

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



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

THÈSE

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

Domaine Architecture, urbanisme, et métiers de la ville

Filière : Architecture

Spécialité : Habitat et savoirs constructifs

Présentée par

SACI HADEF Selma
Intitulée

**Le biomimétisme, vers l'optimisation de la consommation
énergétique de l'habitat individuel à Guelma**

Soutenue le : 09/02/2026

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr LAZRI Yousef	Président	Univ. de Guelma	Président
Mr ALKAMA Djamel	Professeur	Univ. de Guelma	Encadreur
Mme KHELIL Sara	M.C.A.	Univ. de Biskra	Co-encadreur
Mr ADDAD Mohamed Cherif	Professeur	Univ. de Om ElBouaghi	Examineur
Mr CHRAITIA Mohamed	M.C.A	Univ. de Guelma	Examineur
Mme FAREH Fouzia	M.C.A	Univ. de Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2025/2026

DÉDICACES

Je dédie ce travail

À ma très chère mère, source inépuisable de tendresse, de dévouement et de patience, pour son soutien indéfectible et ses prières qui m'ont accompagnée à chaque étape.

À mes chères sœurs, pour leur affection, leur présence et leurs encouragements constants.

À mon frère unique, pour son soutien et sa bienveillance.

À toute ma famille, pour leur soutien constant et leur présence rassurante.

À mes collègues, pour leur aide, leur esprit de partage et les moments enrichissants passés ensemble.

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

À tous ceux qui me sont chers.....

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude envers Dieu, qui m'a guidée tout au long de cette aventure académique, en m'accordant la force, le courage et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux à mon directeur de thèse, **Pr. Alkama Djamel**, pour la qualité de son encadrement, la pertinence de ses orientations, ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à ma co-directrice, **Dr. Sara Khelil**, pour son accompagnement précieux, son soutien constant et ses encouragements qui ont été d'une grande importance dans l'avancement de cette recherche.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour le temps et l'attention qu'ils lui consacrent.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes proches, collègues et enseignants, dont le soutien, la bienveillance et le partage de connaissances ont grandement enrichi mon parcours académique.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à toutes celles et ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail

RÉSUMÉ

Dans le contexte de la transition énergétique et de l'adaptation au changement climatique, la conception des enveloppes architecturales joue un rôle central dans la régulation des échanges entre le bâtiment et son environnement extérieur. À ce titre, le contrôle solaire constitue l'un des rôles clés de l'enveloppe, permettant de moduler les apports solaires et d'améliorer simultanément le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment. Dans cette perspective, Les systèmes de contrôle solaire inspirés du vivant, développés selon une approche biomimétique, apparaissent comme une solution prometteuse.

Cette recherche vise à évaluer les performances thermiques et énergétiques d'un dispositif de contrôle solaire adaptatif bio-inspiré, fondé sur les mécanismes de thermorégulation de la flore, appliqué à une habitation individuelle située dans la ville de Guelma, caractérisée par un climat méditerranéen chaud. La méthodologie adoptée s'articule autour de quatre approches complémentaires, organisées de manière séquentielle et cohérente. Dans un premier temps, l'approche conceptuelle a permis de définir le cadre théorique et scientifique de la recherche. Ensuite, l'approche empirique s'est appuyée sur des mesures in situ de la température et sur l'analyse typologique des habitations individuelles, afin de caractériser le contexte local. Cette étape a conduit à l'approche qualitative, mobilisée pour concevoir un système de contrôle solaire biomimétique modélisé avec Rhinoceros et Grasshopper. Enfin, l'approche quantitative a complété le processus par des simulations énergétiques et thermiques, réalisées à l'aide des plugins Ladybug, Honeybee et EnergyPlus et optimisées de manière paramétrique via un algorithme génétique multi-objectifs Octopus.

Les résultats mettent en évidence l'efficacité de la conception biomimétique paramétrique du système solaire proposé pour réduire les apports solaires estivaux, limiter la demande en refroidissement, favoriser les apports hivernaux et réduire les besoins en chauffage. Parallèlement, le système améliore le confort thermique en régulant la température opérative et en diminuant les heures d'inconfort, contribuant ainsi à une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. L'étude confirme le potentiel du biomimétisme computationnel pour concevoir des systèmes de contrôle solaire adaptatifs, écoénergétiques et respectueux de l'environnement, ouvrant la voie à des solutions innovantes dans le cadre de la transition énergétique.

Mots-clés : Biomimétisme, Approche paramétrique, Contrôle solaire, Efficacité énergétique, Confort thermique, Climat méditerranéen chaud.

ABSTRACT

In the context of the energy transition and adaptation to climate change, the design of building envelopes plays a central role in regulating the exchanges between the building and its external environment. In this regard, solar control constitutes one of the key components of the envelope, enabling the modulation of solar gains while simultaneously improving thermal comfort and the building's energy performance. From this perspective, bio-inspired solar control systems developed through a biomimetic approach appear as a promising solution.

This research aims to evaluate the thermal and energy performance of an adaptive bio-inspired solar control system based on plant thermoregulation mechanisms. The proposed system is applied to a single-family dwelling located in the city of Guelma, characterized by a hot Mediterranean climate. The adopted methodology is structured around four complementary approaches organized in a sequential and coherent manner. First, a conceptual approach was used to establish the theoretical and scientific framework of the research. Second, the empirical approach relied on in situ temperature measurements and a typological analysis of individual housing in order to characterize the local context. This stage led to a qualitative approach dedicated to the design of a biomimetic solar control system modeled using Rhinoceros and Grasshopper. Finally, the quantitative approach completed the process through thermal and energy simulations conducted using the Ladybug, Honeybee, and EnergyPlus plugins, and optimized parametrically through the multi-objective genetic algorithm Octopus.

The results highlight the effectiveness of the proposed parametric biomimetic solar control system in reducing summer solar gains, limiting cooling demand, enhancing winter solar gains, and reducing heating needs. At the same time, the system improves indoor thermal comfort by regulating the operative temperature and reducing discomfort hours, thereby contributing to better energy consumption management.

The study confirms the potential of computational biomimicry for the development of adaptive solar control systems that are energy-efficient and environmentally sustainable, opening new perspectives for innovative solutions within the framework of the energy transition

Keywords: Biomimicry, Parametric design approach, Solar control, Energy efficiency, Thermal comfort, Hot Mediterranean climate.

المخلص

في سياق الانتقال الطاقوي والتكيف مع التغير المناخي، يلعب تصميم الأغلفة المعمارية دورًا محوريًا في تنظيم التبادلات بين المبنى وبيئته الخارجية. وفي هذا الإطار، يُعدّ التحكم الشمسي من الوظائف الأساسية للغلاف المعماري، إذ يتيح تنظيم الكسب الشمسي وتحسين كلاً من الراحة الحرارية والأداء الطاقوي للمبنى في الوقت نفسه. ومن هذا المنظور، تبرز أنظمة التحكم الشمسي المستوحاة من الكائنات الحية، والمطوّرة وفق مقاربة المحاكاة الحيوية (Biomimétisme)، كحلّ واعد.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الأداء الحراري والطاقوي لجهاز تحكم شمسي تكيفي مستوحى حيويًا، يعتمد على آليات التنظيم الحراري للنباتات، وتم تطبيقه على مسكن فردي يقع في مدينة قالمة، التي تتميز بمناخ متوسطي حار. وتعتمد المنهجية المتبعة على أربع مقاربات متكاملة ومنظمة بشكل متسلسل ومنسجم. في المرحلة الأولى، سمحت المقاربة المفاهيمية بتحديد الإطار النظري والعلمي للبحث. بعد ذلك، استندت المقاربة التجريبية إلى قياسات ميدانية لدرجات الحرارة وتحليل نمطي للمساكن الفردية من أجل توصيف السياق المحلي. وقد قادت هذه المرحلة إلى المقاربة النوعية، التي استُخدمت لتصميم نظام تحكم شمسي حيوي النمذجة باستخدام برنامجي Rhinoceros و Grasshopper. وأخيرًا، استُكمل المسار بالمقاربة الكمية من خلال محاكاة حرارية وطاقوية أُجريت باستخدام الإضافات البرمجية Ladybug و Honeybee و EnergyPlus، وتم تحسين النتائج بطريقة بارامترية عبر خوارزمية جينية متعددة الأهداف Octopus.

تُبرز النتائج فعالية التصميم البارامترية القائم على المحاكاة الحيوية للنظام الشمسي المقترح في تقليل الكسب الشمسي خلال فصل الصيف، والحد من الطلب على التبريد، وتعزيز الكسب الشمسي في فصل الشتاء، وتقليل احتياجات التدفئة. كما يساهم النظام في تحسين الراحة الحرارية من خلال تنظيم درجة الحرارة التشغيلية وتقليل ساعات عدم الراحة، مما يؤدي إلى تحكم أفضل في استهلاك الطاقة. وتؤكد الدراسة الإمكانيات الكبيرة للمحاكاة الحيوية الحاسوبية في تصميم أنظمة تحكم شمسي تكيفية وموفرة للطاقة وصديقة للبيئة، مما يفتح آفاقًا لحلول مبتكرة في إطار الانتقال الطاقوي.

الكلمات المفتاحية:

المحاكاة الحيوية، المقاربة البارامترية، التحكم الشمسي، الكفاءة الطاقوية، الراحة الحرارية، المناخ المتوسطي الحار.

TABLE DES MATIERES

DÉDICACES	I
REMERCIEMENTS.....	II
RÉSUMÉ.....	III
ABSTRACT	IV
الملخص	V
TABLE DES MATIERES	VI
NOMENCLATURE.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XXI
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	I
Contexte général.....	2
Problématique.....	4
Questions de recherche.....	5
Hypothèses de la recherche	6
Objectifs de la recherche	6
Méthodologie de la recherche	7
Structure de la thèse	8
Chapitre I : le contrôle solaire en architecture: fondements théoriques.....	11
Introduction	12
I.1 Le rayonnement solaire en architecture.....	12
I.1.1 Le rayonnement solaire : aspect géométrique	12
I.1.1.1 Mouvement apparent du soleil	12
I.1.1.2 Repérage de la position du soleil.....	14
I.1.1.3 Trajectoire du soleil.....	15
I.1.2 Le rayonnement solaire : aspect énergétiques	15
I.1.2.1 L’irradiation solaire.....	16
I.1.2.2 Les apports solaires	17
I.1.2.3 L’angle d’incidence	17
I.1.2.4 La durée d’ensoleillement (l’insolation).....	18
I.1.2.5 L’orientation de la surface réceptrice	18
I.1.2.6 La nature de la surface réceptrice	19
I.2 Le contrôle solaire en architecture.....	20
I.2.1 Aperçu historique	20
I.2.2 Les niveaux de contrôle solaire en architecture	21
I.2.2.1 Au niveau du bâtiment lui-même : l’auto ombrage.....	22

I.2.2.2	Au niveau des ouvertures :	22
I.3	Les dispositifs de contrôles solaires	24
I.3.1	Classification des dispositifs de contrôles solaires	24
I.3.1.1	Systèmes de protection solaire passifs.....	25
I.3.1.2	Dispositifs de protection solaire fixes	25
I.3.1.3	Dispositifs de protection solaire mobiles ajustables manuellement	29
I.3.2	Systèmes de protection solaire actifs	29
I.3.2.1	Systèmes de protection solaire motorisés.....	30
I.3.2.2	Systèmes de protection solaire dynamiques	31
I.3.2.3	Configuration de mouvement simple (dispositifs de contrôle solaire dynamique conventionnels)	33
I.3.2.4	Configuration de mouvement complexe (dispositifs de contrôle solaire dynamique cinétique) ³⁴	34
I.3.3	Systèmes de protection solaire hybrides	37
I.3.3.1	Le système de contrôle solaire avec actionneurs intégrés	39
I.3.3.2	Le système de contrôle solaire avec actionneurs indépendants.....	39
	Conclusion.....	40
	Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : cadre conceptuel	41
II	Introduction	42
II.1	le biomimétisme : Notions et concepts	42
II.1.1	Définition du biomimétisme	42
II.1.2	Cadre sémantique du biomimétisme.....	43
II.1.3	Niveaux de biomimétisme.....	45
II.2	Le biomimétisme en architecture	46
II.2.1	Nature et architecture : origines et évolution	46
II.2.2	Motivations du biomimétisme en architecture	47
II.2.2.1	Le biomimétisme comme source d'innovation	47
II.2.2.2	Le biomimétisme au service de la durabilité	47
II.2.2.3	Le biomimétisme pour le bien-être humain.....	48
II.3	Approches de conception biomimétique en architecture.....	48
II.3.1.1	Approche « Conception se référant à la biologie »	48
II.3.1.2	Approche de « Biologie influençant la conception ».....	48
II.4	Le biomimétisme appliqué au contrôle solaire	49
II.4.1	Les stratégies adaptatives des plantes	49
II.4.1.1	Les types d'adaptation chez les plantes.....	50
II.4.1.2	Les mouvements adaptatifs des plantes.....	50
II.5	Les champs d'application du biomimétisme en architecture.....	52
II.5.1.1	Les matériaux	52

II.5.1.2	Les structures.....	52
II.5.1.3	Les systèmes.....	53
II.6	Le transfert du biomimétisme en architecture	54
II.6.1	Le niveau représentationnel	54
II.6.2	Le niveau génératif.....	54
II.6.3	Le niveau paramétrique	55
II.7	L'Approche paramétrique.....	56
II.7.1	Définition de l'approche paramétrique	56
II.7.2	Origines de l'approche paramétrique	57
II.7.3	Champs d'application de l'approche paramétrique en architecture	58
II.7.3.1	La modélisation paramétrique	59
II.7.3.2	La simulation paramétrique des performances environnementales.....	60
II.7.3.3	L'optimisation paramétrique	62
II.7.3.4	L'optimisation mon -objectif.....	63
II.7.3.5	L'optimisation multi objectifs	64
CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art.....		66
III	Introduction	67
III.1	Analyse bibliométrique	67
III.1.1	Thèmes et terminologies	67
III.2	Évolution des thématiques au fil des années.....	69
III.3	Sélection des études antérieures.....	71
III.4	Phase 1 : Collecte des données	72
III.5	Phase 2 : Sélection des données.....	72
III.6	Phase 3 : Analyse des données.....	73
III.7	Phase 4 : Synthèse.....	73
III.8	Revue des travaux antérieurs	73
III.9	Résultats d'analyse des études antérieures	88
III.10	Positionnement épistémologique	97
III.11	Identification des lacunes.....	97
III.12	Nouveaux apports de la recherche	98
III.13	Cadre méthodologique retenu	99
Conclusion		99
IV	CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE.....	101
Introduction		102
IV.1	Présentation de la ville de Guelma.....	103
IV.1.1	La ville de Guelma : Genèse historique	104

IV.1.1.1	La période avant 1850	104
IV.1.1.2	La période entre 1858 et 1962	105
IV.1.1.3	La période entre 1962- 1977.....	105
IV.1.1.4	La période entre 1977 et 1987	106
IV.1.1.5	La période entre 1987 et 1997	107
IV.1.1.6	La période entre 1997-2014.....	108
IV.1.1.7	La période jusqu'à 2022	108
IV.2	Analyse climatique de la ville de Guelma	109
IV.2.1	Classification climatique de Guelma.....	110
IV.2.2	Température de l'air	110
IV.2.3	Rayonnement solaire	111
IV.2.3.1	Rayonnement solaire horizontal global	111
IV.2.3.2	Comportement directionnel du rayonnement solaire.....	111
IV.2.3.3	Distribution hémisphérique du rayonnement solaire.....	112
IV.2.4	Vents dominants	113
IV.2.5	Humidité relative.....	114
IV.2.6	Digramme ombrethmique	115
IV.3	Analyse bioclimatique de la Ville de Guelma	116
IV.3.1	Le diagramme psychométrique	116
IV.3.2	Le diagramme solaire	117
IV.4	L'habitat individuel à Guelma	118
IV.4.1	L'habitat pavillonnaire	119
IV.4.2	L'habitat auto produit.....	119
IV.4.2.1	L'habitat individuel informel.....	120
IV.5	Sélection des cas d'étude	123
IV.5.1	L'analyse typologique : fondements théorique	123
IV.5.2	Les niveaux d'analyse typologique	123
IV.5.3	Le processus de l'analyse typologique.....	124
IV.5.3.1	Définition du corpus	124
IV.5.3.2	Classement et élaboration des types	126
IV.5.3.3	Constitution de la typologie.....	131
Conclusion.....		131
V CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS		133
Introduction		134
V.1	Présentation de cas d'étude.....	135
V.2	Mesures expérimentales in situ.....	138
V.2.1	Instrument de mesures.....	138

V.2.2	Choix de la période de prise de mesure.....	139
V.2.3	Déroulement de la campagne de mesure.....	140
V.3	Le dispositif de contrôle solaire biomimétique proposé.....	140
V.3.1	Phase de cadrage : définition du problème.....	141
V.3.2	Phase de recherche biologique : investigation et sélection	141
V.3.3	Phase de mise en Œuvre : traduction des stratégies naturelles en système technique	143
V.4	La simulation paramétrique	144
V.4.1	Objectifs de la simulation paramétrique dans cette étude	144
V.4.2	Outils de la simulation paramétrique	145
V.4.3	Paramètres de la simulation paramétrique	147
V.4.3.1	Paramètres constants	147
V.4.3.2	Les paramètres variables	151
V.5	L'Optimisation multi objectifs	152
V.5.1	Objectifs de L'Optimisation multi objectifs.....	153
V.5.2	Outils L'Optimisation multi objectifs	153
V.5.3	Paramètres ajustés au cours du processus d'optimisation.....	154
	Conclusion.....	155
	CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION	157
	Introduction	158
V.6	Validation du modèle de simulation.....	159
V.7	Estimation des apports solaires.....	162
V.7.1	Avant l'intégration du système de contrôle solaire biomimétique.....	163
V.7.2	Après l'intégration du système de contrôle solaire biomimétique.....	164
V.8	Evaluation de la consommation énergétique	166
V.8.1	le comportement énergétique du modèle de référence.....	166
V.8.2	Analyse de La consommation énergétique pour le refroidissement.....	167
V.8.3	La consommation énergétique de chauffage	169
V.9	La simulation thermique	172
V.9.1	La température opérative.....	172
V.9.1.1	La température opérative avant l'intégration du système de contrôle solaire	172
V.9.1.2	La température opérative après l'intégration du système de contrôle solaire.....	174
V.9.2	Le confort adaptatif	179
V.9.2.1	Avant l'intégration d'un système de solaire biomimétique.....	180
V.9.2.2	Après l'intégration du système d'ombrage.....	183
	Conclusion.....	188
	CONCLUSION GÉNÉRALE	189

Conclusion.....	190
Limites de la recherche	192
Perspectives de la recherche.....	193
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	195
ANNEXES	217
ANNEXE A.....	218
ANNEXE B.....	219
ANNEXE C.....	223

NOMENCLATURE

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Société Américaine des Ingénieurs en Chauffage, Réfrigération et Climatisation.
ANSI	American National Standards Institute Institut National des Normes Américaines
EUI	Energy use intensity L'Intensité d'Utilisation Énergétique
WWR	Window wall ratio Rapport fenêtre-mur
MOO	Multi-objective optimization L'optimisation multi-objecti
TMY	Typical Meteorological Year Année Météorologique Typique
APRUE	L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Condition
PMV	Vote Moyen Prévu Predicted Mean Vote
PPD	Pourcentage de Mécontents Prévu Predicted Percentage of Dissatisfied
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
TDP	(Thermal Discomfort Probability)..
UDI	Useful Daylight Illuminance)
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
(MOEA/D	Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition),
GA	Genetic Algorithms

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Mouvements de la terre autour du soleil. Source : (Dankassoua et al., 2017).....	13
Figure I. 2 : les angles de déclinaison aux solstices d'été et d'hiver. Source : (Szokolay, 1996)	13
Figure I. 3 : Les coordonnées Solaires.. Source : (K. Xu et al., 2025)	14
Figure I. 4 : Trajectoire du soleil. Source : https://tecnivent.be/blog/comprendre-la-trajectoire-du-soleil	15
Figure I. 5 : les composants du rayonnement solaire : Source : (Magri Elouadjri,2023).....	16
Figure I. 6 : l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Source : (Wald ,2020).....	18
Figure I. 7 : Le pourcentage du rayonnement intercepté en fonction de l'angle d'incidence. Source : (Mazria, 1979).....	18
Figure I. 8 : l'insolation reçue sur différents plans par rapport à l'insolation horizontale. Source : (Weber, 1991).....	19
Figure I. 9 : comportement de la lumière au contact des surfaces de matériau transparent (à droite) ou opaque (à gauche). Source : (Gallas, 2013).....	20
Figure I. 10 : les brises soleil dans l'unité d'habitation de Marseille (à gauche) . l'immeuble en gradin d'Henri Sauvage (à droite) . Source : (Siret & Harzallah, 2006)	21
Figure I. 11 : Auto-ombrage par la manipulation de la forme du bâtiment (à gauche) et des composants de la façade (à droite).Source : (Lionar et al., 2024)	22
Figure I. 12 : les fonctions des dispositifs de contrôle solaire . Source : (Al-Masrani et al., 2018).....	24
Figure I. 13 : Classification des dispositifs de protections solaire. Source : (Al-Masrani et al., 2018) 25 Ces systèmes sont classés en trois types selon leur l'orientation des lamelles, en trois grandes catégories (Figure I. 14)	26
Figure I. 15 : les trois types des protections solaires fixes. Source : https://civil.poriyaan.in/topic/shading-devices-40094/	26
Figure I. 16 : les différentes configurations de protection solaire horizontales . Source : Olgyay (1963)	Erreur ! Signet non défini.
Figure I. 17 : les différentes configurations de protection solaire verticales Source : Olgyay (1963). .	27
Figure I. 18 : les différentes configurations de protection solaire mixtes . Source : Olgyay (1963).....	28
Figure I. 19 : Positions possibles de systèmes de contrôle solaire : à gauche : à l'intérieur, à droite : à l'extérieur. Source : (Ziasistani et al., 2025)	28
Figure I. 20 : Études et conceptions de systèmes de protection solaire réglables manuellement. Source : (Al-Masrani et al., 2018)	29
Figure I. 21 : Stores vénitiens extérieurs motorisés. Source : (Al-Masrani et al., 2018).....	30
Figure I. 22 : dispositif d'ombrage au niveau d'une ouverture : Source : (Kirimat, 2026).....	30
Figure I. 23 : Variation de la position d'un panneau de protection solaire dynamique. Source : (Wang et al., 2025).....	32

Figure I. 24 : Modèles de dispositifs de protection solaire dynamiques conventionnels issus de différentes études. Source : (Al-Masrani et al., 2018).....	33
Figure I. 25 : Modèles de dispositifs de protection solaire dynamiques cinétique issus de différentes études. Source : (Al-Masrani et al., 2018).....	33
Figure I. 26 : Composants d'un système dynamique cinétique Source :(Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).....	34
Figure I. 27 les mouvements cinétiques primaires. Source : (Moloney (2011).....	35
Figure I. 28 : Catégorisation simplifiée des mouvements, des déformations des systèmes de contrôle solaire . Source :(Brzezicki, 2024)	35
Figure I. 29 : Modèles de mouvement de dispositifs de protection solaire issus de différentes études. Source : (Brzezicki, 2024b).....	36
Figure I. 30 : <i>Systèmes de protection solaire Flectofin et Double Flectofin (Lienhard et al., 2011).</i>	Erreur ! Signet non défini.
Figure I. 31 : <i>Écrans de protection solaire cinétiques réactifs de type origami (Pesenti et al., 2015a ; Pesenti et al., 2015b).</i>	Erreur ! Signet non défini.
Figure I. 32 : système de contrôle solaire biomimétique. Source : (Wang et al., 2025).....	39
Figure II. 1 : cadre sémantique du mot « biomimétisme, Source : (ISO/TC266, 2015).....	44
Figure II. 2 : Différences entre les bio- disciplines. Source : (Sommese et al., 2022b).....	45
Figure II. 3 : les niveaux du biomimétisme .Source : (El Ahmar et al., 2013).....	45
Figure II. 4 : au défi à la biologie .source : Biomimicry 3.8 (2015).....	49
Figure II. 5 : Quelques stratégies adaptatives adoptées par les plantes :Source : (Tabadkani et al., 2021).....	50
Figure II. 6 : les principaux mouvements adaptatifs des plantes. Source : (Sommese et al., 2024a)	51
Figure II. 7 : Exemples de dispositifs de contrôle solaire biomimétique ;,The Flectofin (en haut) , The Air Flower (en bas) . Source : (Tabadkani et al., 2021a)	53
Figure II. 8 : Modélisation d'une fleur à l'aide Rhino –Grasshopper. Source : (Sayed, 2021)	54
Figure II. 9 : Modélisation paramétrique d'une tour à l'aide du logiciel Rhino Grasshopper et de son plug-in Heteroptera .Source : (Sayed, 2021).....	55
Figure II. 10 : la conception paramétrique appliquée aux tours El Bahr . Source : (Karanouh & Kerber, 2015b) 58	
Figure II. 11 : Exemple de représentations « explicites » et « symboliques » sur Grasshopper (plugin de Rhinocéros) :Source : (Barbisan, 2013.)	59
Figure II. 12 : les divers utilisations du plugging Ladybug . Source : (Wintour, 2023).....	62
Figure II. 13 : les divers utilisations du plugging Honeybee . Source : (Wintour, 2023).....	62
Figure II. 14 : Optimisation du modèle basée sur l'UDI à l'aide du composant d'optimisation « Galapagos »..Source : (Samadi ,2020)	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 1 : Carte de cooccurrence des mots-clés relatifs au thème « biomimétisme » appliqué aux enveloppes adaptatives. Source : auteur (2024)	68

