des fenêtres.

Six matériaux de fenêtres distincts, répertoriés dans le Tableau VI.2, ont été examinés afin de mieux comprendre les caractéristiques de performance spécifiques de chacun. Des facteurs tels que l'isolation, le gain de chaleur solaire et la réduction de l'éblouissement sont des éléments clés que ces matériaux peuvent influencer. En choisissant le bon matériau, il est possible d'améliorer le confort intérieur et d'accroître l'efficacité énergétique du bâtiment. La sélection des matériaux appropriés est essentielle non seulement pour répondre aux exigences de performance thermique, mais également pour garantir le bien-être des occupants grâce à une luminosité contrôlée et agréable.

Figure VI.2. Caractéristiques des matériaux en verre utilisés pour la simulation paramétrique. Source : Auteur.

Type	Matériaux	Épaisseur (M)	Coefficient U (W/M ² -K)	Coefficient de gain de chaleur solaire	Transmittance visible	Transmittance solaire
Vitrage simple	Verre clair simple	0.006	5.6	0.86	0.88	0.77
Vitrage double	Verre clair double 3mm/6mm air	0.012	2.6	0.76	0.75	0.60
Vitrage teinté	Verre teinté simple	0.006	3.72	0.75	0.64	0.63
Vitrage double teinté	Vitrage teinté double (6mm/13mm Air	0.025	2.1	0.63	0.61	0.67
Vitrage triple	Vitrage triple (Low-E Argon)	0.042	0.26	0.24	0.51	0.45
Vitrage double à faible émissivité	Vitrage double avec haute isolation.	0.024	0.9	0.26	0.61	0.49

Ce tableau présente une sélection variée de types de vitrage, chacun ayant des caractéristiques uniques qui influencent les performances énergétiques des bâtiments. Les différents matériaux et configurations de vitrage, allant du simple au triple vitrage, montrent une évolution vers une meilleure isolation thermique, avec des coefficients U plus faibles. Par exemple, le vitrage triple à faible émissivité (Low-E Argon) affiche un coefficient U remarquablement bas, indiquant une excellente performance en matière d'isolation.

Les coefficients de gain de chaleur solaire et les valeurs de transmittance visible et solaire offrent des indications précieuses sur la manière dont chaque type de vitrage interagit avec la lumière et la chaleur solaire. La sélection appropriée de vitrage peut donc non seulement optimiser le confort intérieur en réduisant les besoins de chauffage et de climatisation, mais également maximiser l'utilisation de la lumière naturelle tout en limitant l'éblouissement.

Ainsi, le choix des matériaux de vitrage joue un rôle crucial dans la conception durable des bâtiments, en contribuant à leur efficacité énergétique et en améliorant le bien-être des occupants.

VI.1.2.1.5. Dispositif d'ombrage horizontal.

Un dispositif d'ombre horizontal a été conçu avec des dimensions variables en termes de profondeur, de largeur et d'angles de rotation, dans le but d'optimiser le contrôle solaire, l'efficacité énergétique, l'esthétique et la fonctionnalité. Ce dispositif a été stratégiquement positionné en fonction de l'orientation des fenêtres, ce qui permet d'améliorer considérablement le confort intérieur tout en réduisant la consommation d'énergie.

L'importance de ce dispositif réside dans sa capacité à moduler la lumière naturelle qui pénètre dans le bâtiment. En ajustant la profondeur et la largeur de l'ombrage, il est possible de minimiser l'éblouissement et de réguler la température intérieure, surtout pendant les périodes de forte exposition solaire. De plus, l'inclinaison des lames de l'ombrage peut être adaptée pour maximiser les gains solaires en hiver tout en évitant la chaleur excessive en été. Cela contribue non seulement au confort thermique, mais permet également d'alléger la charge des systèmes de climatisation, favorisant ainsi une approche plus durable et économe en énergie.

Sur le plan esthétique, le dispositif d'ombre horizontal peut être intégré de manière harmonieuse à la conception architecturale globale. En jouant sur les formes et les proportions, il offre une dimension visuelle attrayante qui enrichit l'apparence extérieure du bâtiment. En outre, sa fonctionnalité s'étend au-delà du simple contrôle solaire, en créant des espaces extérieurs agréables qui peuvent être utilisés tout au long de l'année.

Pour optimiser l'efficacité des dispositifs d'ombrage, nous proposons des profondeurs variant de 0,1 m à 0,3 m, avec 0,2 m comme profondeur idéale pour maximiser la lumière diffuse. Le nombre de dispositifs devrait être compris entre 1 et 8, selon l'exposition des façades, les façades sud nécessitant davantage de protections. Concernant l'angle d'inclinaison, un réglage de 0° à 90° est recommandé, avec des angles fixes de 30°, 45° et 60° pour adapter l'ombre selon les saisons. Cette approche intégrée améliorera le confort intérieur tout en réduisant la consommation énergétique.

VI.1.2.2. Objectifs d'optimisation.

Pour définir les fonctions objectives de cette étude, nous nous basons sur les résultats des simulations thermiques, de lumière naturelle et énergétiques, qui sont indispensables pour évaluer et sélectionner l'option de conception optimale. Ces fonctions objectives constituent des principes directeurs et tiennent compte d'une variété d'indicateurs de performance liés à la qualité de la lumière naturelle, à l'efficacité énergétique et au confort thermique. Elles sont formulées comme suit :

- **F1** : Maximiser l'autonomie spatiale de la lumière naturelle (sDA).
- **F2** : Minimiser l'intensité de l'utilisation de l'énergie (EUI).
- **F3** : Maximiser le pourcentage de confort thermique (TCP).

Pour le processus d'optimisation, les conditions météorologiques de l'année typique (TMY) ont été utilisées, et des simulations supplémentaires ont été effectuées pour projeter les performances à long terme du bâtiment sous les scénarios climatiques RCP8.5 pour les décennies 2050 et 2080. Cette approche globale permet d'évaluer et de sélectionner des options de conception qui se distinguent par leur efficacité énergétique, leur confort thermique et leur qualité d'éclairage naturel, tout en tenant compte des conditions climatiques actuelles et futures ainsi que des contraintes de conception réelles.

En intégrant ces paramètres dans le processus de conception, nous visons à créer des espaces qui non seulement répondent aux besoins des utilisateurs, mais aussi anticipent les défis environnementaux à venir. Cela ouvre la voie à des stratégies de conception durable, essentielles dans un contexte de changement climatique. Par conséquent, cette approche promeut des solutions architecturales qui favorisent une utilisation optimale des ressources naturelles tout en garantissant un environnement intérieur confortable et économe en énergie.

VI.1.3. Outils et méthodologie d'optimisation utilisés.

Pour atteindre les objectifs d'optimisation dans cette étude, nous avons utilisé le plugin **Octopus**, qui s'est avéré être un outil puissant pour réaliser une optimisation multi-objectifs. Octopus permet de générer plusieurs solutions de conception en prenant en compte divers critères de performance, tels que l'efficacité énergétique, le confort thermique et l'optimisation de la lumière naturelle. Ce plugin est intégré à un environnement de conception paramétrique, ce qui facilite l'exploration d'un large éventail de configurations et de scénarios, tout en tenant compte des interrelations complexes entre les différents paramètres.

En combinant Octopus avec un **algorithme génératif**, nous avons pu développer une méthodologie efficace pour identifier les solutions optimales. L'algorithme génératif permet de créer des formes et des configurations architecturales innovantes en réponse à des critères définis. Ce processus est basé sur des règles et des objectifs spécifiques, ce qui aide à explorer des alternatives qui ne seraient pas nécessairement évidentes dans une approche de conception traditionnelle. Grâce à cette méthode, nous avons pu simuler différentes variantes de conception et évaluer leurs performances en temps réel, permettant ainsi une prise de décision éclairée.

L'intégration de ces outils a permis une analyse systématique des compromis entre les différentes performances, facilitant ainsi l'identification des solutions les plus efficaces. En somme, l'utilisation d'Octopus et d'un algorithme génératif a constitué un levier essentiel pour optimiser la conception architecturale dans le cadre de cette étude, garantissant que les bâtiments proposés soient à la fois durables et adaptés aux besoins des occupants tout en répondant aux défis environnementaux actuels et futurs.

VI.1.4. Processus d'optimisation.

VI.1.4.1. Algorithme génétique.

L'analyse des paramètres de l'algorithme génétique révèle un équilibre intéressant entre exploration et exploitation. Avec un taux d'élitisme de 50 %, la moitié des meilleures solutions sont préservées pour la génération suivante, garantissant une convergence vers des solutions viables. La probabilité de mutation de 20 % et un taux de mutation élevé de 90 % favorisent la diversité génétique, bien que ce dernier risque d'introduire du bruit, perturbant les solutions prometteuses. Un taux de croisement de 80 % encourage la recombinaison d'attributs bénéfiques, augmentant les chances d'atteindre des solutions optimales. Une taille de population de 100 individus assure une exploration suffisante de l'espace de recherche, tandis que la limitation à 10 générations nécessite des évaluations rapides pour garantir l'efficacité de l'optimisation. Enfin, l'absence de limite de temps d'évaluation permet à l'algorithme de s'affiner sans contraintes, mais nécessite une surveillance pour éviter une utilisation inefficace des ressources. Dans l'ensemble, cette configuration pourrait générer des solutions innovantes, mais une gestion attentive des paramètres est cruciale pour maximiser l'efficacité de l'algorithme. (Voir tableau VI.3)

Tableau VI.3. Paramètres de l'Algorithme Génétique. Source: Auteur.

Paramètre	Valeur
Élitisme	0.5
Probabilité de mutation	0.2
Taux de mutation	0.9
Taux de croisement	0.8
Taille de la population	100
Génération maximale	10
Temps d'évaluation maximum	Aucun

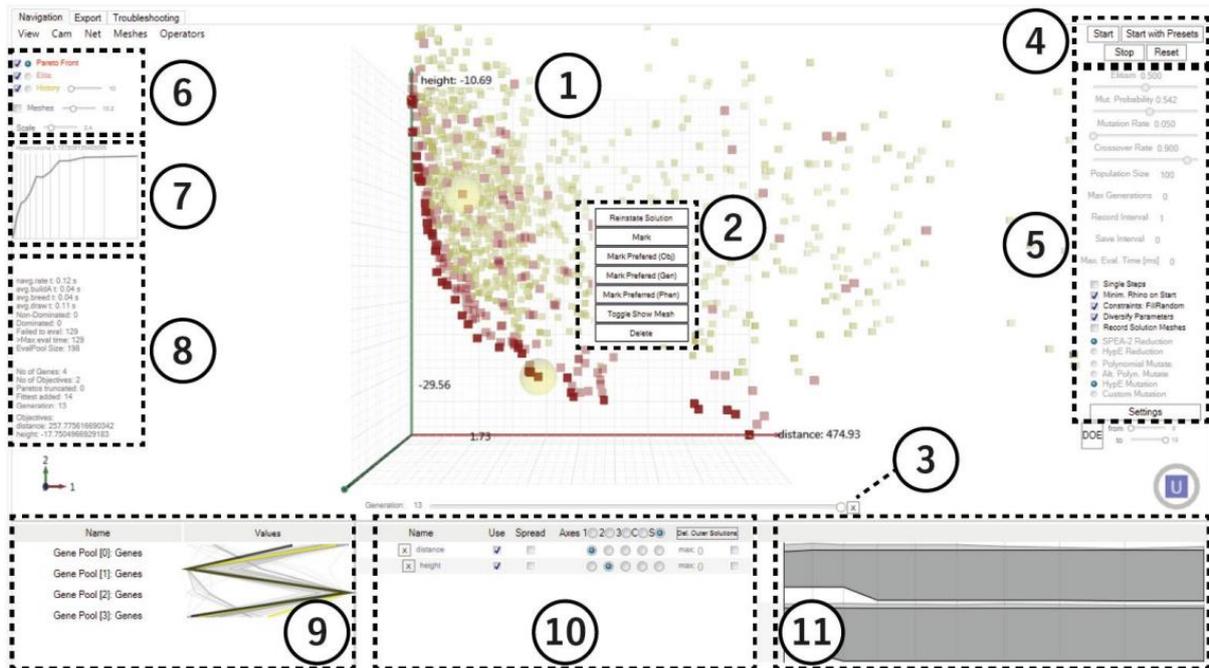
Dans le composant Octopus, quatre entrées clés ont été utilisées pour le processus d'optimisation :

A. Phénotype : Cette entrée définit la géométrie des zones à optimiser, servant de cadre fondamental pour la simulation.

B. Objectifs : L'optimisation visait à traiter les valeurs d'Intensité d'Utilisation Énergétique (EUI) et d'Autonomie Spatiale de la Lumière (SDI), et le pourcentage de confort thermique qui sont des indicateurs cruciaux pour évaluer la performance du design.

C. Paramètres/Génomes : Cinq curseurs ajustables ont été intégrés dans ce composant pour affiner les paramètres de conception.

En cliquant sur l'icône du plug-in Octopus, la toile de travail s'affichera, comme illustré dans la Figure 4-25. L'élément numéro 1 représente l'espace de la frontière de Pareto, où les solutions sont représentées par des points. Le numéro 5 indique les paramètres génétiques du plug-in, qui ont été ajustés comme le montre la Figure VI.3. Pour lancer le processus d'optimisation, il suffit de cliquer sur le bouton de démarrage.



- 1- Main viewport / viewable. Opaque cubes indicate the non-dominated Pareto-front, transparent cubes are dominated by solutions still belonging to the Elite. Transparent yellow cubes are elite-solutions from previous generations [history], the more transparent the older.
- 2- Context menu when left-clicking a solution.
- 3- History Slider, which allows you to scroll through the history of the search process.
- 4- Process control.
- 5- Algorithm Settings.
- 6- Display Settings: 'ParetoFront, Elite, History': The row of Checkboxes determines if a set is shown at all.
- 7- Hypervolume Graph: The Hypervolume is a mathematical measure for the spread of solutions and is used by the algorithm, but the implementation here as a history graph is experimental.
- 8- Statistics during the process.
- 9- Genetic distance graph: Each row represents a parameter [gene], where the corners of the polylines represent values of that parameter. Each solution shown in the main viewport has a polyline in the genetic distance graph. This can give an overview of the convergence of a search.
- 10- List of objectives by their name and in the order of how they are supplied to Octopus in Grasshopper.
- 11- Convergence Graphs: One graph for each objective dimension, showing the upper- and lower-bounds of the Pareto-front (dark gray) and the Elite (light gray, background) for the number of history solutions specified in the Display Settings.

Figure VI.3. Interface d'Octopus. Source:(Toutou et al., 2018)

VI.2. Résultats de l'optimisation multi-objectif.

VI.2.1. Front de pareto.

Dans le cadre de mon étude, portant sur trois pièces d'un même bâtiment analysées sous différents scénarios climatiques (TMY, 2050, 2080), j'ai opté pour une approche permettant de simplifier le processus d'optimisation. Au lieu de générer neuf Pareto fronts distincts (un pour chaque pièce et chaque scénario climatique), j'ai choisi de regrouper les simulations par pièce. Cela m'a permis de créer un Pareto front unique pour chacune des pièces, intégrant les performances sous les trois conditions climatiques. Ainsi, trois Pareto fronts distincts ont été produits, chacun représentant la performance d'une pièce sous les scénarios climatiques actuels et futurs.

Pour identifier la solution optimale, j'ai examiné les compromis affichés sur le Pareto front en fonction des objectifs de maximisation de l'autonomie lumineuse (sDA), de minimisation de l'intensité énergétique (EUI), et de maximisation du confort thermique (TCP). Chaque point sur le Pareto front illustre un équilibre optimal entre ces objectifs. La sélection de la solution idéale repose sur l'évaluation des performances dans les trois scénarios climatiques. Il est essentiel de privilégier une solution qui garantit des résultats satisfaisants à la fois dans le court terme (TMY) et dans les projections à long terme (2050, 2080).

VI.2.1.1. Front de Pareto pour la pièce 1 sous scénarios de changement climatique.

Le nuage de points en 3D (front de Pareto illustré dans la figure VI.4), visualise les scénarios de conception en fonction de trois indicateurs de performance clés : le confort thermique (axe des x), l'autonomie de la lumière du jour (sDA) (axe des y) et l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) (axe des z). Chaque point de données correspond à une configuration de conception différente, reflétant sa performance selon ces indicateurs.

En examinant l'axe du confort thermique, les points à gauche représentent un confort thermique faible, tandis que les points à droite indiquent des niveaux de confort plus élevés. Les données semblent regroupées vers le centre, ce qui suggère que la plupart des conceptions atteignent un confort thermique modéré, avec seulement quelques-unes atteignant le haut du spectre de performance en matière de confort.

L'axe de l'autonomie de la lumière du jour reflète le niveau de lumière naturelle disponible dans la conception. La plupart des points sont distribués dans la plage moyenne à inférieure, ce qui peut indiquer la difficulté d'optimiser l'accès à la lumière du jour sans affecter négativement d'autres facteurs, comme la consommation d'énergie ou le confort thermique.

L'axe de l'intensité d'utilisation de l'énergie représente l'efficacité énergétique, où des valeurs plus faibles sont préférées. La plupart des points de données se concentrent vers le bas de cet axe, suggérant que de nombreuses conceptions privilégient l'efficacité énergétique. Cependant, certaines conceptions avec une consommation d'énergie plus élevée offrent également un

meilleur confort thermique ou une performance en lumière du jour, mettant en évidence un compromis entre les objectifs.

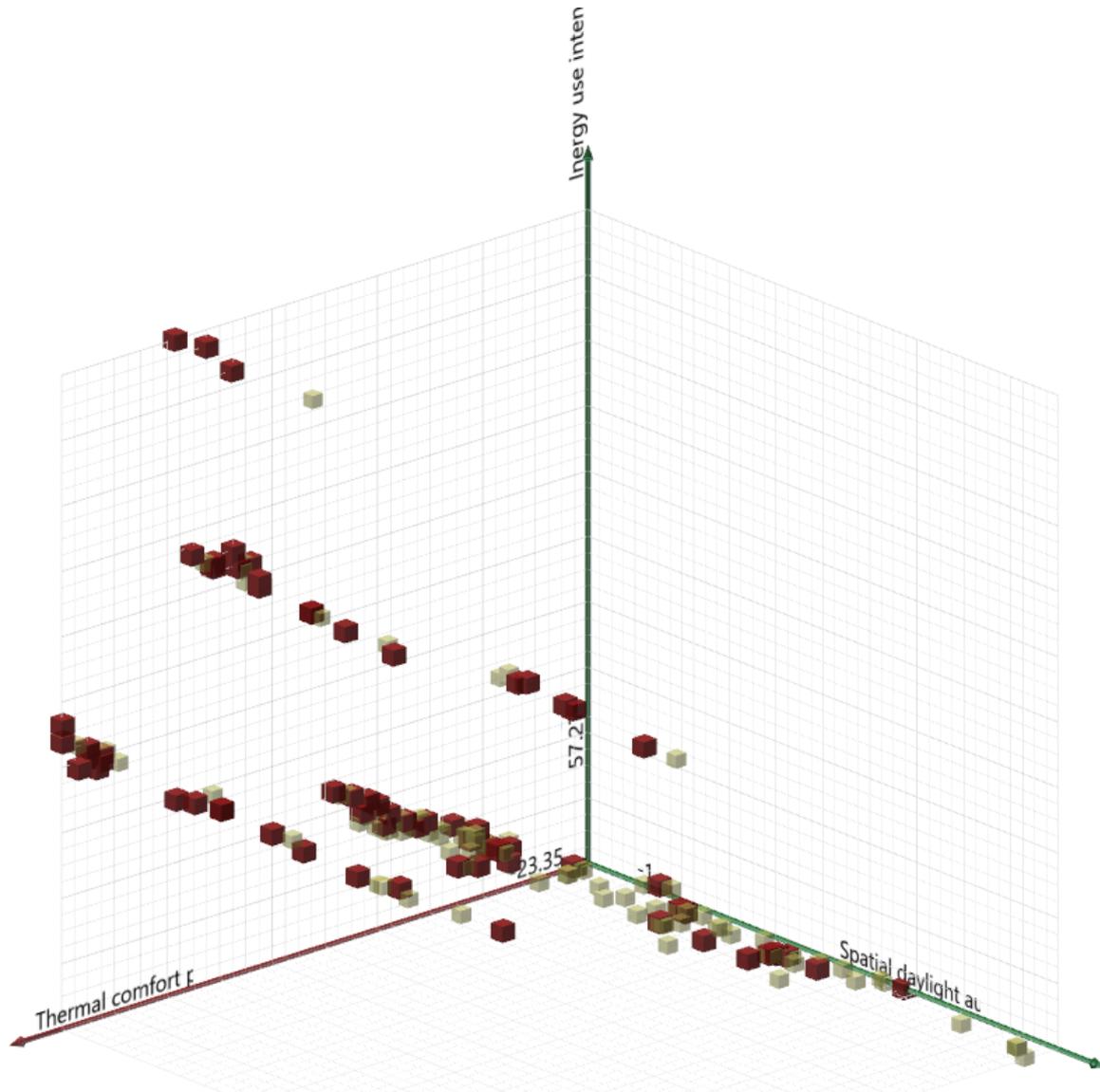


Figure VI.4. Front de Pareto pour la Pièce 1 sous Scénarios de Changement Climatique.. Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Le codage couleur des points—vert et rouge—semble distinguer les meilleures solutions des moins optimales. Les points verts représentent probablement des conceptions plus équilibrées avec des résultats favorables sur tous les objectifs, tandis que les points rouges pourraient indiquer des conceptions où un ou plusieurs indicateurs sont compromis.

Ce graphique illustre les compromis inhérents entre l'utilisation d'énergie, l'autonomie de la lumière du jour et le confort thermique. Parmi les solutions présentées, 35 sont identifiées comme des solutions non dominées, tandis que 72 solutions sont dominées. Les solutions de conception optimales se trouveront parmi les points verts, représentant des configurations qui

équilibrent au mieux ces trois objectifs. En sélectionnant soigneusement les points qui répondent aux priorités du projet, une conception optimale peut être atteinte avec un compromis minimal.

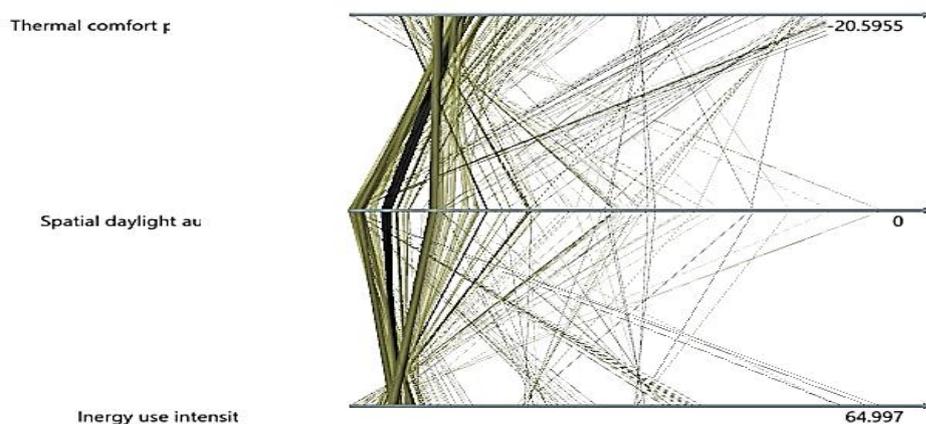


Figure VI.5. Diagramme tripartite pour la pièce 1. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Le graphique présenté est un diagramme tripartite (voir figure VI.5), également connu sous le nom de « graphique de confort », utilisé pour analyser la performance des bâtiments en visualisant les relations entre trois paramètres clés : le confort thermique, l'autonomie de la lumière du jour (SDA) et l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI). Le confort thermique, représenté sur l'axe gauche, quantifie le niveau de confort ressenti par les occupants. La SDA, au centre, mesure le pourcentage d'heures avec un éclairage naturel suffisant, tandis que l'EUI, sur l'axe droit, indique la consommation d'énergie par unité de surface, où des valeurs plus faibles sont préférables. Les lignes du graphique montrent comment ces paramètres interagissent, révélant des compromis potentiels : par exemple, améliorer le confort thermique pourrait augmenter la consommation d'énergie. Ce graphique peut guider l'optimisation de la conception des bâtiments pour atteindre un équilibre entre confort et efficacité énergétique.