D'après cette carte, les différentes thématiques peuvent être regroupées en quatre clusters principaux, comme le montre Figure III. 2. Ces clusters correspondent à différents axes de recherche structurant le domaine étudié..... 68

Figure III. 2 : les clusters principaux du terme « biomimétisme » appliqué aux enveloppes adaptatives, Source : auteur (2024) 68

Figure III. 3 : Cooccurrence des mots-clés et évolution des thématiques de recherche dans le temps. Source : auteur (2024) 70

Figure III. 4 : les étapes de sélection des études antérieures. Source : Auteur, 2025 72

Figure III. 5 : la façade biomimétique proposée par Yazdi Bahri et al, (2025)..... 74

Figure III. 6 : l'enveloppe biomimétique suggéré par Ashraf & Abdin, 2024,. Source : (Ashraf & Abdin, 2024)..... 75

Figure III. 7 : système d'ombrage biomimétique développé par (*Shahin et al., 2023*) Source : Shahin et al., (2023)..... 76

Figure III. 8 : le système de contrôle solaire bio inspiré de Soliman & Bo, (2023). Source : (Soliman & Bo, 2023b))..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III. 9 : : le système d'ombrage biomimétique proposé par Khelil, Source : (Khelil, 2021)..... 78

Figure III. 10 : la façade biomimétique proposée par (Abdel-Rahman, 2021)) , Source : (Abdel-Rahman, 2021) **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III. 11 : les différentes configuration du système adaptatif en suivant le mouvement de la fleur Giant White Impomoea .Source : (Mohamed Abd El-Rahman et al., 2020)..... 79

Figure III. 12 : l'enveloppe biomimétique adaptative suggérée par Wajiha Sheikh et al. (2019) ,Source : (Sheikh & Asghar, 2019b). 80

Figure III. 13..... 80

Figure III. 14 : : (a) Fleurs de Crocus s'ouvrent lorsque la température augmente (b) schéma de principe de mécanisme de mouvement thermonastique des Crocus/ Source : (Hadbaoui, 2018) . 81

Figure III. 15 : le système d'ombrage proposé par Hadbaoui(2018) , à droite en état semi ouvert , à gauche, semi fermé . Source : (Hadbaoui, 2018)..... 81

Figure III. 16 : le système d'ombrage biomimétique proposé par Aysu Kuru et al. (2018). Source : (Kuru et al. 2018). 83

Figure III. 17 : système d'ombrage biomimétique proposé par(Öztürk et al., 2024) Source : (Öztürk et al., 2024)..... 84

Figure III. 18 : le système biomimétique proposé par :(Shama et al., 2022) . Source :(Shama et al., 2022)..... 85

Figure III. 19 : le système de contrôle solaire proposé par (Ben Bacha & Bourbia, 2025) . Source : (Ben Bacha & Bourbia, 2025)..... 86

Figure III. 20 : système d'ombrage biomimétique proposé par (Fattah et al., 2025) . .Source : (Fattah et al., 2025)..... 87

Figure III. 21 les différentes angles d'ouverture du système de contrôle solaire proposé par (Fattah et al., 2025) . Source : (Fattah et al., 2025)	88
Figure III. 22. : Principales lacunes de la recherche identifiées à partir de l'analyse des études antérieures. Sucre : auteur (2025).....	98
Figure IV. 1 : Théâtre romain à Guelma, Source : guelma.mta.gov.dz	103
Figure IV. 2 Situation de l'Algérie à l'échelle international, wilaya de Guelma à l'échelle national, la commune de Guelma au niveau régional, Source : guelma.mta.gov.dz , traité par Auteur (2024)	104
Figure IV. 3 : les limites de la ville de Guelma avant 1585, Source : Meddour, 2024	105
Figure IV. 4: Carte de la ville de Guelma jusqu'à 1977, Source : (Meddour, 2024).....	106
Figure IV. 5 : Carte de la ville de Guelma jusqu'à 1987, Source : (Meddour , 2024)	106
Figure IV. 6 : : Carte de la ville de Guelma jusqu'en 1987 (DUAC Guelma, 2013).	107
Figure IV. 7 : Carte de la ville de Guelma jusqu'à 1997, Source : (Meddour, 2024)	108
Figure IV. 8 : Carte de la ville de Guelma jusqu'à 2022, Source : (Meddour, 2024)	109
Figure IV. 9 : : Carte de classification climatique de Koppen-Geiger pour l'Algérie 1980-2016) Source: Beck et al. (2018)	110
Figure IV. 10 : : Distribution horaire de la température sèche de l'air ambiant à Guelma, Source : Auteur (2024)	110
Figure IV. 11 : Répartition horaire et mensuelle du rayonnement solaire horizontal globale à Guelma, source : Auteur (2024).....	111
Figure IV. 12 : Roses des radiations solaires totales à Guelma : été et hiver. Source : Auteur (2024)	112
Figure IV. 13 : Distribution angulaire du rayonnement solaire directe en hémisphère céleste, Source : Auteur (2024)	113
Figure IV. 14 : Roses des vents saisonnières de la ville de Guelma, Source : Auteur (2024).....	114
Figure IV. 15 : l'humidité relative de Guelma, généré par Grasshopper. Source : Auteur (2024).....	114
Figure IV. 16 : Précipitations à Guelma, Source : meteoblue.com	115
Figure IV. 17 : Diagramme ombrethermique de Guelma, Source : Climatecharts.net	115
Figure IV. 18 : Diagramme psychrométrique de Guelma généré par Climat consultant. Source Auteur (2024)	117
Figure IV. 19 : Diagrammes solaire de la ville de Guelma durant la période estivale (a) et la période hivernale (b) source : Auteur (2025)	118
Figure IV. 20 : Vue aérienne de la cité Bon Accueil à Guelma .Source, : Google earth , traité par auteur (2024)	119
Figure IV. 21 : façades des habitations pavillonnaires - Bon Accueil- . Source :(Benzrari ,2013).....	119
Figure IV. 22 : Vue aérienne du quartier Hadj Embarek à Guelma, Source : Google earth , traité par auteur (2024)	120

Figure IV. 23 : : Vue d'ensemble de l'habitat individuel spontané , à gauche, les habitations non planifiées du boulevard du Volontariat (source : Benzrari, 2013).....	121
Figure IV. 24 : vue aérienne de lotissement 19 juin à Guelma, source : Google earth, traité par auteur	121
Figure IV. 25 : : Façades des immeubles-villas du lotissement 19 Juin, Guelma .Source : auteur, (2023).	122
Figure IV. 26 : : bidonvilles d'Oued El Maiz, Guelma, Source : Google earth, traité par auteur (2024)	122
Figure IV. 27 : 93 : la zone d'étude lotissement 19 juin, Guelma .Source : Auteur ,2024.....	124
Figure IV. 28 : différentes hauteurs des habitations individuelles de lotissement 19 juin ,Source : Auteur (2023)	127
Figure IV. 29 : types de mitoyenneté des habitations individuelles du lotissement 19 juin , à droite une mitoyenneté sur un seul côté , à gauche , une mitoyenneté sur deux cotés s , Source : Auteur (2023).....	128
Figure IV. 30 : différentes positions des fenêtrse dans les faças ades habitations individuelles de lotissement 19 juin , Source : Auteur (2023).....	128
Figure IV. 31 : <i>différents ratios des fenêtres/mur des habitations individuelles du lotissement 19 juin , Source : Auteur (2023)</i>	129
Figure IV. 32 : différents types de vitrage utilisée dans les fenêtres des habitations individuelles de lotissement 19 juin , Source : Auteur (2023).....	130
Figure IV. 33 : différents systèmes d'ombrage utilisés dans les habitations individuelles de lotissement 19 juin, Source : Auteur (2023).....	130
Figure V. 1 : localisation du cas d'étude (a, b, c), modèle 3D du bâtiment analysé (e) et diagramme annuel de la trajectoire solaire illustrant son orientation et son exposition au soleil (f). Source : Auteur,2024.....	135
Figure V. 2 : : la pièce cs d'étude : façade (a) , plan, échelle 1/50 (b) et 3D (c) , Sourcce : Auteur (2024)	137
Figure V. 3 : Identification des semaines et des journées types de l'année à Guelma, Source : Auteur (2024)	139
Figure V. 4 : Processus méthodologique de la conception d'un système d'ombrge biomimétique , Source : (Sommese et al., 2024a)	141
Figure V. 5 : Interactions de la Volubilis bleu céleste (Ipomoea tricolor) avec la lumière et la température. Source : https://www.youtube.com/watch?v=5O7LkKdQejs	142
Figure V. 6 : Processus d'ouverture de la Volubilis bleu céleste (Ipomoea tricolor) en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Source : https://www.youtube.com/watch?v=5O7LkKdQejs	142

Figure V. 7 : Processus de conception du système de contrôle solaire biomimétique Source : Auteur (2024)	143
Figure V. 8 : Processus de la simulation paramétrique. Source : Auteur (2025)	145
Figure V. 9 : définition paramétrique du modèle test généré par Grasshopper, Source : Auteur (2024)	147
Figure V. 10 : : script algorithmique descriptif du système d’ombrage généré par Grasshopper, Source : Auteur,2025.....	148
Figure V. 11: définition paramétrique des matériaux de construction du mur extérieur du cas d’étude , généré par Grasshopper , Source : Auteur (2024)	148
Figure V. 12 : définition paramétrique du vitrage de la fenêtre du cas d’étude , généré par Grasshopper , Source : Auteur (2024)	149
Figure V. 13 : :script de profil d’occupation généré par grasshopper , Source : Auteur (2024)	149
Figure V. 14 : script identifiant le type de CVC utilisé et les consignes de température généré par grasshopper , Source : Auteur (2024):.....	150
Figure V. 15 : : script des charges d’équipements généré par grasshopper , Source : Auteur (2024)	150
Figure V. 16 : : algorithme identifiant les objectifs de l’optimisation multi objectifs, généré par Grasshopper. Source : Auteur, 2025)	155
Figure VI. 1 : Modèle 3D illustrant les températures simulées dans l’ensemble du logement, y compris la pièce de référence, lors d’une journée de la période hivernale. Source : Auteur, 2025.	160
Figure VI. 2 : Modèle 3D illustrant la distribution des températures intérieures simulées dans l’ensemble du logement, incluant la pièce de référence, durant une journée estivale. Source : (Auteur, 2025)	160
Figure VI. 3 : Comparaison des températures mesurées et simulées pendant d’une journée froide (le 23 janvier). Source : (Auteur ,2025).....	161
Figure VI. 4 : Evolution des températures mesurées et simulées au cours d’une journée chaude (le 25 juillet) : Source : (Auteur ,2025)	161
Figure VI. 5 : : Apports solaires totaux incidents sur l’orientation est. Source : Auteur ,2025	163
Figure VI. 6 : Apports solaires totaux incidents sur l’orientation sud. Source : Auteur ,2025.....	164
Figure VI. 7 : Apports solaires totaux incidents sur l’orientation ouest. Source : Auteur ,2025.....	164
Figure VI. 8 : impacts du système d’ombrage sur les apports solaire selon l’orientation pendant la journée type estivale, Source : Auteur, 2025.....	165
Figure VI. 9 : Variation des apports solaires selon l’orientation avec le système d’ombrage durant la journée type hivernale. Source : Auteur, 2025.	165
Figure VI. 10 : Consommation énergétique de refroidissement du modèle de référence, Source : Auteur (2024)	166

Figure VI. 11 : Consommation énergétique de chauffage du modèle de référence. Source : Auteur, 2024).....	167
Figure VI. 12 : Évolution horaire de la consommation d'énergie de refroidissement selon l'orientation EST et les configurations des systèmes de contrôle solaire biomimétique. Source : Auteur, 2025	168
Figure VI. 13 : Évolution horaire de la consommation d'énergie de refroidissement selon les orientations et les configurations des systèmes d'ombrage. Source : Auteur ,2025.....	170
Figure VI. 14 : Évolution horaire de la consommation énergétique de chauffage selon les orientations et les configurations de système d'ombrage. Source : Auteur ,2025.....	170
Figure VI. 15 : : Évolution horaire de la consommation énergétique de chauffage selon les orientations et les configurations des systèmes d'ombrage. Source : Auteur ,2025	171
Figure VI. 16 : : Évolution horaire de la consommation énergétique de chauffage selon les orientations et les configurations des systèmes d'ombrage. Source : Auteur ,2025	171
Figure VI. 17 : la température opérative estivale simulée dans la pièces avant l'intégration du système d'ombrage .source, Auteur (2025).....	173
Figure VI. 18 : la température opérative hivernale simiuée dans la pièce test l'intégration du systèmede contrôle solaiie. Source , Auteur (2025)	173
Figure VI. 19 : : Impact de la coniguration du système d'ombrage adaptatif sur la température opérative estivale pour l'orientation Est , Source : Auteur, 2025.....	174
Figure VI. 20 : Impact de la coniguration du système d'ombrage adaptatif sur la température opérative estivale pour l'orientation Sud, Source : Auteur, 2025	175
Figure VI. 21 : Impact de la coniguration du système d'ombrage adaptatif sur la température opérative estivale pour l'orientation ouest , Source : Auteur, 202	176
Figure VI. 22 : Impact de la coniguration du système de contrôle solaire sur la température opérative hivernale pour l'orientation Est , Source : Auteur, 2025	177
Figure VI. 23 : Impact de la coniguration du système de contrôle solaire sur la température opérative hivernale pour l'orientation Sud , Source : Auteur, 2025	178
Figure VI. 24 : Impact de la coniguration du système de contrôle solaire sur la température opérative hivernale pour l'orientation ouest , Source : Auteur, 2025.....	179
Figure VI. 25 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée à l'est (b) et au sud (a) avant l'intégration du système d'ombrage adaptatif : la période estivale. Source : Auteur (2025)	180
Figure VI. 26 : Confort adaptatif estival (orientation ouest) sans système d'ombrage. Source : Auteur, 2025	181
Figure VI. 27 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée à l'est avant l'intégration du système d'ombrage adaptatif, source : Auteur,2025	182
Figure VI. 28 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée au sud – situation initiale avant l'intégration du système d'ombrage adaptatif, source : Auteur.....	182

Figure VI. 29 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée à l'ouest avant l'application du système d'ombrage adaptatif, Source : Auteur, 2025.....	183
Figure VI. 30 : Impact du système ABBS sur les heures d'inconfort thermique durant la période estivale. Source :Auteur , 2025.....	184
Figure VI. 31 : : Impact de l'angle de rotation du système d'ombrage adaptatif sur les heures d'inconfort thermique selon l'orientation, Source : Auteur, 2025.....	185

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III. 1 : Synthèse des travaux scientifiques recensés dans la revue de littérature. Source : Auteur (2025).....	89
Tableau IV. 1 : Grille d'analyse typologique des fenêtres d'habitation nivelles à Guelma, Source : Auteur, 2025	126
Tableau V. 1 : les caractéristiques thermo physique des matériaux déconstruction utilisée pour le bâtiment cas d'étude, source : (D.T.R C3-2, 1997)	136
Tableau V. 2 : caractéristiques du vitrageutilisé dans le cas d'étude.....	137
Tableau V. 3 : les caratéristiques de l'instrument utilisé.....,	138
Tableau V. 4 : Principales fonctionnalités des logiciels et plug-ins utilisés pour la simulation paramétrique. Source : Auteur	146
Tableau V. 5 : Tableau récapitulatif des conditions générales de la simulation, Source : Auteur (2024).....	151
Tableau V. 6 : paramètres intégrés durant le processus d'optimisation de configuration du modèle . (Source : Auteur, 2025).....	154

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte général

Le monde est aujourd'hui confronté à des défis environnementaux majeurs, notamment le changement climatique, l'épuisement progressif des ressources naturelles et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le secteur du bâtiment occupe une place centrale, puisqu'il représente à lui seul plus de 39 % de la consommation énergétique mondiale et environ 26 % des émissions totales de gaz à effet de serre. Une part significative de cette consommation énergétique, estimée à près de 40 %, est liée aux besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments (International Energy Agency, 2023) . Face à l'urgence croissante de la transition énergétique et à l'objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, la réduction de la demande énergétique des bâtiments est devenue une priorité essentielle (Sommese et al., 2022a)

L'enveloppe du bâtiment, en particulier les surfaces vitrées, , représente un levier important d'amélioration des performances énergétiques (Badeche, 2022) , En effet, les fenêtres peuvent être responsables d'environ 60 % des gains solaires et de près de 25 % des pertes thermiques(Al-Obaidi et al., 2017) . Selon Sozer (2010), elles peuvent également représenter à elles seules près de 30 % de la consommation énergétique totale d'un bâtiment. En interaction permanente avec les facteurs environnementaux dynamiques, notamment le rayonnement solaire, l'enveloppe influence directement les échanges thermiques et, par conséquent, le niveau de confort thermique des occupants.

Dans ce contexte, la capacité de l'enveloppe du bâtiment à s'adapter aux variations climatiques apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer l'efficacité énergétique tout en garantissant des conditions de confort intérieur adéquates (Saci Hadeef et al., 2025a)

Les systèmes de contrôle solaire adaptatifs émergent ainsi comme une solution technologique innovante, capable d'ajuster en temps réel leurs propriétés thermiques, optiques et morphologiques en fonction des conditions climatiques, de l'intensité du rayonnement solaire ou des variations de température (Hosseini et al., 2021)

Grâce à leur capacité d'adaptation dynamique, ces systèmes répondent aux exigences croissantes en matière de durabilité environnementale et de confort des usagers (Brzezicki, 2024a)

Selon la classification proposée par Goharian et al. (2025), les systèmes de contrôle solaire adaptatifs peuvent être regroupées en plusieurs catégories, allant des systèmes passifs, reposant sur l'orientation ou les propriétés intrinsèques des matériaux, aux systèmes actifs et cinétiques, intégrant des éléments mobiles et des technologies de contrôle en temps réel. À ces catégories

s'ajoutent également les façades interactives, capables de modifier leurs propriétés physiques ou optiques en réponse directe aux stimuli environnementaux. Parmi ces approches innovantes, les façades biomimétiques se distinguent par leur capacité à imiter les mécanismes d'adaptation du vivant afin de concevoir des enveloppes architecturales réactives, autonomes et éco-énergétiques.

la conception de ces systèmes s'inspirent des principes de la biomimétique, une méthode qui reproduit les systèmes, modèles et éléments de la nature afin de résoudre des problèmes techniques (Al-Obaidi et al., 2017; Fiorito et al., 2016). En particulier, les mouvements des plantes (Bijari et al., 2025a) . Bien qu'immobiles, à l'instar des bâtiments, elles réagissent à la lumière et à la température grâce à des mouvements adaptatifs (Sheikh & Asghar, 2019a) servant ainsi de modèles naturels pour l'adaptation dynamique des systèmes architecturaux. (Schumacher et al., 2010) . Ces mécanismes biologiques constituent aujourd'hui une base conceptuelle solide pour la conception systèmes de contrôle solaire dynamiques, capables de se reconfigurer en fonction des conditions thermiques ambiantes, dans le double objectif d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort intérieur.

Le développement de la conception computationnelle (J. Xu et al., 2024) , entendue comme l'utilisation d'outils algorithmiques et paramétriques pour générer, simuler et optimiser les formes et les comportements architecturaux complexes a été déterminant pour la traduction de ces stratégies biologiques en solutions architecturales concrètes. Les environnements de modélisation paramétrique permettent aujourd'hui de simuler et d'itérer avec une grande précision des comportements adaptatifs complexes (Toutou et al., 2018) . Associés à l'usage de matériaux intelligents, réactifs aux stimuli environnementaux (Mohammed Ahmed & Albadry, 2025) , ces outils ouvrent la voie à la conception de systèmes peu énergivores, capables de réagir dynamiquement aux conditions climatiques changeantes (Brzezicki, 2024a) . Cette synergie entre biologie, design paramétrique et science des matériaux a permis l'émergence d'une nouvelle génération de peaux architecturales réactives, conciliant performance énergétique et confort thermique intérieur

De nombreuses recherches ont porté sur l'optimisation de la performance énergétique à travers des façades et systèmes d'ombrage bio-inspirés. Les travaux d'Ashraf et Abdin (2024), Shahin et al. (2023), Mohamed Abd El-Rahman et al.(2020)), , Khelil et al (2020), Hadbaoui & Bourbia, (2018) ainsi que Kuru et al. (2018) ont montré que l'intégration de mécanismes adaptatifs inspirés de la nature permet d'améliorer significativement l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment dans les contextes climatiques marqués par de fortes contraintes thermiques. Parallèlement, plusieurs études se sont intéressées à l'amélioration du confort

thermique intérieur grâce aux enveloppes biomimétiques adaptatives. C'est le cas des travaux de , Khelil et al (2020) ,Mohamed Abd El-Rahman et al,(2020) , Kuru et al. (2018),Hadbaoui & Bourbia, (2018) . En s'appuyant sur les mécanismes thermorégulateurs de la flore et sur les approches computationnelles paramétriques, ces recherches ont démontré la capacité des façades réactives à moduler les conditions intérieures et à réduire les périodes d'inconfort thermique. Ces études révèlent un intérêt croissant pour les systèmes d'ombrage bio-inspirés dans des contextes climatiques variés. Elles démontrent que la reproduction des mécanismes adaptatifs de la flore peut générer des économies d'énergie significatives, principalement grâce à la réduction des charges de refroidissement.

Cependant, deux lacunes majeures persistent dans la recherche actuelle. D'une part, la majorité des études existantes se concentre sur les bâtiments du secteur tertiaire (bureaux, établissements éducatifs et sanitaires), alors que le secteur résidentiel, bien qu'il représente une part substantielle de la consommation énergétique mondiale, demeure largement sous-exploré en matière d'applications bio-inspirées. D'autre part, le champ géographique de ces travaux se focalise principalement sur les climats arides et tropicaux, tandis que le climat méditerranéen chaud (Csa), marqué par une forte variabilité saisonnière, restent encore peu investigués dans le cadre d'approches biomimétiques appliquées pour l'amélioration du confort thermique et l'optimisation du confort thermique du bâtiment. Pour cela, La présente recherche vise à combler ces lacunes en explorant une approche biomimétique computationnelle appliquée à l'habitat individuel en zone climatique méditerranéenne chaude (Csa)

Problématique

En Algérie, le secteur résidentiel constitue l'un des principaux postes de consommation énergétique, représentant près de 43 % de la consommation énergétique totale du pays (APRUE, 2019.) Cette consommation est principalement liée aux besoins en chauffage et en climatisation, devenus indispensables pour assurer un niveau de confort thermique acceptable dans les logements. Dans un contexte marqué par la transition énergétique et la recherche de modèles de développement plus durables, cette forte dépendance énergétique soulève des enjeux majeurs en matière d'efficacité énergétique et de maîtrise de la demande en énergie.

Au sein de ce secteur, l'habitat individuel se distingue par un niveau de consommation particulièrement élevé, puisqu'il représente environ 65 % de la consommation énergétique résidentielle, contre 35 % pour le logement collectif (APRUE, 2019.). À l'instar de nombreuses villes algériennes, la ville de Guelma se caractérise par une diversité typologique de l'habitat individuel, résultant des dynamiques sociopolitiques, économiques et urbaines qui ont marqué

son évolution. Cet habitat se décline principalement en deux formes : l'habitat informel et l'habitat planifié, dont l'essor s'est particulièrement accentué à partir des années 1980.

Dans le cas de l'habitat individuel planifié, les façades présentent souvent des surfaces vitrées mal orientées ou mal dimensionnées, ce qui entraîne une exposition solaire peu maîtrisée. Pour limiter les effets de cette exposition, différents dispositifs de protection solaire sont généralement utilisés, tels que les protections fixes (auvents, brise-soleil) ou mobiles (persiennes, volets).

Cependant, ces dispositifs présentent plusieurs limites. Les protections fixes sont généralement statiques et ne permettent pas une adaptation aux variations temporelles du rayonnement solaire, tandis que les protections mobiles dépendent largement de l'intervention des occupants, ce qui limite leur capacité d'adaptation continue aux variations solaire. Cette situation est particulièrement problématique dans un contexte climatique comme celui de Guelma, caractérisé par un climat méditerranéen chaud présentant deux saisons fortement contrastées : des étés chauds et secs marqués par un rayonnement solaire intense, et des hivers relativement froids avec un ensoleillement plus limité (Harbi et al, 2024).

Dans ces conditions, les bâtiments sont confrontés à une double contrainte thermique : d'une part, des apports solaires excessifs en été, favorisant les phénomènes de surchauffe intérieure, et d'autre part, des pertes thermiques importantes en hiver, limitant les gains solaires passifs. Ces dysfonctionnements contribuent à renforcer la dépendance aux systèmes mécaniques de chauffage et de climatisation, entraînant ainsi une augmentation significative de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre.

Le défi majeur consiste donc à trouver un équilibre entre la réduction des surchauffes estivales et l'optimisation des gains solaires en période hivernale (Sahnoune, 2022). Ce défi met en évidence la nécessité de développer des enveloppes architecturales capables de s'adapter dynamiquement aux variations climatiques, afin de réguler de manière plus efficace les flux solaires et thermiques. Dans cette perspective, les systèmes de contrôle solaire biomimétiques conçus par une approche paramétrique, apparaissent comme une piste de recherche prometteuse.

Questions de recherche

Au regard des limites des dispositifs de protection solaire conventionnels et des exigences d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel, la question centrale de cette recherche peut être formulée comme suit :

Dans quelle mesure l'intégration de systèmes de contrôle solaire biomimétiques dans les bâtiments résidentiels peut-elle améliorer leur adaptation au climat méditerranéen chaud tout en réduisant leur impact environnemental ?

Cette question principale se décline en deux questions secondaires :

- Comment l'intégration d'un système de contrôle solaire biomimétique contribue-t-elle à l'amélioration de l'efficacité énergétique et du confort thermique des habitations individuelles à Guelma ?
- Comment l'orientation et la configuration du système de contrôle solaire biomimétique influencent-elles la modulation des apports solaires et, par conséquent, les performances thermiques et énergétiques du bâtiment ?

Hypothèses de la recherche

Afin de répondre aux questions de recherche, les hypothèses suivantes sont formulées

- L'adoption d'un système de contrôle solaire biomimétique peut améliorer le confort thermique et réduire la consommation énergétique des habitations individuelles à Guelma
- L'orientation et la configuration du dispositif biomimétique influencent significativement la modulation des apports solaires et, par conséquent, les performances thermiques et énergétiques du bâtiment.

Objectifs de la recherche

Cette recherche vise à optimiser la performance énergétique de l'habitation individuelle dans un contexte de climat méditerranéen chaud, à travers l'intégration de systèmes de contrôle solaire biomimétiques inspirés des stratégies adaptatives du monde végétal.

Dans cette perspective, les objectifs de la recherche sont les suivants :.

Objectif principal

Développer et évaluer un système de contrôle solaire biomimétique adapté à l'habitat individuel dans le climat méditerranéen chaud de Guelma afin d'améliorer les performances thermiques et énergétiques du bâtiment.

Objectifs spécifiques

- Identifier et analyser les mécanismes d'adaptation morphologique et comportementale des plantes en réponse au rayonnement solaire, afin d'en extraire des principes transférables à la conception architecturale.
- Explorer le potentiel de la conception computationnelle, notamment l'approche paramétrique, dans la génération de systèmes de contrôle solaire réactifs et adaptatifs.
- Concevoir et développer un prototype de système de contrôle solaire biomimétique inspiré d'un modèle végétal et adapté aux conditions climatiques du climat méditerranéen chaud.

- Évaluer les performances thermiques et énergétiques du système proposé à l'aide de simulations paramétriques, en comparant la situation du bâtiment avant et après l'intégration du dispositif.
- Proposer une solution architecturale innovante pour l'habitat individuel, combinant efficacité énergétique, amélioration du confort thermique et contribution aux objectifs de la transition énergétique et du développement durable

Méthodologie de la recherche

Cette recherche s'inscrit dans un cadre scientifique visant à combler les lacunes de la conception des enveloppes architecturales face aux enjeux de durabilité. Pour atteindre ses objectifs, elle adopte une méthodologie qui se focalise sur quatre approches complémentaires : conceptuelle, expérimentale qualitative et quantitative mobilisant chacune des outils et des techniques spécifiques.

- **Approche conceptuelle**

Cette première phase repose sur l'élaboration d'un état de l'art consacré aux notions centrales de la recherche, telles que l'enveloppe architecturale, le confort thermique, la performance énergétique, l'architecture adaptative, le biomimétisme et la conception paramétrique. L'objectif est de définir et de clarifier les concepts pertinents tout en identifiant les limites des travaux antérieurs et les avancées récentes. Ce cadre théorique constitue ainsi une base essentielle pour contextualiser la recherche et situer les enjeux contemporains liés à la conception des enveloppes architecturales et aux problématiques environnementales

- **Approche expérimentale**

Cette phase s'appuie sur une étude in situ menée dans la ville de Guelma. Elle débute par une analyse typologique des habitations individuelles situées dans le lotissement du 19 juin, permettant de comprendre la réalité du terrain et de sélectionner un bâtiment représentatif servant de cas d'étude. L'investigation repose sur la collecte de documents graphiques, sur des visites de terrain accompagnées de relevés photographiques et sur l'utilisation d'une grille d'analyse. Des mesures de température ont également été réalisées durant les périodes les plus froides et les plus chaudes, afin d'évaluer la performance thermique de l'espace-test avant l'intégration du système de contrôle solaire biomimétique. Cette étape constitue une base essentielle pour la validation du modèle de simulation..

- **Approche qualitative**

L'approche qualitative vise à développer un système de contrôle solaire biomimétique à travers une démarche en trois étapes. Elle commence par l'identification des enjeux climatiques liés à l'ensoleillement, se poursuit par l'exploration de stratégies d'adaptation inspirées des plantes

et se concrétise par la transposition de ces principes en un dispositif paramétrique. Cette démarche mobilise un langage de programmation visuelle, en l'occurrence Grasshopper associé au modèleur Rhino 3D, afin de générer une façade dynamique capable de s'adapter aux variations saisonnières tout en améliorant simultanément le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment.

- **Approche quantitative**

L'approche quantitative se déploie en deux étapes complémentaires. La première consiste à simuler les performances thermiques et énergétiques du dispositif biomimétique durant des journées types, en utilisant Ladybug et Honeybee pour Grasshopper en lien avec EnergyPlus. La seconde est consacrée à l'optimisation, conduite à l'aide de l'algorithme évolutif Octopus, qui permet de croiser plusieurs paramètres afin d'identifier les configurations les plus performantes. Les résultats ont ensuite été enregistrés et analysés grâce à TT Toolbox, tandis que Design Explorer a permis une visualisation interactive des différentes solutions générées.

Structure de la thèse

Ce travail de recherche est structuré en deux parties, chacune composée de trois chapitres. L'ensemble débute par une introduction générale et s'achève par une conclusion générale.

La première partie, essentiellement théorique et conceptuelle, comprend les trois premiers chapitres. Elle est dédiée à la compréhension des concepts fondamentaux à travers une analyse approfondie de la littérature. Le troisième chapitre fait office de passerelle entre la partie théorique et la partie pratique : il présente l'état de l'art, discute des différentes méthodologies employées par les chercheurs ces dernières années et situe la position épistémologique de cette recherche dans le domaine scientifique.

La deuxième partie, de nature pratique, couvre les chapitres quatre à six. Ces chapitres, méthodologiques, pratiques et analytiques, exposent le contexte de recherche, le corpus étudié, les protocoles expérimentaux et de mesure in situ, les techniques de simulation, ainsi que l'interprétation des résultats. Ils sont essentiels pour traiter la problématique et vérifier les hypothèses de recherche.

La structure de la thèse se développe comme suit :

Introduction générale

L'introduction présente le contexte général de l'étude et met en évidence la problématique traitée à travers la formulation des questions de recherche, des hypothèses et des objectifs poursuivis. Elle précise ensuite la méthodologie adoptée, en expliquant la logique des approches retenues. Enfin, elle décrit la structure générale de la thèse

Chapitre I : le contrôle solaire en architecture : fondements théoriques

Ce chapitre établit les bases théoriques du contrôle solaire en architecture. Il présente d'abord les principes fondamentaux du rayonnement solaire et ses interactions avec le bâtiment, notamment les paramètres géométriques et énergétiques influençant les apports solaires. Il analyse ensuite l'évolution des stratégies de contrôle solaire, depuis les approches morphologiques passives jusqu'aux dispositifs d'ombrage fixes, mobiles et dynamiques. Enfin, il propose une classification des systèmes de protection solaire et met en évidence leurs rôles, leurs limites et leurs perspectives dans l'amélioration du confort thermique et de la performance énergétique des bâtiments.

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : cadre conceptuel

Introduit le concept de biomimétisme en architecture, en exposant ses fondements et ses niveaux d'application, notamment dans la conception des enveloppes. Il analyse les stratégies adaptatives des plantes face aux contraintes environnementales et leur transfert vers l'architecture à travers une approche computationnelle. Le chapitre aborde ensuite la conception paramétrique comme outil de modélisation des enveloppes biomimétiques adaptatives, en soulignant ses opportunités et ses limites. Enfin, il met en évidence le rôle de l'optimisation multi-objectif dans l'amélioration des performances énergétiques et environnementales des bâtiments.

Chapitre III : la performance énergétique et thermique des systèmes de contrôle solaire biomimétique

Ce chapitre présente une revue de la littérature consacrée aux systèmes de contrôle solaire biomimétiques et à leurs performances thermiques et énergétiques dans l'architecture. Il s'appuie sur une analyse bibliométrique et une étude critique de plusieurs travaux scientifiques afin d'identifier les principales approches, mécanismes et stratégies inspirés du vivant appliqués aux façades adaptatives. Cette analyse permet également de mettre en évidence les tendances de recherche, ainsi que les limites et les lacunes existantes dans le domaine.

Chapitre IV : Contexte et cas d'étude

Ce chapitre présente le contexte d'étude, à savoir la ville de Guelma, à travers ses dimensions historiques, climatiques et bioclimatiques. Une classification de l'habitat individuel, est proposée, suivie du choix d'un cas représentatif issu d'une analyse typologique et qui servira de support aux évaluations thermiques et énergétiques..

Chapitre V : Méthodes et matériels

Ce chapitre décrit la méthodologie de recherche en trois volets : présentation du cas d'étude et des campagnes de mesures expérimentales, conception biomimétique d'un dispositif de

contrôle solaire, et simulations paramétriques appuyées par divers outils numériques et plug-ins.

Chapitre VI : Résultats et discussion

Ce chapitre valide l'approche biomimétique en évaluant les performances environnementales du dispositif proposé à l'aide de simulations paramétriques. Les résultats sont analysés et discutés en les confrontant aux travaux de référence existants.

Conclusion générale

La conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus, répond aux questions de recherche et met en évidence les apports de l'étude. Elle souligne les limites rencontrées et propose des perspectives pour des recherches futures.

Chapitre I : le contrôle solaire en architecture: fondements théoriques

Introduction

Le rayonnement solaire constitue un paramètre fondamental de la conception architecturale, en raison de son influence directe sur le confort thermique et visuel des espaces intérieurs ainsi que sur la performance énergétique des bâtiments. Selon le contexte climatique, l'exposition solaire peut représenter un apport bénéfique ou, au contraire, une source d'inconfort liée à la surchauffe et à l'éblouissement, ce qui rend indispensable sa maîtrise dès les premières phases de conception. Dans ce chapitre, le rayonnement solaire sera abordé comme un facteur déterminant de l'architecture bioclimatique. Il visera à établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du contrôle solaire en architecture. Dans un premier temps, une analyse des principes fondamentaux du rayonnement solaire et de ses interactions avec le bâti sera proposée. Ensuite, l'évolution des stratégies de contrôle solaire sera examinée, depuis les approches morphologiques et passives jusqu'aux dispositifs architecturaux fixes et mobiles. Enfin, une classification des dispositifs de protection solaire sera présentée, mettant en évidence leurs apports, leurs limites et leurs enjeux en matière de confort et de performance énergétique, ouvrant ainsi la voie aux approches adaptatives et biomimétiques.

I.1 Le rayonnement solaire en architecture

Le soleil joue un rôle considérable dans la conception architecturale. L'organisation du plan, la conception des ouvertures, leur orientation selon l'état du ciel sont essentiels dans la recherche de la lumière. Les apports de lumière et de chaleur peuvent être source de confort (chaleur en hiver) ou bien d'inconfort (surchauffe en été), selon l'exposition et les dimensions des baies vitrées. La nature des parois transparentes, leur exposition, les dispositifs de contrôle de la lumière et de la chaleur qui leur sont associés, doivent être étudiés en tenant compte de la course du soleil dans la voûte céleste.

I.1.1 Le rayonnement solaire : aspect géométrique

L'évaluation de la disponibilité du rayonnement solaire et de ses modalités de contrôle constitue un enjeu fondamental en conception architecturale. La maîtrise des paramètres géométriques du rayonnement solaire représente la base du dimensionnement de tout dispositif de protection ou de captation solaire. Elle suppose une compréhension rigoureuse du mouvement apparent du soleil et de sa trajectoire céleste, définie par ses coordonnées angulaires.

I.1.1.1 Mouvement apparent du soleil

La terre tourne autour du soleil en formant une trajectoire « elliptique » (Dankassoua et al., 2017) . Le mouvement apparent du soleil dans la voûte céleste résulte de deux mouvements

fondamentaux de la Terre. Le premier est la rotation de la Terre autour de son axe en 24 heures, qui engendre l'alternance du jour et de la nuit ainsi que le déplacement quotidien apparent du soleil d'est en ouest. Le second est la révolution de la Terre autour du soleil, accomplie en un peu plus de 365 jours, qui explique les variations annuelles de la position solaire. (Szokolay, 1996)

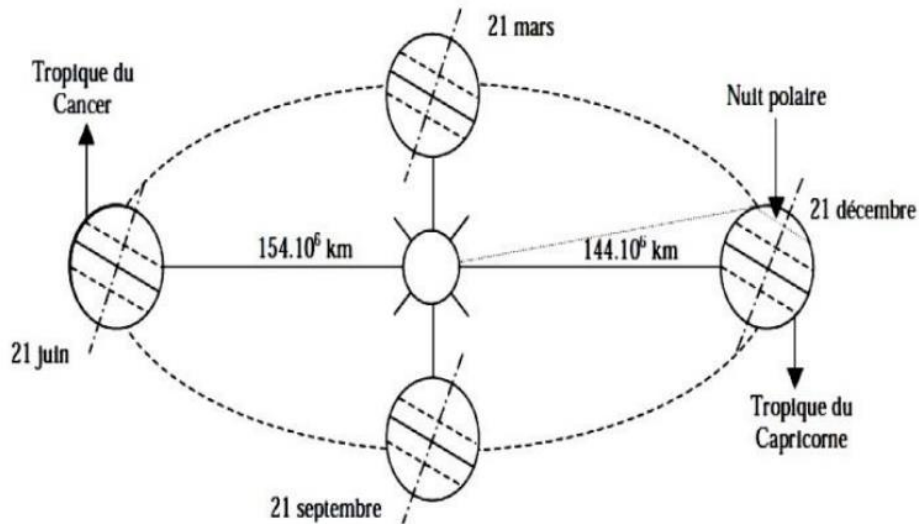


Figure I. 1 : Mouvements de la terre autour du soleil. Source : (Dankassoua et al., 2017)

La déclinaison du Soleil est l'angle de la droite Terre-Soleil avec le plan équatorial. Elle varie entre $+23^{\circ}27'$ (au solstice d'été, 22 juin) et $-23^{\circ}27'$ (au solstice d'hiver, 22 décembre), sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) (Dankassoua et al., 2017). Cette inclinaison constitue le facteur déterminant des variations saisonnières observées au cours de l'année (Szokolay, 1996)

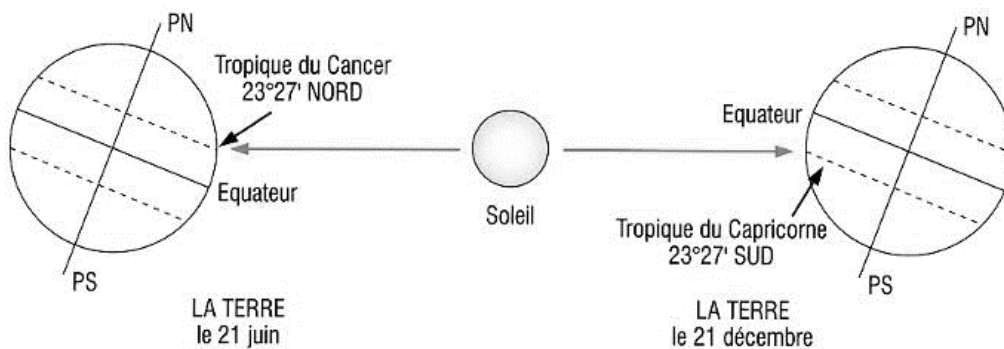


Figure I. 2 : les angles de déclinaison aux solstices d'été et d'hiver. Source : (Szokolay, 1996)

Ainsi, aux équinoxes de printemps et d'automne, le soleil se lève exactement à l'est et se couche à l'ouest, et la durée du jour est sensiblement égale à celle de la nuit. En revanche, les solstices marquent les positions extrêmes de la trajectoire solaire : le solstice d'été correspond, dans

l'hémisphère Nord, à la journée la plus longue de l'année, tandis que le solstice d'hiver correspond à la journée la plus courte (GIVONI & IZARD, 1978).

I.1.1.2 Repérage de la position du soleil

À un instant donné et pour un lieu déterminé, la position du soleil dans la voûte céleste est définie par deux coordonnées angulaires fondamentales (GIVONI & IZARD, 1978) : la hauteur solaire et l'azimut. Ces deux paramètres permettent de déterminer avec précision la direction du rayonnement solaire incident et, par conséquent, d'identifier les surfaces exposées ainsi que les zones d'ombre générées par le relief, le contexte bâti, la végétation ou le bâtiment lui-même.

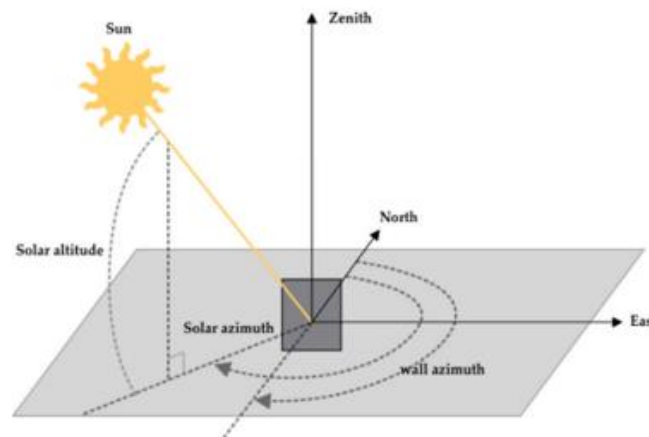


Figure I. 3 : Les coordonnées Solaires.. Source :(K. Xu et al., 2025)

La hauteur (l'altitude) solaire correspond à l'angle formé entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu considéré. Elle se mesure de 0° à l'horizon jusqu'à 90° lorsque le soleil est au zénith. Cette grandeur varie au cours de la journée et selon les saisons. À midi solaire, dans l'hémisphère Nord, la hauteur solaire atteint sa valeur maximale pour la journée considérée. Elle dépend directement de la latitude du lieu et de la déclinaison solaire. Cette dernière varie au cours de l'année en fonction de la position de la terre sur son orbite.

L'azimut solaire (a) représente l'angle formé entre le plan vertical passant par le soleil et le plan vertical de référence Nord-Sud. Par convention, à midi solaire, lorsque le soleil est orienté plein sud dans l'hémisphère Nord, l'azimut est égal à 0° . La direction du soleil est mesurée dans le plan horizontal à partir du nord, dans le sens des aiguilles d'une montre ainsi, l'est correspond à 90° , le sud à 180° et l'ouest à 270° , tandis que le nord peut être noté 0° ou 360° ((Szokolay, 1996).

I.1.1.3 Trajectoire du soleil

Pour un observateur situé à la surface terrestre, le soleil décrit une trajectoire journalière apparente d'est en ouest. Cette trajectoire varie en hauteur au cours de l'année en fonction des saisons, sous l'effet de l'inclinaison de l'axe terrestre. En hiver, dans l'hémisphère nord, la trajectoire solaire est basse sur l'horizon. La hauteur angulaire du soleil demeure limitée, ce qui réduit la durée et l'intensité du rayonnement solaire reçu. Cette période correspond ainsi au minimum annuel d'ensoleillement.

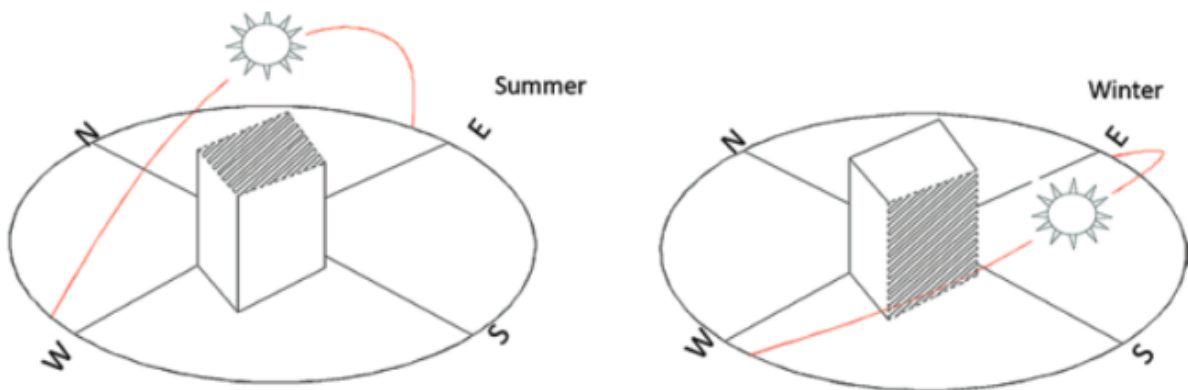


Figure I. 4 : Trajectoire du soleil en été et en hiver. Source : (Sayigh, 2019)

Aux équinoxes de printemps et d'automne, la trajectoire solaire occupe une position intermédiaire. Le soleil atteint une hauteur moyenne à midi solaire, et la durée du jour est approximativement égale à celle de la nuit. Les trajectoires observées à ces deux périodes sont symétriques et comparables.

En été, la trajectoire solaire est la plus élevée de l'année dans l'hémisphère Nord. Le soleil atteint alors sa hauteur maximale à midi solaire, ce qui entraîne une augmentation significative de la durée d'ensoleillement et de l'intensité du rayonnement reçu. Cette configuration correspond au maximum annuel d'apports solaires.

I.1.2 Le rayonnement solaire : aspect énergétiques

Le soleil émet une quantité considérable d'énergie, appelée énergie solaire (Wald, 2010). Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m^2 , Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut $1\,353\ W/m^2$ et est appelée constante solaire.

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15 %) et la réémet dans toutes les directions sous forme

de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6 %). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc. (De Herde & Liébard, 2005).