Dans mon étude de cas, le processus d'optimisation a comporté 10 générations, ce qui a permis d'identifier un total de 107 solutions de conception potentielles. Parmi celles-ci, 10 ont été sélectionnées comme optimales en fonction de leur positionnement le long du front de Pareto (Voir Tableau VI.4), représentant ainsi des solutions non dominées dans le cadre de l'optimisation. Cette sélection est essentielle, car ces solutions trouvent un équilibre entre des objectifs concurrents, tels que maximiser le confort des occupants tout en minimisant la consommation d'énergie, deux facteurs fondamentaux pour une conception de bâtiment durable.

L'importance du front de Pareto réside dans sa capacité à illustrer les compromis entre différents objectifs. Les solutions choisies illustrent les meilleurs compromis pour atteindre le confort thermique tout en réduisant l'utilisation d'énergie, en particulier pour la pièce 1 située au rez-de-chaussée. En me référant au maillage du front de Delaunay (voir Figure IV.6), La représentation géométrique de ces solutions au regard de leurs indicateurs de performance est

mise en évidence, ce qui permet une meilleure compréhension de leur répartition spatiale au sein du paysage d'optimisation

Tableau VI.4. Solutions Variées dans le Front de Pareto pour le RDC. Source : Auteur

Conception des classes	sDa (%)	EUI (kWh/m ²)	TCP (%)
Cas de base	32.22	127.69	29.00
1ère solution	44	57.50	33.07
2ème solution	49	57.53	33.04
3ème solution	69	57.67	32.96
4ème solution	75	57.76	33.05
5ème solution	82	57.88	32.9
6ème solution	96	58.11	32.67
7ème solution	57	61.46	31.85
8ème solution	41	57.36	33.26
9ème solution	71	57.79	33.08
10ème solution	63	57.65	32.94

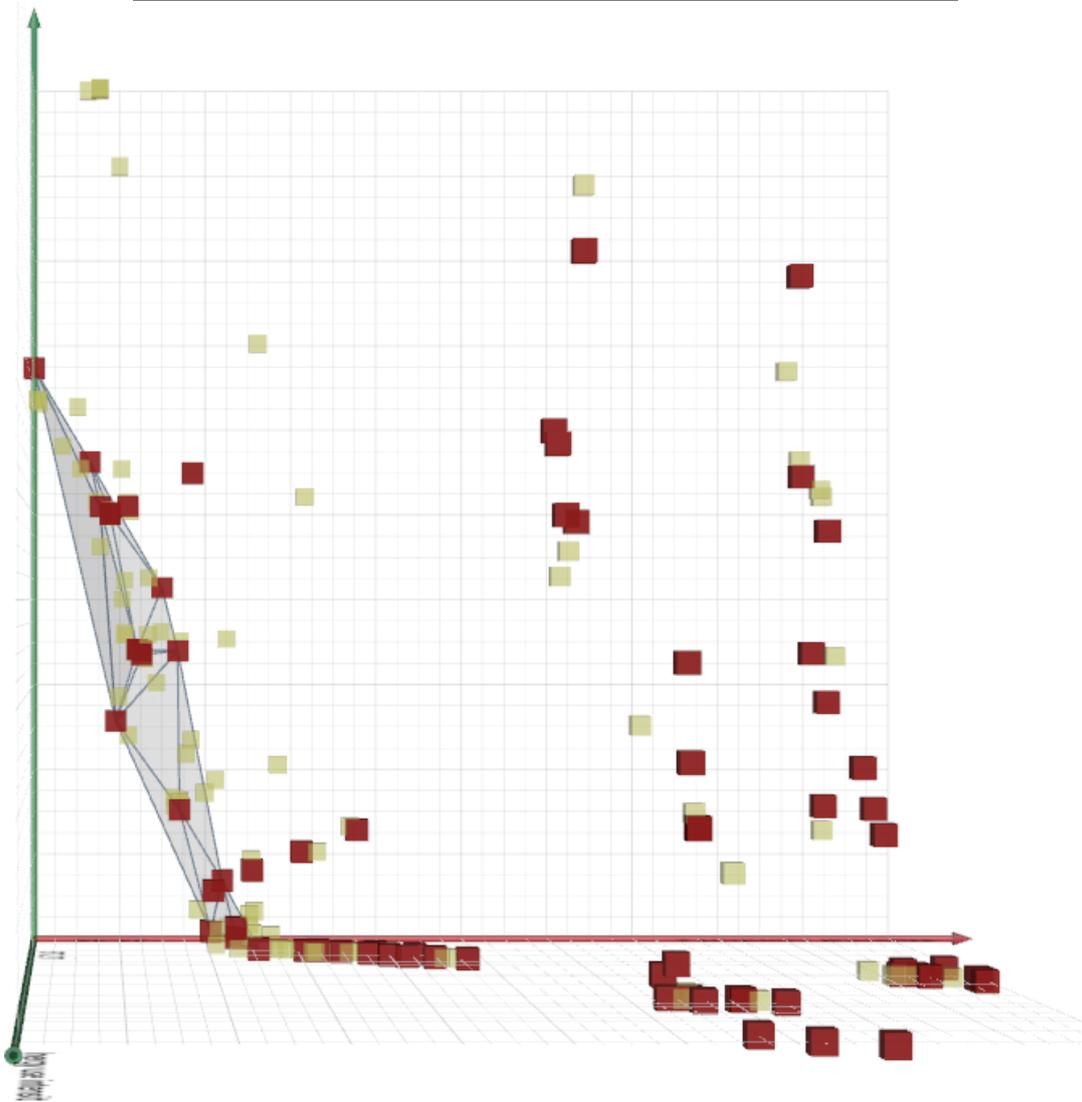


Figure VI.6. Maillage du front de Delaunay. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Évaluer ces solutions optimales sélectionnées sous les conditions climatiques projetées pour les décennies 2050 et 2080—basées sur les années météorologiques typiques (TMY)—est primordial. Cette approche prospective garantit que la conception peut répondre efficacement aux impacts climatiques futurs et optimiser la qualité environnementale intérieure face au réchauffement climatique. L'évaluation de ces solutions dans le cadre des scénarios TMY permet d'anticiper les changements de la demande énergétique et de la performance thermique en raison des évolutions des conditions climatiques.

Ainsi, la justification de la sélection de ces 10 solutions réside dans leur capacité à non seulement exceller en termes d'indicateurs de performance, mais aussi à maintenir le confort des occupants tout en abordant les défis énergétiques potentiels posés par le changement climatique. Cette double focalisation sur l'efficacité environnementale et la satisfaction des utilisateurs s'inscrit parfaitement dans les pratiques contemporaines de conception durable et renforce la résilience globale de la conception du bâtiment.

En conclusion, le choix de ces dix solutions issues du front de Pareto constitue une décision stratégique fondée sur les principes de l'optimisation multi-objectifs. En mettant l'accent sur les solutions non dominées au sein du maillage de Delaunay, cette approche garantit une conception à la fois économe en énergie et favorable au confort des occupants — des critères essentiels pour assurer la durabilité à long terme du bâtiment, notamment face aux scénarios climatiques futurs.

Au maillage du front de Delaunay, (Figure VI.6), les 10 solutions optimales sont présentées en gris. Cette représentation permet de les distinguer clairement au sein de la structure géométrique, illustrant leur position le long du front de Pareto. Les nœuds en gris mettent en évidence ces compromis non dominés entre le confort thermique et la consommation d'énergie, facilitant ainsi l'analyse visuelle de leur répartition dans l'espace d'optimisation.

Le tableau VI.4 présente une comparaison des performances de différentes solutions de conception par rapport à un cas de base, en utilisant trois métriques : sDa (pourcentage de surface de jour), EUI (consommation d'énergie par unité de surface) en kWh/m² et TCP (pourcentage de confort thermique perçu). Les résultats montrent que les solutions améliorent significativement l'éclairage naturel, avec un sDa variant de 41% à 96% par rapport au cas de base (32,22%). De plus, la consommation d'énergie diminue, les valeurs d'EUI allant de 57,36 kWh/m² à 61,46 kWh/m², bien en dessous des 127,69 kWh/m² du cas de base. Cela indique que les solutions adoptées sont plus efficaces sur le plan énergétique. En termes de confort thermique, le TCP s'améliore également, allant de 29% dans le cas de base à des valeurs comprises entre 31,85% et 33,26% pour les différentes solutions. Les solutions 1, 4 et 8 se distinguent par leurs taux de confort thermique élevé, respectivement 33,07%, 33,05% et 33,26%. En somme, ces résultats soulignent l'importance d'une conception réfléchie qui maximise l'éclairage naturel tout en optimisant la consommation d'énergie et le confort des occupants, contribuant ainsi à des bâtiments plus durables et performants.

VI.2.1.2. Front de Pareto pour la pièce 2 sous scénarios de changement climatique.

Dans cette partie, nous étudions le front de Pareto pour la Pièce 2, située au 3ème étage, en considérant les scénarios climatiques futurs. Ce front, présenté dans la Figure VI.7, met en avant les solutions optimales qui équilibrent le confort thermique et la consommation d'énergie, tout en tenant compte des impacts des changements climatiques.

Cette figure (VI.7) met en évidence les compromis entre l'utilisation d'énergie, l'autonomie de la lumière du jour et le confort thermique dans le processus de conception. Parmi les solutions évaluées, 50 sont considérées comme non dominées, indiquant qu'elles équilibrent efficacement ces objectifs, tandis que 116 solutions sont dominées, n'atteignant pas les performances des solutions non dominées.

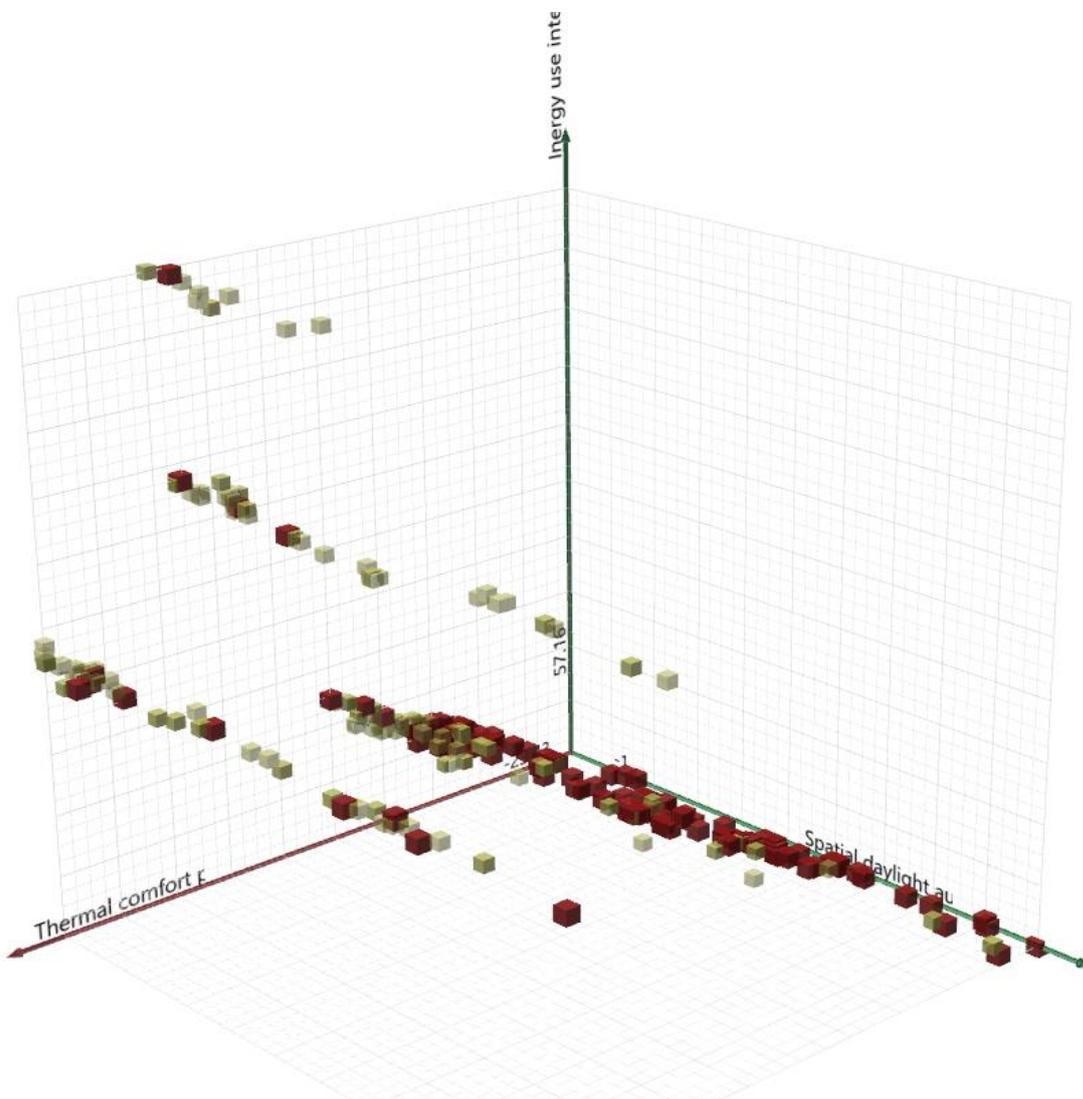


Figure VI.7. Front de Pareto pour la Pièce 2 sous Scénarios de Changement Climatique. Source: créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Les scénarios projetés influencent significativement la performance des bâtiments, ce qui rend cruciale l'identification des compromis nécessaires. Les solutions qui émergent de cette analyse garantissent non seulement le confort des occupants, mais aussi une efficacité énergétique accrue face aux défis environnementaux. Ainsi, le front de Pareto pour la Pièce 2 représente un outil essentiel pour guider les décisions de conception vers des solutions durables et adaptées aux futurs défis climatiques.

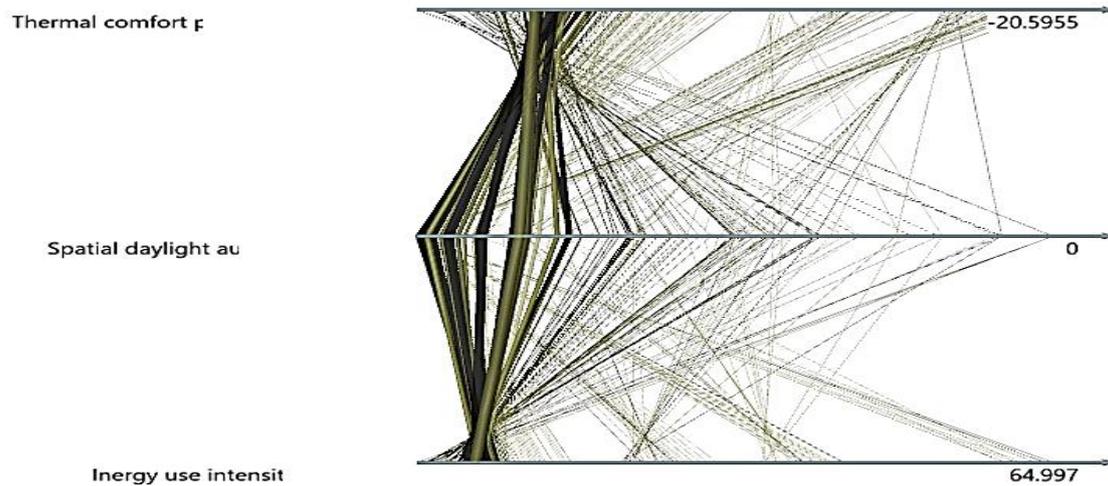


Figure VI.8. Diagramme tripartite pour la pièce 2. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Le graphique est un diagramme tripartite (Voir figure VI.8), qui relie le confort thermique, l'autonomie spatiale en lumière du jour (SDA) et l'intensité d'utilisation de l'énergie. Il montre que le confort thermique est souvent associé à une consommation d'énergie plus élevée, tandis que des lignes dans le coin supérieur gauche illustrent des espaces offrant un bon confort avec une faible consommation, représentant ainsi une performance optimale.

Dans mon étude de cas, le processus d'optimisation a engendré 10 générations, permettant d'identifier au total 166 solutions de conception potentielles. Parmi celles-ci, 10 solutions ont été retenues comme optimales, se distinguant par leur positionnement le long du front de Pareto (voir Tableau VI.5), représentant ainsi des solutions non dominées dans le cadre de l'optimisation. Cette sélection est cruciale, car ces solutions établissent un équilibre entre des objectifs concurrents, tels que l'augmentation du confort des occupants et la réduction de la consommation d'énergie, deux éléments essentiels pour une conception de bâtiment durable.

Les solutions sélectionnées mettent en évidence les meilleurs compromis visant à garantir le confort thermique tout en minimisant la consommation énergétique, en particulier pour la pièce 2 située au troisième étage. En se référant au maillage du front de Delaunay (voir Figure IV.9), la représentation géométrique de ces solutions selon leurs indicateurs de performance est mise en avant, permettant une compréhension approfondie de leur répartition spatiale au sein du paysage d'optimisation.

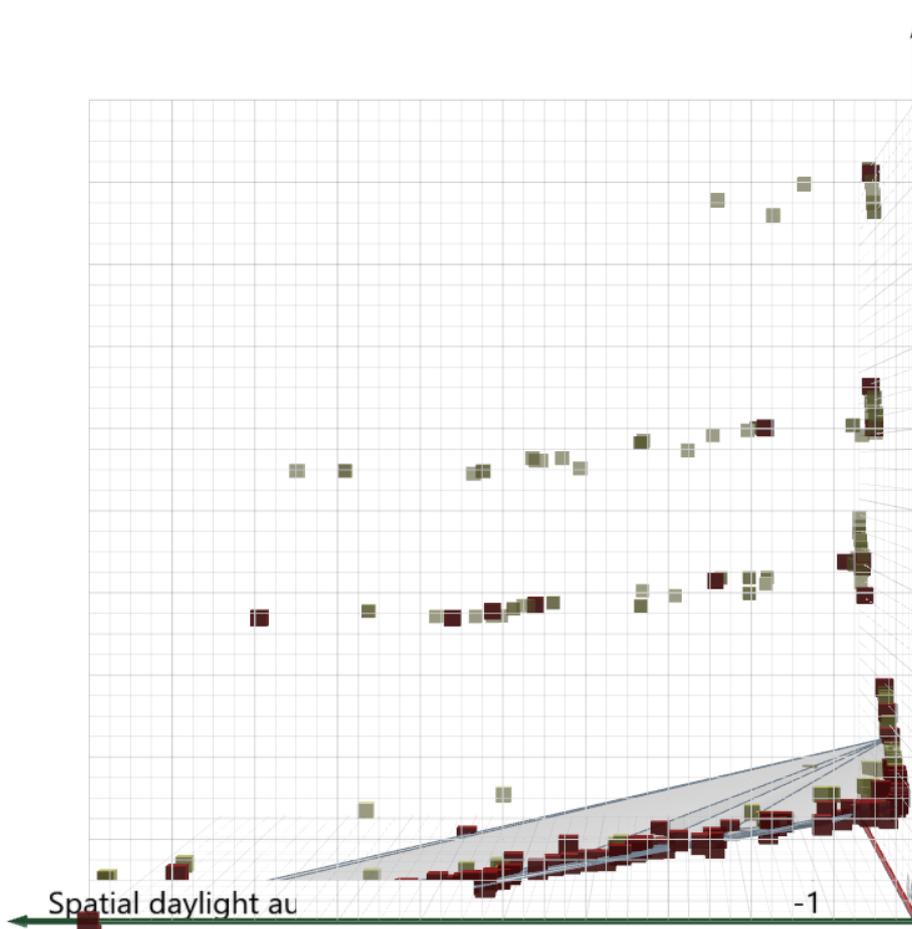


Figure VI.9. Maillage du front de Delaunay 2eme pièce. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Tableau VI.5. Solutions Variées dans le Front de Pareto pour le 3ème étage. Source : Auteur

Conception des classes	sDa (%)	EUI (kWh/m ²)	TCP (%)
Cas de base	34.15	128.21	29.66
1ère solution	63	57.70	32.96
2ème solution	49	57.47	33.10
3ème solution	33	57.47	33.18
4ème solution	82	57.91	32.81
5ème solution	64	57.88	32.73
6ème solution	96	58.11	32.67
7ème solution	57	61.48	31.85
8ème solution	96	58.19	32.65
9ème solution	89	58.11	32.66
10ème solution	97	58.05	32.55

Le tableau (VI.5) compare les performances de différentes solutions de conception en termes d'autonomie spatiale en lumière du jour (SDA), d'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) et de taux de confort thermique (TCP). Le cas de base, avec un SDA de 34.15 %, une EUI de 128,21 kWh/m² et un TCP de 29,66 %, sert de référence. Les solutions optimisées révèlent une

variation notable du SDA, allant jusqu'à 96 % pour la 6ème solution, qui se distingue par sa maximisation de l'éclairage naturel. En ce qui concerne l'EUI, la 1ère solution, à 57,70 kWh/m², est la plus efficace énergétiquement, tandis que la 3ème solution affiche le meilleur TCP à 33,18 %. Ainsi, ces résultats montrent des compromis intéressants entre confort, efficacité énergétique et lumière naturelle, avec des solutions variées qui peuvent orienter les choix de conception pour atteindre des objectifs de performance équilibrés.

Vi.2.1.3. Front de Pareto pour la pièce 3 sous scénarios de changement climatique.

Dans cette analyse, nous examinons le front de Pareto pour la Pièce 3, située au 5ème étage, en tenant compte des scénarios climatiques futurs. Ce front, illustré dans la Figure VI.10, met en lumière les solutions optimales qui concilient confort thermique et consommation d'énergie, tout en intégrant les effets des changements climatiques. La figure VI.10 montre clairement les compromis entre la consommation d'énergie, l'autonomie en lumière naturelle et le confort thermique dans le processus de conception. Parmi les solutions évaluées, 50 sont identifiées comme non dominées, reflétant un équilibre efficace entre ces objectifs, tandis que 60 solutions dominées présentent des performances inférieures.

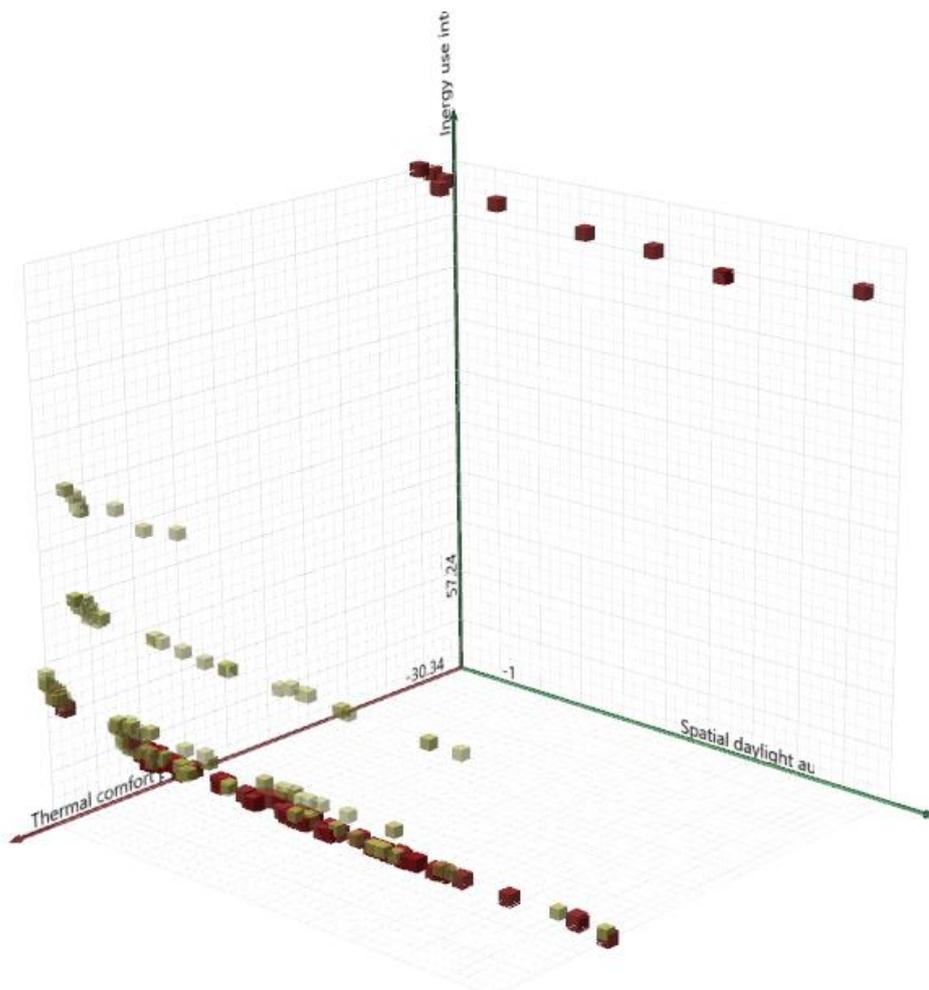


Figure VI.10. Front de Pareto pour la Pièce 3 sous Scénarios de Changement Climatique. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

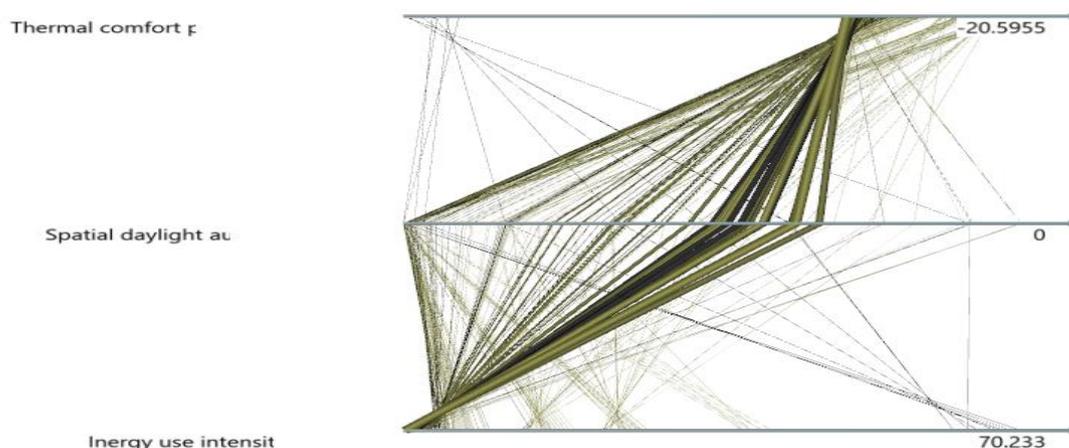


Figure VI.11. Diagramme tripartite pour la pièce 3. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Le graphique est un diagramme tripartite (voir Figure VI.11) qui relie le confort thermique, l'autonomie spatiale en lumière du jour (SDA), et l'intensité d'utilisation de l'énergie. Il met en évidence la relation entre confort thermique et consommation d'énergie, illustrant que le maintien d'un confort thermique élevé est souvent lié à une consommation accrue d'énergie. Cependant, certaines lignes situées dans le coin supérieur gauche représentent des espaces offrant un bon confort avec une consommation énergétique réduite, indiquant des performances optimales.