I.1.2.1 L'irradiation solaire

Le rayonnement total reçu par une surface, communément appelé irradiation solaire incidente ou éclairage énergétique global, résulte de la combinaison de plusieurs composantes énergétiques issues de l'interaction entre le Soleil, l'atmosphère et l'environnement bâti. L'irradiation solaire dépend de nombreux facteurs, dont principalement la, couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation, et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon. La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation solaire. (Dankassoua et al., 2017)

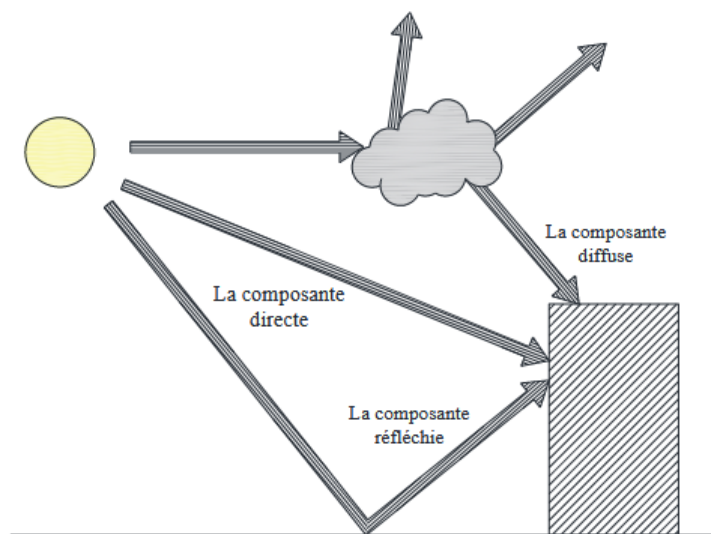


Figure I. 5 : les composants du rayonnement solaire : Source : (MAGRI ELOUADJERI, 2023)

Cette irradiation globale est classiquement définie comme la somme de trois contributions principales : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi. (DE HERDE & LIÉBARD, 2005)

La première composante est l'irradiation directe, qui correspond au rayonnement solaire atteignant la surface sans subir de déviation significative dans l'atmosphère. Cette composante dépend fortement de la position du Soleil, de l'orientation de la surface et des conditions météorologiques. Elle devient nulle lorsque le disque solaire est occulté, soit par une couverture

nuageuse dense, soit par des obstacles physiques tels que des bâtiments ou des éléments naturels.

La seconde composante est l'irradiation diffuse, issue du rayonnement solaire diffusé par les molécules de l'atmosphère, les aérosols et les nuages, puis renvoyé vers la surface terrestre depuis l'ensemble de la voûte céleste, à l'exclusion du rayonnement direct. Cette composante joue un rôle majeur dans l'éclairage naturel, notamment dans les régions à forte nébulosité. Elle peut représenter jusqu'à 50 % du rayonnement global lorsque le Soleil est proche de l'horizon et atteindre 100 % du rayonnement reçu dans le cas d'un ciel entièrement couvert

Enfin, la troisième composante est l'irradiation réfléchie, qui correspond au rayonnement solaire renvoyé vers la surface considérée après réflexion sur les éléments de l'environnement extérieur, principalement le sol, mais également les façades, les plans d'eau ou la végétation. L'importance de cette contribution dépend des propriétés de réflexion des surfaces environnantes, caractérisées par leur albédo, défini comme le rapport entre la quantité d'énergie solaire réfléchie et la quantité d'énergie incidente reçue (Wald, 2010) .

I.1.2.2 Les apports solaires

Les apports solaires correspondent à l'énergie solaire effectivement reçue et valorisée par le bâtiment. (Mazria, 1978) La densité du flux solaire incident à l'intérieur d'un espace résulte de la combinaison du rayonnement solaire direct transmis à travers les surfaces vitrées (apports directs) et de l'énergie restituée par les parois opaques exposées. (apports indirects) Ces apports dépendent de plusieurs facteurs essentiels :

I.1.2.3 L'angle d'incidence

La quantité d'énergie solaire reçue par une paroi dépend fortement de l'angle d'incidence du rayonnement. Les apports énergétiques sont maximaux lorsque le flux solaire est perpendiculaire à la surface réceptrice. La surface effectivement irradiée correspond alors à la surface réelle multipliée par le cosinus de l'angle d'incidence. Cet angle est déterminé par la position du soleil, définie par sa hauteur et son azimut (Mazria, 1978)

Lorsque l'angle d'incidence se rapproche de la normale à la surface, la densité d'énergie reçue augmente. À l'inverse, une inclinaison importante du faisceau solaire entraîne une répartition de l'énergie sur une surface plus étendue, réduisant ainsi l'intensité énergétique reçue par unité de surface (Mazria, 1978) .

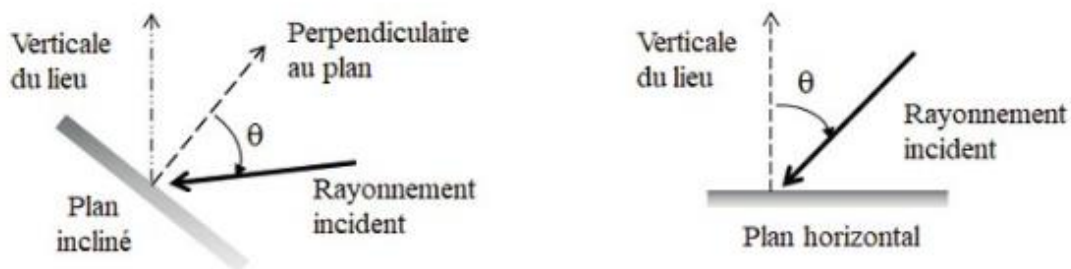


Figure I. 6 : l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Source : (Wald, 2020)

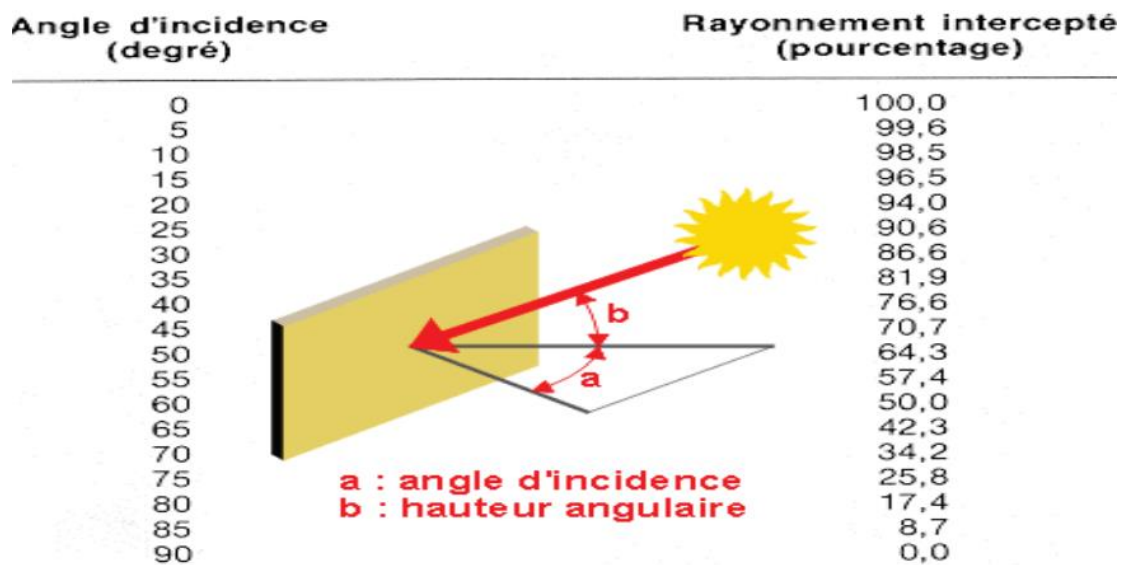


Figure I. 7 : Le pourcentage du rayonnement intercepté en fonction de l'angle d'incidence. Source : (Mazria, 1978)

I.1.2.4 La durée d'ensoleillement (l'insolation)

Les gains solaires passifs augmentent proportionnellement à la durée d'exposition d'une paroi au rayonnement solaire. La durée d'ensoleillement, ou insolation, correspond au nombre d'heures pendant lesquelles une surface reçoit directement le soleil. Elle dépend principalement de l'implantation du bâtiment et de son environnement immédiat (Mazria, 2005)

On considère généralement que le rayonnement solaire devient énergétiquement significatif lorsque la hauteur solaire dépasse 10°, afin de tenir compte des masques solaires et du faible apport énergétique au lever et au coucher du soleil. La durée d'ensoleillement ou de l'exposition énergétique peut être déterminée facilement à l'aide des diagrammes solaires.

I.1.2.5 L'orientation de la surface réceptrice

Les apports solaires sont également conditionnés par l'orientation et l'inclinaison des parois. En période hivernale, les façades orientées au sud reçoivent les apports solaires les plus

importants, contrairement aux orientations est et ouest. Cette situation s'inverse en été. De ce fait, les ouvertures orientées au sud présentent une meilleure capacité de régulation passive, favorisant le confort thermique intérieur. L'orientation influence directement la température des surfaces extérieures, laquelle conditionne à son tour la qualité de l'ambiance thermique intérieure. (MAGRI ELOUADJERI, 2023)

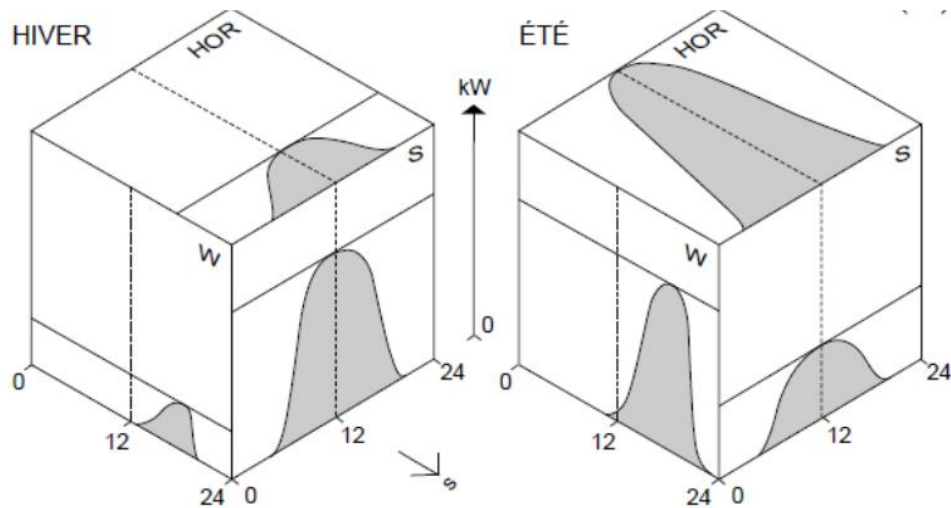


Figure I. 8 : l'insolation reçue sur différents plans par rapport à l'insolation horizontale. Source : (Weber, 1991)

I.1.2.6 La nature de la surface réceptrice

La répartition des flux solaires incidents dépend de la nature de la surface réceptrice, qu'elle soit transparente ou opaque, et se traduit par des coefficients d'absorption (α), de réflexion (ρ) et de transmission (τ), dont la somme représente le rayonnement solaire total reçu (Gallas, 2013)

Les parois opaques absorbent une partie de l'énergie solaire et réfléchissent le reste, sans transmission directe. L'énergie absorbée est progressivement restituée vers l'intérieur après un décalage temporel appelé déphasage thermique, à condition que la température intérieure soit inférieure à la température extérieure. L'ensoleillement des parois opaques influence donc les transferts de chaleur et contribue à réduire les déperditions thermiques, qui sont proportionnelles à la différence entre températures intérieures et extérieures. (Gallas, 2013)

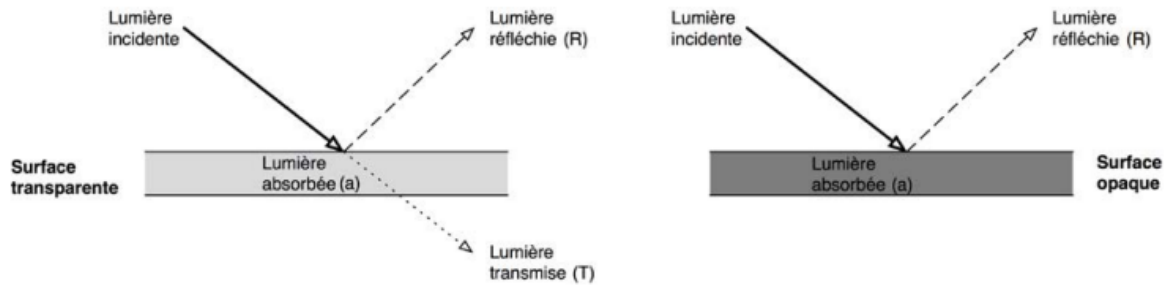


Figure I. 9 : Comportement Du rayonnement solaire au contact des surfaces de matériau transparent (à droite) ou opaque (à gauche). Source : (Gallas, 2013)

Les surfaces vitrées représentent les capteurs solaires les plus efficaces grâce à leur capacité à transmettre directement l'énergie solaire vers l'intérieur. Une partie du rayonnement solaire absorbé par le vitrage est réémise sous forme de rayonnement à grande longueur d'onde, piégé à l'intérieur de l'espace, ce qui élève la température ambiante (Gallas, 2013)

L'analyse du comportement des surfaces opaques et transparentes face au rayonnement solaire révèle le rôle ambivalent des apports solaires : bénéfiques en hiver par leurs gains thermiques, mais susceptibles de provoquer des surchauffes en été. Cette dualité impose une régulation adaptée des flux solaires afin d'optimiser le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment. C'est dans cette perspective que s'inscrit le contrôle solaire en architecture.

I.2 Le contrôle solaire en architecture

Le contrôle solaire en architecture désigne l'ensemble des stratégies visant à réguler l'interaction entre le rayonnement solaire et l'enveloppe du bâtiment. Il a pour objectif d'optimiser les apports énergétiques utiles tout en limitant les risques de surchauffe et d'éblouissement, afin d'assurer le confort thermique et visuel des occupants.

I.2.1 Aperçu historique

L'évolution du contrôle solaire en architecture trouve ses origines dans la seconde moitié du XIX^e siècle, à la suite des crises sanitaires qui ont touché les villes européennes. À cette époque, l'ensoleillement était principalement perçu comme un facteur hygiéniste notamment par des chercheurs tels que Pasteur et Koch. (Siret & Harzallah, 2006) . Le soleil devient alors un paramètre central de la conception architecturale, tandis que la problématique des surchauffes reste marginale.(Siret & Harzallah, 2006).

Au début du XX^e siècle, cette approche se formalise à travers la théorie héliothermique proposée par Rey, Pidoux et Barde en 1928, visant à optimiser l'orientation des formes bâties afin de maximiser l'ensoleillement. Cette théorie, largement diffusée par Le Corbusier dans plusieurs

projets emblématiques, privilégiait une orientation légèrement décalée par rapport à l’axe nord–sud. Toutefois, dès les années 1940, elle fait l’objet de critiques scientifiques, notamment pour son manque de prise en compte de la variabilité du rayonnement solaire et des déséquilibres thermiques saisonniers qu’elle engendre.

À partir du milieu du XX^e siècle, l’essor des façades largement vitrées entraîne une prise de conscience accrue des risques de surchauffe. Cette évolution conduit au développement de dispositifs architecturaux spécifiques de contrôle solaire, tels que le brise-soleil, largement expérimenté par Le Corbusier. Ces dispositifs marquent une transition vers une maîtrise plus fine et plus technique du rayonnement solaire, En parallèle, certains architectes explorent des solutions morphologiques, telles que les immeubles à gradins, afin d’améliorer l’enseillement et la ventilation naturelle, tandis que d’autres mettent en avant la dimension plastique du soleil à travers des théories comme l’hélioplastique. (Twarowski, 1967) qui propose aux concepteurs d’exploiter les opportunités plastiques qu’offre le jeu des ombres et des taches solaires. (Siret, 2014)



Figure I. 10 : les brises soleil dans l’unité d’habitation de Marseille (à gauche) . l’immeuble en gradins d’Henri Sauvage (à droite) . Source : (Siret & Harzallah, 2006)

Enfin, à partir des années 1970 et du premier choc pétrolier (Siret, 2013), le contrôle solaire s’inscrit dans une approche énergétique plus globale. Le soleil n’est plus seulement un facteur d’hygiène ou de confort, mais devient une ressource à valoriser à travers des stratégies de captage solaire passif et actif, (Siret, 2011) .marquant une étape décisive vers l’architecture bioclimatique et énergétique contemporaine.

I.2.2 Les niveaux de contrôle solaire en architecture

Le contrôle du rayonnement solaire en architecture s’exerce principalement à l’échelle du bâtiment et de ses composants, depuis la configuration globale de l’édifice jusqu’au traitement

des ouvertures, telles que les fenêtres, qui assurent l'apport de lumière et de chaleur à l'intérieur des espaces (Djenane, 2008) . Dans ce cadre, le contrôle solaire à l'échelle architecturale se décline principalement à deux niveaux complémentaires : celui du bâtiment dans son ensemble et celui des ouvertures, où s'opère une régulation fine des apports lumineux et thermiques. (Magri elouadjeri, 2023)

I.2.2.1 Au niveau du bâtiment lui-même : l'auto ombrage

L'auto-ombrage, en tant que technique de conception solaire passive, constitue une solution consistant à intégrer et à concevoir des formes architecturales ou des façades capables de projeter leurs propres ombres sur l'enveloppe du bâtiment. (Hamed et al., 2025) , dans ce cadre L'auto-ombrage peut être assuré soit par la forme globale du bâtiment, soit par les composants de façade (Lionar et al., 2024).

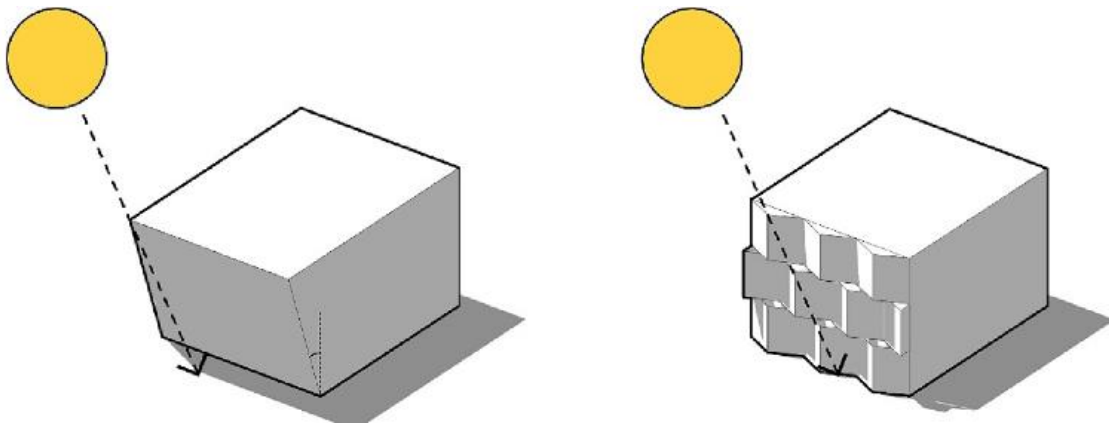


Figure I. 11 : Auto-ombrage par la manipulation de la forme du bâtiment (à gauche) et des composants de la façade (à droite).Source : (Lionar et al., 2024)

Les conditions d'ensoleillement d'un bâtiment dépendent non seulement de l'orientation des façades, mais aussi de sa volumétrie et de son contexte urbain. La forme, la compacité (rapport E/V) et les proportions du volume influencent directement l'exposition au rayonnement solaire et les performances énergétiques, les bâtiments compacts, hauts et étroits étant généralement plus efficaces. Les décrochements volumétriques et l'inclinaison des façades permettent de créer des ombres portées et de modifier l'angle d'incidence solaire. Dans ce cadre, le concept de self-shading, introduit par Capeluto (2003), vise à générer une enveloppe auto-protégée capable de limiter les gains solaires en période de surchauffe, notamment par des murs inclinés, réduisant ainsi les besoins de refroidissement.

I.2.2.2 Au niveau des ouvertures :

L'ouverture est l'interface entre les rayonnements solaires incidents et l'espace architectural. Elle constitue le facteur déterminant de la quantité et de la qualité des apports solaires qui

pénètrent et occupent l'intérieur des espaces (Gallas, 2013). Bien que les apports solaires aient un effet bénéfique en hiver, ils provoquent également un réchauffement excessif des espaces intérieurs en été, augmentant significativement les besoins en refroidissement (Wang et al., 2025). Il devient donc indispensable de contrôler adéquatement les apports solaires au niveau des ouvertures (Kirimtat, 2026).

La quantité de ces apports solaires dépend des paramètres de conception des fenêtres tels que l'orientation, les dimensions, la protection solaire ainsi que le type du vitrage. Le choix de ces paramètres se fait dans l'objectif de réduire autant que possible ces apports en été tout en permettant une pénétration solaire en hiver.

L'orientation des ouvertures fait appel à la notion de position du soleil dans le ciel ainsi que la direction de ses rayons. Dans l'hémisphère nord, une ouverture orientée sud, est ou ouest aura un apport de rayonnement solaire de type direct qui traverse l'espace architectural. Ce type de rayonnement crée des taches solaires dont la taille et la position varient en fonction de l'heure et de la saison. Par contre, une ouverture orientée au nord aura un faible apport solaire de type indirect réparti d'une manière uniforme sur les différentes surfaces de l'espace (Elghamry & Hassan, 2020).

La dimension de l'ouverture détermine la quantité de lumière à l'intérieure d'un espace. Cette propriété permet de dégager la notion de taux d'ouverture qui correspond au ratio entre la surface totale d'ouverture et la surface du plancher. Plus le taux d'ouverture est grand, plus la moyenne des apports solaire est importante. (Gallas, 2013)

Le type de vitrage influence également la quantité du rayonnement solaire traversant une fenêtre. C'est le facteur solaire qui définit le comportement du vitrage par rapport au rayonnement solaire. Lorsque le rayonnement solaire frappe un vitrage, une partie de ce rayonnement est réfléchi, une partie est transmise à travers le vitrage et une partie est absorbée par le vitrage. Le facteur solaire d'un vitrage est la fraction du rayonnement solaire qui traverse le vitrage sur le rayonnement incident (Carmody et al., 1996)

Un contrôle solaire peut être assuré par l'utilisation d'une protection solaire appropriée qui empêche le rayonnement solaire pendant l'été tout en permettant sa pénétration pendant l'hiver. Sa configuration dépend des conditions climatiques et la latitude du lieu considéré mais également de l'orientation de la fenêtre à protéger. En général, les protections solaires externes sont plus performantes que les protections internes (Datta, 2001; Valladares-Rendón et al., 2017)

I.3 Les dispositifs de contrôles solaires

Les systèmes de contrôle solaire représentent l'un des composants et stratégies bioclimatiques les plus importants pour les façades de bâtiments, (Al-Tamimi, 2011) ; Lima et al., 2013.) Ces systèmes offrent un contrôle significatif des espaces intérieurs, notamment des conditions visuelles et thermiques, et influencent donc fortement les besoins énergétiques tout en permettant aux occupants de gérer leur intimité et leur vue sur l'extérieur (O'Brien et al., 2013)

L'objectif principal d'un système de contrôle solaire est de protéger un bâtiment contre le rayonnement solaire direct (Al-Tamimi & Fadzil, 2011); Kirimtat et al., 2016) tout en remplissant deux fonctions fondamentales en tant que régulateur sélectif : créer un environnement sain et améliorer la performance du bâtiment (Baker & Steemers, 2014) L'effet de contrôle solaire sur l'énergie et les conditions thermiques n'est pas nécessairement idéal. Il est en réalité influencé par divers facteurs tels que le climat, les saisons et les fonctions du bâtiment. (O'Brien et al., 2013 ; Al-Obaidi, K.M., & Rahman, 2016)

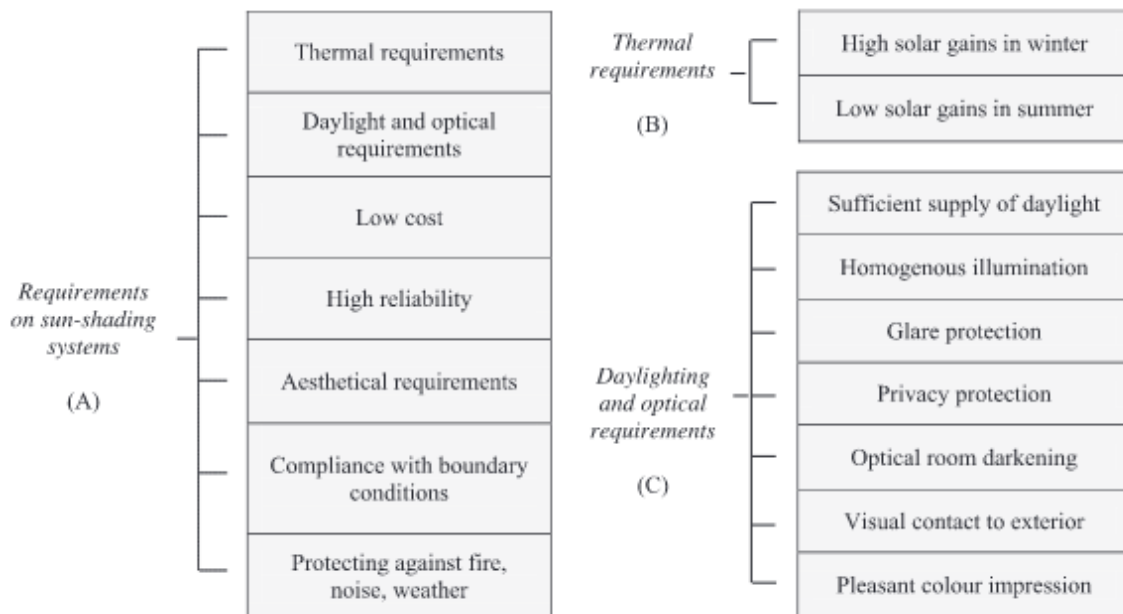


Figure I. 12 : les fonctions des dispositifs de contrôle solaire. Source : (Al-Masrani et al., 2018)

I.3.1 Classification des dispositifs de contrôles solaires

Selon (Al-Masrani et al., 2018) la performance énergétique et l'approche de conception constituent les principaux critères de classification des dispositifs de contrôle solaire. Ces critères permettent de distinguer trois grandes catégories : les systèmes **passifs**, **actifs** et **hybrides** (Figure I. 14).