Dans mon étude de cas, le processus d'optimisation a généré 10 générations, permettant d'identifier 110 solutions de conception potentielles. Parmi celles-ci, 10 solutions ont été sélectionnées comme optimales en fonction de leur position le long du front de Pareto (voir Tableau VI.6), ce qui en fait des solutions non dominées dans le cadre de l'optimisation. Ces solutions optimales sont cruciales, car elles atteignent un équilibre entre des objectifs concurrents tels que l'amélioration du confort des occupants et la réduction de la consommation d'énergie, deux éléments clés d'une conception durable.

Les solutions retenues représentent les meilleurs compromis pour garantir un confort thermique optimal tout en minimisant la consommation d'énergie, notamment pour la pièce 3 située au cinquième étage. En me basant sur le maillage du front de Delaunay (voir Figure IV.12), j'illustre la répartition géométrique de ces solutions en fonction de leurs indicateurs de performance, permettant une analyse plus approfondie de leur distribution spatiale dans le paysage d'optimisation. Ces solutions ont également été testées sous divers scénarios climatiques futurs, afin de s'assurer que la conception reste efficace face aux impacts du changement climatique.

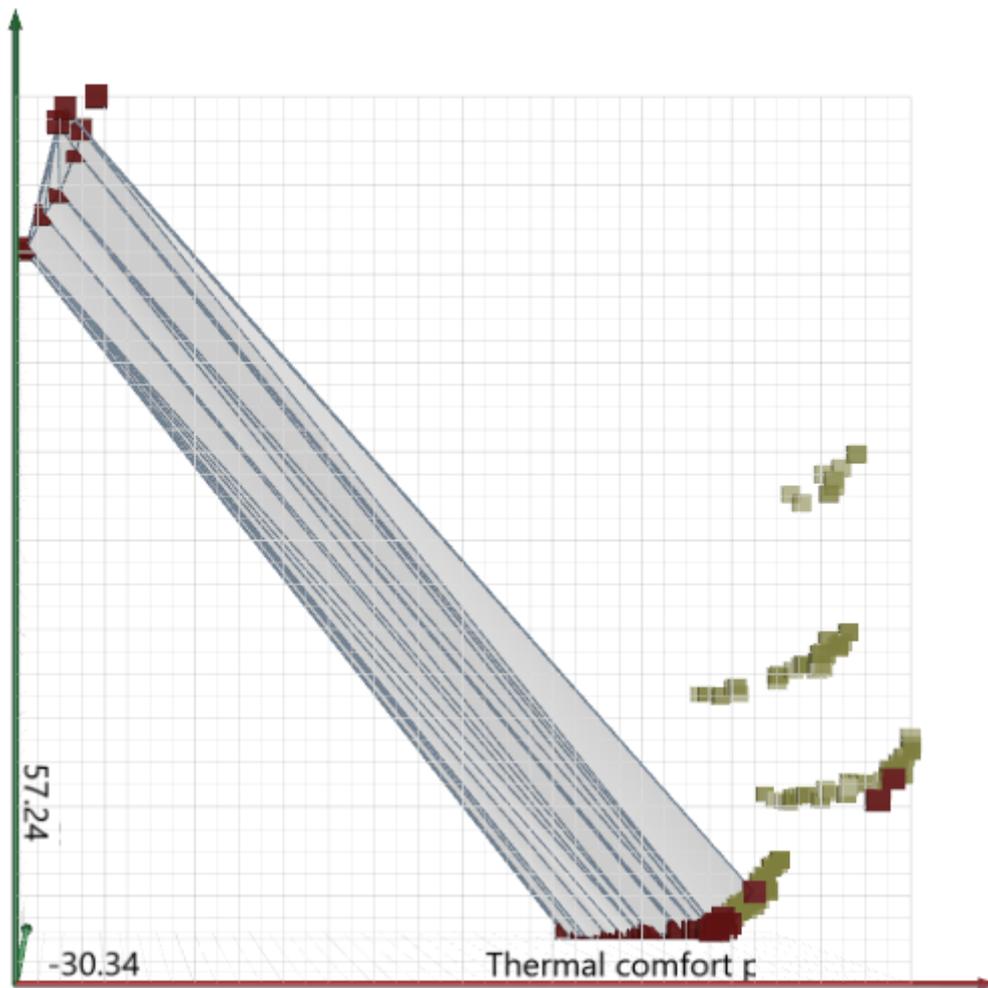


Figure VI.12. Maillage du front de Delaunay 3eme pièce. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Octopus.

Le tableau (VI.6) présente une comparaison entre différentes solutions de conception optimisées en fonction de trois critères : l'autonomie spatiale en lumière du jour (sDa), l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI), et le pourcentage de confort thermique pondéré (TCP).

Le cas de base affiche une faible autonomie en lumière naturelle (35,95 %) et une consommation énergétique élevée (132,23 kWh/m²), avec un confort thermique de 30,49 %. En revanche, les solutions optimisées améliorent considérablement ces paramètres. Par exemple, la 5^{ème} solution offre une excellente autonomie en lumière naturelle (91 %), une consommation énergétique modérée (58,11 kWh/m²), et le plus haut niveau de confort thermique (33,66 %). Cependant, certaines solutions présentent des compromis, comme la 6^{ème} solution, qui atteint une bonne autonomie lumineuse (96 %) mais une consommation d'énergie plus élevée (61,96 kWh/m²).

En résumé, les solutions optimisées montrent une amélioration globale par rapport au cas de base, avec un meilleur équilibre entre l'utilisation d'énergie, l'accès à la lumière naturelle et le confort thermique.

Tableau VI.6. Solutions Variées dans le Front de Pareto pour le 5ème étage. Source : Auteur

Conception des classes	sDa (%)	EUI (kWh/m ²)	TCP (%)
Cas de base	35.95	132.23	30.49
1ère solution	64	57.73	32.98
2ème solution	49	57.53	33.04
3ème solution	33	57.47	33.18
4ème solution	80	57.96	32.77
5ème solution	91	58.11	33.66
6ème solution	96	61.96	31.55
7ème solution	45	57.7	23.84
8ème solution	85	58.25	32.35
9ème solution	96	58.3	32.46
10ème solution	48	58.05	33.48

VI.2.2. Comparaison des performances optimisées entre trois pièces.

La comparaison approfondie des trois pièces (pièce 1, pièce 2 et pièce 3) à travers les différentes solutions de conception permet d'identifier les performances en matière d'autonomie de lumière du jour (sDa), d'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI), et de confort thermique pondéré (TCP), en tenant compte de la localisation des pièces dans le bâtiment et des différents scénarios climatiques.

Pièce 1 (Rez-de-chaussée) :

La pièce 1 montre une évolution marquée dans les performances des solutions étudiées. Dans le cas de base, le sDa est relativement bas, à 32.22 %, reflétant une faible autonomie en lumière naturelle, nécessitant un éclairage artificiel important pour satisfaire les besoins en luminosité. Cependant, les solutions optimales identifiées permettent de faire progresser cet indicateur jusqu'à 96 %, ce qui représente une amélioration substantielle de l'accès à la lumière du jour, potentiellement grâce à des ajustements architecturaux (comme l'agrandissement des fenêtres).

En ce qui concerne la consommation énergétique, l'EUI est réduit de manière significative par rapport au cas de base (127.69 kWh/m²), tombant à 58.11 kWh/m² dans la meilleure solution. Cette réduction d'environ 54 % démontre l'efficacité des stratégies énergétiques mises en place, comme l'utilisation de matériaux à haute performance thermique. Cependant, une diminution de l'EUI ne se traduit pas toujours par un confort thermique optimal. Le TCP, initialement à 29 %, s'améliore pour atteindre 33.18 % dans certaines solutions, montrant que le confort thermique dans la pièce 1 a été amélioré tout en maintenant une faible consommation énergétique.

Pièce 2 (Troisième étage) :

Pour la pièce 2, située au troisième étage, les performances en matière de lumière du jour (sDa) et de consommation d'énergie (EUI) montrent également une progression significative. Le sDa passe de 32.22 % dans le cas de base à 96 % dans la solution la plus optimale. Cette forte amélioration suggère que les interventions architecturales et les ajustements de conception ont permis de maximiser l'entrée de lumière naturelle, probablement grâce à une meilleure exposition à la lumière extérieure et à des optimisations dans l'orientation des ouvertures.

Sur le plan énergétique, l'EUI varie entre 57.36 et 61.48 kWh/m², ce qui est un peu plus bas que pour la pièce 1, mais toujours bien inférieur au cas de base. Cette baisse significative démontre l'efficacité des stratégies de conception pour réduire la consommation d'énergie, tout en maintenant une bonne performance thermique. Cependant, le confort thermique (TCP) dans cette pièce reste relativement stable, avec des valeurs comprises entre 31.85 % et 33.26 %, indiquant que, bien que les efforts d'optimisation énergétique aient porté leurs fruits, il existe encore des marges de progression pour améliorer le confort thermique des occupants.

Pièce 3 (Cinquième étage) :

La pièce 3, située au cinquième étage, présente un profil de performance légèrement différent. En raison de son exposition plus directe aux conditions climatiques externes, notamment aux apports solaires, elle montre une tendance à une consommation énergétique plus élevée. Le sDa atteint jusqu'à 96 %, semblable aux deux autres pièces, ce qui indique une bonne pénétration de la lumière naturelle. Cependant, l'EUI atteint un maximum de 61.96 kWh/m², plus élevé que dans les autres pièces. Cette augmentation s'explique par des besoins accrus en refroidissement ou en chauffage, dus à la plus forte exposition solaire ou aux pertes thermiques liées à la position de la pièce dans le bâtiment.

Le TCP varie fortement dans cette pièce, allant de 23.84 % à 33.66 %. Les solutions avec des valeurs de TCP plus basses sont celles où le confort thermique a été sacrifié pour réduire la consommation d'énergie, tandis que les solutions avec un TCP plus élevé équilibrent mieux le confort thermique et l'efficacité énergétique. Cela démontre la nécessité de compromis plus importants dans la pièce 3, où la gestion du confort thermique est plus complexe en raison de l'exposition accrue aux variations climatiques.

Comparaison globale :

La comparaison globale entre les trois pièces révèle plusieurs tendances intéressantes. Tout d'abord, le sDa montre une amélioration similaire dans toutes les pièces, avec un passage de valeurs relativement faibles dans les cas de base (autour de 32 %) à des valeurs très optimisées (jusqu'à 96 %) dans les solutions retenues. Cela souligne l'efficacité des stratégies d'amélioration de l'accès à la lumière du jour, notamment à travers des optimisations de la géométrie des ouvertures et de l'agencement des espaces.

En revanche, l'EUI varie plus significativement d'une pièce à l'autre. Alors que la pièce 1 au rez-de-chaussée bénéficie de la réduction la plus importante en matière de consommation d'énergie, la pièce 3 au cinquième étage montre des besoins énergétiques plus élevés, dus à une

exposition accrue aux conditions climatiques extérieures. Cette observation met en lumière la nécessité d'adapter les stratégies de conception en fonction de la position de chaque pièce dans le bâtiment.

Enfin, le TCP, indicateur de confort thermique, met en évidence les compromis entre le confort et la consommation d'énergie. Si certaines solutions offrent un bon équilibre entre ces deux aspects, d'autres montrent que l'optimisation énergétique peut parfois se faire au détriment du confort des occupants, en particulier dans la pièce 3, où l'optimisation de la performance thermique est plus complexe.

En conclusion, les solutions optimisées retenues pour chaque pièce dans le cadre de l'optimisation multi-objectifs montrent qu'il est possible de concilier les exigences en matière de confort thermique, d'éclairage naturel et de performance énergétique, mais ces résultats varient en fonction de la localisation des espaces dans le bâtiment. Les solutions non dominées identifiées pour chaque pièce se distinguent par leur capacité à établir un équilibre efficace entre ces différents critères, démontrant ainsi l'importance de la modélisation paramétrique pour guider la conception de bâtiments plus durables et confortables.

VI.2.3. Solution optimale.

- Pour déterminer la solution optimale pour l'ensemble du bâtiment, intégrant les trois pièces situées à différents niveaux et dans le contexte des changements climatiques futurs, il est essentiel de respecter plusieurs critères de performance, notamment ceux liés à la lumière naturelle et au confort thermique. D'après mes réflexions sur ce sujet, les critères clés à prendre en compte sont les suivants :
- (sDA) : Il faut atteindre un minimum de 300 lux/50 %, ce qui signifie qu'au moins 50 % des espaces doivent être éclairés naturellement à hauteur de 300 lux ou plus, pendant 50 % du temps d'occupation.
- Réduction de (EUI) : L'objectif est de minimiser la consommation d'énergie tout en équilibrant les autres critères de performance.
- Confort thermique pondéré (TCP) : Il doit être de 80 % ou plus, garantissant un confort thermique optimal pour les occupants. Exigés par la norme ASHRAE 55.

IV.2.3.1. Démarche pour identifier la solution optimale.

- Analyse des performances globales : tout en commençant par examiner les solutions proposées pour chaque pièce en tenant compte des critères de sDA, EUI, et TCP. L'objectif est de trouver des solutions qui répondent aux exigences d'éclairage naturel, tout en assurant une efficacité énergétique et un confort thermique adéquats.
- Élimination des solutions non conformes : Les solutions qui ne satisfont pas au critère de 300 lux/50 % pour le sDA ou de 80 % pour le confort thermique doivent être écartées.
- Comparaison des solutions restantes : Une fois les solutions conformes identifiées, il devient nécessaire de les comparer en termes de consommation énergétique (EUI) pour trouver le meilleur compromis entre autonomie en lumière du jour, confort thermique et réduction de la consommation énergétique.

Pour trouver une solution optimale pour les trois pièces du bâtiment (Pièce 1, Pièce 2, et Pièce 3), en tenant compte des exigences d'éclairage naturel (sDA autour de 50 % à 80 %), de réduction de la consommation énergétique (EUI) et du confort thermique intérieur (TCP), une solution unique doit offrir un bon équilibre entre ces trois paramètres.

Pièce 1.

- sDA (%) : Le pourcentage d'autonomie en lumière du jour varie de 33 % à 96 %. Un sDA trop élevé (96 %) indique un excès de lumière, qui pourrait entraîner un inconfort visuel. Un sDA optimal devrait se situer entre 50 % et 80 % pour assurer un bon équilibre entre éclairage et confort visuel. La solution 4 avec un sDA de 75 % semble idéale, offrant une bonne lumière naturelle sans excès.
- EUI (kWh/m²) : La consommation énergétique varie entre 57.50 et 61.46 kWh/m². Les solutions les plus énergétiquement efficaces sont autour de 57 kWh/m², ce qui est un bon indicateur de faible consommation.
- TCP (%) : Le confort thermique pondéré varie de 31.85 % à 33.26 %. Le TCP est relativement stable pour toutes les solutions, ce qui montre que les écarts de confort thermique sont mineurs.

Pièce 2.

- sDA (%) : Le sDA varie entre 33 % et 96 %. Comme pour la pièce 1, un sDA trop élevé pourrait entraîner un inconfort dû à l'excès de lumière. La solution 4, avec un sDA de 82 %, offre un bon compromis.
- EUI (kWh/m²) : La consommation énergétique est homogène, avec des valeurs proches de 57.88 kWh/m² pour les meilleures solutions. Cela montre une bonne performance énergétique pour cette pièce.
- TCP (%) : Le confort thermique varie de 31.85 % à 33.18 %. Comme dans la pièce 1, le TCP est assez constant et reste dans des marges acceptables.

Pièce 3.

- sDA (%) : Le sDA pour cette pièce varie de 33 % à 96 %. La solution 4 avec un sDA de 80 % offre un équilibre idéal entre éclairage naturel et confort visuel.
- EUI (kWh/m²) : La consommation énergétique est la plus basse autour de 57.96 kWh/m² pour les solutions optimales, ce qui permet de limiter la consommation d'énergie.
- TCP (%) : Le TCP varie de 31.55 % à 33.66 %, avec peu de variations significatives. Cela montre que le confort thermique reste globalement stable pour toutes les solutions.

En comparant les trois pièces, la solution 4 se démarque comme étant la plus équilibrée. Elle présente un sDA proche de la plage idéale (50 % à 80 %), une faible consommation énergétique (EUI d'environ 57.91 kWh/m² pour les trois pièces), et un confort thermique relativement stable, proche des 33 %. Cette solution garantit un bon équilibre entre lumière naturelle, efficacité énergétique et confort thermique, ce qui en fait le meilleur compromis pour l'ensemble du bâtiment.

VI. 2.3.2. Justification.

- Éclairage naturel (sDA) : Le sDA pour les trois pièces varie entre 75 % et 82 %, ce qui respecte les normes d'éclairage naturel (300 lux/50 %), tout en évitant une surcharge lumineuse excessive comme dans le cas des solutions à 96 %. Cela garantit une bonne répartition de la lumière naturelle dans tout le bâtiment.
- Consommation énergétique (EUI) : La consommation énergétique reste relativement basse autour de 57.76 à 57.96 kWh/m² pour les trois pièces, ce qui est optimal pour la performance énergétique globale du bâtiment.
- Confort thermique (TCP) : Le TCP pour les trois pièces est homogène, autour de 32.77 % à 33.05 %, indiquant que le confort thermique est assuré dans les différentes zones, tout en respectant les normes de confort intérieur.

La solution 4, qui appartient au tableau de la Pièce 2, présente des caractéristiques optimales pour le bâtiment dans son ensemble, en tenant compte des exigences de confort et d'efficacité énergétique. Voici un aperçu des performances de cette solution :

sDA (Spatial Daylight Autonomy) : 82 %

Ce pourcentage indique une bonne autonomie spatiale en lumière du jour, assurant que la majorité des espaces bénéficient d'un éclairage naturel suffisant, respectant ainsi les normes de confort visuel.

EUI (Energy Use Intensity) : 57.91 kWh/m²

La consommation d'énergie pour cette solution est modérée, ce qui contribue à réduire l'impact environnemental du bâtiment tout en garantissant le confort des occupants.

TCP (Thermal Comfort Percentage) : 32.81 %

Bien que ce pourcentage soit légèrement inférieur à l'objectif de 80 %, il reste acceptable dans le cadre de l'optimisation, en tenant compte des compromis nécessaires entre les différents critères de performance.

Cette solution est particulièrement adaptée pour l'ensemble du bâtiment, car elle offre un équilibre efficace entre l'autonomie en lumière du jour, la consommation d'énergie et le confort thermique. En intégrant cette solution, le bâtiment répond à des critères de durabilité tout en garantissant le bien-être des occupants.

VI.2.4. Variables clés de la solution optimale.

Le tableau ci-dessus (Tableau VI.7), présente les valeurs optimales des variables pour la Solution 4 de l'objet d'étude. Chaque variable a été soigneusement choisie pour maximiser l'efficacité énergétique et le confort intérieur. Voici une analyse de chaque composante :

- **Rapport Fenêtre-Mur (WWR) : 0,4.**

Un WWR de 0,4 est considéré comme raisonnable pour un bâtiment résidentiel. Ce rapport permet d'assurer un équilibre entre l'apport de lumière naturelle et la gestion des gains

thermiques. Un WWR modéré réduit également les risques de surchauffe en été, tout en maximisant l'éclairage naturel, ce qui diminue le besoin d'éclairage artificiel pendant la journée.

Tableau VI.7. Valeurs optimales des variables pour la Solution optimale. Source : Auteur.

Variable	Valeur
Rapport Fenêtre-Mur (WWR)	0,4
Type de Mur	Mur en brique creuse double avec un espace d'air
Type de Vitrage	Vitrage double à faible émissivité (Low-E Argon)
Orientation du Bâtiment	150° (sud-est)
Profondeur du Dispositif d'Ombre	0,3 m (inclinaison de 30° avec 3 lames)

- **Type de Mur : Mur en brique creuse double avec un espace d'air.**

Ce choix de matériau est judicieux car il offre une bonne isolation thermique, contribuant ainsi à la performance énergétique du bâtiment. La brique creuse permet de réduire les déperditions de chaleur, tandis que l'espace d'air agit comme un isolant supplémentaire, améliorant le confort thermique des occupants.

- **Type de Vitrage : Vitrage double à faible émissivité (Low-E Argon).**

Le vitrage Low-E Argon est particulièrement adapté pour les bâtiments résidentiels, car il optimise l'isolation tout en permettant un bon passage de la lumière. Ce type de vitrage réduit les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été, ce qui contribue à un environnement intérieur agréable et à des économies d'énergie.

- **Orientation du Bâtiment : 150° (sud-est).**

L'orientation du bâtiment à 150° permet de maximiser l'exposition à la lumière naturelle tout au long de la journée, tout en minimisant les gains thermiques indésirables. Une telle orientation favorise un éclairage naturel optimal et réduit le besoin de chauffage et de climatisation, ce qui est crucial pour améliorer l'efficacité énergétique.

- **Dispositif d'Ombre : 0,3 m (inclinaison de 30° avec 3 lames).**

Un dispositif d'ombre avec une profondeur de 0,3 m et une inclinaison de 30° est conçu pour réguler l'apport de lumière naturelle et minimiser l'éblouissement. Ce dispositif aide à maintenir une température intérieure agréable, particulièrement en période de forte exposition solaire. L'utilisation de 3 lames permet une modulation efficace de la lumière, garantissant un confort visuel pour les occupants.

L'ensemble des choix effectués pour la Solution 4 vise à créer un bâtiment résidentiel à la fois confortable et économe en énergie. Chaque variable a été sélectionnée pour interagir de manière synergique, améliorant l'efficacité énergétique tout en garantissant le bien-être des occupants. Les solutions proposées permettent d'atteindre des performances optimales en matière de confort thermique et visuel, tout en répondant aux exigences modernes de durabilité et d'efficacité énergétique.

VI.3. Simulation de la solution optimale pour l'objet d'étude.

Cette recherche vise à explorer l'impact des choix de conception architecturale sur le confort thermique et visuel dans un contexte de changement climatique futur. La simulation proposée permet d'évaluer comment divers paramètres, tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux de construction, et le rapport de surface vitrée, influencent les performances environnementales des espaces de vie.

En appliquant les variables optimales de la solution retenue dans le cas d'étude sous un climat futur, cette étude démontre que l'approche paramétrique est cruciale, en particulier dans les phases en amont de la conception. En adoptant une méthodologie systématique, nous cherchons à établir un lien entre les décisions de conception et leur capacité à garantir un confort optimal pour les occupants, tout en tenant compte des défis imposés par les conditions climatiques changeantes.

Cette recherche se positionne dans une perspective d'anticipation, visant à modéliser des scénarios réalistes et à identifier les configurations les plus efficaces. L'objectif est de promouvoir une architecture durable et résiliente, capable de répondre aux exigences contemporaines tout en minimisant l'impact environnemental. Cette étude contribue à une meilleure compréhension des interactions entre la conception architecturale et les effets du changement climatique, en favorisant des solutions qui garantissent un confort durable dans les bâtiments résidentiels.

VI.3.1. Autonomie spatiale de la lumière du jour : influence des variables optimales.

VI.3.1.1 Application sur la première pièce du rez-de-chaussée.

L'application de la solution optimale 4 sur la pièce 1, située au rez-de-chaussée, a permis d'observer des améliorations considérables dans la SDA sous différents scénarios climatiques. Les résultats, présentés dans la Figure VI.13, montrent une SDA de 75,50 % pour les conditions TMY, 78,00 % pour le scénario RCP 2050 et 81,25 % pour le scénario RCP 2080. Ces résultats représentent des augmentations significatives par rapport à l'état actuel, où la SDA était de 32,22 %.

Le tableau comparatif des résultats (voir tableau VI.8), avant et après l'application de la solution optimale pour la pièce 1 sous différents scénarios climatiques :

Tableau VI.8. Comparaison de la SDA Avant et Après Optimisation pour la pièce1. Source : Auteur

Scénario	SDA Actuelle (%)	SDA Optimisée (%)	Taux d'Amélioration (%)
TMY	32.22	75.50	134.33
RCP 2050	36.52	78.00	113.60
RCP 2080	37.13	81.25	118.82

L'interprétation de ce tableau met en évidence une amélioration significative de l'Autonomie Spatiale de la Lumière du Jour (SDA) après l'application de la solution optimale pour la pièce 1 sous différents scénarios climatiques.

Dans le scénario de TMY, la SDA actuelle est de 32,22 %, mais après optimisation, elle atteint 75,50 %, représentant une amélioration remarquable de 134,33 %. Cela indique une distribution plus homogène et une meilleure pénétration de la lumière naturelle, réduisant ainsi la nécessité d'un éclairage artificiel.

Pour le scénario RCP 2050, la SDA passe de 36,52 % à 78,00 %, soit une augmentation de 113,60 %. Cette hausse démontre que l'optimisation est efficace même face aux projections climatiques futures.

Enfin, dans le scénario RCP 2080, la SDA initiale de 37,13 % atteint 81,25 % après optimisation, marquant une amélioration de 118,82 %. Cette progression met en lumière la pertinence des ajustements optimisés dans les contextes climatiques extrêmes futurs.

Dans l'ensemble, le tableau illustre que l'optimisation des paramètres de conception permet d'obtenir une amélioration substantielle de l'éclairage naturel dans la pièce 1, sous tous les scénarios, confirmant ainsi l'efficacité de la solution appliquée.

Le tableau met en évidence les améliorations obtenues grâce à l'optimisation des paramètres de conception sur SDA dans les pièces 2 (étage intermédiaire) et 3 (dernier étage), en tenant compte des scénarios climatiques actuels (TMY) et futurs (RCP 2050 et RCP 2080).

VI.3.1.2. Application sur la deuxième et la troisième pièce.

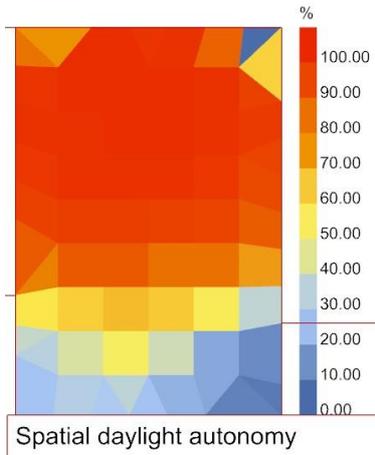
Pour la pièce 2, avec la solution optimale appliquée, la SDA de la pièce 2 passe à **82 %** dans le scénario TMY, soit une amélioration significative de **47,85 %** par rapport à l'état actuel, où la SDA était de 34,15 %. Dans les scénarios RCP 2050 et RCP 2080, les SDA augmentent respectivement à **82 %**, soit une amélioration de **44,81 %** et à **82 %**, soit une augmentation de **43,37 %**. Ces résultats montrent une amélioration significative de l'éclairage naturel dans la pièce, quel que soit le scénario climatique. Cela signifie que, même avec les changements climatiques projetés, l'optimisation permet d'obtenir des niveaux d'éclairage largement suffisants pour réduire la dépendance à l'éclairage artificiel.

La pièce 3, située au dernier étage, voit sa SDA passer à **80 %** dans le scénario TMY, soit une augmentation de **44,05 %** par rapport à l'état actuel, où la SDA était de 35,95 %. Pour les scénarios RCP 2050 et RCP 2080, les SDA atteignent respectivement **80 %** et **80 %**, affichant des améliorations de **41,38 %** et **40,44 %**. Cela souligne que la pièce 3, même avant optimisation, bénéficiait déjà d'une bonne exposition à la lumière naturelle, mais l'optimisation a permis d'en maximiser les performances.

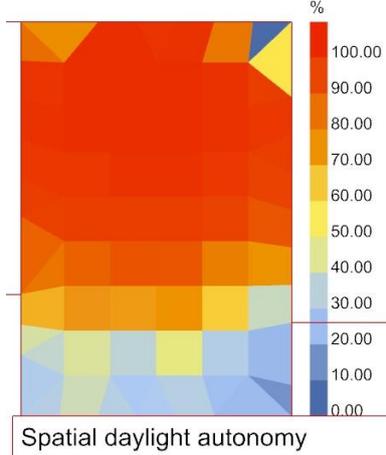
La pièce 2, après optimisation, atteint une SDA de **82 %** sous toutes les conditions climatiques, dépassant ainsi les performances de la pièce 3, qui atteint **80 %**. Bien que la pièce 3, située au dernier étage, bénéficie d'une meilleure exposition, l'optimisation appliquée à la pièce 2 permet d'obtenir une meilleure performance en termes d'éclairage naturel. Cela montre que la solution optimale, combinée à un emplacement stratégique dans le bâtiment, peut compenser les limitations d'exposition directe à la lumière naturelle. (Voir tableau VI.9).

Les résultats (voir Figure VI.13) démontrent que l'application de la solution optimale dans les pièces 2 et 3 a permis d'augmenter considérablement la SDA, assurant ainsi une plus grande autonomie en éclairage naturel. Cette amélioration contribue non seulement à un confort visuel accru, mais aussi à une réduction de la consommation d'énergie en limitant la nécessité d'un éclairage artificiel. Ces optimisations montrent l'efficacité de la conception paramétrique pour s'adapter aux futurs changements climatiques tout en garantissant des performances optimales en termes d'éclairage naturel.

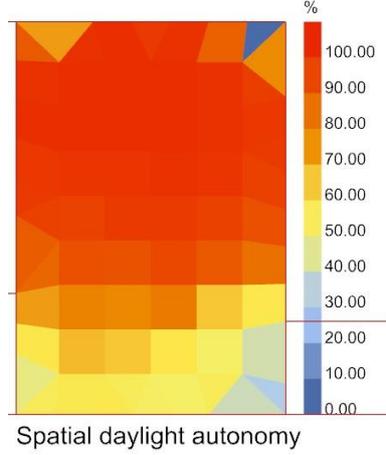
Sous TMY



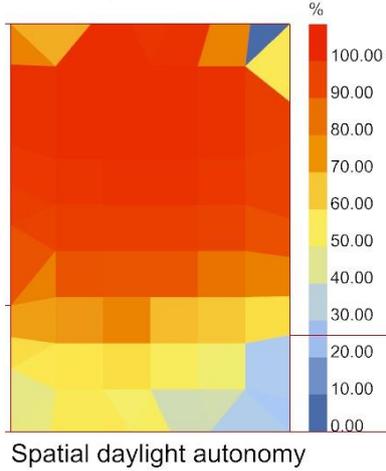
RCP 8.5 2050s



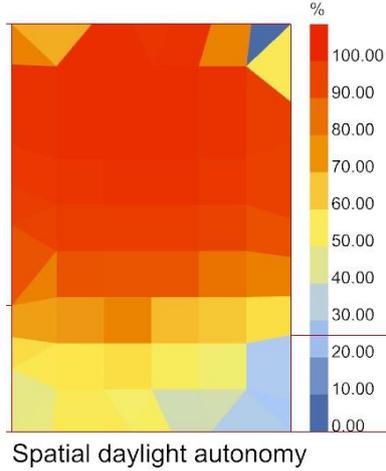
RCP 8.5 2080s



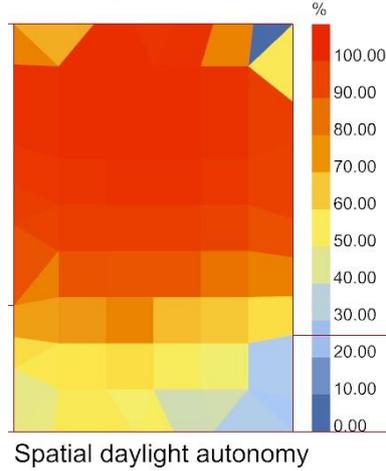
sDA Moy : 75 %



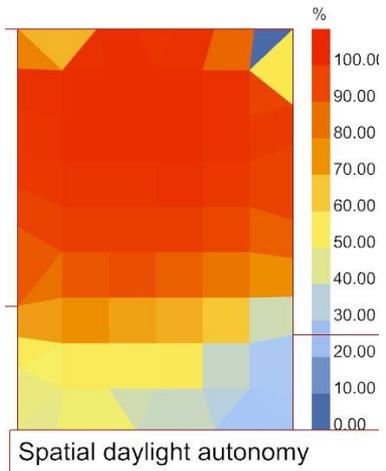
sDA Moy: 78 %



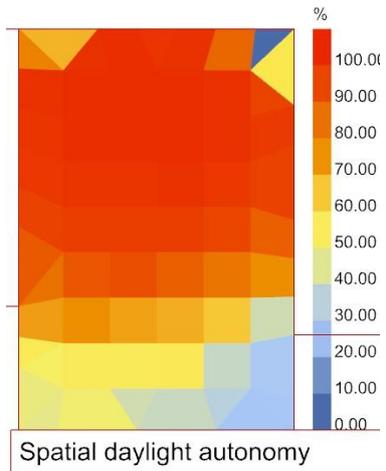
sDA Moy: 81 %



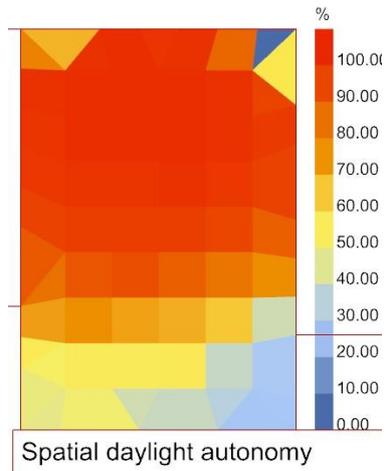
sDA Moy: 82 %



sDA Moy: 82 %



sDA Moy: 82 %



sDA Moy: 80%

sDA Moy: 80%

sDA Moy: 80%

Figure VI.13. *sDA pour les pièces sélectionnées après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.*

Tableau VI.9. *Amélioration des SDA pour les Pièces 2 et 3 après optimisation. Source : Auteur.*

Scénario	SDA Actuelle - Pièce 2 (%)	SDA Optimisée - Pièce 2 (%)	Taux d'Amélioration (%)	SDA Actuelle - Pièce 3 (%)	SDA Optimisée - Pièce 3 (%)	Taux d'Amélioration (%)
TMY	34,15	82	47,85	35,95	80	44,05
RCP 2050	37,19	82	44,81	38,62	80	41,38
RCP 2080	38,63	82	43,37	39,56	80	40,44

VI.3.2. IUE : Influence des Variables Optimales.

La première pièce, située au rez-de-chaussée, présente des valeurs de (IUE) (voir tableau VI.10), et (voir figure VI.14), qui s'élèvent à 58,11 kWh/m² sous les conditions climatiques actuelles (TMY). En projetant vers les années 2050 et 2080, l'IUE augmente de manière significative, atteignant respectivement 95,00 kWh/m² et 100,00 kWh/m². Cette hausse est principalement due à l'augmentation de l'énergie de refroidissement, qui passe de 21,57 kWh/m² sous TMY à 50,00 kWh/m² en 2050, puis à 70,00 kWh/m² en 2080, ce qui reflète la nécessité croissante de refroidir la pièce en réponse à des températures estivales plus élevées. En revanche, l'énergie de chauffage montre une tendance à la baisse, passant de 36,54 kWh/m² à 20,00 kWh/m², soulignant l'impact positif du réchauffement climatique sur la demande de chauffage. L'énergie d'éclairage demeure constante à 10,00 kWh/m² tout au long de la période, ce qui suggère que les besoins d'éclairage artificiel ne devraient pas varier de manière significative.

Tableau VI.10. *IUE après optimisation pour la pièce 1. Source : Auteur.*

Paramètre	TMY (kWh/m ²)	2050 (kWh/m ²)	2080 (kWh/m ²)
Énergie de chauffage	36,54	35,00	20,00
Énergie de refroidissement	21,57	50,00	70,00
Énergie d'éclairage	10,00	10,00	10,00
Intensité d'utilisation d'énergie (IUE)	58,11	95,00	100,00

La deuxième pièce, située à l'étage intermédiaire, affiche également une (IUE) (voir Tableau VI.11), actuelle de 57,91 kWh/m², avec une projection d'augmentation à 89,00 kWh/m² en 2050 et 94,00 kWh/m² en 2080. L'énergie de chauffage diminue de 35,12 kWh/m² à 19,00 kWh/m², ce qui témoigne d'une tendance similaire à celle observée dans la première pièce. Toutefois, la consommation d'énergie pour le refroidissement montre une augmentation significative, passant de 22,79 kWh/m² à 45,00 kWh/m² en 2050 et atteignant 65,00 kWh/m² en 2080. Cette variation indique une réponse accrue aux défis posés par le changement climatique, où les besoins de refroidissement deviennent prédominants, en particulier pendant les mois d'été. L'énergie d'éclairage restant stable à 10,00 kWh/m² renforce l'idée que les besoins en éclairage artificiel ne sont pas affectés par les changements climatiques prévus.

Chapitre VI

Tableau VI.11. IUE après optimisation pour la pièce 2. Source : Auteur.

Paramètre	TMY (kWh/m ²)	2050 (kWh/m ²)	2080 (kWh/m ²)
Énergie de chauffage	35,12	34,00	19,00
Énergie de refroidissement	22,79	45,00	65,00
Énergie d'éclairage	10,00	10,00	10,00
Intensité d'utilisation d'énergie (IUE)	57,91	89,00	94,00

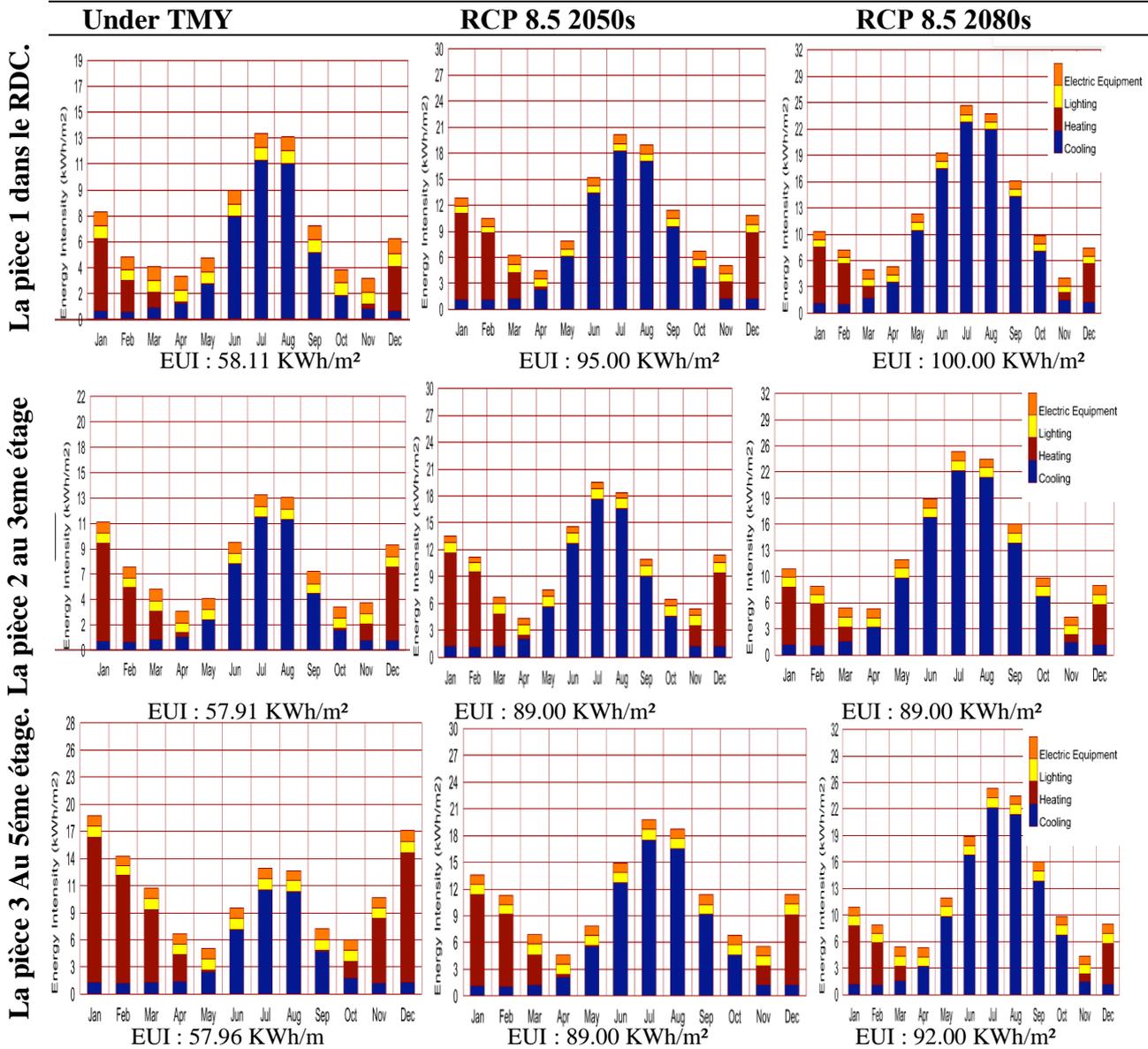


Figure.VI.14. EUI pour les pièces sélectionnées après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Enfin, la troisième pièce, située au dernier étage, présente une (IUE) de 57,96 kWh/m² sous TMY (voir tableau VI.12), avec des prévisions d'augmentation à 89,00 kWh/m² en 2050 et 92,00 kWh/m² en 2080. Tout comme dans les autres pièces, l'énergie de chauffage diminue, de 34,21 kWh/m² à 18,00 kWh/m², mettant en évidence l'impact du réchauffement climatique sur

Chapitre VI

la réduction des besoins en chauffage. Cependant, l'énergie de refroidissement connaît une hausse marquée, passant de 23,75 kWh/m² à 46,00 kWh/m² en 2050 et à 64,00 kWh/m² en 2080. Cela souligne une tendance à une consommation d'énergie accrue pour le refroidissement à mesure que les températures estivales continuent d'augmenter. L'énergie d'éclairage, quant à elle, reste constante à 10,00 kWh/m² tout au long de la période étudiée, ce qui suggère que les besoins en éclairage ne devraient pas fluctuer de manière significative en réponse aux changements climatiques prévus.

Tableau VI.12. IUE après optimisation pour la pièce 3. Source : Auteur.

Paramètre	TMY (kWh/m ²)	2050 (kWh/m ²)	2080 (kWh/m ²)
Énergie de chauffage	34,21	33,00	18,00
Énergie de refroidissement	23,75	46,00	64,00
Énergie d'éclairage	10,00	10,00	10,00
Intensité d'utilisation d'énergie (IUE)	57,96	89,00	92,00

Dans l'ensemble, les tableaux mettent en lumière l'évolution des besoins énergétiques dans chaque pièce face aux changements climatiques prévus pour les années 2050 et 2080 (voir figure VI.14). On constate une tendance générale à la diminution des besoins en chauffage et une augmentation substantielle des besoins en refroidissement, ce qui souligne l'impact du réchauffement climatique sur la consommation énergétique des bâtiments. L'énergie d'éclairage semble stable, indiquant que les stratégies d'optimisation de l'éclairage naturel pourraient contribuer à une amélioration de l'efficacité énergétique globale. Ces résultats suggèrent l'importance d'intégrer des solutions durables et des conceptions adaptatives pour répondre aux défis croissants liés au changement.

VI.3.3. Confort thermique : influence des variables optimales.

Les résultats (Voir figure VI.15) indiquent que la pièce 1 a enregistré un pourcentage de confort thermique (PCT) de 33,18 % sous les conditions climatiques actuelles (TMY), ce qui représente environ 2906,12 heures de confort thermique sur un total de 8760 heures annuelles. Cela signifie que cette pièce est en état d'inconfort pendant 66,82 % du temps, soit 5853,88 heures. Ce pourcentage de confort est en dessous des 80 % requis par la norme ASHRAE 55-2013, soulignant ainsi l'importance d'améliorer les conditions thermiques intérieures pour le bien-être des occupants. Sous le scénario climatique RCP 8.5, les prévisions pour les années 2050 et 2080 montrent une légère augmentation du PCT à respectivement 34,40 % et 35,80 %. Ces changements, bien qu'ils montrent une tendance à l'amélioration, demeurent en deçà des exigences minimales pour un confort optimal. Parallèlement, le pourcentage de sensation de chaleur (HSP) augmente de 30,25 % d'ici 2050, atteignant 40,50 % en 2080, tandis que la sensation de froid (CSP) diminue de 25,15 % en 2050 et de 36,30 % en 2080. Cela indique que les occupants ressentiront davantage de chaleur et moins de froid à mesure que les températures augmentent.