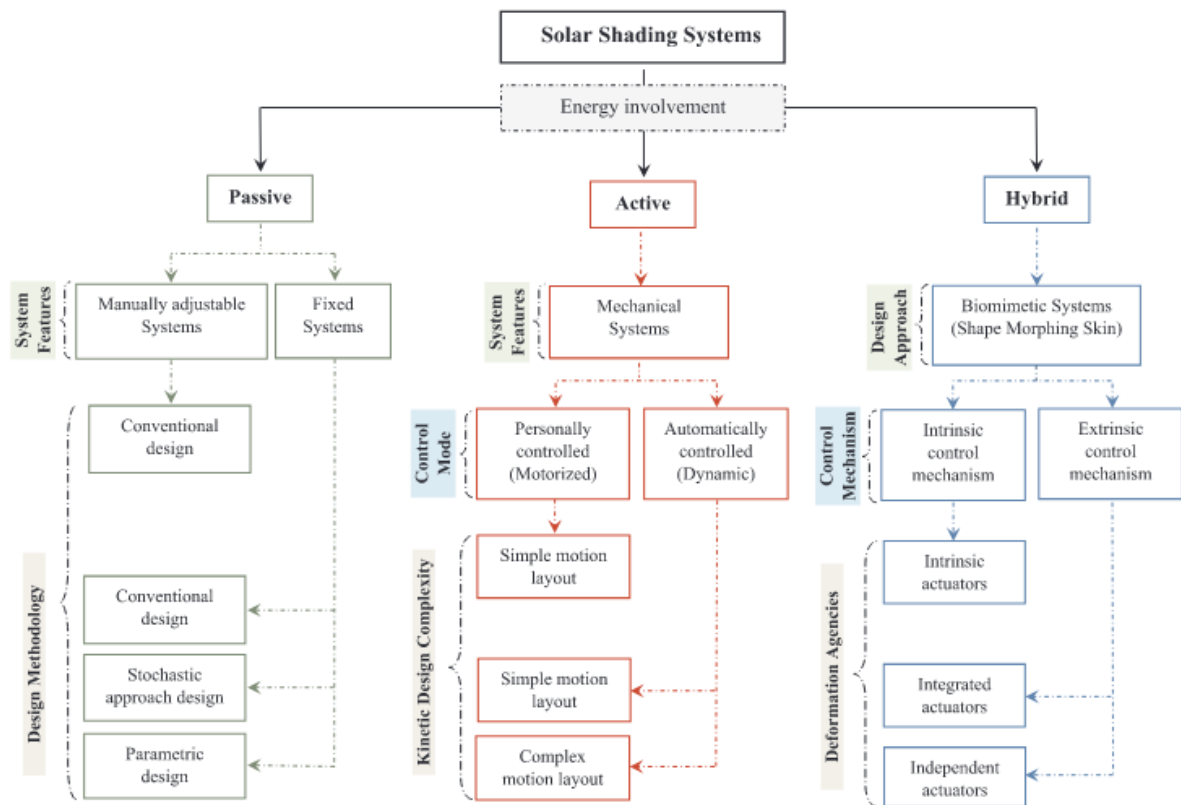


Figure I. 13 : Classification des dispositifs de protections solaire. Source : (Al-Masrani et al., 2018)

I.3.1.1 Systèmes de protection solaire passifs

Cette catégorie regroupe les systèmes de protection solaire conçus selon les principes de l'architecture passive, dont le fonctionnement ne requiert aucun apport énergétique externe. Leur efficacité repose exclusivement sur leur configuration géométrique et leurs propriétés physiques. Ces systèmes se déclinent principalement en deux types : les dispositifs d'ombrage fixes et les dispositifs d'ombrage ajustables

I.3.1.2 Dispositifs de protection solaire fixes

Les dispositifs de protection solaire fixes sont des éléments attachés à la façade du bâtiment, réalisés dans un matériau distinct ou intégrés au système de façade (Kirimtata, 2026). Ils se caractérisent par une géométrie statique, ne présentant aucune capacité de mouvement ou d'adaptation mécanique. Le choix des matériaux et leurs propriétés optiques jouent un rôle déterminant dans la limitation du rayonnement solaire direct, tout en assurant la diffusion et la redistribution contrôlée de la lumière naturelle vers les zones intérieures profondes (O'Brien et al., 2013; Olbina & Beliveau, 2009). Grâce à leur nature statique, ces dispositifs participent à la régulation des niveaux élevés d'éclairage, à la réduction des phénomènes d'éblouissement,

à la diminution des charges thermiques de pointe liées au refroidissement (Al-Masrani et al., 2018; Ossen et al., 2005) (Chen et al., 2015) .

Ces systèmes sont classés en trois types selon leur l'orientation des lamelles, en trois grandes catégories (Figure I. 145)

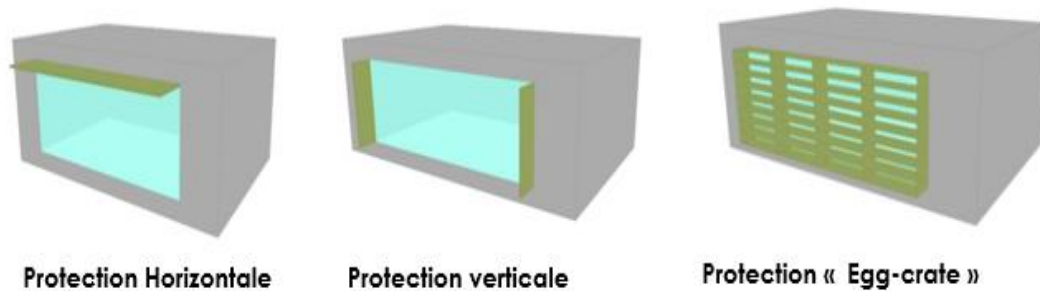


Figure I. 15 : les trois types des protections solaires fixes. Source : (Chen et al., 2015)

- **La protection horizontale** : largement répandue, elle se décline sous diverses formes telles que les auvents, les brise-soleil à lamelles horizontales ou les stores. Ce type de dispositif est particulièrement adapté aux façades orientées au sud ainsi qu'aux ouvertures zénithales (Leighton & Bader, 2010), Ces dispositifs permettent les apports solaires en hiver tout en assurant une protection complète contre le soleil en été.(Kirimtat, 2026)
- **La protection verticale** : sont utilisés lorsque les dispositifs horizontaux deviennent insuffisants, notamment au lever et au coucher du soleil, lorsque l'angle d'incidence solaire est faible. Ils sont particulièrement efficaces pour bloquer les rayons à faible angle sur les façades est le matin et ouest le soir. Ces dispositifs peuvent être constitués d'un panneau unique, de plusieurs panneaux perpendiculaires à la façade vitrée ou de variantes inclinées, parallèles ou perpendiculaires à la façade.(Kirimtat, 2026)

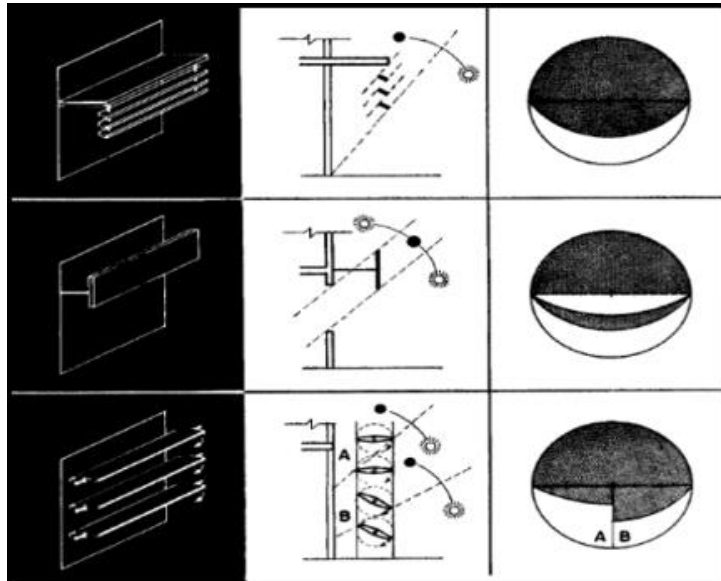


Figure I. 16 : les différentes configurations de protection solaire horizontales. Source : (Olgyay, 1963)

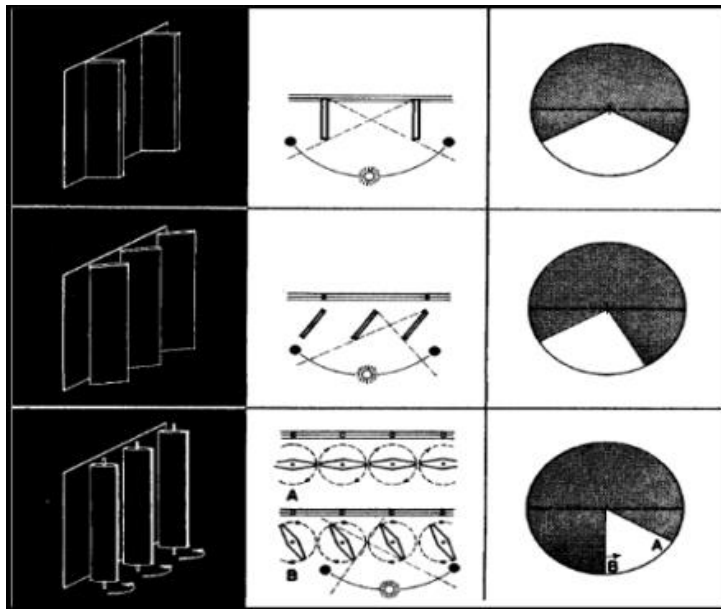


Figure I. 17 : les différentes configurations de protection solaire verticales Source : (Olgyay, 1963)

- La protection mixte ou de type « nid d'abeille » (eggcrate)** : combinant des éléments horizontaux et verticaux, elle se présente généralement sous forme de grilles ou d'écrans décoratifs. Ce dispositif est généralement employé pour les ouvertures orientées sud-est et sud-ouest, il est particulièrement adapté aux climats chauds et secs. Cependant, ces dispositifs présentent certains inconvénients : ils peuvent obstruer la vue vers l'extérieur et, dans le cas de configurations non ajourées, favoriser l'accumulation d'air chaud à l'intérieur du dispositif. Une séparation adéquate entre le dispositif et la façade est donc nécessaire afin de permettre la circulation de l'air et d'éviter le piégeage de la chaleur. (Kirimtat, 2026).

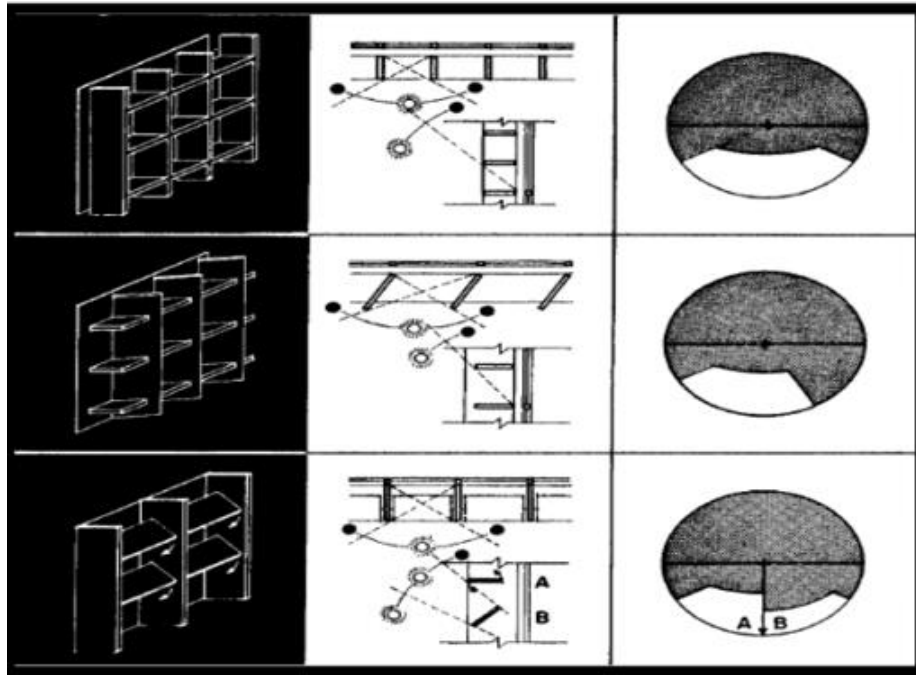


Figure I. 18 : les différentes configurations de protection solaire mixtes . Source : (Olgyay, 1963)

Ces dispositifs peuvent être installés à l'extérieur ou à l'intérieur des baies vitrées. Les protections extérieures sont principalement utilisées pour bloquer le rayonnement solaire avant qu'il ne pénètre dans le bâtiment, contribuant ainsi à des économies d'énergie. En général, les protections solaires externes sont plus performantes que les protections internes (Datta, 2001; Valladares-Rendón et al., 2017)

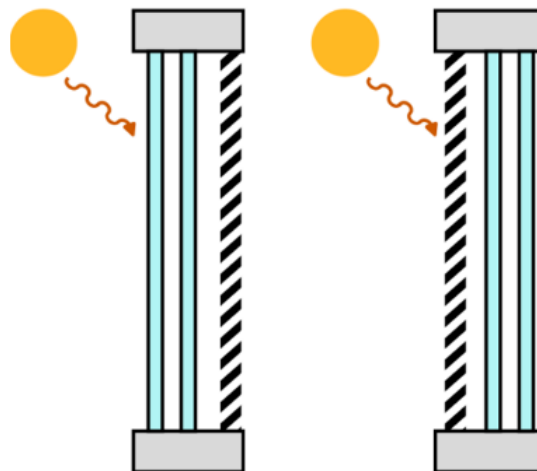


Figure I. 19 : Positions possibles de systèmes de contrôle solaire : à gauche : à l'intérieur, à droite : à l'extérieur. Source : (Ziasistani et al., 2025)

Malgré les avantages des dispositifs d'ombrage statiques, historiquement utilisés à des fins esthétiques ou fonctionnelles, ils présentent encore des limitations en termes de performance lumineuse (Mandalaki et al., 2012; Ogunyemi et al., 2015) . Les études récentes indiquent que

de nombreux problèmes des systèmes d'ombrage traditionnels peuvent être résolus en passant d'un concept statique à un concept mobile et adaptable (Perino & Serra, 2015)

I.3.1.3 Dispositifs de protection solaire mobiles ajustables manuellement

Les dispositifs de protection solaire ajustables se distinguent par leur aptitude à répondre aux variations des conditions climatiques extérieures (Yao et al., 2016). Par rapport aux systèmes fixes, ils contribuent à la réduction des apports solaires thermiques, de l'excès de lumière naturelle et de l'éblouissement, notamment en période estivale ou lors d'une forte exposition solaire, tout en permettant un contrôle efficace du rayonnement diffus (O'Brien et al., 2013) (Yao, 2014).

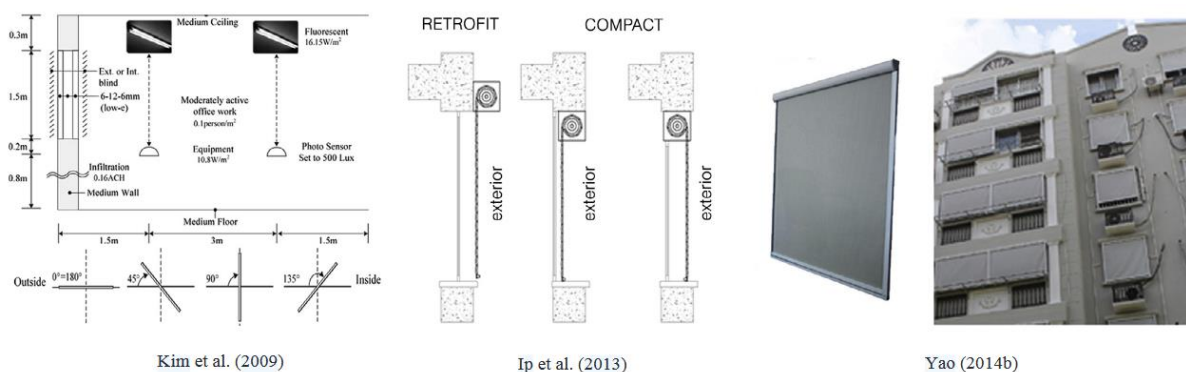


Figure I. 20 : Études et conceptions de systèmes de protection solaire réglables manuellement.
Source : (Al-Masrani et al., 2018)

Ces systèmes offrent également aux occupants une certaine maîtrise de leur environnement intérieur, en leur permettant d'ajuster les conditions de confort visuel et thermique ainsi que de préserver leur intimité en fonction de leurs besoins (Nicol & Humphreys, 2002; O'Brien et al., 2013). Leur large adoption, telles que les stores vénitiens, enroulables ou verticaux, et les brise-soleil orientables explique en partie par un coût d'installation relativement faible comparativement aux dispositifs entièrement automatisés (Yao, 2014) (Yao et al., 2016). Toutefois, leur efficacité dépend fortement des comportements et des préférences des usagers, ce qui peut engendrer des écarts entre les performances théoriques et réelles (Borgeson & Brager, 2008; O'Brien et al., 2013).

I.3.2 Systèmes de protection solaire actifs

Les systèmes de protection solaire actifs correspondent à des dispositifs mécaniques mobiles nécessitant une source d'énergie pour fonctionner. Ils se déclinent en deux catégories : les dispositifs motorisés et les dispositifs de protection solaire dynamique

I.3.2.1 Systèmes de protection solaire motorisés

Cette catégorie correspond à une évolution avancée des dispositifs de protection solaire réglables manuellement, dans laquelle les mécanismes passifs traditionnels, tels que les cordes, chaînes ou tiges sont remplacés par des moteurs électriques. Ces derniers peuvent être commandés individuellement, soit par des interrupteurs muraux, soit à distance à l'aide de télécommandes ou de dispositifs sans fil (Kim et al., 2009)

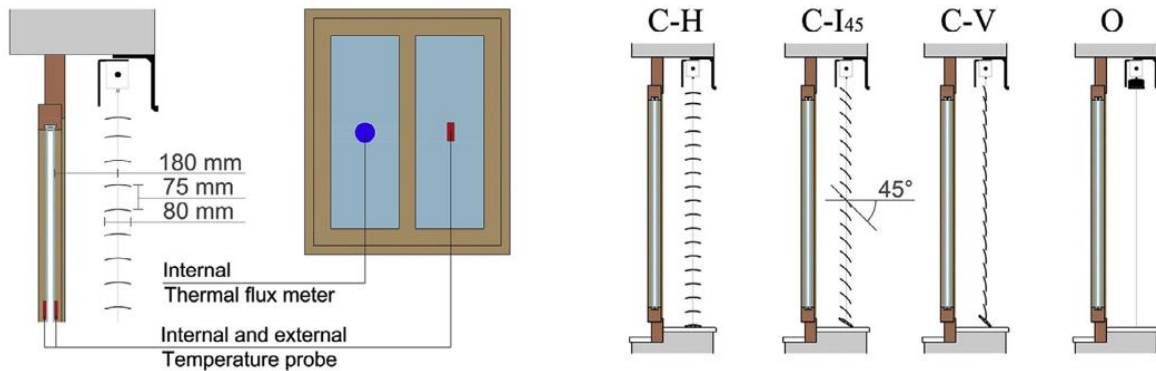


Figure I. 21 : Stores vénitiens extérieurs motorisés. Source : (Al-Masrani et al., 2018)

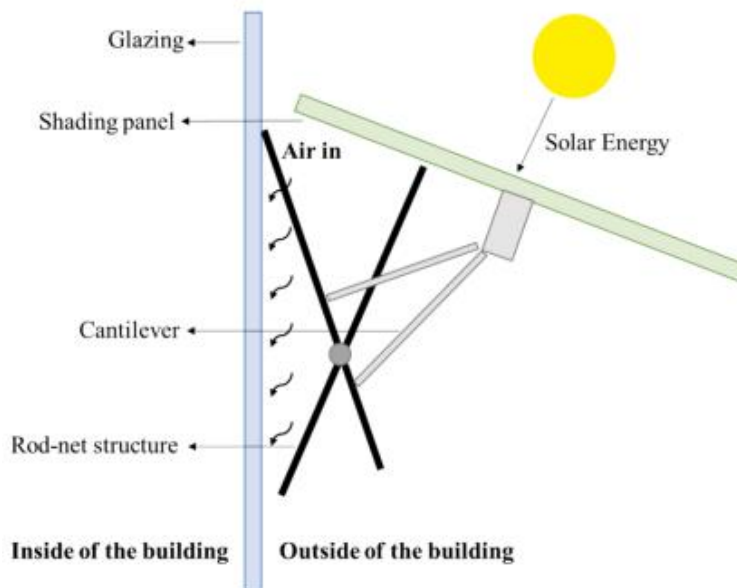


Figure I. 22 : dispositif d'ombrage au niveau d'une ouverture : Source : (Kirimtat, 2026)

Bien que ces systèmes présentent une structure technologique plus élaborée que celle des protections mobiles passives, leur conception reste, dans la majorité des cas, fondée sur des solutions conventionnelles. Elles se caractérisent par des géométries simples et des schémas cinématiques élémentaires, tels que les stores enroulables à mouvement planaire unique ou les stores vénitiens à rotation axiale indépendante des lames. Les protections solaires motorisées

offrent néanmoins une meilleure fluidité de fonctionnement et une facilité d'utilisation accrue, bien que leur coût d'investissement initial soit généralement plus élevé (Kim et al., 2009)

Malgré cet surcoût, ces dispositifs surpassent les systèmes manuels traditionnels en termes de confort d'usage et de potentiel d'économies d'énergie (O'Brien et al., 2013). Ils participent également à l'instauration d'une interaction plus active entre l'utilisateur et le bâtiment. Les préférences des occupants vis-à-vis du contrôle de ces systèmes peuvent toutefois être influencées par plusieurs facteurs, notamment le type d'interface de commande, la gestion de l'éclairage artificiel, le système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), la présence de fenêtres ouvrantes, la qualité de la vue extérieure et l'aménagement du mobilier intérieur (O'Brien & Gunay, 2014).

Par ailleurs, l'évaluation des performances réelles des protections solaires motorisées demeure complexe, car elle est soumise aux mêmes incertitudes que celles rencontrées pour les systèmes ajustables manuels, en particulier en raison de la difficulté à modéliser de manière fiable le comportement des occupants (Borgeson & Brager, 2008). En outre, le développement de ces dispositifs reste largement cantonné à des modèles à mouvements simples, laissant un potentiel d'innovation encore peu exploré

La principale limitation de ces systèmes réside dans la fluctuation de leur commande, influencée par les attitudes personnelles des occupants, lesquelles ne répondent pas toujours aux exigences visuelles et thermiques optimales (Yao, 2014).