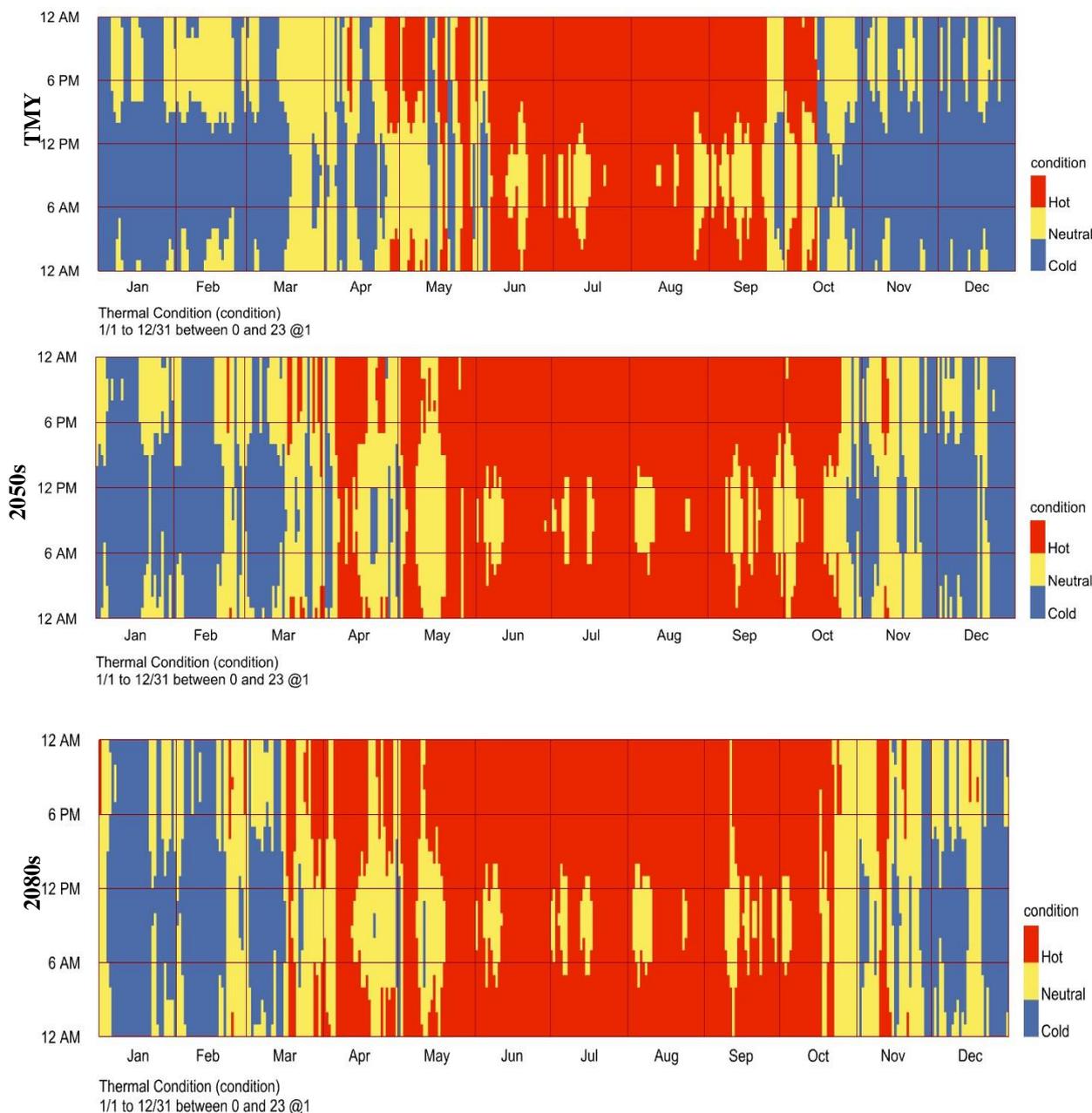


Figure VI.15. Diagramme de confort adaptatif dans la première pièce après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

Dans la pièce 2 (voir figures VI.16), le PCT actuel sous les conditions TMY est de 32,81 %, ce qui correspond à environ 2878,72 heures de confort thermique. Cela implique également un état d'inconfort de 67,19 % du temps, soit 5881,28 heures. Comme pour la pièce 1, ce taux de confort est insuffisant selon les standards de la norme ASHRAE. En se projetant vers les années 2050 et 2080, le PCT s'élève à 33,50 % et 34,90 %, respectivement. Bien qu'il y ait une légère amélioration, cela ne suffit pas à garantir un niveau de confort adéquat. Sous le scénario RCP 8.5, la sensation de chaleur (HSP) augmente de 31,10 % en 2050, atteignant 41,90 % en 2080, tandis que la sensation de froid (CSP) montre une diminution de 26,30 % en 2050 et de 37,50 % en 2080, indiquant une tendance similaire à celle de la pièce 1, avec une plus grande nécessité de refroidissement et moins de besoin de chauffage.

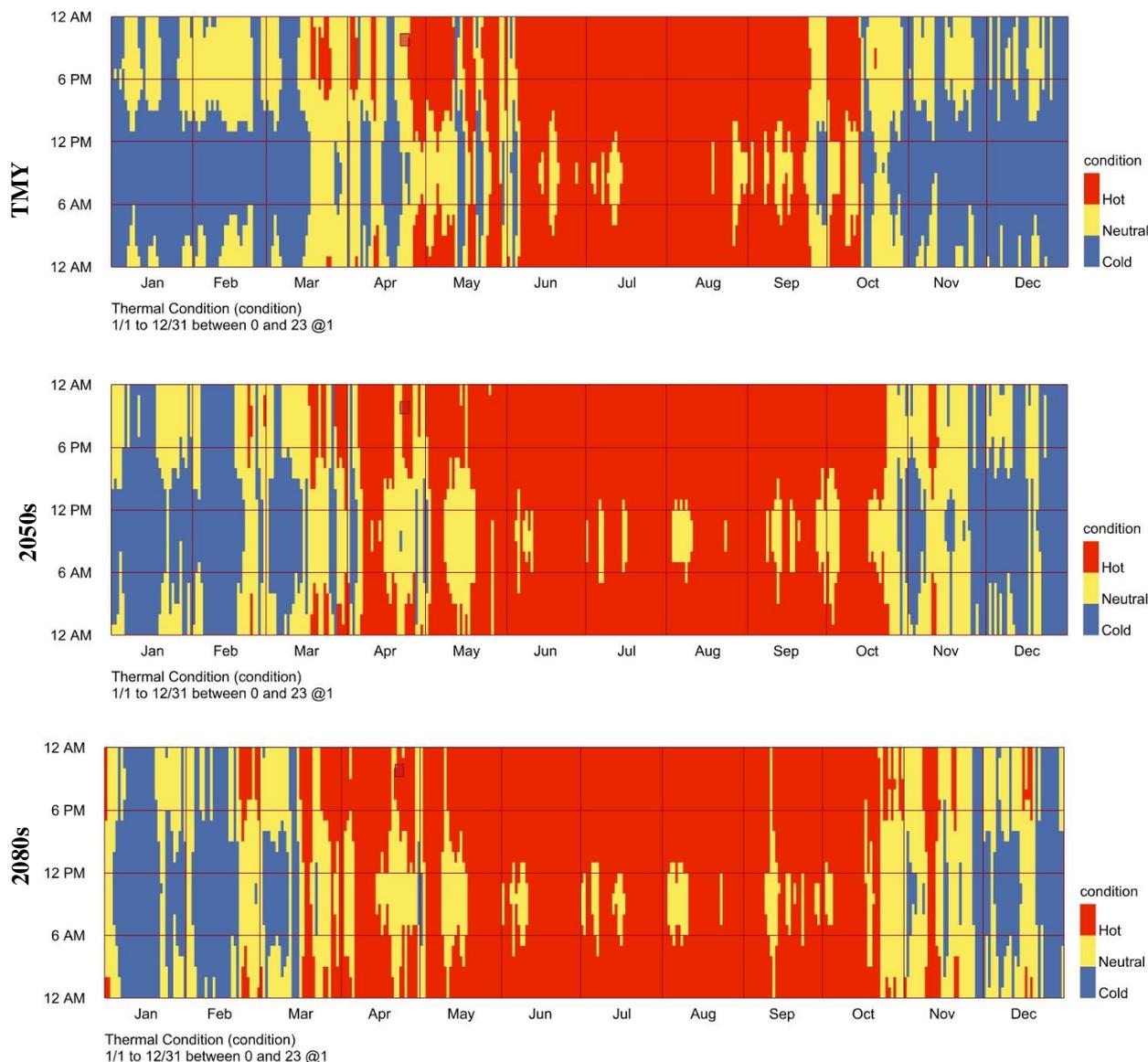


Figure VI.16. Diagramme de confort adaptatif dans la deuxième pièce après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper.

La pièce 3 (Voir Figure VI.17) affiche un PCT de 33,66 % sous les conditions climatiques TMY, représentant environ 2953,92 heures de confort thermique sur un total de 8760 heures. Cela signifie que 66,34 % du temps, soit 5806,08 heures, les occupants éprouvent un inconfort thermique. Ce pourcentage reste en dessous des exigences de la norme ASHRAE 55-2013. En 2050 et 2080, le PCT devrait atteindre respectivement 34,20 % et 35,50 %. Bien que les valeurs s'améliorent légèrement, elles ne suffisent toujours pas pour assurer un confort optimal. Les prévisions montrent une augmentation significative de la sensation de chaleur (HSP), avec des hausses de 30,45 % en 2050 et 40,10 % en 2080, tandis que la sensation de froid (CSP) diminue de 24,50 % en 2050 et de 35,80 % en 2080, ce qui renforce l'idée que les occupants ressentiront davantage de chaleur et moins de besoin de chauffage dans le futur.

Chapitre VI

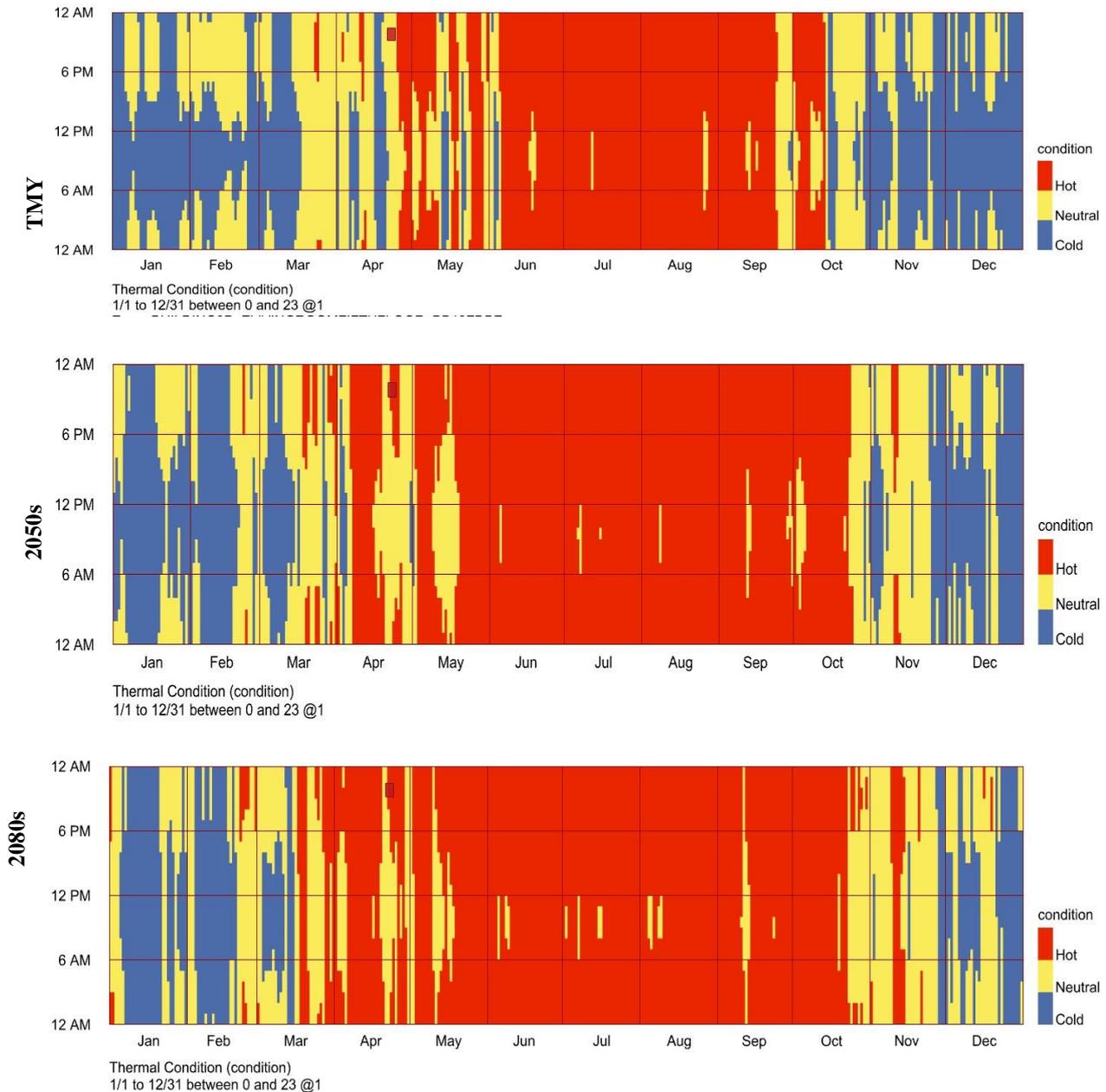


Figure VI.17. Diagramme de confort adaptatif dans la troisième pièce après optimisation. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinocéros Grasshopper

Bien qu'après l'optimisation, le pourcentage de confort dans les trois pièces, tant pour 2050 que pour 2080, n'atteigne pas le seuil recommandé de 80 % selon la norme ASHRAE, cette situation révèle une contradiction avec les objectifs d'optimisation fixés. Bien qu'il y ait eu une minimisation de l'Intensité d'utilisation d'énergie (EUI) et une amélioration des indicateurs de performance, tels que le confort visuel, l'augmentation du pourcentage de confort reste faible par rapport à l'état actuel. Ces résultats soulignent la nécessité de mettre en œuvre des mesures supplémentaires pour garantir un environnement intérieur confortable, car les améliorations observées, bien qu'encourageantes, ne sont pas suffisantes pour répondre aux exigences essentielles du bien-être des occupants dans un contexte climatique en évolution.

VI.4. Conclusion du chapitre.

Ce chapitre a présenté les différentes étapes de l'optimisation multi-objectifs appliquée au cas d'étude, en mettant l'accent sur l'amélioration des performances énergétiques et du confort thermique des bâtiments. Nous avons débuté par la mise en place d'un cadre d'optimisation, qui a permis de définir clairement les variables et les objectifs à optimiser. Les sections concernant les caractéristiques de construction des murs extérieurs, l'orientation du bâtiment, la sélection des matériaux des fenêtres et les dispositifs d'ombrage horizontal ont mis en lumière l'importance de ces éléments dans la performance énergétique globale du bâtiment.

Les objectifs d'optimisation ont été soigneusement sélectionnés afin de maximiser le confort intérieur tout en minimisant l'Intensité d'utilisation d'énergie (IUE). Cela a permis d'établir un équilibre entre l'efficacité énergétique et la qualité de vie des occupants, en garantissant un environnement intérieur agréable même dans un contexte climatique évolutif.

L'utilisation d'outils et de méthodologies d'optimisation a joué un rôle crucial dans cette recherche de la solution optimale. En intégrant des simulations dynamiques et des algorithmes d'optimisation, nous avons pu explorer différentes configurations et identifier les meilleures combinaisons de variables. En particulier, la solution optimale 4, qui a été sélectionnée sur la base de critères de performance rigoureux, a démontré une efficacité énergétique remarquable tout en atteignant un taux de confort thermique significatif.

En conclusion, les résultats obtenus soulignent l'importance d'une approche intégrée et paramétrique dans la conception des bâtiments. Bien que les optimisations aient permis d'améliorer considérablement les performances, il reste essentiel de continuer à affiner ces solutions face aux défis futurs liés au changement climatique. La recherche de solutions optimales doit se poursuivre, en prenant en compte l'évolution des normes et des attentes en matière de confort et de durabilité. Cela ouvrira la voie à des bâtiments résilients, capables de s'adapter aux conditions climatiques futures tout en garantissant le bien-être de leurs occupants.

Conclusion générale.

Conclusion générale et perspectives.

L'objectif de cette thèse est de démontrer la pertinence de l'approche paramétrique dans la conception environnementale des logements sociaux. Elle vise à optimiser le confort intérieur ainsi que l'efficacité énergétique, en tenant compte des défis engendrés par le changement climatique. En intégrant cette approche dès les phases amont de la conception architecturale, cette recherche aspire à explorer et identifier des solutions innovantes et durables qui contribuent à améliorer les performances des bâtiments tout en répondant aux besoins des occupants. Ce manuscrit est structuré en deux parties essentielles, chacune mettant en lumière les enjeux interconnectés de la conception architecturale et des préoccupations environnementales contemporaines. La première partie établit un cadre théorique et conceptuel qui prépare à une compréhension approfondie des concepts clés liés aux hypothèses de recherche. La seconde partie, quant à elle, présente une analyse empirique et expérimentale des relations entre les variables définies, suivant une méthodologie rigoureuse et intégrée.

La première partie commence par une exploration des enjeux environnementaux croissants et de leur impact sur la conception architecturale. L'industrialisation, l'urbanisation rapide et les pratiques de construction intensives ont engendré des conséquences désastreuses, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, l'épuisement des ressources naturelles et la dégradation des écosystèmes. Cette situation critique incite les architectes, urbanistes et décideurs à réévaluer leurs pratiques et à envisager de nouvelles méthodes de conception qui allient fonctionnalité et respect de l'environnement.

Une analyse des impacts environnementaux des bâtiments s'avère cruciale pour comprendre les interactions entre l'architecture et les enjeux écologiques. Les effets du réchauffement climatique et la consommation excessive de ressources doivent être examinés de manière critique, notamment en ce qui concerne les émissions de carbone liées à la construction, à l'exploitation et à la démolition des édifices. L'architecture vernaculaire, avec ses pratiques régionales et son adaptation aux contextes locaux, peut également inspirer des approches modernes d'éco-conception. En tirant parti des connaissances traditionnelles et des méthodes durables, les architectes peuvent concevoir des solutions contemporaines qui respectent l'environnement. L'évolution vers des pratiques architecturales durables a donné naissance à l'approche paramétrique. Cet outil essentiel permet de modéliser et d'analyser les relations entre divers paramètres influençant le confort intérieur et l'efficacité énergétique des bâtiments. Grâce à des données empiriques et à des simulations, cette méthode facilite une compréhension approfondie des interactions entre les éléments de conception, l'utilisation de l'énergie et le bien-être des occupants. La phase en amont de la conception architecturale joue un rôle crucial dans la mise en œuvre de ces approches. Une évaluation minutieuse des conditions climatiques locales, des ressources disponibles et des besoins des utilisateurs dès les premières étapes de la conception permet d'orienter les décisions vers des solutions durables et adaptées. Cette préparation en amont est essentielle pour garantir que les choix de conception répondent efficacement aux défis environnementaux tout en assurant le confort et le bien-être des occupants.

Conclusion générale

L'interaction entre design paramétrique et conception environnementale favorise une approche systémique, où chaque décision est éclairée par des résultats quantifiables. En intégrant des outils de modélisation avancés, les architectes peuvent simuler divers scénarios climatiques, offrant ainsi la flexibilité nécessaire pour répondre aux défis actuels et futurs du changement climatique. La nécessité d'une approche intégrée devient particulièrement évidente lorsque l'on considère l'optimisation multi-objectifs (MOO). Ce cadre permet de gérer les compromis entre divers objectifs de conception, tels que le confort intérieur et l'efficacité énergétique. L'intégration de scénarios climatiques comme le RCP 8.5 dans l'optimisation MOO se révèle indispensable pour anticiper les impacts futurs sur la conception architecturale. En effet, cette intégration améliore l'efficacité énergétique des bâtiments et favorise des solutions résilientes adaptées aux exigences évolutives de notre environnement.

Enfin, l'examen des enjeux climatiques souligne l'importance d'adapter les modèles d'optimisation pour inclure les effets prévisibles du changement climatique sur la durée de vie des bâtiments, généralement estimée à 60 ans. Le manque de données climatiques actualisées a souvent conduit à des résultats biaisés dans les modèles d'optimisation, ce qui souligne l'urgence d'incorporer des informations dynamiques et pertinentes dans le processus de conception

Au niveau national, le phénomène de construction rapide et dans de brefs délais se manifeste souvent au détriment du confort intérieur, en particulier dans le secteur du logement social collectif. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les zones où le taux de bâtiments est élevé par rapport aux besoins résidentiels, entraînant une consommation énergétique excessive. Le confort intérieur, et plus spécifiquement les aspects visuel et thermique, est souvent négligé dans cette précipitation à construire. La problématique de cette étude, mise en exergue et confirmée à travers l'analyse de la revue de la littérature présentée dans la première partie, permet de situer notre recherche par rapport aux travaux existants. L'examen des études antérieures révèle une insuffisance significative concernant l'intégration des préoccupations liées au confort intérieur dans les pratiques de construction actuelles. En réponse à cela, un cadre méthodologique a été établi, définissant le contexte de l'étude et le cas spécifique examiné. Ce cadre décrit en détail les techniques d'investigation employées ainsi que les outils utilisés tout au long de la recherche. L'analyse des données collectées, les résultats obtenus et leur discussion sont également intégrées dans le quatrième, cinquième et sixième chapitre du manuscrit.

La recherche s'ouvre sur une présentation du contexte de l'étude, qui se concentre sur la ville de Guelma. Cette ville, reconnue pour son climat méditerranéen chaud, est classée selon la classification de Köppen comme Csa. L'analyse se penche ensuite sur les ensembles de logements sociaux à Guelma, choisis en raison de leur pertinence pour l'évaluation du confort intérieur, tant thermique que visuel, ainsi que des caractéristiques architecturales spécifiques qui leur sont associées. Le travail de terrain a été amorcé par le recensement des projets de logements sociaux les plus récents, dans le but d'examiner leur réponse aux défis contemporains en matière d'habitat. Quatre cités ont été sélectionnées pour des visites sur site, accompagnées de relevés architecturaux et de photographies, permettant une analyse approfondie des solutions mises en œuvre en termes de confort et de durabilité.

Conclusion générale

L'analyse typologique réalisée a permis de comparer ces projets et de sélectionner un bâtiment représentatif pour l'étude de cas. Ce bâtiment fait partie d'un complexe résidentiel comprenant 956 logements. Pour l'analyse, trois pièces ont été choisies dans trois appartements différents du même bâtiment, chacune à un niveau distinct : une pièce au rez-de-chaussée, une autre au troisième étage, et la troisième au cinquième étage. Cette sélection permet d'évaluer l'impact de la hauteur et de l'exposition sur les performances thermiques et visuelles de chaque pièce. Bien que le bâtiment étudié ait été conçu selon les normes locales en matière de construction résidentielle, des simulations ont été réalisées pour évaluer ses performances dans le contexte du changement climatique futur. Cette étude vise spécifiquement à évaluer l'éclairage naturel et le confort thermique des logements sociaux.

Des mesures in situ ont été effectuées pour analyser l'impact de la hauteur sur les performances thermiques et d'éclairage. Les niveaux d'éclairage naturel ont été mesurés en segmentant chaque pièce en 56 rectangles de taille égale, avec des mesures prises au centre de chaque rectangle. Les relevés ont été effectués à une hauteur de 0,8 mètre, correspondant à la hauteur d'une surface de travail, avec un espacement de 0,5 mètre entre les points de mesure, en utilisant un luxmètre Multimetrix LM76. Ces mesures ont été réalisées une fois par an, le 26 janvier, journée choisie pour représenter les conditions d'éclairage sous un ciel nuageux en hiver, à quatre moments différents de la journée. En parallèle, des mesures de température ont été réalisées pour évaluer les performances thermiques. Ces relevés ont été effectués deux fois par an, le 26 janvier (hiver) et le 6 août (été), avec des mesures prises à huit intervalles tout au long de la journée (de 08h00 à minuit). La température de l'air a été mesurée au centre de chaque pièce, à une hauteur d'un mètre, conformément aux exigences de la norme ANSI/ASHRAE Standard 55-2017.

La validation des données in situ est essentielle pour comparer les conditions réelles observées dans le bâtiment avec les prédictions issues des simulations numériques, garantissant ainsi la précision des modèles. À cet effet, le test de Pearson a été utilisé pour évaluer la corrélation entre les mesures expérimentales et les résultats simulés, avec des coefficients élevés (proches de 1) dans les trois pièces examinées, indiquant une forte concordance. En complément, l'erreur moyenne biaisée (MBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV RMSE) ont montré une faible marge d'erreur, renforçant la fiabilité des simulations. Ces résultats, conformes aux normes internationales, notamment l'ASHRAE-55, valident les performances thermiques et lumineuses des bâtiments et justifient l'utilisation des outils de simulation pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique dans les espaces résidentiels.

Bien que la validation des consommations énergétiques n'ait pas pu être effectuée, les calculs basés sur des conditions thermiques et lumineuses validées restent cohérents avec l'objectif d'optimisation par algorithme génétique. Pour modéliser les conditions climatiques futures, le logiciel Meteonorm a été utilisé pour générer des fichiers de données météorologiques intégrant divers scénarios de changement climatique, notamment le RCP 8.5, qui illustre un scénario d'émissions élevées de gaz à effet de serre. Cette approche a permis de créer des fichiers pour les années 2050 et 2080, périodes correspondant au cycle de vie habituel d'un bâtiment de 60

Conclusion générale

ans, afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur la performance et l'efficacité énergétique des bâtiments.

Cette étude de cas illustre l'utilisation de l'approche paramétrique pour examiner les interactions entre les performances d'un bâtiment résidentiel, les conditions climatiques futures et la configuration des pièces à différents niveaux. Le processus débute par une modélisation numérique du bâtiment, suivie d'une validation rigoureuse des résultats pour garantir la précision des simulations. Ensuite, une évaluation des performances du bâtiment face aux évolutions climatiques est réalisée à l'aide de simulations annuelles, prenant en compte des scénarios futurs (2050 et 2080) générés par l'outil Meteonorm.

La modélisation est effectuée avec Rhino et Grasshopper, intégrant des données climatiques via Ladybug et Honeybee pour analyser l'énergie et la lumière naturelle. Pour évaluer la lumière du jour, des outils tels que Daysim et Radiance sont employés, tandis qu'EnergyPlus et OpenStudio simulent les besoins énergétiques. Les paramètres influençant le confort thermique et lumineux, comme l'orientation du bâtiment (-14° vers le nord-est), le type de vitrage, les matériaux des murs, et l'absence de protection solaire, sont soigneusement pris en compte. Des spécifications énergétiques sont définies, incluant des températures de consigne pour le chauffage (22°C) et le refroidissement (27°C), ainsi que des taux d'occupation et d'infiltration d'air spécifiques.

L'évaluation des performances repose sur des indicateurs tels que l'Autonomie de la Lumière Naturelle Spatiale (sDA300/50%) et l'Intensité d'Utilisation Énergétique (EUI), ainsi que des mesures de confort thermique (TCP, HSP, CSP). Ces analyses permettent d'obtenir une évaluation précise des performances énergétiques tout en répondant aux exigences de confort face aux défis climatiques futurs. L'évaluation de l'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) a montré des résultats variés d'une pièce à l'autre, révélant que les trois espaces ne répondent pas aux normes minimales d'éclairage naturel. Cela met en lumière des insuffisances dans le système de fenestration, entraînant ainsi une dépendance accrue à l'éclairage artificiel. Par ailleurs, l'analyse de l'Intensité d'Utilisation de l'Énergie (IUE) indique une augmentation significative des besoins énergétiques, notamment pour le refroidissement. En ce qui concerne le confort thermique, l'application d'un modèle adaptatif a révélé que toutes les pièces ne respectent pas les heures de confort thermique (TCH) par an, se situant bien en dessous des 80 % requis par la norme ASHRAE 55-2013.

Cette recherche a examiné l'intégration de l'optimisation dans le processus de conception environnementale. L'optimisation a été réalisée par le biais d'algorithmes et de modèles paramétriques qui simulent différentes configurations architecturales, prenant en compte plusieurs variables clés. Parmi celles-ci, le rapport fenêtre-mur (WWR) a été exploré sur une large plage de 0,2 à 0,95, afin de déterminer son impact sur l'efficacité énergétique. Les caractéristiques de construction des murs extérieurs, comprenant quatre matériaux distincts sélectionnés en fonction de leur coût, de leur disponibilité et de leurs performances thermiques, se sont également révélées essentielles pour l'optimisation. De plus, l'orientation du bâtiment a été modifiée entre le nord et le sud, avec un angle variant de 0 à 180 degrés, influençant

Conclusion générale

l'ensoleillement et les besoins en chauffage et en climatisation. En ce qui concerne les matériaux de fenêtres, six types différents ont été évalués pour leurs performances en matière d'isolation, de gain de chaleur solaire et de réduction de l'éblouissement, mettant particulièrement l'accent sur la sélection des vitrages (simple, double, triple vitrage), qui peuvent significativement améliorer l'efficacité énergétique et le confort intérieur.

En outre, la conception de dispositifs d'ombrage horizontal, avec des profondeurs variant de 0,1 à 0,3 m et des angles d'inclinaison ajustables de 0° à 90°, vise à optimiser le contrôle solaire tout en maintenant une luminosité diffuse agréable à l'intérieur. Les objectifs d'optimisation de cette étude reposent sur les résultats des simulations thermiques, de lumière naturelle et énergétiques, permettant de sélectionner l'option de conception optimale en maximisant l'autonomie spatiale de la lumière naturelle (sDA), en minimisant l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) et en maximisant le pourcentage de confort thermique (TCP). L'optimisation utilise des conditions météorologiques typiques (TMY) et projette les performances à long terme sous des scénarios climatiques RCP8.5 pour les décennies 2050 et 2080,

Pour atteindre ces objectifs, le plugin Octopus a été intégré à un environnement de conception paramétrique, facilitant l'exploration de configurations variées et permettant de simuler différentes variantes de conception en temps réel grâce à un algorithme génératif. Générant ainsi trois fronts de Pareto distincts. Chacun de ces fronts illustre la performance d'une pièce, en identifiant les solutions optimales par l'analyse des compromis entre trois objectifs. L'analyse des résultats, présentée que la majorité des conceptions atteignent un niveau de confort thermique modéré, tout en se concentrant principalement sur l'efficacité énergétique, avec un accès à la lumière du jour souvent limité. Au total, 107 solutions ont été générées, dont 10 ont été retenues comme optimales, représentant des compromis non dominés entre confort et consommation d'énergie. Ces solutions ont été soumises à des évaluations en fonction des scénarios climatiques futurs, garantissant ainsi leur pertinence face aux impacts du changement climatique.

L'optimisation globale du bâtiment garantit un sDA de 75-82 %, un EUI d'environ 57,91 kWh/m² et un TCP d'environ 32,81 %. Les variables optimales présentées visent à maximiser l'efficacité énergétique et le confort intérieur d'un bâtiment résidentiel. Le rapport fenêtre-mur (WWR) est fixé à 0,4, permettant un équilibre entre l'apport de lumière naturelle et la gestion des gains thermiques, ce qui réduit les risques de surchauffe et diminue le besoin d'éclairage artificiel. Un mur en brique creuse double avec un espace d'air a été choisi pour sa bonne isolation thermique, tandis que le vitrage double à faible émissivité (Low-E Argon) optimise l'isolation et minimise les pertes de chaleur. L'orientation du bâtiment à 150° (sud-est) maximise l'exposition à la lumière naturelle tout en limitant les gains thermiques indésirables. Un dispositif d'ombrage de 0,3 m avec une inclinaison de 30° et trois lames régule l'apport de lumière et maintient une température intérieure agréable, contribuant ainsi à créer un bâtiment à la fois confortable et économe en énergie.

La recherche propose une analyse approfondie de l'influence des choix de conception architecturale sur le confort thermique et visuel dans le contexte du changement climatique.

Conclusion générale

Elle s'appuie sur des simulations pour évaluer divers paramètres, tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux utilisés et le rapport de surface vitrée. En intégrant une approche paramétrique dès les phases initiales de conception, l'étude a permis d'identifier des configurations efficaces et des scénarios réalistes, conduisant à une amélioration significative des performances environnementales. La solution optimale, déterminée à partir de l'analyse des variables, a été mise en œuvre dans les trois pièces sous les conditions climatiques TMY pour les années 2050 et 2080, avec des résultats attestant de l'efficacité de cette optimisation pour garantir un éclairage naturel adéquat. De plus, l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) a diminué par rapport à l'état actuel, grâce à la maximisation de l'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA), indiquant une gestion énergétique plus efficace. Cependant, le pourcentage de confort thermique (PCT) dans la première pièce s'est établi à seulement 33,18 % sous TMY, témoignant d'une évolution très marginale, insuffisante pour satisfaire les exigences de la norme ASHRAE, et mettant en évidence la nécessité d'améliorations substantielles pour garantir le bien-être des occupants face aux défis climatiques futurs.

Il est essentiel d'examiner comment les hypothèses formulées ont été confirmées par les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche.

Hypothèse 1 : "L'adoption d'une approche paramétrique dans le processus d'une conception environnementale intégrée permettra d'améliorer la qualité environnementale du logement et d'assurer un confort optimal."

Les résultats de cette étude ont clairement démontré que l'adoption d'une approche paramétrique dans le design environnemental intégré joue un rôle crucial dans l'amélioration de la qualité de l'environnement résidentiel. Grâce à l'utilisation d'outils logiciels avancés, il a été possible d'analyser l'impact des différentes variables sur le niveau de confort intérieur, notamment la ventilation naturelle et l'éclairage naturel. Cette analyse a permis d'identifier les conceptions les plus efficaces, renforçant ainsi le confort thermique et visuel et contribuant à un niveau de satisfaction plus élevé pour les habitants.

Hypothèse 2 : "Les paramètres tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux de construction, ainsi que les caractéristiques des fenêtres et des dispositifs d'ombrage, jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la performance environnementale des logements sociaux à Guelma."

Les données collectées au cours de cette étude confirment cette hypothèse, mettant en évidence l'impact significatif des normes de conception variées. L'analyse de la performance thermique des différents bâtiments a révélé que l'orientation architecturale et le choix des matériaux influencent considérablement la consommation d'énergie. L'efficacité de diverses formes architecturales a été mesurée pour améliorer l'efficacité énergétique. De plus, les résultats indiquent que l'intégration de technologies telles que les fenêtres à haute performance et les dispositifs d'ombrage a considérablement réduit le besoin de chauffage et de climatisation.

Hypothèse 3 : "L'adoption de pratiques architecturales intégratives, telles que l'éco-conception intégrée, permet aux concepteurs d'incorporer efficacement une diversité de paramètres de performance en réponse aux conditions climatiques futures."

Cette recherche a révélé comment les pratiques architecturales intégratives, telles que le design environnemental intégré, augmentent la capacité des concepteurs à relever les défis posés par les changements climatiques futurs. En évaluant différents scénarios, il a été constaté que l'intégration de variables de performance, telles que les sources d'énergie renouvelable et les techniques de ventilation naturelle, contribue non seulement à réaliser une haute efficacité énergétique, mais facilite également l'adaptation aux changements climatiques. Cela souligne l'importance d'une réflexion stratégique dès les phases initiales de conception pour garantir la durabilité des performances environnementales des bâtiments. En confirmant ces hypothèses, les résultats de cette recherche soulignent que le design environnemental intégré, en s'appuyant sur une approche paramétrique, peut significativement améliorer la qualité de vie dans le logement social collectif, notamment dans des contextes comme la ville de Guelma. Ce cadre permet la mise en œuvre de stratégies efficaces visant à répondre aux besoins futurs.

Limites de recherche.

Dans le cadre de cette recherche, plusieurs limites doivent être prises en compte. Tout d'abord, la modélisation utilisée pour simuler le confort thermique et visuel peut simplifier la complexité inhérente aux bâtiments et à leur environnement. Cette simplification risque de générer des résultats moins précis, car les outils de simulation n'intègrent souvent pas la variabilité des matériaux de construction, le comportement des occupants et les fluctuations climatiques locales.

Ensuite, les données climatiques utilisées pour les simulations peuvent ne pas représenter fidèlement les conditions réelles du site. En effet, l'utilisation de moyennes historiques peut négliger des événements climatiques extrêmes, qui ont un impact significatif sur le confort intérieur, et par conséquent, cela affecte la précision des évaluations. Le comportement des occupants est également un aspect crucial à considérer. Les modèles de simulation adoptent souvent un comportement standardisé en matière d'utilisation de l'énergie et de confort, ce qui ne reflète pas nécessairement les habitudes réelles des utilisateurs. De plus, les variations culturelles et individuelles dans l'utilisation des espaces peuvent ne pas être intégrées dans ces modèles.

Par ailleurs, les limitations technologiques des outils paramétriques et de simulation représentent une contrainte supplémentaire. Certains logiciels peuvent ne pas prendre en compte toutes les variables pertinentes, telles que l'acoustique ou l'humidité, ce qui limite l'étendue de l'analyse du confort intérieur. Enfin, la recherche se concentre principalement sur le confort thermique et visuel, ce qui peut conduire à négliger d'autres dimensions importantes du confort intérieur, comme le confort acoustique ou psychologique. Cette approche pourrait

restreindre la compréhension globale de l'impact de la conception environnementale sur le bien-être des occupants.

Perspectives futures.

Les perspectives futures de cette recherche mettent l'accent sur l'exploration du confort acoustique en complément du confort intérieur, soulignant son rôle essentiel dans la création d'environnements de vie sains et agréables. En intégrant des analyses acoustiques, cette démarche permettra d'obtenir une vision plus complète du confort dans les logements sociaux, prenant en considération non seulement les aspects thermiques et lumineux, mais également les nuisances sonores susceptibles d'affecter le bien-être des occupants.

Par ailleurs, l'introduction de la notion de coût comme indicateur d'optimisation s'avérera cruciale. En minimisant les dépenses tout en maximisant les performances en matière de confort et d'efficacité énergétique, cette approche vise à encourager des conceptions optimales respectant les contraintes budgétaires, tout en garantissant un niveau de qualité de vie élevé. L'évaluation économique des différentes solutions de conception permettra de trouver un équilibre entre durabilité, confort et viabilité financière.

En outre, l'intégration de technologies novatrices, telles que des systèmes de contrôle automatique pour l'éclairage et la ventilation, pourrait encore améliorer le confort intérieur tout en réduisant la consommation d'énergie. La recherche pourrait également examiner l'impact de solutions comme le jardinage vertical et les murs végétaux sur le confort thermique et acoustique, contribuant à améliorer la qualité de l'air et à atténuer le bruit ambiant.

Une autre perspective intéressante consiste à appliquer la modélisation paramétrique pour simuler divers scénarios de conception en fonction des variations climatiques, permettant ainsi de mieux anticiper et s'adapter aux conditions changeantes. De plus, l'étude des bâtiments devrait aller au-delà de l'analyse intérieure pour inclure une évaluation de l'environnement extérieur, afin de bien comprendre l'impact des éléments urbains sur le confort des occupants.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

Abdullah, H. K., & Alibaba, H. Z. (s. d.). *TOWARDS NEARLY ZERO-ENERGY BUILDINGS: THE POTENTIAL OF PHOTOVOLTAIC-INTEGRATED SHADING DEVICES TO ACHIEVE AUTONOMOUS SOLAR ELECTRICITY AND ACCEPTABLE THERMAL COMFORT IN NATURALLY-VENTILATED OFFICE SPACES.*

Abdullah, H. K., & Kamara, J. M. (2013). Parametric Design Procedures : A New Approach to Generative-Form in the Conceptual Design Phase. *AEI 2013*, 334-343. <https://doi.org/10.1061/9780784412909.032>

Achim_Menges_Bob_Sheil_Ruairi_Glynn_Mari.pdf. (s. d.).

Adapting buildings and cities for climate change : A 21st century survival guide. (2005). *Choice Reviews Online*, 43(01), 43-0117-43-0117. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.43-0117>

Adegbile, M. (s. d.). *Development of a Green Building Rating System for Nigeria.*

Agkathidis, A. (2015). *Generative Design Methods—Implementing Computational Techniques in Undergraduate Architectural Education.* 47-55. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.2.047>

Aish, R., & Woodbury, R. (2005). Multi-level Interaction in Parametric Design. In A. Butz, B. Fisher, A. Krüger, & P. Olivier (Éds.), *Smart Graphics* (Vol. 3638, p. 151-162). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11536482_13

Al-Attili, D. A. (s. d.). *Generative Tectonics : Environmental performance and parametric design morphology.*

Al-Azzawi, T., & Al-Majidi, Z. (2021). Parametric architecture : The second international style. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1067/1/012019>

Ali-Toudert, F., & Weidhaus, J. (2017). Numerical assessment and optimization of a low-energy residential building for Mediterranean and Saharan climates using a pilot project in Algeria. *Renewable Energy*, 101, 327-346. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.043>

Ameur, M., Kharbouch, Y., & Mimet, A. (2020). Optimization of passive design features for a naturally ventilated residential building according to the bioclimatic architecture concept and considering the northern Morocco climate. *Building Simulation*, 13(3), 677-689. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0593-6>

Amira, O. D., Fatma-Zohra, M. H., Sara, M. K., Abida, M. H., Youcef, M. L., & Dechicha, M. A. (s. d.). *Evaluation des effets de la ventilation naturelle sur la qualité de l'air intérieur. Ilot urbain-Cité Guehdour Tahar-Guelma.*

Andersen, M., Kleindienst, S., Yi, L., Lee, J., Bodart, M., & Cutler, B. (2008). An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach. *Building Research & Information*, 36(6), 593-607. <https://doi.org/10.1080/09613210802243159>

Références Bibliographiques

- Andric, I., Kamal, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate : Case study of Qatar. *Energy Reports*, 6, 2476-2489. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.006>
- ANSI/ASHRAE Addendum d to ANSI/ASHRAE Standard 55-2017*. (s. d.).
- Antony Gaudi.pdf*. (s. d.).
- Ascione, F., Bianco, N., Maria Mauro, G., & Napolitano, D. F. (2019). Building envelope design : Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, 174, 359-374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.182>
- Aslanoglu, R., Pracki, P., Kazak, J. K., Ulusoy, B., & Yekanielibeglou, S. (2021). Short-term analysis of residential lighting : A pilot study. *Building and Environment*, 196, 107781. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107781>
- Assistance 1.pdf*. (s. d.).
- Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate Change Effects on Belgian Households : A Case Study of a Nearly Zero Energy Building. *Energies*, 13(20), 5357. <https://doi.org/10.3390/en13205357>
- Azhar, S., Khalfan, M., & Maqsood, T. (2015). Building information modelling (BIM) : Now and beyond. *Construction Economics and Building*, 12(4), 15-28. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v12i4.3032>
- Badeche, M., & Bouchahm, Y. (2020). Design optimization criteria for windows providing low energy demand in office buildings in Algeria. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100024>
- Bahdad, A. A. S., Fadzil, S. F. S., Onubi, H. O., & BenLasod, S. A. (2021). Sensitivity analysis linked to multi-objective optimization for adjustments of light-shelves design parameters in response to visual comfort and thermal energy performance. *Journal of Building Engineering*, 44, 102996. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102996>
- Bakmohammadi, P., & Noorzai, E. (2020). Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort. *Energy Reports*, 6, 1590-1607. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.008>
- Bandyopadhyay, S., Chakraborty, R., & Maulik, U. (2015). Priority based ϵ dominance : A new measure in multiobjective optimization. *Information Sciences*, 305, 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.01.018>
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753-1766. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008>
- Bastianoni, S., Galli, A., Niccolucci, V., & Pulselli, R. M. (2006). The ecological footprint of building construction. *The Sustainable City IV: Urban Regeneration and Sustainability*, 1, 345-356. <https://doi.org/10.2495/SC060331>

Références Bibliographiques

Bellia, L., Cesarano, A., Iuliano, G. F., & Spada, G. (s. d.). *DAYLIGHT GLARE: A REVIEW OF DISCOMFORT INDEXES*.

BENSAHLA.pdf. (s. d.).

Berghout, B., & Forgues, D. (2019). Passive Ambient Comfort and Correlation of Strategies and Vernacular Devices for Habitat Design in Arid Zones : The Case of Biskra, Algeria. *Buildings*, 9(4), 87. <https://doi.org/10.3390/buildings9040087>

Berneman, C., Lanoie, P., Plouffe, S., & Vernier, M.-F. (2009). L'Éco-Conception : Quels Retours Économiques Pour L'Entreprise. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1495762>

Berto, R., Tintinaglia, F., & Rosato, P. (2023). How much is the indoor comfort of a residential building worth? A discrete choice experiment. *Building and Environment*, 245, 110911. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110911>

Bhooshan, S. (2017). Parametric design thinking : A case-study of practice-embedded architectural research. *Design Studies*, 52, 115-143. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.05.003>

Bilan_energetique_2022_web_65b0e0d173bab.pdf. (s. d.).

Blyussen, P. M. (2010). Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings. *Building and Environment*, 45(4), 808-818. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.020>

Boeke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2019). Superposition matrix for the assessment of performance-relevant adaptive façade functions. *Journal of Facade Design and Engineering*, 1-20 Pages. <https://doi.org/10.7480/JFDE.2019.2.2463>

Branko kolarevic.pdf. (s. d.).

Bre, F., Roman, N., & Fachinotti, V. D. (2020). An efficient metamodel-based method to carry out multi-objective building performance optimizations. *Energy and Buildings*, 206, 109576. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109576>

Broadbent.pdf. (s. d.).

Brownlee, A. E. I., & Wright, J. A. (2015). Constrained, mixed-integer and multi-objective optimisation of building designs by NSGA-II with fitness approximation. *Applied Soft Computing*, 33, 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.04.010>

Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Martorell, I., Pérez, G., & Fernández, I. (2010). Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*, 42(5), 630-636. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.033>

Çağla Meral Akgü.pdf. (s. d.).

Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., & Suárez, R. (2023). Climate change mitigation : Thermal comfort improvement in Mediterranean social dwellings through dynamic

- test cells modelling. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 14(2), 121-134. <https://doi.org/10.1007/s40095-022-00498-1>
- Cantin, F., & Dubois, M.-C. (2011). Daylighting metrics based on illuminance, distribution, glare and directivity. *Lighting Research & Technology*, 43(3), 291-307. <https://doi.org/10.1177/1477153510393319>
- Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., & Pagliano, L. (s. d.). *Thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated.*
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016-1033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.062>
- Carr, J. (s. d.). *An Introduction to Genetic Algorithms.*
- Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (avec Pachauri, R. K., & Meyer, L. A.). (2015). GIEC.
- Chaturvedi, S., Rajasekar, E., & Natarajan, S. (2020). Multi-objective Building Design Optimization under Operational Uncertainties Using the NSGA II Algorithm. *Buildings*, 10(5), 88. <https://doi.org/10.3390/buildings10050088>
- Chegari, B., Tabaa, M., Simeu, E., Moutaouakkil, F., & Medromi, H. (2021). Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort by combining artificial neural networks and metaheuristic algorithms. *Energy and Buildings*, 239, 110839. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110839>
- Chen, H., Ooka, R., & Kato, S. (2008). Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction. *Building and Environment*, 43(1), 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.039>
- Cheraitia, M., & Makhlof, M. (2018). *Le plan d'occupation des sols (POS Sud) de Guelma : Un projet urbain et des éléments influents.*
- Cheriet, A. (s. d.). *Métaheuristique hybride pour l'optimisation multi-objectif.*
- Chi, D. A., González M., E., Valdivia, R., & Gutiérrez J., E. (2021). Parametric Design and Comfort Optimization of Dynamic Shading Structures. *Sustainability*, 13(14), 7670. <https://doi.org/10.3390/su13147670>
- Chokhachian, A. (s. d.). *Studies on Architecture Design Procedure A Framework for Parametric Design Thinking.*
- Ciardiello, A., Rosso, F., Dell'Olmo, J., Ciancio, V., Ferrero, M., & Salata, F. (2020). Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*, 280, 115984. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984>

Références Bibliographiques

Climate change.pdf. (s. d.).

Coley, D. A. (1999). *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/3904>

Conception architecturale.pdf. (s. d.).

Conception intégrée.pdf. (s. d.).

Cooper, R. N., Houghton, J. T., McCarthy, J. J., & Metz, B. (2002). Climate Change 2001 : The Scientific Basis. *Foreign Affairs*, 81(1), 208. <https://doi.org/10.2307/20033020>

Courbe de MacLeamy (Mor, 2015).pdf. (s. d.).

Crooss.pdf. (s. d.).

Daniel davis.pdf. (s. d.).

DARWN NEZAMALDIN.pdf. (s. d.).

De La Hoz-Torres, M. L., Aguilar, A. J., Ruiz, D. P., & Martínez-Aires, M. D. (2024). An investigation of indoor thermal environments and thermal comfort in naturally ventilated educational buildings. *Journal of Building Engineering*, 84, 108677. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108677>

Delgarm, N., Sajadi, B., Azarbad, K., & Delgarm, S. (2018). Sensitivity analysis of building energy performance : A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. *Journal of Building Engineering*, 15, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.020>

Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance : A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy*, 170, 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.141>

Della Crociata, S., Martellotta, F., & Simone, A. (2012). A measurement procedure to assess indoor environment quality for hypermarket workers. *Building and Environment*, 47, 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.011>

Design process.pdf. (s. d.).

Diakaki, C., Grigoroudis, E., & Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40(9), 1747-1754. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.03.002>

Dino, I. G., & Üçoluk, G. (2017). Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(5), 04017025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000669](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000669)

Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2012). *Modélisation dynamique des transferts hygrothermiques dans les enveloppes de bâtiments végétalisées*.

Références Bibliographiques

Djellouli.pdf. (s. d.).

DTR_C3_2_Reglement_thermique_des_batimen.pdf. (s. d.).

Dtrc3-4_climatisation.pdf. (s. d.).

Dugoua, E., & Dumas, M. (2021). Green product innovation in industrial networks : A theoretical model. *Journal of Environmental Economics and Management*, 107, 102420. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102420>

Eastman, C. M., & Eastman, C. (Éds.). (2008). *BIM handbook : A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Wiley.

Éco charlootte.pdf. (s. d.).

Eco conception mija.pdf. (s. d.).

Éco conc.pdf. (s. d.).

Eco design étarative.pdf. (s. d.).

Elghandour, A., Saleh, A., Aboeineen, O., & Elmokadem, A. (s. d.). *USING PARAMETRIC DESIGN TO OPTIMIZE BUILDING'S FAÇADE SKIN TO IMPROVE INDOOR DAYLIGHTING PERFORMANCE*.

Elnaz Taghipourarasteh.pdf. (s. d.).