I.3.2.2 Systèmes de protection solaire dynamiques

Le deuxième groupe regroupe les systèmes de protection solaire dynamiques, caractérisés par leur capacité de mouvement et leur adaptation aux conditions environnementales intérieures et extérieures (Saci Hadeef et al., 2025c). Ces dispositifs reposent sur l'intégration de technologies actives et de processus d'automatisation, à l'instar des systèmes dynamiques intelligents (Loonen et al., 2013a). Selon le degré d'intervention de l'occupant dans le processus de contrôle, ce groupe peut être subdivisé en deux catégories : les systèmes réactifs, qui répondent automatiquement aux variations extérieures sans intervention directe de l'utilisateur (Kolodziej & Rak, 2013) et les systèmes interactifs, qui autorisent une participation de l'occupant à travers des mécanismes de contrôle logique (Achten, 2011)

La protection solaire dynamique représente une stratégie bioclimatique performante, car elle dépasse les limites des systèmes fixes en s'adaptant aux variations continues des angles solaires.

Elle permet ainsi des ajustements en temps réel favorisant des économies d'énergie significatives (Wang et al., 2025) (Saci Hadeef et al., 2025b).

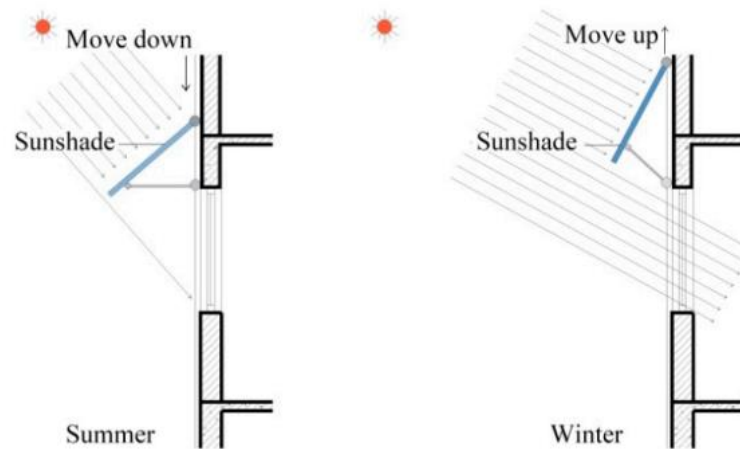


Figure I. 23 : Variation de la position d'un panneau de protection solaire dynamique selon la variation de l'angle solaire . Source : (Wang et al., 2025)

Il convient toutefois de souligner que le concept d'ombrage dynamique intelligent ne se limite pas exclusivement aux dispositifs mobiles. Il englobe également des technologies non mobiles, telles que les vitrages intelligents ou électrochromes, capables de modifier leurs propriétés optiques en réponse à des stimuli environnementaux (Rezaei et al., 2017).

Les protections solaires dynamiques se distinguent principalement par l'adoption du contrôle automatique afin de répondre de manière proactive aux variations climatiques, grâce à l'intégration de technologies intelligentes (Giovannini et al., 2015). Le qualificatif dynamique renvoie ici à un processus de transformation continue induit par des stimuli variables, tels que la lumière et la chaleur, qui influencent la configuration et le comportement du système. Dans ce contexte, les dispositifs dynamiques sont en mesure de reconfigurer leurs éléments en fonction de la trajectoire solaire (velikov & thün, 2013) au moyen de composants transformables évoluant dans le temps sous l'effet des interactions entre forces et mouvements. Cette capacité d'adaptation permet à ces systèmes de répondre à une large gamme de conditions extérieures afin d'assurer un niveau adéquat de confort intérieur (velikov & thün, 2013).

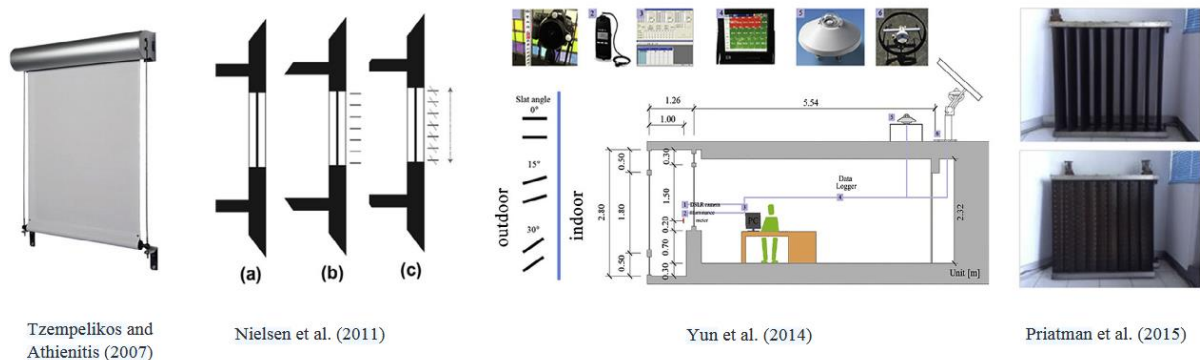


Figure I. 24 : Modèles de dispositifs de protection solaire dynamiques conventionnels issus de différentes études. Source : (Al-Masrani et al., 2018)

Néanmoins, les protections solaires dynamiques actives reposent entièrement sur des processus automatisés pour réaliser ces adaptations, selon des règles de fonctionnement prédéfinies (Karanouh & Kerber, 2015a) .

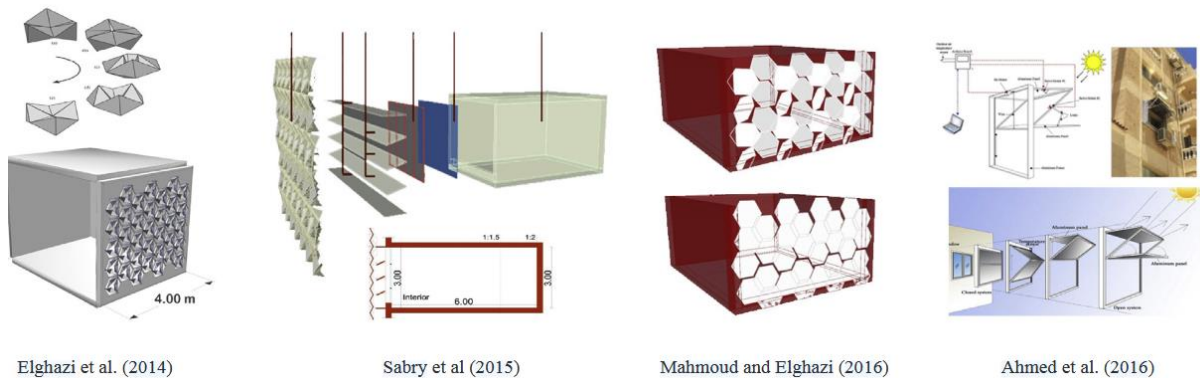


Figure I. 25 : Modèles de dispositifs de protection solaire dynamiques cinétique issus de différentes études. Source : (Al-Masrani et al., 2018)

Leur mise en œuvre nécessite ainsi trois composantes fondamentales : un réseau de capteurs chargé de collecter les données environnementales, un contrôleur destiné à analyser ces informations et à déterminer les actions appropriées, et des actionneurs mécaniques responsables de l'exécution des mouvements (Al-Obaidi et al., 2017; Konstantoglou & Tsangrassoulis, 2016) ,(Wang et al., 2025)). Dans ce contexte, on peut distinguer :

I.3.2.3 Configuration de mouvement simple (dispositifs de contrôle solaire dynamique conventionnels)

Les systèmes dynamiques conventionnels se caractérisent par leur conception cinétique simple. Leurs formes géométriques peuvent inclure un élément mobile unique, comme un store enrouleur avec un mouvement planaire unique (système d'ombrage 2D), ou un dispositif

composé de plusieurs éléments identiques, tels que des stores vénitiens, des lames orientables ou des ailettes avec rotation axiale (système d'ombrage 3D).

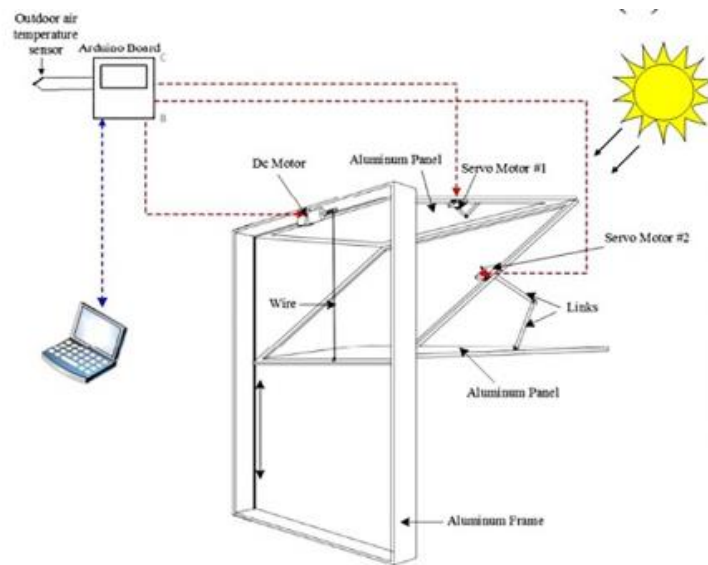


Figure I. 26 : Composants d'un système dynamique cinétique Source :(Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019)

I.3.2.4 Configuration de mouvement complexe (dispositifs de contrôle solaire dynamique cinétique)

Ce groupe inclut des modèles innovants caractérisés par des configurations de mouvement complexes et des conceptions mécaniques avancées reposant sur les principes de la cinétique. En physique, la cinétique renvoie à la relation qui régit un ensemble de mouvements, plus précisément aux interactions entre les mouvements et leurs sources, telles que les forces et les couples. Dans ce contexte, Moloney (2011) définit la cinétique comme la transformation d'éléments dans l'espace à travers plusieurs mouvements distincts (Moloney, 2011). Sur cette base, quatre mouvements cinétiques primaires peuvent être distingués : le mouvement translationnel dans une direction plane linéaire, le mouvement de rotation autour d'un axe, le mouvement d'échelle caractérisé par la contraction ou l'expansion de la taille d'un module, ainsi que la déformation de la matière, comme illustré à la figure I.27 (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Moloney, 2011). (Waseef & El-Mowafy, 2017) en s'inspirant des travaux de (Moloney, 2011), ont proposé une classification élargie des mouvements possibles des systèmes de contrôle solaire, incluant le glissement et le pliage comme sous-catégories de la translation, ainsi que la rotation à un ou plusieurs axes comme sous-catégories de la rotation.

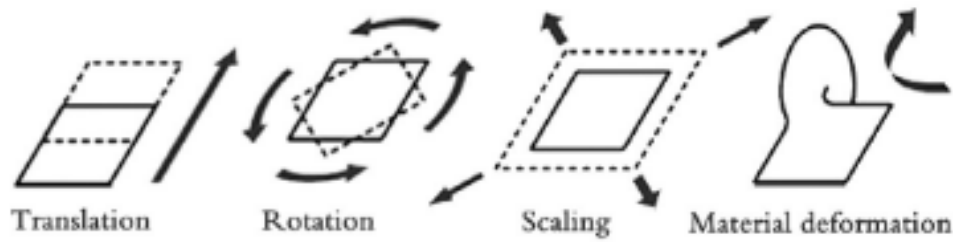


Figure I. 27 les mouvements cinétiques primaires. Source : (Moloney, 2011)

Selon (Brzezicki, 2024), les systèmes de contrôle solaire dynamique se divisent en deux catégories selon leur type de transformation géométrique : le mouvement et la déformation

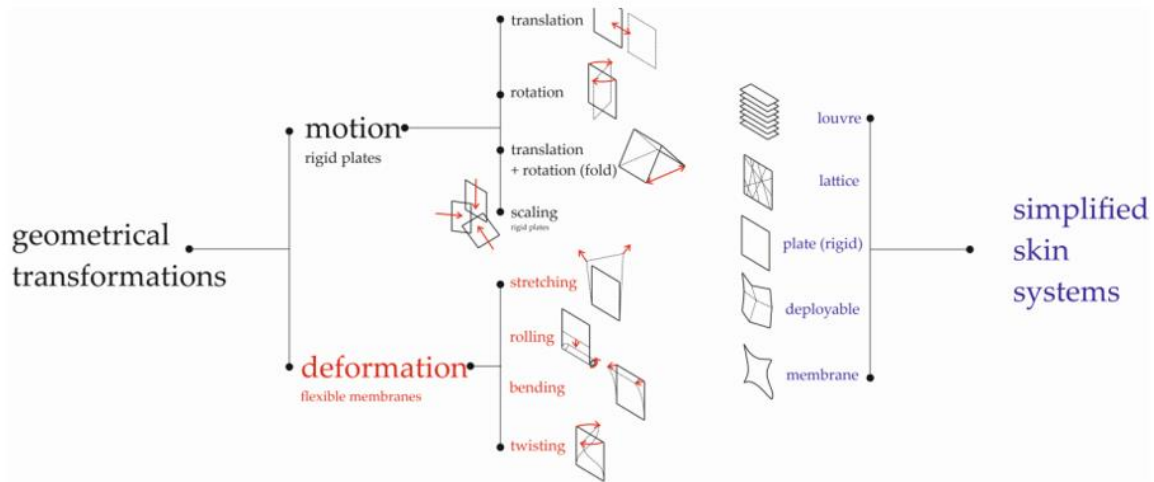


Figure I. 28 : Catégorisation simplifiée des mouvements, des déformations des systèmes de contrôle solaire . Source : (Brzezicki, 2024)

Le mouvement peut être défini comme un changement de position d'un élément rigide dans l'espace. Selon (Schumacher et al., 2010) , il peut être ramené à trois types fondamentaux : la rotation, la translation, ou une combinaison des deux. (Waseef & El-Mowafy, 2017) propose également des définitions claires de ces deux formes de mouvement : la translation correspond au déplacement d'un composant dans une direction plane constante, tandis que la rotation décrit le mouvement d'un objet autour d'un axe. Ainsi, la rotation implique un changement d'orientation sans modification de position, alors que la translation représente l'inverse, c'est-à-dire un changement de position sans modification d'orientation.

Les systèmes pliants peuvent être considérés comme une combinaison de ces deux types de mouvement, puisqu'ils impliquent des déplacements résultant à la fois de translations et de rotations d'éléments rigides articulés.

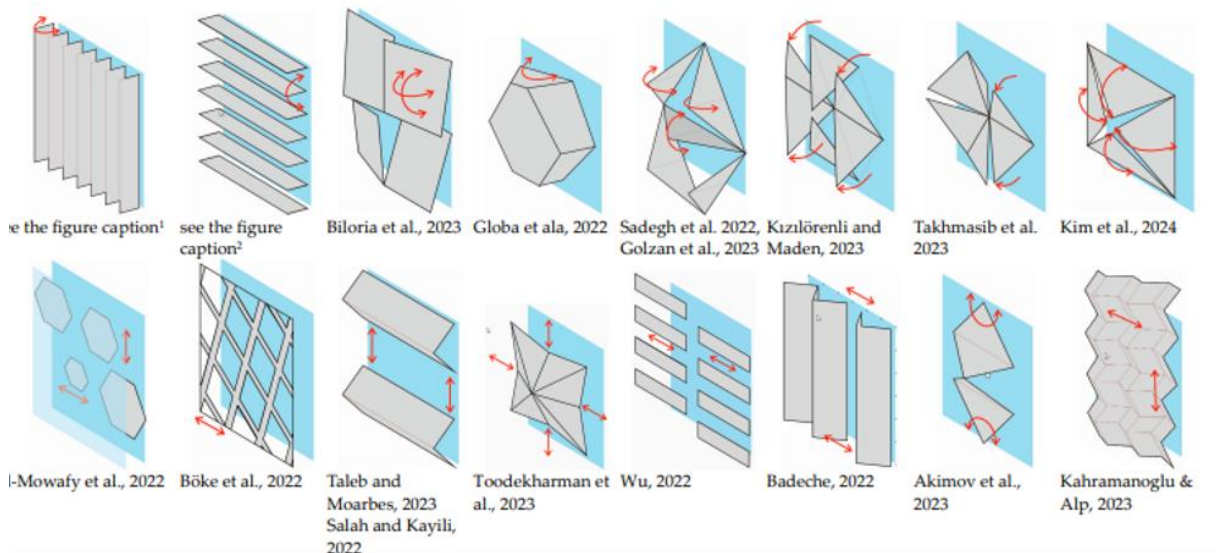


Figure I. 29 : Modèles de mouvement de dispositifs de protection solaire issus de différentes études.
Source : (Brzezicki, 2024)

La déformation, quant à elle, correspond à une transformation géométrique qui modifie la forme d'un élément non rigide. Elle peut se manifester sous différentes formes, notamment l'étirement, l'enroulement comme dans les stores à rouleau, la flexion ou la torsion, le déploiement, le cisaillement ainsi que le vibrage des éléments déformables..

Cette liste n'est pas exhaustive, car de nouvelles formes de déformation peuvent encore être conceptualisées, simulées et testées. La déformation nécessite généralement l'application d'une force externe, à l'exception de certains matériaux intelligents (Smart Materials, SMA) capables de se déformer de manière autonome.

Moloney inclut également la mise à l'échelle dans la catégorie du mouvement, qu'il définit comme une expansion ou une contraction dimensionnelle (Moloney, 2009) Cependant, cette interprétation est considérée comme simplificatrice. L'analyse de cas présentée dans la revue montre en effet que la mise à l'échelle peut résulter soit d'un mouvement, soit d'une déformation. (Waseef & El-Mowafy, 2017) la décrivent comme une action basée sur la rotation ou la translation, sans toutefois fournir d'exemple concret pour la seconde (Brzezicki, 2024)

Par ailleurs, l'intégration de différents types de mouvements peut générer des mouvements plus complexes, tels que des mouvements directionnels, torsadés ou roulants (Moloney, 2009) conduisant à des compositions spatiales riches et variables (Schaeffer et Vogt, 2010). De plus, (Fiorito et al., 2016) soulignent que plusieurs typologies peuvent être dérivées de chaque mouvement de base en tenant compte du degré de liberté des axes de coordonnées.

I.3.3 Systèmes de protection solaire hybrides

Le troisième groupe comprend les systèmes mobiles qui adoptent une approche combinant des méthodes actives et passives, dont la peau est constituée de matériaux déformables, souvent capables de transformations réversibles sous activation par différents stimuli, notamment la chaleur, la lumière et l'humidité (Fiorito et al., 2016) . Les systèmes de protection solaire hybrides exploitent la capacité de déformation des matériaux intelligents pour produire des mouvements spatiaux. (Addington & Schodek, 2005) ont indiqué que la déformation élastique fournit aux systèmes dynamiques une stratégie efficace d'altération de la forme, combinant légèreté et faible complexité mécanique.

la conception de ces systèmes s'inspirent des principes de la biomimétique, une méthode qui reproduit les systèmes, modèles et éléments de la nature afin de résoudre des problèmes techniques (Al-Obaidi et al., 2017; Fiorito et al., 2016). En particulier, les mouvements des plantes qui fournissent aux architectes un modèle inspirant en raison de leurs attributs morphologiques et anatomiques (Schumacher et al., 2010) .

Ce champ propose une nouvelle vision pour la conception de protections solaires fondée sur la morphologie et les règles de déformation (shape-morphing). En principe, la protection solaire à morphologie variable représente l'une des applications des façades intelligentes (Grosso & Basso, 2013) et adaptatives, simulant la structure et les fonctions de la peau biologique. Cette approche repose sur les matériaux intelligents pour réduire considérablement la consommation énergétique active (Al-Obaidi et al., 2017)

Lelieveld (2013) définit un matériau intelligent comme un matériau multifonctionnel doté de propriétés de détection et d'action. Ce type de matériau réagit aux changements de son environnement selon des stimuli spécifiques. Les matériaux réactifs aux stimuli constituent le type de matériaux le plus approprié pour une enveloppe à morphologie variable : ils peuvent modifier leurs caractéristiques physiques ou chimiques en réponse à des stimuli tels que la

chaleur, la tension, l'humidité ou la lumière ; des exemples incluent les matériaux thermo-réactifs et électro-réactifs (Fiorito et al., 2016) .

Pour les systèmes de contrôle solaire adaptatifs, de nombreux matériaux intelligents sont utilisés, notamment :(Hraska, 2018)

- **Matériaux sensibles à la température** (alliages à mémoire de forme, polymères à mémoire de forme, hybrides à mémoire de forme, polymères thermo chromiques, matériaux thermo tropes, matériaux à changement de phase (PCM) .
- **Matériaux réactifs au rayonnement solaire** (polymères photosensibles, matériaux photochromiques, cellules photovoltaïques)
- **Matériaux chromogènes** (vitrages électrochromes, matériaux gasochromiques, cristaux liquides, dispositifs à particules en suspension)
- **Autres matériaux** (polymères électroactifs, matériaux piézoélectriques, matériaux à propriétés magnétiques variables).

Dans ce contexte, (Attia et al., 2015) a précisé que le fonctionnement d'une enveloppe adaptative peut être intrinsèque ou extrinsèque. Ainsi, l'étude distingue deux types de systèmes hybrides de protection solaire selon le mécanisme de transformation. mécanismes de contrôle intrinsèques, et mécanismes de contrôle extrinsèques.(Loonen et al., 2013b)

- **Mécanisme de contrôle intrinsèque**

Ce type de système de protection solaire repose sur des actionneurs intrinsèques intégrés directement aux éléments de protection solaire, sans ajout ou insertion de matériaux externes. Ces systèmes peuvent adapter leur enveloppe adaptative, laquelle fonctionne de manière innée dans son contexte environnemental (Al-Obaidi et al., 2017) Bien que ces dispositifs semblent réagir naturellement aux variables climatiques sans activation externe, leur capacité à contrôler et ajuster leurs mouvements en fonction des conditions extérieures et des besoins humains reste incertaine.

- **Mécanisme de contrôle extrinsèque**

Cette catégorie de systèmes de protection solaire repose sur une intervention externe pour initier la modification de forme de leurs éléments ; elle utilise des matériaux intelligents nécessitant une faible quantité d'énergie conventionnelle pour contrôler leur déformation via des capteurs (Al-Obaidi et al., 2017) . Dans ce contexte, on peut distinguer :

I.3.3.1 Le système de contrôle solaire avec actionneurs intégrés

Dans ce type de modèles d'ombrage, les matériaux intelligents (actionneurs) et la peau d'ombrage physique apparente sont intégrés en une seule couche, c'est-à-dire que les actionneurs sont incorporés directement dans la peau d'ombrage, souvent fabriquée à partir de matériaux élastiques.

I.3.3.2 Le système de contrôle solaire avec actionneurs indépendants

Dans cette catégorie, les matériaux intelligents (actionneurs) sont placés comme des éléments indépendants au sein des membres structurels pour produire un mouvement. La déformation de ces actionneurs stimule les matériaux passifs des éléments d'ombrage afin de réaliser des mouvements spécifiques.

Les dispositifs d'ombrage fixes. Malgré leur rentabilité et leur facilité de mise en œuvre, les performances des dispositifs fixes par leur caractère statique présentent des limites pour faire face aux conditions météorologiques changeantes tout au long de l'année.

Malgré les progrès enregistrés dans la conception des dispositifs d'ombrage mécaniques, tels que les contrôleurs, la performance et l'applicabilité des systèmes de bâtiments intelligents, cette conception fait l'objet de nombreuses critiques en raison de sa complexité, de son coût et de sa consommation énergétique élevée. En conséquence, les systèmes hybrides enrichissent les conceptions de contrôle solaire par des solutions écologiques, adaptables et durables.