Eltaweel, A., & Su, Y. (2017). Parametric design and daylighting : A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1086-1103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>

Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city : The Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment*, 40(12), 1591-1601. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.004>

Environmental Design_ An Introduction for Architects and Engineers.pdf. (s. d.).

Environnemntal design en rouge.pdf. (s. d.).

Envo practice.pdf. (s. d.).

Etheridge, D. W., & Stanway, R. J. (1988). A parametric study of ventilation as a basis for design. *Building and Environment*, 23(2), 81-93. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90022-4)

Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>

Fasoulaki, E. (s. d.). *Genetic Algorithms in Architecture : A Necessity or a Trend?*

Références Bibliographiques

- Feng, K., Lu, W., & Wang, Y. (2019). Assessing environmental performance in early building design stage : An integrated parametric design and machine learning method. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101596. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101596>
- Ferdyn-Grygierek, J., Sarna, I., & Grygierek, K. (2021). Effects of Climate Change on Thermal Comfort and Energy Demand in a Single-Family House in Poland. *Buildings*, 11(12), 595. <https://doi.org/10.3390/buildings11120595>
- Fioravanti_Improving_2017.pdf*. (s. d.).
- Frontczak, M., & Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4), 922-937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
- Gallas, M.-A., Jacquot, K., Jancart, S., & Delvaux, F. (s. d.). *Parametric Modeling : An Advanced Design Process for Architectural Education*.
- Gaterell, M. R., & McEvoy, M. E. (2005). The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, 37(9), 982-995. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.015>
- Gholipour, V. (s. d.). *Éco-conception collaborative de bâtiments durables*.
- Gibberd, J. T. (2020). Climate Change in the Built Environment : Addressing Future Climates in Buildings. In S. Mostafa & P. Rahnamayiezekavat (Éds.), *Advances in Educational Technologies and Instructional Design* (p. 100-121). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8452-0.ch006>
- Goldhagen, S. W. (s. d.). *Welcome to Your World How the Built Environment Shapes Our Lives*.
- Gou, S., Nik, V. M., Scartezzini, J.-L., Zhao, Q., & Li, Z. (2018). Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. *Energy and Buildings*, 169, 484-506. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095>
- Gueliane, N. (2017). THE VERNACULAR ARCHITECTURAL HERITAGE, LEVER OF THE DEVELOPMENT OF A SUSTAINABLE ARCHITECTURE. . . Nr., 1.
- Guerra Santin, O., Itard, L., & Visscher, H. (2009). The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, 41(11), 1223-1232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.002>
- Hadda, M. M. (2015). *Le logement social collectif : Entre la conception et l'usage Cas de la ville de M'sila*.
- Haidar, A., Underwood, J., & Coates, D. P. (s. d.). *Submitted in Partial Fulfilment for the Requirement of the Degree of Doctor of Philosophy, December, 2019*.
- Hamdani, M., Bekkouche, S. M. E. A., Benouaz, T., Belarbi, R., & Cherier, M. K. (2014). MINIMIZATION OF INDOOR TEMPERATURES AND TOTAL SOLAR INSOLATION

BY OPTIMIZING THE BUILDING ORIENTATION IN HOT CLIMATE. *Engineering Structures and Technologies*, 6(3), 131-149. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.988756>

Hamdy, M., Nguyen, A.-T., & Hensen, J. L. M. (2016). A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems. *Energy and Buildings*, 121, 57-71. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.035>

Harding, J. E., & Shepherd, P. (2017). Meta-Parametric Design. *Design Studies*, 52, 73-95. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.005>

Harkouss, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2018). Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings. *Journal of Building Engineering*, 16, 57-71. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.12.003>

Harshalatha, Patil, S., & Kini, P. G. (2024). A review on simulation based multi-objective optimization of space layout design parameters on building energy performance. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(1), 69. <https://doi.org/10.1007/s41024-024-00425-3>

Hasan, A. U. (2023). *The Impact and mitigation of Climate Change on the building performance of nonresidential buildings : Case studies of typical UK supermarkets* [University of West London]. <https://doi.org/10.36828/xvqy0596>

Heeren, N. (2017). *Modelling environmental impacts of buildings – energy, material, and dynamics* [ETH Zurich; Application/pdf,238]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010853498>

Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., & Zeumer, M. (2007). *Energie Atlas : Nachhaltige Architektur*. DE GRUYTER. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614498>

Hensen, J. J. (1991). *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*. Technische Universiteit Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR353263>

Herbert A. Simon.pdf. (s. d.).

Hildebrand, L. (2014). *Strategic investment of embodied energy during the architectural planning process*. Univ. of Technology.

Hildebrand, L., Konstantinou, T., Kosanović, S., & Knaack, U. (s. d.). *Origin and Development of Environmental Design*.

Hillier.pdf. (s. d.).

Himes, A., & Busby, G. (2020). Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment*, 4, 100030. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100030>

Hsiao, Y. S. (s. d.). *THE IMPACT OF PARAMETRIC DESIGN METHODOLOGIES ON CREATIVITY IN HOSPITAL DESIGN PROCESS*.

Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., Fishman, T., Kua, H., & Nakatani, J. (2020). A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*, 3(5), 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>

Références Bibliographiques

Huang, B., Zhao, F., Fishman, T., Chen, W.-Q., Heeren, N., & Hertwich, E. G. (2018). Building Material Use and Associated Environmental Impacts in China 2000–2015. *Environmental Science & Technology*, 52(23), 14006-14014. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04104>

Ibrahim integrated design.pdf. (s. d.).

IDPGuide_print.pdf. (s. d.).

Ieslightinghandb00inillu_bw.pdf. (s. d.).

Imessad, K., Derradji, L., Messaoudene, N. A., Mokhtari, F., Chenak, A., & Kharchi, R. (2014). Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate. *Renewable Energy*, 71, 589-597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.005>

Ingersoll, R. (2012). The Ecology Question and Architecture. In C. Crysler, S. Cairns, & H. Heynen, *The SAGE Handbook of Architectural Theory* (p. 573-589). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.4135/9781446201756.n34>

Intégration des aspects énergétiques dans la conception.pdf. (s. d.).

Internationale Energieagentur (Éd.). (2012). *World energy outlook 2012*.

Iordanova, I. (s. d.). *Librairie de référents interactifs proposant des approches environnementales*.

Ippc.pdf. (s. d.).

Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. Laurence King Publishing.

Jafari, A., & Valentin, V. (2017). An optimization framework for building energy retrofits decision-making. *Building and Environment*, 115, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.020>

Ji, S., Lee, B., & Yi, M. Y. (2021). Building life-span prediction for life cycle assessment and life cycle cost using machine learning : A big data approach. *Building and Environment*, 205, 108267. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108267>

Joffroy, T., & Guillaud, H. (s. d.). *Architectures contemporaines en terre crue : Sur les traces de Hassan Fathy*.

John.pdf. (s. d.).

Jollivet, M., & Pavé, A. (1993). L'environnement : Un champ de recherche en formation. *Natures Sciences Sociétés*, 1(1), 6-20. <https://doi.org/10.1051/nss/19930101006>

Journal français.pdf. (s. d.).

Jozefowicz, N. (s. d.). *Optimisation combinatoire multi-objectif : Des méthodes aux problèmes, de la Terre à (presque) la Lune*.

JuHyun Lee.pdf. (s. d.).

Références Bibliographiques

Kat Park.pdf. (s. d.).

Keeler, M. (s. d.). *Fundamentals of Integrated Design for Sustainable Building*.

Khaoula, L. (s. d.). *Impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment. Cas des régions chaudes et arides*.

Khasreen, M. M., Banfill, P. F. G., & Menzies, G. F. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 1(3), 674-701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>

Kirati, A., Medjeldi, Z., Dechaicha, A., & Alkama, D. (2023). The Transition to Integrated Renewable Energy: A Framework for Low Energy Building Design. *6th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism – Full Paper Proceedings of ICCAUA2023, 14-16 June 2023*, 120-129. <https://doi.org/10.38027/iccaua2023en0168>

Kolarevic, B. (2001). *Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age*. 117-123. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2001.117>

Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43(1), 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.09.009>

Kwok, A. G., & Rajkovich, N. B. (2010). Addressing climate change in comfort standards. *Building and Environment*, 45(1), 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.005>

Laaroussi.pdf. (s. d.).

Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, 204, 108173. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>

Lamé.pdf. (s. d.).

Lan, L., Wargocki, P., & Lian, Z. (2011). Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. *Energy and Buildings*, 43(5), 1057-1062. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.001>

Larson Idp.pdf. (s. d.).

Latifi, M., Mahdavinezhad, M. J., & Diba, D. (2016). UNDERSTANDING GENETIC ALGORITHMS IN ARCHITECTURE. *THE TURKISH ONLINE JOURNAL OF DESIGN, ART AND COMMUNICATION*, 6(AGSE), 1385-1400. <https://doi.org/10.7456/1060AGSE/023>

Le+Grenelle+de+l'Environnement.pdf. (s. d.).

Le Bars, Y., Faugère, E., Menanteau, P., Multon, B., Riedacker, A., & Velut, S. (Éds.). (2010). La maîtrise de l'énergie dans le domaine du bâtiment et des équipements. In *L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie* (p. 63-85). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.1004>

Leaman, A., & Bordass, B. (1999). Productivity in buildings: The 'killer' variables. *Building Research & Information*, 27(1), 4-19. <https://doi.org/10.1080/096132199369615>

- Li, K., Pan, L., Xue, W., Jiang, H., & Mao, H. (2017). Multi-Objective Optimization for Energy Performance Improvement of Residential Buildings : A Comparative Study. *Energies*, *10*(2), 245. <https://doi.org/10.3390/en10020245>
- Li, Z., Genovese, P. V., & Zhao, Y. (2020). Study on Multi-Objective Optimization-Based Climate Responsive Design of Residential Building. *Algorithms*, *13*(9), 238. <https://doi.org/10.3390/a13090238>
- Li, Z., Tian, M., Zhu, X., Xie, S., & He, X. (2022). A Review of Integrated Design Process for Building Climate Responsiveness. *Energies*, *15*(19), 7133. <https://doi.org/10.3390/en15197133>
- Li, Z., Zou, Y., Tian, M., & Ying, Y. (2022). Research on Optimization of Climate Responsive Indoor Space Design in Residential Buildings. *Buildings*, *12*(1), 59. <https://doi.org/10.3390/buildings12010059>
- Light and lighting—Lighting of work places. Part 1, Indoor work places.* (2011). BSI.
- Limleamthong, P., & Guillén-Gosálbez, G. (2017). Rigorous analysis of Pareto fronts in sustainability studies based on bilevel optimization : Application to the redesign of the UK electricity mix. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 1602-1613. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.134>
- Lin, Y., & Yang, W. (2018). Application of Multi-Objective Genetic Algorithm Based Simulation for Cost-Effective Building Energy Efficiency Design and Thermal Comfort Improvement. *Frontiers in Energy Research*, *6*, 25. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00025>
- Liu, Q., Han, X., Yan, Y., & Ren, J. (2023). A Parametric Design Method for the Lighting Environment of a Library Building Based on Building Performance Evaluation. *Energies*, *16*(2), 832. <https://doi.org/10.3390/en16020832>
- Liu, S., Schiavon, S., Das, H. P., Jin, M., & Spanos, C. J. (2019). Personal thermal comfort models with wearable sensors. *Building and Environment*, *162*, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106281>
- Lobaccaro, G., Wiberg, A. H., Ceci, G., Manni, M., Lolli, N., & Berardi, U. (2018). Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. *Energy and Buildings*, *167*, 106-123. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.025>
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, *333*(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Logiciel para.pdf.* (s. d.).
- López-López, D., Serrano-Jiménez, A., Gavilanes, J., Ventura-Blanch, F., Barrios-Padura, Á., & Díaz-López, C. (2023). *A Study on the Parametric Design Parameters That Influence Environmental Ergonomics and Sustainability.*
- Lu, Y., Wu, W., Geng, X., Liu, Y., Zheng, H., & Hou, M. (2022). Multi-Objective Optimization of Building Environmental Performance : An Integrated Parametric Design Method Based on Machine Learning Approaches. *Energies*, *15*(19), 7031. <https://doi.org/10.3390/en15197031>

Références Bibliographiques

- Lyu, H., Herring, D., Wang, L., Ninic, J., Andrews, J., Li, M., Kočvara, M., Spill, F., & Wang, S. (2024). Multi-Objective Optimization for Flexible Building Space Usage. *2024 IEEE Conference on Artificial Intelligence (CAI)*, 932-939. <https://doi.org/10.1109/CAI59869.2024.00172>
- Ma, J., & Cheng, J. C. P. (2016a). Estimation of the building energy use intensity in the urban scale by integrating GIS and big data technology. *Applied Energy*, *183*, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.079>
- Ma, J., & Cheng, J. C. P. (2016b). Identifying the influential features on the regional energy use intensity of residential buildings based on Random Forests. *Applied Energy*, *183*, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.096>
- MacDonald, G. J. (2003). Environment : Evolution of a Concept. *The Journal of Environment & Development*, *12*(2), 151-176. <https://doi.org/10.1177/1070496503012002002>
- Magnier, L., & Haghghat, F. (2010). Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, *45*(3), 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016>
- Mandez.pdf*. (s. d.).
- Manni, M., & Nicolini, A. (2022). Multi-Objective Optimization Models to Design a Responsive Built Environment: A Synthetic Review. *Energies*, *15*(2), 486. <https://doi.org/10.3390/en15020486>
- Manuel pratique de l'éclairage.pdf*. (s. d.).
- Mardaljevic, J., Heschong, L., & Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*, *41*(3), 261-283. <https://doi.org/10.1177/1477153509339703>
- Marsault, X. (s. d.). *Eco-Generative Design for Early Stages of Architecture*.
- Marsault—Eco-Generative Design for Early Stages of Architec.pdf*. (s. d.).
- McAloone.pdf*. (s. d.).
- Medjeldi, Z., Dechaicha, A., & Alkama, D. (2023). Enhancing Thermal Comfort in Social Housing : A Parametric Sensitivity Analysis in Response to Climate Change in Guelma, Algeria. *PERIODICO Di MINERALOGIA*, *92*(5).
- Medjeldi, Z., Kirati, A., Dechaicha, A., & Alkama, D. (2023). Parametric design of a residential building system through solar energy potential : The case of Guelma, Algeria. *Journal of Physics: Conference Series*, *2600*(4), 042012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/4/042012>
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, *305*(5686), 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Mehibel, Mia, 2018.pdf*. (s. d.).

Références Bibliographiques

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & Van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1-2), 213-241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

Méndez Echenagucia, T., Capozzoli, A., Cascone, Y., & Sassone, M. (2015). The early design stage of a building envelope : Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Applied Energy*, 154, 577-591. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.090>

Metallinou, V. A. (2006). Ecological propriety and architecture. *Eco-Architecture: Harmonisation between Architecture and Nature*, 1, 15-22. <https://doi.org/10.2495/ARC060021>

Michael Hensel.pdf. (s. d.).

Miet, D. (s. d.). *Une épistémologie de la modélisation architecturale*.

Miller, N. (2011). *The Hangzhou Tennis Center : A Case Study in Integrated Parametric Design*. XX-XX. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2011.x.e2j>

Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., & Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871), 514-517. <https://doi.org/10.1038/415514a>

Moazami, A., Nik, V. M., Carlucci, S., & Geving, S. (2019). Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions. *Applied Energy*, 238, 696-720. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.085>

Modeling 3d.pdf. (s. d.).

Mokhtara, C., Negrou, B., Settou, N., Gouareh, A., & Settou, B. (2019). Pathways to plus-energy buildings in Algeria : Design optimization method based on GIS and multi-criteria decision-making. *Energy Procedia*, 162, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.019>

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Mounira Badeche.pdf. (s. d.).

Mukkavaara, J., & Shadram, F. (2021). An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design. *Energy and Buildings*, 253, 111529. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111529>

Références Bibliographiques

Mumford.pdf. (s. d.).

Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances : A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905-913. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>

Naciba.pdf. (s. d.).

Nadji Maachi, I., Mokhtari, A., & Slimani, M. E.-A. (2019). The natural lighting for energy saving and visual comfort in collective housing : A case study in the Algerian building context. *Journal of Building Engineering*, 24, 100760. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100760>

Nasrollahi, N., Shokry, E., & Architecture Department, Faculty of Technology and Engineering, Ilam University, Ilam, Iran. (2020). Parametric Analysis of Architectural Elements on Daylight, Visual Comfort, and Electrical Energy Performance in the Study Spaces. *Journal of Daylighting*, 7(1), 57-72. <https://doi.org/10.15627/jd.2020.5>

Nazarenko, L., Schmidt, G. A., Miller, R. L., Tausnev, N., Kelley, M., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., Bauer, M., Bauer, S., Bleck, R., Canuto, V., Cheng, Y., Clune, T. L., Del Genio, A. D., Faluvegi, G., Hansen, J. E., Healy, R. J., Kiang, N. Y., ... Zhang, J. (2015). Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(1), 244-267. <https://doi.org/10.1002/2014MS000403>

Neil Leach.pdf. (s. d.).

Ngô, C. (2008). *L'Energie : Ressources, technologies et environnement* (3e éd). Dunod.

Nguyen, A. T., Singh, M. K., & Reiter, S. (2012). An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia. *Building and Environment*, 56, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.021>

Nicholis.pdf. (s. d.).

Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)

Nik, V. M., & Sasic Kalagasidis, A. (2013). Impact study of the climate change on the energy performance of the building stock in Stockholm considering four climate uncertainties. *Building and Environment*, 60, 291-304. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.005>

Norme.pdf. (s. d.).

Norouzi, M., Chàfer, M., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Boer, D. (2021). Circular economy in the building and construction sector : A scientific evolution analysis. *Journal of Building Engineering*, 44, 102704. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102704>

Oktan, S., & Vural, S. (s. d.). *PARAMETRICISM: A STYLE OR A METHOD?*

Olbina, S., & Beliveau, Y. (2009). Developing a transparent shading device as a daylighting system. *Building Research & Information*, 37(2), 148-163. <https://doi.org/10.1080/09613210902723738>

Références Bibliographiques

- Olesen, B. W. (2004). International standards for the indoor environment. *Indoor Air*, 14(s7), 18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00268.x>
- Olesen, B. W., & Parsons, K. C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, 34(6), 537-548. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00004-X)
- Olonscheck, M., Holsten, A., & Kropp, J. P. (2011). Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. *Energy Policy*, 39(9), 4795-4806. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.041>
- O'Riordan, T. (1991). The new environmentalism and sustainable development. *Science of The Total Environment*, 108(1-2), 5-15. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(91\)90230-C](https://doi.org/10.1016/0048-9697(91)90230-C)
- Oxman, R. (2017). Thinking difference : Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4-39. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001>
- Oxman.pdf*. (s. d.).
- Pajek, L., Potočnik, J., & Košir, M. (2022). The effect of a warming climate on the relevance of passive design measures for heating and cooling of European single-family detached buildings. *Energy and Buildings*, 261, 111947. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111947>
- Panichella, A. (2022). An improved Pareto front modeling algorithm for large-scale many-objective optimization. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 565-573. <https://doi.org/10.1145/3512290.3528732>
- Pedersen, C. (s. d.). *The Parametric Process : A Strategic Analysis on Digital Design Technology in Landscape Architecture*.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Peupor.pdf*. (s. d.).
- Peuportier, B., Leurent, F., & Roger-Estrade, J. (Éds.). (2020). *Eco-Design of Buildings and Infrastructure : Developments in the Period 2016–2020* (1^{re} éd.). <https://doi.org/10.1201/9781003095071>
- Piskac, R., Wies, T., & Zufferey, D. (2014). GRASShopper : Complete Heap Verification with Mixed Specifications. In E. Ábrahám & K. Havelund (Éds.), *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems* (Vol. 8413, p. 124-139). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54862-8_9
- Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers & Graphics*, 47, 145-164. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.11.002>
- Pulkkinen, J., Louis, J.-N., Debusschere, V., & Pongrácz, E. (2024). Near-, medium- and long-term impacts of climate change on the thermal energy consumption of buildings in Finland

Références Bibliographiques

under RCP climate scenarios. *Energy*, 302, 131636.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131636>

Qingsong, M., & Fukuda, H. (2016). Parametric Office Building for Daylight and Energy Analysis in the Early Design Stages. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 818-828.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.079>

Queiroz, N., Dantas, N., Nome, C., & Vaz, C. (2015). Designing a Building envelope using parametric and algorithmic processes. *Anais Do XIX Congresso Da Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital 2015*, 797-801. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2015-sp90284>

Rahif, R., Norouzasas, A., Elnagar, E., Doutreloup, S., Pourkiaei, S. M., Amaripadath, D., Romain, A.-C., Fettweis, X., & Attia, S. (2022). Impact of climate change on nearly zero-energy dwelling in temperate climate : Time-integrated discomfort, HVAC energy performance, and GHG emissions. *Building and Environment*, 223, 109397.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109397>

Rahmouni, S., & Smail, R. (2019). A design approach towards sustainable buildings in Algeria. *Smart and Sustainable Built Environment*, 9(3), 229-245. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2019-0057>

Rawal, R., Shukla, Y., Vardhan, V., Asrani, S., Schweiker, M., De Dear, R., Garg, V., Mathur, J., Prakash, S., Diddi, S., Ranjan, S. V., Siddiqui, A. N., & Somani, G. (2022). Adaptive thermal comfort model based on field studies in five climate zones across India. *Building and Environment*, 219, 109187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109187>

Razika, K. (s. d.). *Recherche et Développement*.

Rechauffement-climatique-selon-le-giec-quel-role-le-batiment-et-ses-industries-peuvent-ils-jouer.pdf. (s. d.).

Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, 3(1), 7-31.
<https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>

Reinhart, C. F., & Wienold, J. (2011). The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment*, 46(2), 386-396.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>

Robert, A., & Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Building and Environment*, 55, 150-158.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.014>

Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609), 631-639.
<https://doi.org/10.1038/nature18307>

Roland Hudson.pdf. (s. d.).

Références Bibliographiques

- Saifudeen, A., & Mani, M. (2024). Adaptation of buildings to climate change : An overview. *Frontiers in Built Environment*, *10*, 1327747. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1327747>
- Sajjadian, S. (2017). Performance Evaluation of Well-Insulated Versions of Contemporary Wall Systems—A Case Study of London for a Warmer Climate. *Buildings*, *7*(1), 6. <https://doi.org/10.3390/buildings7010006>
- Samir, M. S. (s. d.). *Développement d'une approche de conception dans les zones arides et semi-arides*.
- Samuel, F., & Jones, P. B. (2012). The making of architectural promenade : Villa Savoye and Schminke House. *Architectural Research Quarterly*, *16*(2), 108-124. <https://doi.org/10.1017/S1359135512000437>
- SAYAD Boutheina, Djamel, M. A., Zohra, M. H. F., Hassib, M. R., Aissa, M. M., D'Annaba, U., & de Constantine, U. (s. d.). *La contribution de la végétation et des plans d'eau pour améliorer le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma*.
- Schnapper, D., Rapoport, A., & d'Anne-Marie Meistersheim. (1975). Pour une anthropologie de la maison. *Revue Française de Sociologie*, *16*(1), 149. <https://doi.org/10.2307/3321148>
- Schroeder, T. (2018). Giving Meaning to the Concept of Sustainability in Architectural Design Practices : Setting Out the Analytical Framework of Translation. *Sustainability*, *10*(6), 1710. <https://doi.org/10.3390/su10061710>
- Schumacher, P. (s. d.). *Parametricism as Style—Parametricist Manifesto*.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism : A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, *79*(4), 14-23. <https://doi.org/10.1002/ad.912>
- Schumacher.pdf*. (s. d.).
- Sdegno, A., Cochelli, P., Riavis, V., & Veneziano, S. (2019). Advanced Simulation of Frank Lloyd Wright's Fallingwater : Digital Reconstruction and Virtual Reality. In A. Luigini (Éd.), *Proceedings of the 1st International and Interdisciplinary Conference on Digital Environments for Education, Arts and Heritage* (Vol. 919, p. 587-596). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_61
- Semahi, S., & Djebri, B. (2023). La conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie—Proposition d'un outil d'aide à la conception dans les zones arides et semi-arides. *Journal of Renewable Energies*, *16*(3). <https://doi.org/10.54966/jreen.v16i3.400>
- Semahi, S., Zemmouri, N., Hamdy, M., & Attia, S. (2021, septembre 1). *Passive envelope design optimization of residential buildings using NSGA-II in different Algerian climatic zones*. 2021 Building Simulation Conference. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30243>
- Semahi, S., Zemmouri, N., Singh, M. K., & Attia, S. (2019). Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment*, *161*, 106271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106271>

Références Bibliographiques

Shepherd, P., Hudson, R., & Hines, D. (2011). Aviva Stadium : A Parametric Success. *International Journal of Architectural Computing*, 9(2), 167-185. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.9.2.167>

Shumacher.pdf. (s. d.).

Solomon, S., IPCC, & IPCC (Éds.). (2008). *Climate change 2007 : The physical science basis* (Repr). Cambridge University Press.

Solomon.pdf. (s. d.).

Son, H., & Kim, C. (2016). Evolutionary Multi-objective Optimization in Building Retrofit Planning Problem. *Procedia Engineering*, 145, 565-570. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.045>

Song, Y., Mao, F., & Liu, Q. (2019). Human Comfort in Indoor Environment : A Review on Assessment Criteria, Data Collection and Data Analysis Methods. *IEEE Access*, 7, 119774-119786. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937320>

Soufiane, F., Atef, A., Mohamed, M., & Salaheddine, D. (2019). Quantifying the effectiveness of mass proportions and the orientation for buildings on thermal performance in Tebessa, Algeria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 397(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/397/1/012008>

Spinrad, D. R. (s. d.). *WRITTEN TESTIMONY OF*.

Stemers, K., & Manchanda, S. (2010). Energy efficient design and occupant well-being : Case studies in the UK and India. *Building and Environment*, 45(2), 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.025>

Su, Z., & Yan, W. (2015). A fast genetic algorithm for solving architectural design optimization problems. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 29(4), 457-469. <https://doi.org/10.1017/S089006041500044X>

Taleb, H., & Musleh, M. A. (2015). Applying urban parametric design optimisation processes to a hot climate : Case study of the UAE. *Sustainable Cities and Society*, 14, 236-253. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.09.001>

Taleghani, M., & Dariush, B. (s. d.). *Recognition of Dimensions of Sustainable Architecture (Case study; New Shoushtar Residential complex)*.

Terzidis, K. (2004). *Algorithmic Design : A Paradigm Shift in Architecture?* 201-207. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2004.201>.

Tomrukcu, G., & Ashrafian, T. (2024). Climate-resilient building energy efficiency retrofit : Evaluating climate change impacts on residential buildings. *Energy and Buildings*, 316, 114315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>

Toutou, A., Fikry, M., & Mohamed, W. (2018). The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3595-3608. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.04.006>

Traite_Archi_Urba_Bioclimatiques.pdf. (s. d.).

Tubielewicz-Michalczuk, M. (2019). Fences Application of the CATIA Program in Architecture and Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(2), 022014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/2/022014>

Turrin, M., Von Buelow, P., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 656-675. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.009>

Updated world Köppen-Geiger climate classification map. (2007).

Vakili-Ardebili, A., & Boussabaine, A. H. (2005). The Intricacy of Eco-Building Design. *2005 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 649-654. <https://doi.org/10.1109/ECODIM.2005.1619317>

Van Hal, A. (2006). The keyword is quality not ecology. *Eco-Architecture: Harmonisation between Architecture and Nature*, 1, 35-44. <https://doi.org/10.2495/ARC060041>

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways : An overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Vitruve.pdf. (s. d.).

Volkov, A. A., Sedov, A. V., & Chelyshkov, P. D. (2014). Modelling the Thermal Comfort of Internal Building Spaces in Social Buildings. *Procedia Engineering*, 91, 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.075>

Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2005). An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 19(1), 5-23. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.03.002>

Weissenstein, C. (s. d.). *Éco-profil : Un outil d'assistance à l'éco-conception architecturale*.

Wimmer, M., Kovacic, I., Fersch, P., Rist, F., Hensel, M., Schinegger, K., Rutzinger, S., Kaufmann, H., Kilian, M., Müller, C., Izmetiev, I., Nawratil, G., Füssl, J., Stavric, M., Hahn, D., & Suter, G. (2022). Advanced Computational Design – digitale Methoden für die frühe Entwurfsphase. *Bautechnik*, 99(10), 720-730. <https://doi.org/10.1002/bate.202200057>

Wright, J., & Farmani, R. (s. d.). *THE SIMULTANEOUS OPTIMIZATION OF BUILDING FABRIC CONSTRUCTION, HVAC SYSTEM SIZE, AND THE PLANT CONTROL STRATEGY*.

Yan, W. (2015). Parametric BIM SIM : Integrating Parametric Modeling, BIM, and Simulation for Architectural Design. In K. M. Kensek & D. Noble (Éds.), *Building Information Modeling* (1^{re} éd., p. 57-77). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119174752.ch5>

Yang, Y., Javanroodi, K., & Nik, V. M. (2021). Climate change and energy performance of European residential building stocks – A comprehensive impact assessment using climate big

Références Bibliographiques

data from the coordinated regional climate downscaling experiment. *Applied Energy*, 298, 117246. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117246>

Yasmina BESBAS, 2019.pdf. (s. d.).

Yassmina.pdf. (s. d.).

Yildiz, Y., Tezg, Y. L., Dali, M. A. B., Üngversgtesg, G., & Enstgtüsü, F. B. (s. d.). *PARAMETRİK TASARIM YAKLAĞIMININ MİMARİ TASARIM SÜRECİNE ETKİSİ*.

Younes.pdf. (s. d.).

Yu, W., Li, B., Jia, H., Zhang, M., & Wang, D. (2015). Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings*, 88, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.063>

Zboinska, M. A., Cudzik, J., Juchnevic, R., & Radziszewski, K. (2015). *A Design Framework and a Digital Toolset Supporting the Early-Stage Explorations of Responsive Kinetic Building Skin Concepts*. 715-725. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.2.715>

Zhai, Y., Wang, Y., Huang, Y., & Meng, X. (2019). A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. *Renewable Energy*, 134, 1190-1199. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.024>

Zhang, J., Liu, N., & Wang, S. (2020). A parametric approach for performance optimization of residential building design in Beijing. *Building Simulation*, 13(2), 223-235. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0571-z>

Zhang, L., Wang, C., Chen, Y., & Zhang, L. (2021). Multi-Objective Optimization Method for the Shape of Large-Space Buildings Dominated by Solar Energy Gain in the Early Design Stage. *Frontiers in Energy Research*, 9, 744974. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.744974>

Zhao, Y., Li, Y., Chen, X., Xia, D., Huang, Y., & Lou, S. (2022). Parametric optimization procedure for efficient window design of educational buildings in the Pearl River Delta of China. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 394-410. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac013>

Zimmerman.pdf. (s. d.).

Zou, Y., Lou, S., Xia, D., Lun, I. Y. F., & Yin, J. (2021). Multi-objective building design optimization considering the effects of long-term climate change. *Journal of Building Engineering*, 44, 102904. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102904>

Zube, E. H., & Moore, G. T. (Éds.). (1991). *Advances in Environment, Behavior, and Design*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-5814-5>

. (2021). *RAPPORT NATIONAL DE MISE EN ŒUVRE*.

Annexes.

Annexe A

L'annexe A :

A.1. Température de l'air.

Le diagramme en boîte (boxplot) présente la distribution des températures mensuelles pour la ville de Guelma. Les graphiques A.1 montrent que les températures augmentent progressivement pour atteindre un pic de 40°C durant les mois de juillet et août, les plus chauds de l'année. En revanche, les mois d'avril et de mai sont considérés comme des périodes confortables, avec des températures moyennes oscillant entre 12 et 18°C. Ce graphique illustre un cycle saisonnier bien défini, marqué par des étés chauds et des hivers froids, avec une transition progressive entre les saisons. Cela reflète un climat tempéré, caractérisé par des variations interannuelles notables.

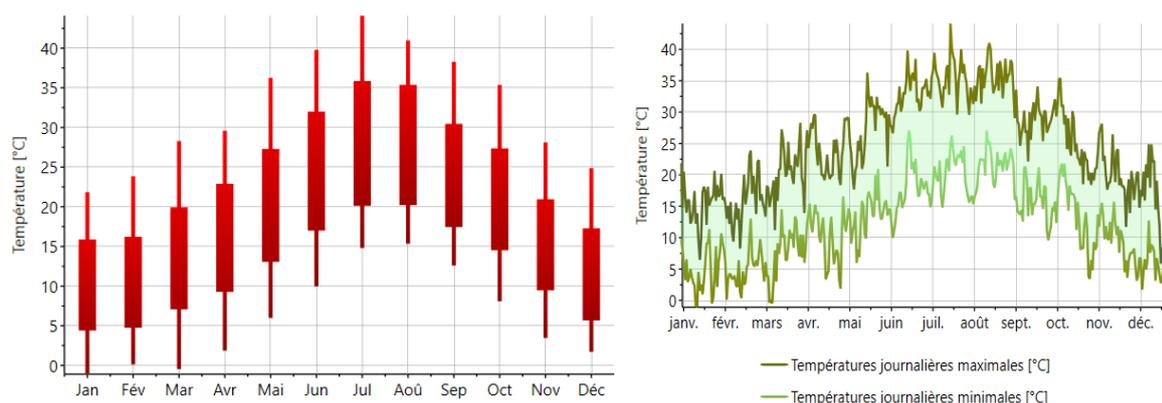


Figure A.1. Température de l'air mensuelle pour la ville de Guelma. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Meteonorm.

A.2. Précipitations.

Le graphique (voir figure A.2), des précipitations illustre un cycle saisonnier bien défini, avec des pics en hiver et au printemps et des minima en été, typique des climats tempérés. Sa distribution asymétrique montre un maximum principal en automne, suivi d'un second pic au printemps. Il existe une corrélation entre le volume total des précipitations et le nombre de jours de pluie, bien que celle-ci ne soit pas toujours linéaire. Les variations saisonnières sont influencées par des systèmes météorologiques, comme les dépressions en hiver et les anticyclones en été. La nature des précipitations, qu'il s'agisse de pluie, de neige ou de grêle, affecte aussi la quantité d'eau atteignant le sol, impactant ainsi l'environnement, la végétation, et la biodiversité.

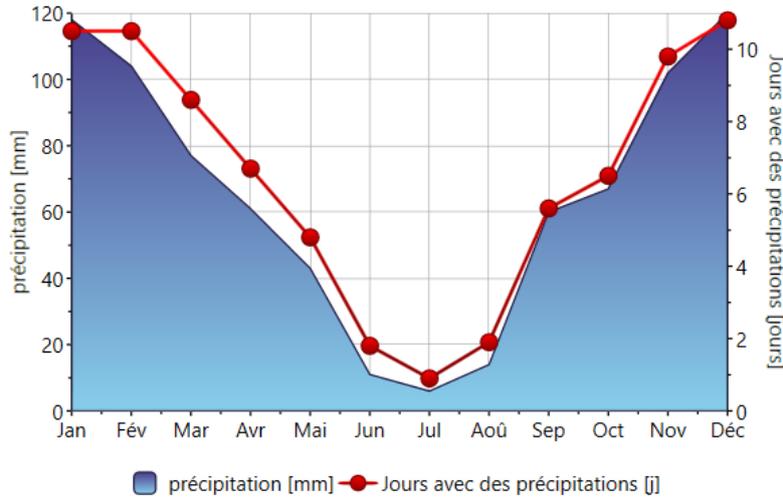


Figure 2. Précipitations Mensuelles pour la Ville de Guelma. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Meteonorm.

A.3. L'enseillement.

Le graphique (voir figure A.3), illustre la durée mensuelle d'enseillement (en heures) à Guelma, en Algérie, en la comparant à la durée du jour astronomique, qui indique le maximum possible de lumière du jour en fonction de la position de la Terre par rapport au soleil. La durée d'enseillement suit une tendance saisonnière claire, avec des journées plus longues en été (de juin à août) et plus courtes en hiver (de décembre à février). La durée du jour astronomique atteint son maximum en juin et est la plus courte en décembre. La différence entre la durée réelle d'enseillement et celle astronomique met en évidence les périodes de couverture nuageuse ou d'obstruction atmosphérique, particulièrement visibles en hiver. Les mois de juin, juillet et août connaissent généralement les durées d'enseillement les plus élevées, reflet de la combinaison d'une lumière du jour prolongée et d'un ciel généralement dégagé.

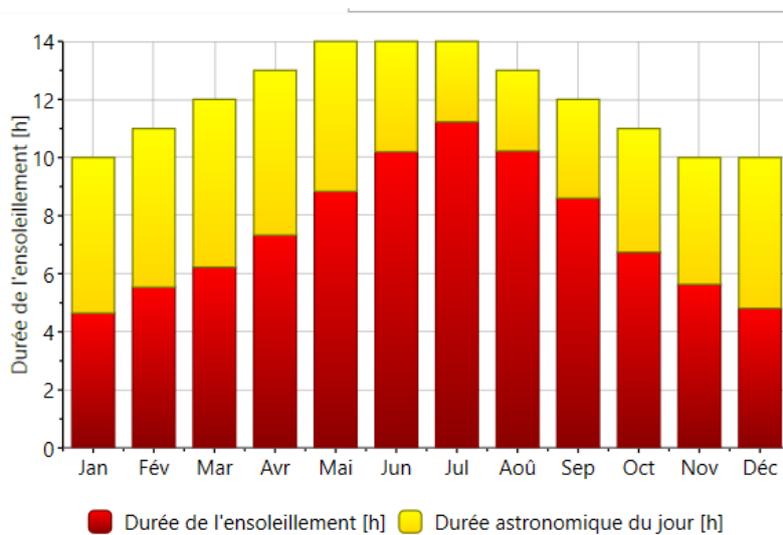


Figure A.3. Durée mensuelle d'enseillement. Source : créé par l'auteur à l'aide du logiciel Meteonorm.

Données de Rayonnement et Météo pour Guelma. (Meteonorm 8.)

Nom du site = Guelma

Latitude [°] = 36,467, Longitude [°] = 7,422, Altitude [m] = 283

Zone climatique = IV, 1

Mois	H_Gh (kWh/m ²)	H_Bn (kWh/m ²)	H_Dh (kWh/m ²)	Lg (lux)	Ld (lux)	N	Ta (°C)	Td (°C)	RH (%)	p (hPa)	DD (°)	FF (m/s)
Janv.	70	104	29	10252	4973	4	10.1	6.6	79	981	265	2.8
Fév.	82	74	46	13234	8294	5	10.6	6.5	76	980	270	2.8
Mars	129	118	61	18705	10054	4	13.4	8.7	73	981	268	2.7
Avr.	160	138	70	24088	12364	3	16.3	10.8	70	981	271	2.6
Mai	187	156	80	27510	13780	3	20.1	13.2	64	982	156	2.6
Juin	209	173	85	31818	15750	2	24.6	15.7	57	982	89	2.7
Juil.	218	192	82	32260	15126	2	27.8	17.7	54	982	88	2.7
Août	196	175	78	29193	14454	1	27.5	18.3	57	982	88	2.6
Sept	147	134	64	22634	11897	3	24.0	17.1	65	982	217	2.4
Oct.	117	132	48	17408	8538	3	20.4	14.6	69	981	268	2.3
Nov.	80	102	35	12095	6494	4	15.0	10.1	73	981	268	2.5
Déc.	66	105	27	9635	4789	4	11.3	7.7	78	981	270	2.6
Année	1658	1602	704	20736	10543	3	18.4	12.2	68	981	247	2.6

Légende des Variables.

- **H_Gh** : Irradiation du rayonnement global horizontal
- **H_Bn** : Irradiation du rayonnement direct normal
- **H_Dh** : Irradiation du rayonnement diffus horizontal
- **N** : Nébulosité
- **Lg** : Luminance globale
- **Ta** : Température de l'air
- **RH** : Humidité relative
- **Td** : Point de rosée
- **DD** : Direction du vent
- **FF** : Vitesse du vent
- **p** : Pression atmosphérique

Notes supplémentaires.

- Rayonnement en [kWh/m²]
- Température en [°C]
- Pression en [hPa]
- Vitesse du vent en [m/s]
- Luminance en [lux]

Annexe B

L'annexe B.

Tableau 4. Tableau récapitulatif des exigences techniques des cités de logements sociaux à Guelma. Source : Auteur.

Catégorie	Détails
Hauteurs sous plafond	- Minimum 2,60 m dans la zone littorale (profondeur de 25 km max de la côte) - Minimum 2,80 m en dehors des zones littorales
Dimensions des pièces	- Superficie couverte du logement : 50 à 80 m ² - Appartement : doit inclure 10 % de parties communes - Composantes minimales : 1 salon, 1 chambre parents, 1 chambre enfants, 1 cuisine, 1 salle d'eau
Dimensions minimales des pièces	- Salon : minimum 12 m ² - 1ère chambre : minimum 9 m ² - 2ème chambre : minimum 7 m ² - Cuisine : minimum 5 m ² , largeur minimum 1,80 m - Salle d'eau : minimum 2 m ²
Largeur des escaliers	- Minimum 1,20 m
Éclairage	- Chaque pièce doit avoir des fenêtres d'une surface totale \geq 1/10 de la superficie de la pièce, minimum 0,90 m ²
Ventilation des salles d'eau	- Soit par une baie \geq 0,20 m ² ouvrant à l'extérieur - Soit par gaine technique verticale - Ne pas ventiler directement sur une pièce habitable ou cuisine
Hauteur des murs d'acrotère	- Minimum 1,20 m au niveau moyen de la terrasse accessible - Minimum 0,40 m si terrasses non accessibles
Hauteur des murs séparatifs sur terrasse	- Maximum 1,80 m, raccordement au mur de façade à 30° avec l'horizontale
Dalle de protection des escaliers	- Hauteur maximum sous dalle : 2 m - Largeur max : 3 m - Superficie max : 6 m ²
Terrasses et installations	- Terrasse accessible pour copropriétaires, sans locaux d'habitation - Installations diverses en gardant une zone libre de 1,20 m de profondeur
Dispositions techniques	- Conformité aux règlements de la zone considérée - Installation de chauffe-eau à gaz dans un endroit aéré
Organisation du chantier	- Evacuation régulière des gravats et débris selon réglementation
Gros œuvres	- Utilisation de procédés et matériaux locaux - Respect de la réglementation parasismique - Application d'enduits adaptés
Étanchéité	- Étanchéité sur murs mitoyens, pièces humides, terrasses, sous-sols - Exigences : imperméabilité, résistance mécanique, durabilité
Revêtements	- Exigences : confort tactile, durabilité, imperméabilité, résistance aux chocs

Annexes

Menuiserie	- Réalisation en menuiseries, étanchéité à l'air, aux eaux de pluie et à la poussière - Grilles de protection aux fenêtres
Quincaillerie et ferronnerie	- Exigences : étanchéité à l'air et à la poussière, étanchéité à l'eau de pluie, rigidité des éléments montés

Annexe C

Annexe C :

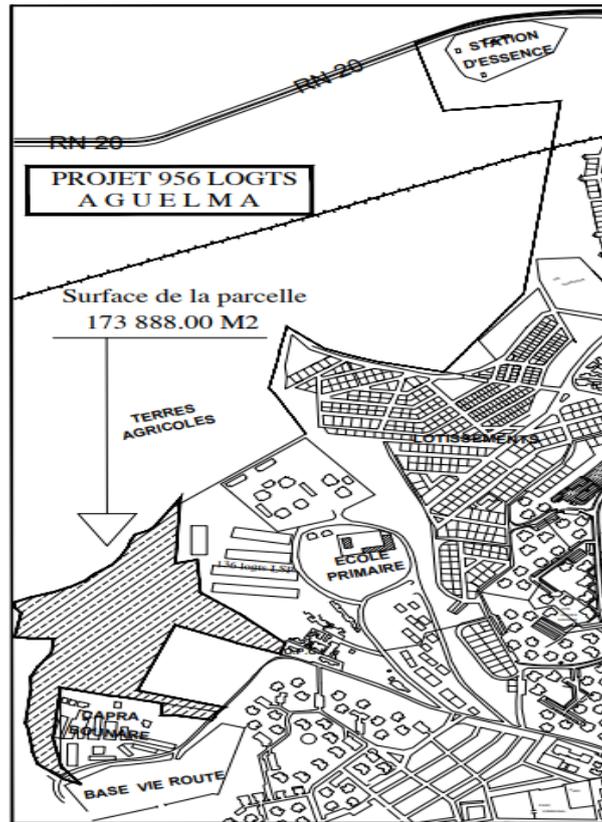


Figure C.1. Plan de situation du projet.



Figure C.2. Plan de masse du projet.

Annexes

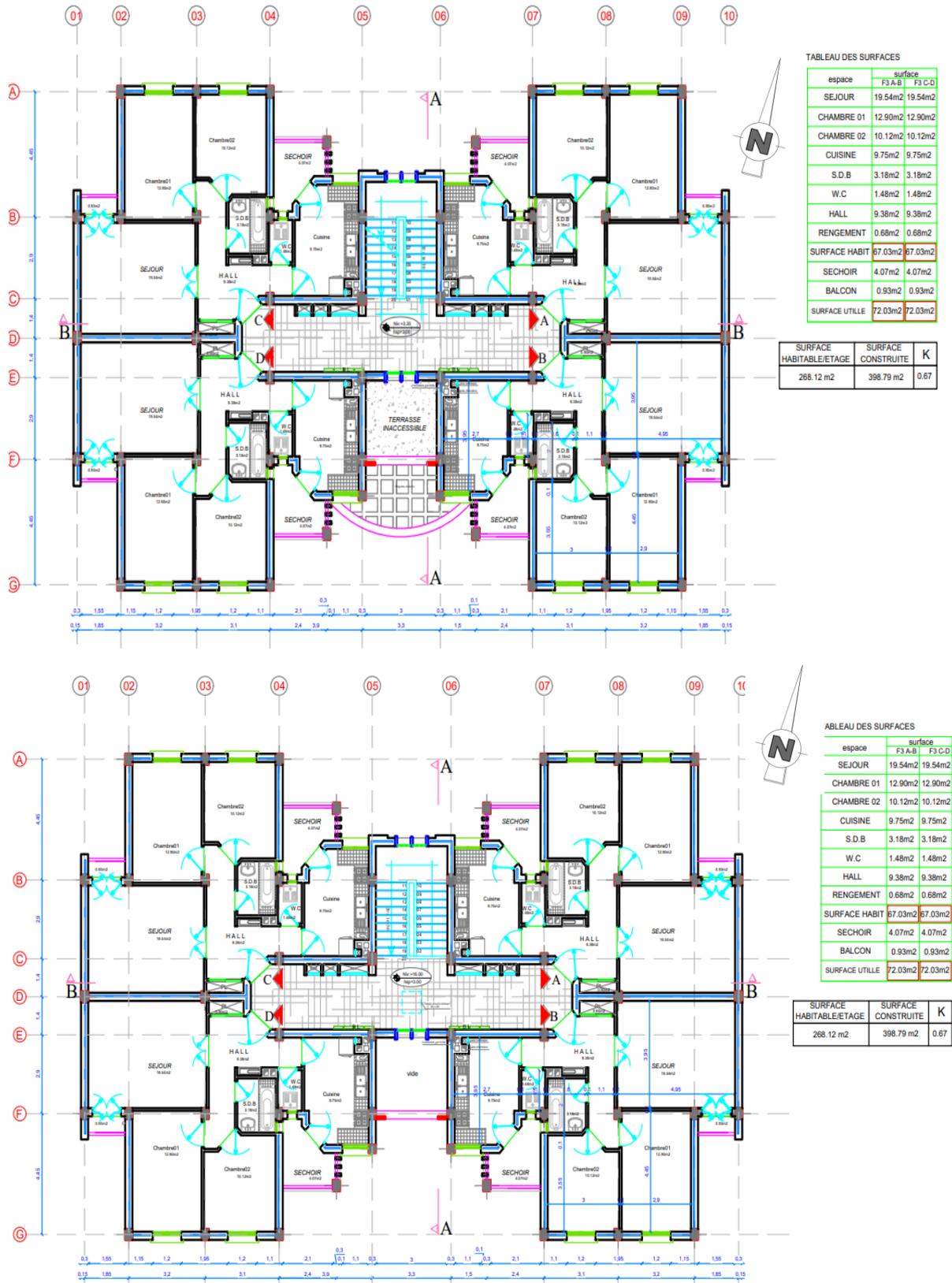


Figure C.3. a. Vue en plan du rez-de-chaussée b. Vue en plan des 3ème et 5ème étage.



Figure C.4. Façade principale et postérieure.



Figure C.5. La 3D du bâtiment sélectionné. Source : réalisé par l'auteur à l'aide du logiciel Rhinoceros Grasshopper