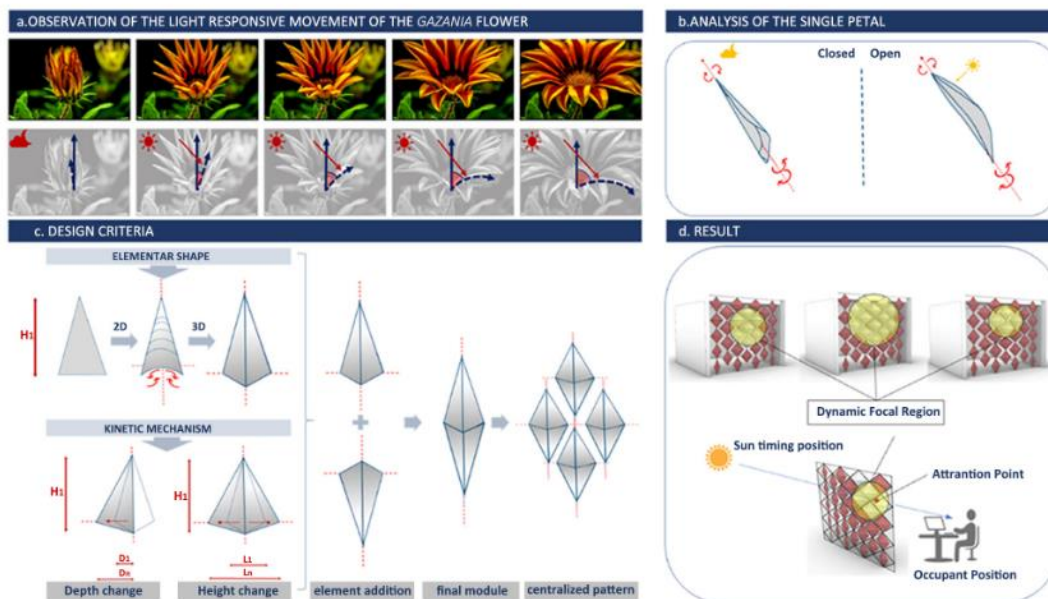


Figure I. 30 : système de contrôle solaire biomimétique. Source : (Wang et al., 2025)

L'intégration de dispositifs de protection solaire avec des matériaux intelligents, combinée aux spécificités climatiques régionales, peut améliorer significativement la performance énergétique des bâtiments et réduire la dépendance aux énergies non renouvelables

Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence le rôle central du rayonnement solaire dans la conception architecturale, en tant que facteur déterminant du confort thermique et visuel ainsi que de la performance énergétique des bâtiments. L'analyse des principes du contrôle solaire a montré que la maîtrise des apports solaires ne peut être dissociée des choix architecturaux fondamentaux, tels que la forme du bâtiment, son orientation, la configuration des façades et le traitement des ouvertures.

L'évolution des stratégies de contrôle solaire, depuis les approches passives fondées sur la morphologie architecturale jusqu'aux dispositifs d'ombrage fixes et mobiles, révèle une complexification progressive des solutions, motivée par les exigences croissantes en matière de confort et d'efficacité énergétique. Si les dispositifs traditionnels permettent une régulation partielle du rayonnement solaire, leurs limites apparaissent face à la variabilité climatique et aux besoins changeants des usagers.

Ainsi, la nécessité de solutions plus flexibles et réactives s'impose, ouvrant la voie aux systèmes d'ombrage adaptatifs et intelligents. Ces derniers constituent une réponse prometteuse aux enjeux contemporains de l'architecture durable et justifient l'intérêt porté, dans les chapitres suivants, à l'exploration de nouvelles approches intégrant adaptation, performance énergétique et qualité environnementale des espaces bâtis.

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : cadre conceptuel

II Introduction

Le biomimétisme et la conception paramétrique représentent aujourd'hui deux axes complémentaires de l'innovation architecturale. Le premier, le biomimétisme, s'inspire des formes, processus et systèmes du vivant pour développer des solutions durables et performantes, répondant aux enjeux énergétiques, environnementaux et sociaux contemporains. Il ne se limite pas à la simple imitation de la nature, mais cherche à traduire les principes d'efficacité, de résilience et d'adaptation propres aux écosystèmes dans le domaine du bâtiment. L'architecture biomimétique peut ainsi intervenir à différents niveaux, allant de l'inspiration formelle à la conception de structures adaptatives et de matériaux intelligents capables de répondre dynamiquement aux variations de l'environnement.

Parallèlement, l'approche computationnelle, et en particulier le design paramétrique, offre un cadre méthodologique permettant de transformer ces principes biologiques en solutions concrètes et optimisées. Grâce à des outils de modélisation, de simulation et d'optimisation, les concepteurs peuvent générer un large éventail de variantes, évaluer leur performance énergétique et environnementale, et sélectionner les configurations les plus adaptées aux contraintes spécifiques d'un projet. L'intégration du biomimétisme et de la conception paramétrique constitue ainsi une convergence de la science, de la technologie et de la créativité architecturale, ouvrant la voie à des bâtiments capables d'interagir de manière dynamique avec leur environnement tout en répondant aux exigences de durabilité et de confort.

Ce chapitre propose donc une analyse approfondie des fondements théoriques du biomimétisme en architecture et de l'approche computationnelle, en abordant successivement les définitions, les niveaux d'application, les motivations, ainsi que les outils et méthodes permettant de transférer les stratégies naturelles vers des solutions architecturales performantes. Cette réflexion constitue la base conceptuelle pour les développements pratiques et les expérimentations d'optimisation présentés dans les chapitres suivants.

II.1 le biomimétisme : Notions et concepts

II.1.1 Définition du biomimétisme

Le terme biomimétisme, dérivé des racines grecques bios (vie) et mimikos (imitation), signifie littéralement « l'imitation de la vie ». (Benyus, 1997)

L'origine académique du concept remonte aux années 1950, lorsqu'Otto Schmitt introduisit le terme biomimétique pour désigner le transfert d'analogies issues du vivant vers les technologies humaines. Bien que cette approche ait déjà permis de générer des dispositifs et concepts

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

remarquables, elle reste en phase de développement et son intégration complète dans la pensée et la conception architecturale demande encore du temps.

Le biomimétisme, tel qu'introduit par Janine Benyus dans son ouvrage fondateur *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* (Benyus, 1997), considère la nature comme modèle, mesure et mentor. Benyus a mis en évidence le potentiel transformateur de l'imitation des systèmes, des formes et des processus naturels afin de répondre aux défis humains, notamment en matière de conception durable et d'efficacité énergétique, contribuant ainsi à la création d'une planète plus saine et plus durable (Jalali et al., 2025a)

(Vincent et al., 2006) définit ainsi le biomimétisme comme « l'abstraction de solutions pertinentes à partir de modèles naturels » Dans une perspective architecturale, (Pawlyn, 2011) le décrit comme « l'imitation des principes fonctionnels des formes, des processus et des systèmes biologiques en vue de générer des solutions durables ». De son côté, l'Institut du biomimétisme considère cette approche comme « la science et l'art de reproduire les meilleures stratégies du vivant pour répondre aux besoins humains » (Badarnah, 2015)

Selon Khelil (2018), il s'agit d'examiner les solutions les plus performantes développées par la nature et de les adapter à la résolution de problématiques humaines. En effet, au cours de ses 3,8 milliards d'années d'évolution, la nature a perfectionné des processus et systèmes extrêmement efficaces, susceptibles d'inspirer des réponses aux défis contemporains liés à la consommation d'énergie, à la gestion des ressources et à la réduction du gaspillage (Elghawaby, 2010).

Aujourd'hui, le biomimétisme s'impose comme une voie de recherche en pleine expansion, particulièrement dans les domaines de l'architecture et de l'ingénierie. Qu'il s'agisse de s'inspirer d'organismes vivants, de processus biologiques ou encore de dynamiques écosystémiques, il offre un potentiel considérable pour concevoir un environnement bâti non seulement plus durable mais également capable de s'inscrire dans une logique régénérative (Khelil, 2015; Benyus, 2002)

II.1.2 Cadre sémantique du biomimétisme

Le terme biomimétisme appartient à un champ sémantique riche où plusieurs notions se recoupent sans être parfaitement synonymes. Ces termes traduisent les différentes étapes de l'évolution scientifique et conceptuelle de l'imitation du vivant dans les sciences et dans l'architecture (Chayaamor-Heil et al., 2018) .

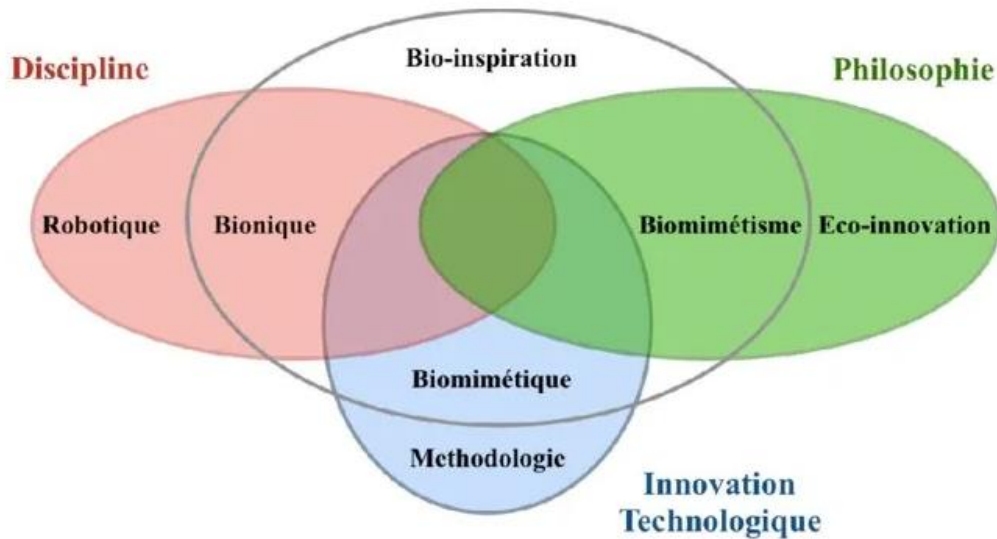


Figure II. 1 : cadre sémantique du mot « biomimétisme, Source : (ISO/TC266, 2015)

- **Bio-inspiration**

(Le biomorphisme) : il s'agit du terme le plus large et le plus ancien. Le biomorphisme fait référence à l'imitation des formes du vivant. (Sommese et al., 2022b) Dans l'architecture, la bio-inspiration peut se limiter à l'imitation des formes (par exemple les motifs végétaux ou animaux dans l'Art nouveau).

- **Bionics**

(bionique en français) : apparu dans les années 1960, ce terme est surtout employé dans les sciences de l'ingénierie et de la robotique. Il désigne l'application directe de mécanismes biologiques à des systèmes artificiels. En architecture, la bionique a influencé certains travaux sur les structures légères ou les mécanismes adaptatifs

- **Biomimetic** (biomimétique)

Terme souvent utilisé dans le domaine des matériaux et des sciences appliquées. Il désigne des systèmes ou matériaux qui reproduisent des propriétés spécifiques du vivant, comme les surfaces auto-nettoyantes ou les polymères à mémoire de forme. Dans l'architecture, la biomimétique renvoie à l'imitation des fonctions, on parle de biomimetic façades ou biomimetic shading systems pour désigner des enveloppes directement inspirées du fonctionnement biologique (Badarnah, 2017) tandis que la bio-utilisation désigne l'utilisation directe de matériaux naturels dans la construction. (Sommese et al., 2022b)

- **Biomimicry** (biomimétisme)

Popularisé par Janine Benyus (1997), ce terme dépasse la simple imitation pour introduire une dimension écologique et systémique. Le biomimétisme vise à reproduire non seulement

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

les formes et les fonctions, mais également les logiques d'efficacité, de résilience et de durabilité propres aux écosystèmes naturels. En architecture, cela signifie concevoir des bâtiments qui fonctionnent comme des organismes intégrés dans leur environnement (Pedersen Zari, 2015).

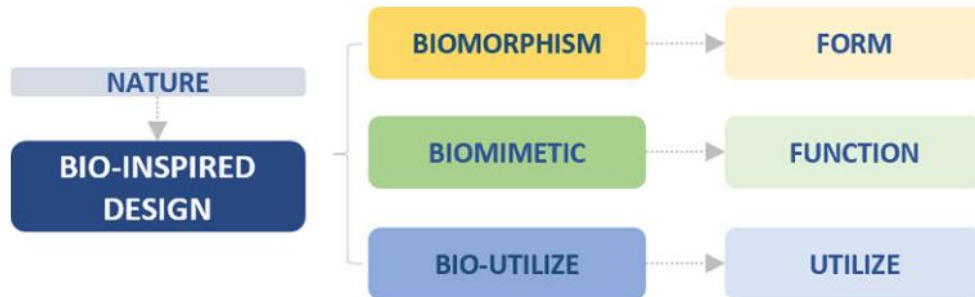


Figure II. 2 : Différences entre les bio-disciplines. Source : (Sommese et al., 2022b)

II.1.3 Niveaux de biomimétisme

Le processus de conception biomimétique peut être décliné selon trois principaux niveaux d'imitation : celui de l'organisme, du comportement et de l'écosystème (Zari, 2007)

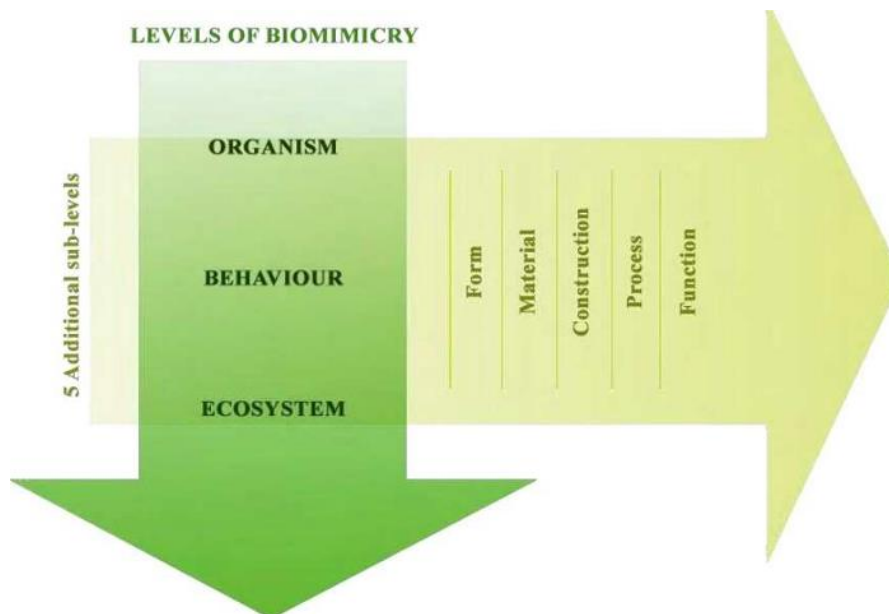


Figure II. 3 : les niveaux du biomimétisme .Source : (El Ahmar et al., 2013)

Le premier niveau, dit organisme, consiste à s'inspirer directement d'un être vivant, qu'il s'agisse d'un végétal, d'un animal ou d'un microorganisme. L'imitation peut porter sur l'organisme dans son ensemble ou bien sur une partie spécifique, comme une feuille, une coquille ou une structure osseuse.

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

Le deuxième niveau concerne le comportement. Ici, l'architecte ou le concepteur s'intéresse non pas à la forme physique de l'organisme mais à sa manière d'interagir avec son environnement. Cela peut inclure la traduction d'un comportement adaptatif particulier ou la reproduction de dynamiques relationnelles entre l'organisme et son contexte (Zari, 2007)

Enfin, le troisième niveau vise l'imitation des écosystèmes. Il s'agit d'intégrer dans la conception les logiques et principes qui assurent le fonctionnement harmonieux et résilient d'un système naturel complexe, comme la gestion des flux d'énergie, de matières et de ressources à l'échelle d'un milieu.

À l'intérieur de chacun de ces trois niveaux, cinq dimensions supplémentaires d'imitation existent. la conception peut être biomimétique, par exemple en termes de ce à quoi elle ressemble (forme), de ce à partir de quoi elle est faite (matériau), de la manière dont elle est faite (construction), de la façon dont elle fonctionne (processus) ou de ce qu'elle est capable de faire (fonction). (Zari, 2007)

II.2 Le biomimétisme en architecture

II.2.1 Nature et architecture : origines et évolution

L'utilisation de la nature comme source d'inspiration architecturale n'est pas un phénomène récent. Depuis l'Antiquité, les bâtisseurs se sont appuyés sur l'observation du vivant pour concevoir des formes, des structures et des dispositifs adaptés à leur environnement. Les Grecs et les Romains, par exemple, s'inspiraient déjà des proportions et des symétries naturelles pour développer leurs ordres architecturaux. Au Moyen Âge, l'architecture gothique exploita les principes de ramification et d'optimisation des forces, analogues à ceux observés dans les arbres et les structures osseuses (Vincent, 2009)

À l'époque moderne, l'architecte Antoni Gaudí fut l'un des premiers à systématiser cette approche. Ses réalisations, comme la Sagrada Família, reprennent directement des modèles biologiques, notamment les colonnes arborescentes et les voûtes inspirées des structures naturelles (Collins, 2005). Plus tard, dans la première moitié du XXe siècle, des pionniers tels que Frei Otto ont exploré l'analogie entre formes naturelles et structures tendues ou réticulées, en étudiant les toiles d'araignées et les bulles de savon pour concevoir des structures légères et efficaces (Otto & Rasch, 1996).

Le terme biomimétisme fut popularisé dans les années 1990 par Janine Benyus, à travers son ouvrage *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* (1997). Elle y définit le biomimétisme comme une discipline visant à « imiter la nature pour résoudre les problèmes humains de manière durable ». Depuis lors, cette approche a pris une dimension scientifique et technologique, notamment grâce aux avancées en modélisation computationnelle, en matériaux

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

intelligents et en fabrication numérique, permettant de traduire les principes biologiques en solutions architecturales concrètes (Badarnah, 2017)

Aujourd'hui, le biomimétisme en architecture ne se réduit plus à une imitation formelle, mais constitue un champ de recherche orienté vers la performance énergétique, le confort thermique et la durabilité environnementale, en alignant les bâtiments avec les lois et les équilibres des écosystèmes naturels

II.2.2 Motivations du biomimétisme en architecture

Les progrès scientifiques et technologiques récents permettent aujourd'hui d'observer et d'analyser le monde vivant avec une précision inédite. Cette capacité accrue a favorisé l'essor du biomimétisme comme domaine de recherche, offrant aux concepteurs de nouvelles possibilités pour comprendre, interpréter et reproduire les solutions de la nature . Selon (Zari, 2012) , l'imitation des organismes et des écosystèmes représente un champ d'investigation en rapide expansion, aussi bien dans le milieu académique que dans le discours architectural et de design (Zari, 2012) Elle identifie trois grandes motivations qui expliquent l'intérêt croissant pour le biomimétisme :

II.2.2.1 Le biomimétisme comme source d'innovation

Le biomimétisme constitue un moteur de création de nouveaux matériaux et technologies. De nombreuses recherches biomimétiques visent à générer des solutions techniques inédites ou à améliorer les performances existantes, sans nécessairement prendre en compte les enjeux environnementaux. Ce type d'approche est particulièrement mobilisé dans les domaines de la robotique, de l'informatique et des sciences des matériaux, où l'accent est mis sur l'efficacité et la performance technologique (Zari, 2012)

II.2.2.2 Le biomimétisme au service de la durabilité

Un second axe repose sur la recherche d'une conception plus durable des matériaux, des produits et de l'environnement bâti. Dans cette perspective, le biomimétisme vise à renforcer la performance écologique des technologies humaines et à intégrer des principes inspirés non seulement des organismes, mais également des processus et stratégies propres aux écosystèmes (Zari, 2007). Comme le souligne Pawlyn (2011), l'imitation des logiques fonctionnelles de la nature permet de réorienter la conception vers des solutions capables de répondre aux défis environnementaux contemporains. Cette approche se distingue du biomimétisme purement technologique, car elle cherche à transformer en profondeur les fondements mêmes de la conception architecturale et urbaine.

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

II.2.2.3 Le biomimétisme pour le bien-être humain

Enfin, la troisième motivation s'intéresse au rôle du biomimétisme dans l'amélioration du bien-être psychologique et émotionnel des individus. En s'appuyant sur une compréhension des liens profonds entre l'être humain et le vivant, cette démarche rejoint le concept de biophilie, qui met en avant l'importance du contact avec la nature pour la santé et l'équilibre humain (Zari, 2012)

II.3 Approches de conception biomimétique en architecture

Les approches du biomimétisme en architecture se répartissent en deux grandes catégories, différenciées par leur point de départ et leur processus de conception, (Sayed, 2021):

II.3.1.1 Approche « Conception se référant à la biologie »

Cette démarche, très utilisée en architecture (Keskas, 2023), est également connue sous les termes. problem-based (Vattam et al., 2009), top-down (Speck et al., 2006), biomimétisme par analogie (Gebeshuber et al., 2008), ou challenge to biology (Baumeister, 2012) (Badarnah-Kadri, 2012).

Cette approche part d'un problème architectural spécifique (surchauffe, éblouissement, gestion des apports solaires) et consiste à rechercher dans la nature des solutions fonctionnelles analogues. Elle repose sur un processus qui commence par l'identification du défi architectural et des fonctions requises, suivi de leur traduction en besoins biologiques afin de faciliter la recherche de modèles naturels pertinents. Les stratégies observées dans ces modèles sont ensuite analysées et abstraites pour être transposées dans le domaine architectural, permettant ainsi le développement d'un concept biomimétique adapté aux objectifs architecturaux, énergétiques et environnementaux.

II.3.1.2 Approche de « Biologie influençant la conception »

Cette approche est également désignée sous les termes :l'approche indirecte, Biomimicry by induction (Gebeshuber and Drack 2008), Biology to Design (Baumeister 2012), bottom-up (Grain et al. 2006), solution-based approach (Badarnah-Kadri, 2012) et biology push) (Biomimétique -Terminologie, concepts et méthodologi, 2015). Bien que moins couramment employée en architecture, cette approche présente un potentiel important, notamment lorsqu'un mécanisme naturel remarquable (auto-ombrage, hygrosensibilité, ventilation, optimisation structurelle) peut être directement traduit en solution innovante pour le bâtiment

Cette approche part d'une stratégie biologique existante et explore son potentiel d'application dans le domaine architectural. Elle consiste d'abord à identifier un organisme ou un mécanisme naturel présentant une fonction pertinente, puis à analyser sa structure, son fonctionnement et ses processus. Les principes observés sont ensuite abstraits afin d'en extraire des concepts

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

transférables, qui peuvent être interprétés et adaptés pour développer des solutions architecturales répondant aux besoins du bâtiment

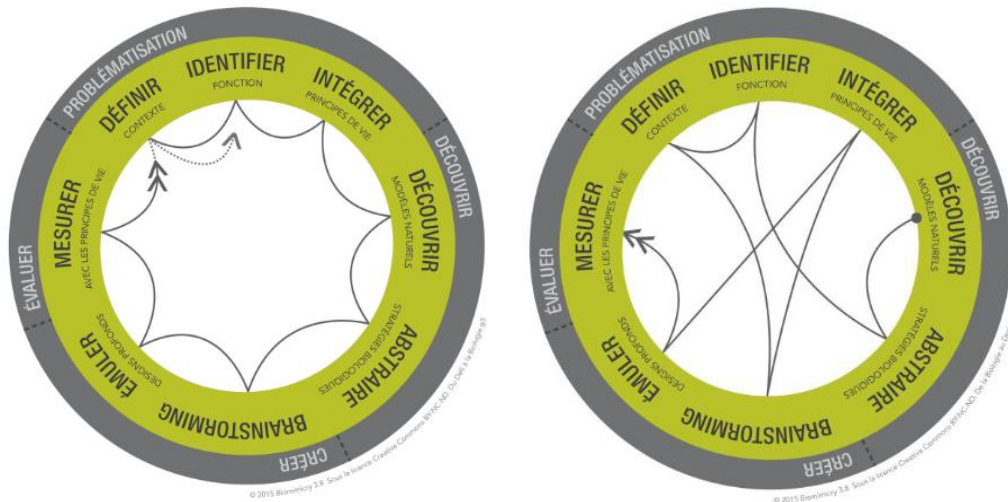


Figure II. 4 : les deux approches de la conception biomimétique .Source : Biomimicry 3.8 (2015)

Ces deux démarches ne s'opposent pas, mais sont complémentaires : la première est orientée par les besoins du projet, la seconde par la découverte scientifique et l'inspiration biologique.

II.4 Le biomimétisme appliqué au contrôle solaire

L'énergie solaire, qui constitue l'une des ressources naturelles et renouvelables les plus importantes, peut être gérée à travers l'enveloppe du bâtiment selon des approches inspirées des innombrables stratégies adaptatives présentes dans la nature (Jalali et al., 2025a)

Dans le champ du biomimétisme, les solutions émergent par l'émulation de stratégies, de mécanismes et de principes observés dans la nature (Ashraf & Abdin, 2024)

La nature est reconnue comme l'une des sources d'inspiration les plus importantes pour les CABS. L'adaptabilité est omniprésente dans le vivant, et les efforts de biomimétisme visant à transposer les solutions éprouvées par la nature au contexte architectural se révèlent particulièrement fructueux. (Loonen et al., 2013b)

II.4.1 Les stratégies adaptatives des plantes

L'inspiration issue des plantes est fréquemment mobilisée en architecture biomimétique, les plantes constituent des structures flexibles et sensibles aux conditions climatiques ; en réponse, ils ont développé de nombreuses stratégies et caractéristiques leur permettant de s'adapter et de surmonter ces contraintes environnementales (Bijari et al., 2025b)

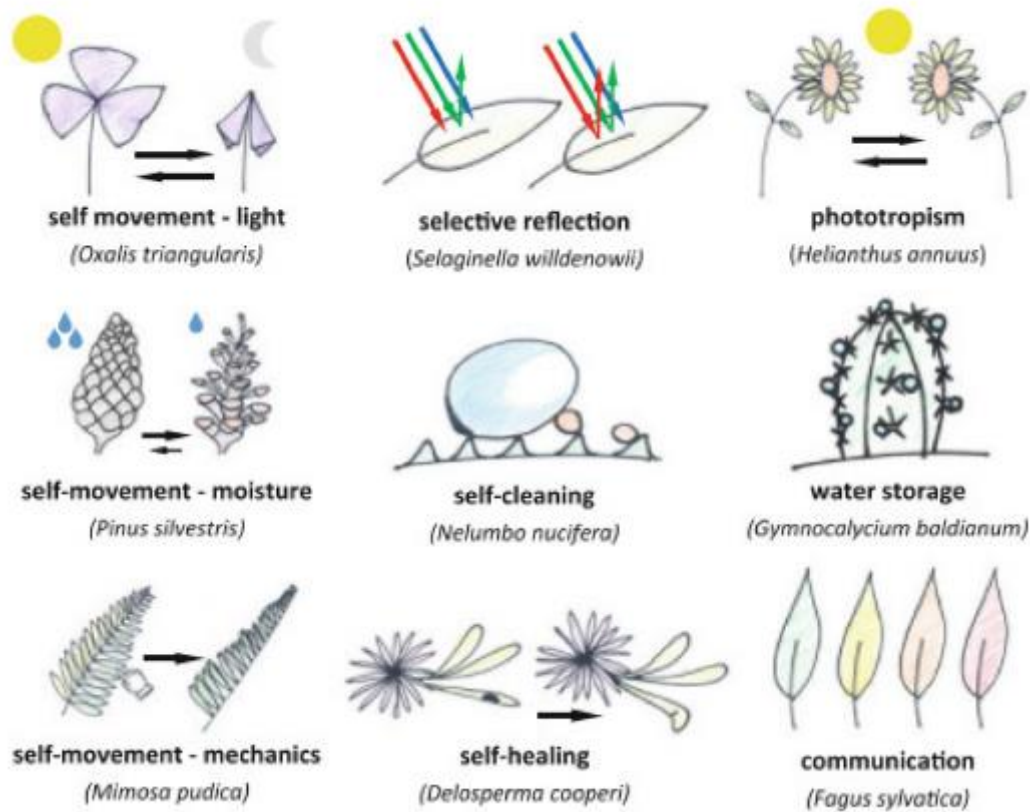


Figure II. 5 : Quelques stratégies adaptatives adoptées par les plantes :Source : (Tabadkani et al., 2021)

II.4.1.1 Les types d'adaptation chez les plantes

La nature développe trois stratégies fondamentales pour assurer la survie des organismes (Al-Vattam et al., 2009 ,Obaidi et al., 2017 ; Badarnah, 2017 ; Tabadkani et al., 2021) :

- les adaptations **physiologiques**, qui permettent de maintenir un état d'équilibre face à des stimuli environnementaux instables ;
- les adaptations **morphologiques**, qui renvoient à des caractéristiques telles que les motifs, les dimensions et les formes, améliorant la capacité des organismes à s'adapter à des conditions environnementales variées ;
- les adaptations **comportementales**, qui correspondent aux actions mises en œuvre par les organismes pour survivre . (Loonen et al., 2013b)

II.4.1.2 Les mouvements adaptatifs des plantes

Les plantes et les bâtiments partagent des similitudes dans leur interaction avec l'environnement, notamment du fait de leur caractère immobile. Les plantes doivent gérer de manière autonome leur température, leur exposition à la lumière et d'autres besoins vitaux,

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

tandis que les bâtiments doivent intégrer des mécanismes pour contrôler les gains solaires, la circulation de l'air, la régulation thermique et l'apport de lumière naturelle afin d'assurer le confort des occupants (Bijari et al., 2025b) . Cette immobilité a conduit les plantes à développer des stratégies adaptatives face à divers facteurs environnementaux évoluant au fil des générations en réponse à un environnement changeant ((Bijari et al., 2025b)

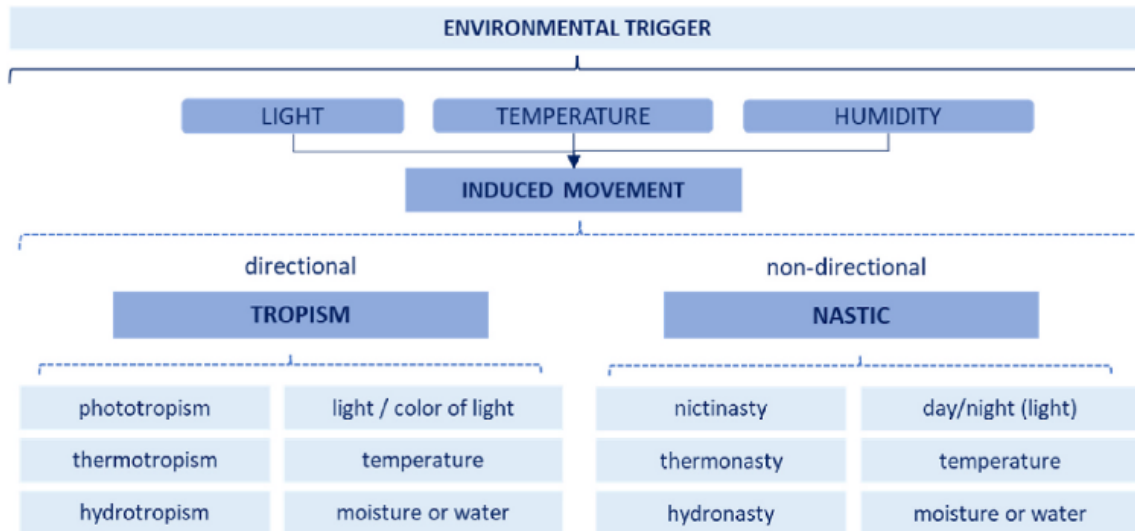


Figure II. 6 : les principaux mouvements adaptatifs des plantes. Source : (Sommese et al., 2024a)

Bien qu'apparentes statiques, les plantes possèdent une grande diversité de mouvements adaptatifs qui leur permettent de réguler efficacement leur exposition aux stimuli environnementaux tels que la lumière, la température, l'humidité ou la vitesse du vent (Al-Obeidi et al., 2018; Sommese et al., 2024)). Ces mouvements constituent des stratégies biologiques essentielles pour la survie, l'optimisation des échanges énergétiques et la reproduction, et sont déclenchés par des facteurs environnementaux agissant comme stimuli , Comme illustré dans le schéma, (Sommese et al., 2024a)

Les mouvements des plantes peuvent être classés comme des réponses induites, qui se répartissent en deux catégories principales selon leur orientation par rapport au stimulus : les tropismes et les mouvements nastiques.(Sommese et al., 2024a)

Les tropismes correspondent à des mouvements directionnels, orientés par la provenance du stimulus. (Loonen et al., 2013b) . Ils résultent généralement de processus de croissance différentielle ou de variations prolongées de turgescence. Parmi les principaux tropismes figurent le phototropisme, induit par la direction ou la qualité spectrale de la lumière, le thermotropisme, lié aux gradients de température, et l'hydrotropisme, déclenché par la présence

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

ou la distribution de l'eau ou de l'humidité dans le milieu. Ces mécanismes permettent aux plantes d'optimiser l'accès aux ressources essentielles telles que la lumière et l'eau.

À l'inverse, les mouvements nastiques sont des réponses non directionnelles, indépendantes de l'orientation du stimulus. C'est le cas de la plante sensitive (*Mimosa pudica*), qui, au toucher, replie ses feuilles comme réaction défensive (Vazquez et al., 2024) . Ils dépendent principalement de la structure interne de l'organe végétal et de variations rapides ou cycliques de la pression de turgescence. il y a plusieurs types de mouvements nastiques, notamment la nyctinastie, associée à l'alternance jour/nuit et aux cycles lumineux, la thermonastie, déclenchée par des variations de température, et l'hydronastie, liée aux changements d'humidité ou de disponibilité en eau. Ces mouvements sont souvent réversibles et peuvent se produire à des échelles de temps très variées, allant de quelques secondes à des cycles journaliers ou saisonniers.(Sommese et al., 2024a)

II.5 Les champs d'application du biomimétisme en architecture

L'architecture biomimétique ne se limite pas à une imitation formelle de la nature, mais explore plutôt des principes fonctionnels, structurels et systémiques pour répondre aux défis de durabilité et de confort dans le bâtiment. L'application du biomimétisme en architecture peut être abordée à différents niveaux, allant des matériaux innovants inspirés du vivant jusqu'aux structures porteuses et aux enveloppes adaptatives. Ces trois axes complémentaires permettent d'intégrer des stratégies naturelles dans la conception architecturale, en vue d'améliorer la performance énergétique, la résilience et l'harmonie avec l'environnement (Badarnah & Kadri, 2015; Pawlyn, 2011; Zari, 2010).

II.5.1.1 Les matériaux

Le premier axe concerne le développement de matériaux inspirés de la nature, qui reproduisent les propriétés physiques ou chimiques d'organismes vivants. L'exemple le plus connu est l'« effet lotus », ayant conduit à des revêtements auto-nettoyants. De même, la structure poreuse des os et des coquillages inspire des matériaux légers mais résistants, capables d'optimiser l'efficacité énergétique et la durabilité des constructions (Myers, 2019; Vincent, 2009)

II.5.1.2 Les structures

Au niveau structurel, l'architecture biomimétique s'inspire des logiques mécaniques et morphologiques des organismes pour concevoir des systèmes porteurs optimisés. Les structures arborescentes, les voûtes inspirées des squelettes marins ou encore les réseaux réticulés imitant les toiles d'araignées permettent de réduire la consommation de matière tout en garantissant

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

stabilité et efficacité. Ces approches favorisent des conceptions légères, économes en ressources et adaptées aux contraintes environnementales (Pawlyn, 2011; Vincent, 2009).

II.5.1.3 Les systèmes

Le troisième axe se concentre sur l'enveloppe architecturale et les systèmes d'ombrage dynamiques, qui représentent l'interface entre le bâtiment et son environnement. Inspirés des stratégies adaptatives du vivant, comme l'ouverture des fleurs ou les changements de couleur et de texture de certains organismes, ces dispositifs permettent de réguler la lumière, la ventilation et les apports thermiques. Ainsi, les façades biomimétiques deviennent des systèmes actifs contribuant à l'amélioration du confort thermique et à la réduction des consommations énergétiques (Zari, 2010; Badarnah, 2017).

Parmi les dispositifs d'ombrage biomimétiques adaptatifs, le système Flectofin qui constitue un exemple emblématique, inspiré des caractéristiques structurelles et fonctionnelles des mouvements végétaux (Lienhard et al., 2011). Premier prototype de ce type mis en œuvre en environnement bâti réel, Flectofin est un système battant sans charnières, dérivé du mécanisme adaptatif de la fleur *Strelitzia reginae*. Il illustre une approche bottom-up fondée sur des déformations matérielles réversibles, relevant de la cinétique souple (soft kinetics), permettant une modification de forme efficace à l'aide d'un composant mécanique léger et peu complexe sous l'action d'une force externe.

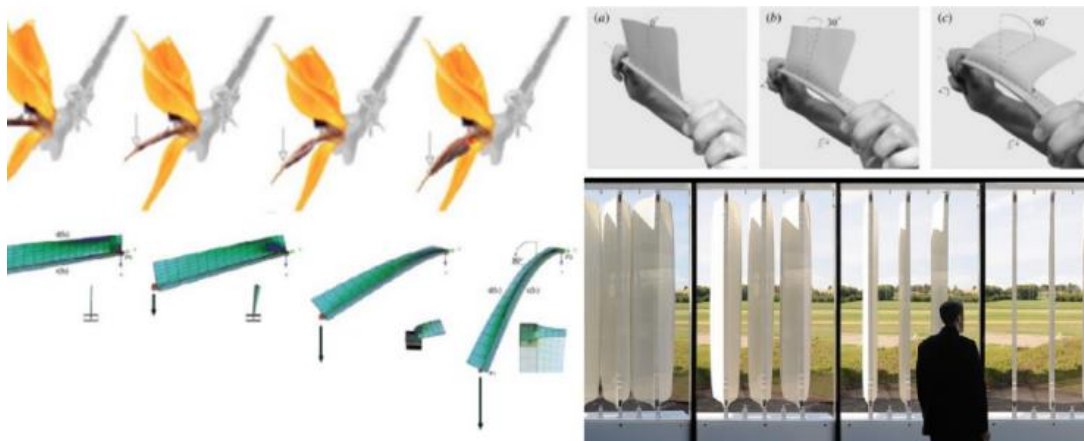


Figure II. 7 : Exemples de dispositifs de control solaire biomimétique ;,The Flectofin (en haut) , The Air Flower (en bas) . Source : :(Tabadkani et al., 2021a)

Les mouvements des plantes peuvent inspirer les systèmes de contrôles solaires adaptatifs. de deux manières La première consiste à étudier leur cinématique, à l'abstraire, puis à la traduire en systèmes élasto-cinétiques . a seconde s'appuie sur les mécanismes propres aux plantes à motilité rapide, dont l'étude révèle des principes de contrôle et d'amplification du mouvement

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

exploitant des instabilités élastiques pour produire des déformations rapides et de grande amplitude. (Vazquez et al., 2024)

II.6 Le transfert du biomimétisme en architecture

L'approche biomimétique en architecture soulève la question de la manière de transférer la nature vers l'architecture, ainsi que de la façon dont la nature doit être informatisée afin de soutenir efficacement le processus de transposition des comportements biologiques en éléments architecturaux. En architecture, la nature est informatisée à trois niveaux selon la classification de (Kotnic, 2010): le niveau représentationnel, le niveau paramétrique et le niveau génératif (Sayed, 2021).

II.6.1 Le niveau représentationnel

Le niveau représentationnel consiste à utiliser la conception computationnelle pour transférer la morphogenèse de la nature. Ainsi, les outils de conception assistée par ordinateur (CAO) ont permis de transposer vers l'architecture les géométries non linéaires et complexes présentes dans la nature. (Sayed, 2021)

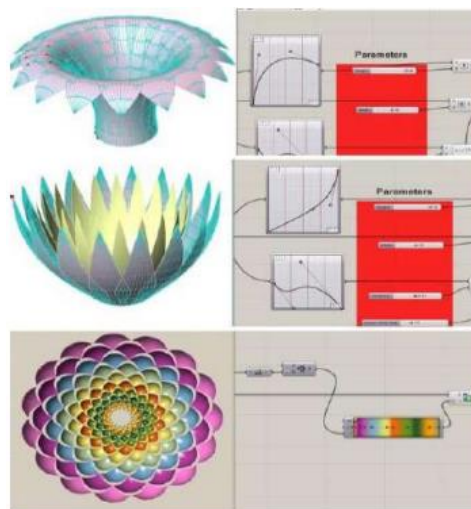


Figure II. 8 : Modélisation d'une fleur à l'aide Rhino-Grasshopper. Source : (Sayed, 2021)

Des outils computationnels non standards ont été introduits, de même que des langages de programmation permettant l'application efficace d'opérations morphogénétiques et la mise en œuvre de simulations morphologiques. Par exemple, la simulation de fleurs à l'aide du logiciel Rhino Grasshopper repose sur des simulations mathématiques de la morphogenèse florale

II.6.2 Le niveau génératif

Le niveau génératif repose sur l'utilisation d'algorithmes capables de simuler des comportements complexes inspirés de la nature afin d'améliorer les performances des

II.7 L'Approche paramétrique

Comme mentionné précédemment, l'approche paramétrique est considérée comme une solution prometteuse pour transposer les stratégies adaptatives naturelles en systèmes de contrôles solaires adaptatives. Les modèles numériques informatiques sont largement utilisés dans l'ensemble des disciplines de conception, notamment en architecture biomimétique. Cette section examine la définition de l'approche de conception paramétrique, ses champs d'application ainsi que les technologies informatiques récentes, afin de mieux démontrer son potentiel en matière de conception des dispositifs de contrôle solaire dynamique

II.7.1 Définition de l'approche paramétrique

La conception paramétrique est une approche de conception computationnelle fondée sur la manipulation de paramètres et de relations algorithmiques afin de générer et contrôler des formes et des systèmes architecturaux complexes (Jabi, 2013 ; Jabi et al., 2017 ; Barrios, 2005 ; Eastman et al., 2008). Selon Schumacher (2014), cette approche considère les propriétés géométriques d'un projet (telles que les dimensions, angles, orientations ou structures) comme des variables ajustables, permettant l'adaptation continue du modèle à de nouvelles informations et la génération simultanée de multiples alternatives de conception (Medjeldi, 2025 ; Eltaweel & Su, 2017 ; Gu et al., 2018).

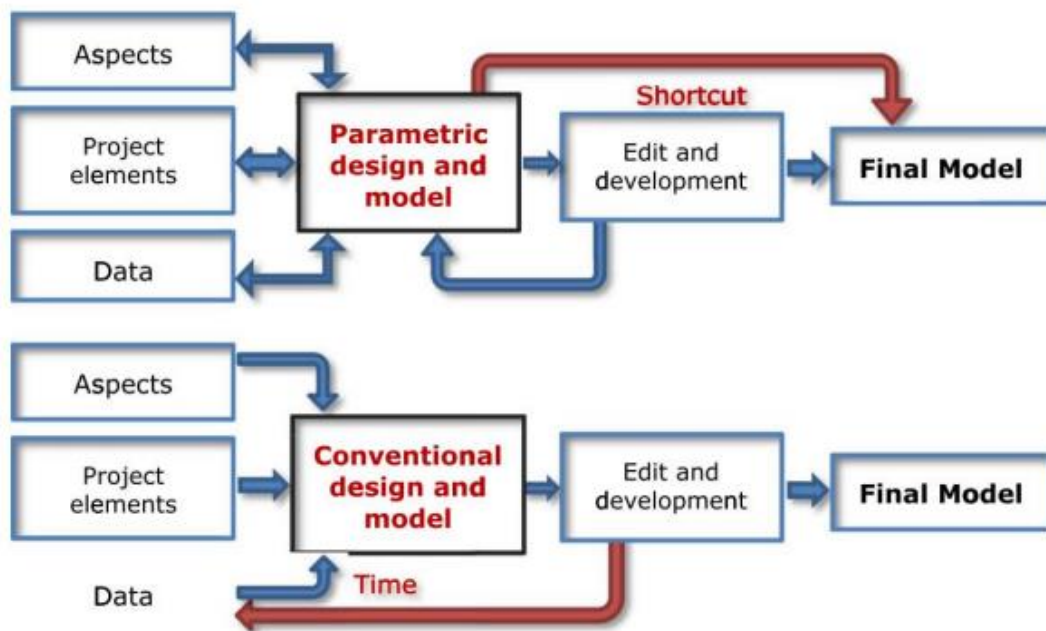


Figure II. 10 : Comparaison entre le design conventionnel et le design paramétrique . Source : (Eltaweel & Su, 2017)

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

La conception paramétrique transforme ainsi le processus de conception traditionnel, dans lequel toute modification implique la reconstruction du modèle, en un système interactif où les changements de paramètres entraînent une mise à jour automatique du projet. Elle repose sur des règles et contraintes définies à l'avance, établissant des relations logiques entre les composants du projet et facilitant l'exploration de solutions optimisées selon différents critères, tels que les performances structurelles, lumineuses, énergétiques ou environnementales (Ahmed AbdelAziz, 2016 ; Khelil, 2021 ; Rolvink et al., 2010 ; Labib, 2015).

Dans ce contexte, la conception architecturale paramétrique se caractérise par l'utilisation de procédures algorithmiques pour générer les éléments du bâtiment et les composants techniques, plutôt que par une manipulation directe de la géométrie. Les paramètres et les règles définissent alors le lien entre les objectifs de conception et les performances du projet (Bande et al., 2022)

La conception paramétrique repose ainsi sur une logique algorithmique, dans laquelle le résultat produit par l'algorithme évolue en fonction des variations des paramètres d'entrée. Un algorithme peut être considéré comme un ensemble d'instructions variables : lorsqu'il reçoit des données d'entrée, il transforme les paramètres selon ses règles et génère de nouvelles données appelées sorties, permettant de produire différentes solutions de conception.

Par ailleurs, cette approche est étroitement liée au paradigme du BIM (Building Information Modeling), qui exploite les principes de géométrie associative et de relations topologiques afin de coordonner les éléments du projet et gérer leurs interdépendances (Caetano et al., 2020) Elle constitue ainsi un outil puissant pour la génération de formes complexes, l'optimisation des performances et l'exploration de nouvelles expressions architecturales, tout en nécessitant l'acquisition de compétences en algorithmique et en conception computationnelle (Niclas, 2019 ; Yang, 2017 ; Reissmüller, 2015 ; Di Niccolo, 2016).

II.7.2 Origines de l'approche paramétrique

Le terme « paramètre » est utilisé depuis les années 1650 en géométrie et désigne une variable modifiable pour ajuster le résultat d'un système ou d'une équation (Al-Azzawi & Al-Majidi, 2021) . En architecture, Luigi Moretti, dès les années 1940, théorise l'« architecture paramétrique » comme l'étude des systèmes architecturaux fondés sur les relations entre paramètres et dimensions (Yazdi Bahri et al., 2022), tandis que des exemples antérieurs existent, comme James Dana en 1888 utilisant variables et rapports pour générer des formes de cristaux (Davis, 2013),

L'expression « Parametric Design » apparaît en 1988 dans l'article de Maurice Ruitter ((Al-Azzawi & Al-Majidi, 2021) . . La conception paramétrique se développe réellement à la fin du

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

XX^e siècle avec l'apparition de logiciels comme CATIA, 3D MAX, Generative Components et Grasshopper, permettant de générer et d'évaluer de nombreuses alternatives de conception à partir de paramètres contrôlés. (Eltaweel & Su, 2017)

Vers 2000, les agences comme Foster + Partners, Zaha Hadid Architects ou UNStudio adoptent ces outils pour produire des formes complexes et libres. Depuis, la conception paramétrique s'est largement diffusée et certains auteurs la considèrent comme un nouveau paradigme architectural, le « paramétrisme » (Schumacher, 2009). Elle constitue aujourd'hui un outil clé de la conception computationnelle, facilitant la gestion de la complexité, l'exploration formelle et l'optimisation des performances dans le processus architectural (Besbas, 2023)

II.7.3 Champs d'application de l'approche paramétrique en architecture

Aujourd'hui, la conception paramétrique est utilisée dans de nombreux domaines impliquant des relations algorithmiques complexes, notamment en architecture. L'introduction de cette approche a profondément transformé la pratique architecturale en permettant la génération de formes et de géométries complexes, auparavant difficiles à concevoir ou à réaliser à l'aide des méthodes de conception traditionnelles.

En outre, la conception paramétrique offre aux architectes la possibilité d'intégrer et d'optimiser les performances du bâtiment dès les premières phases du processus de conception, notamment dans des domaines essentiels tels que l'efficacité énergétique, le confort environnemental et la stabilité structurelle (Eltaweel & Su, 2017 ; Gu et al., 2018).

Cette approche a également été appliquée à la conception de façades innovantes et adaptatives. Un exemple emblématique est celui des tours Al Bahar à Abou Dhabi (Figure II.11), qui intègrent un système d'ombrage dynamique inspiré du moucharabieh traditionnel. Ce dispositif réactif s'ajuste automatiquement en fonction de la position du soleil au cours de la journée, permettant de réduire les gains solaires tout en maintenant un niveau adéquat d'éclairage naturel (Karanouh & Kerber, 2015).

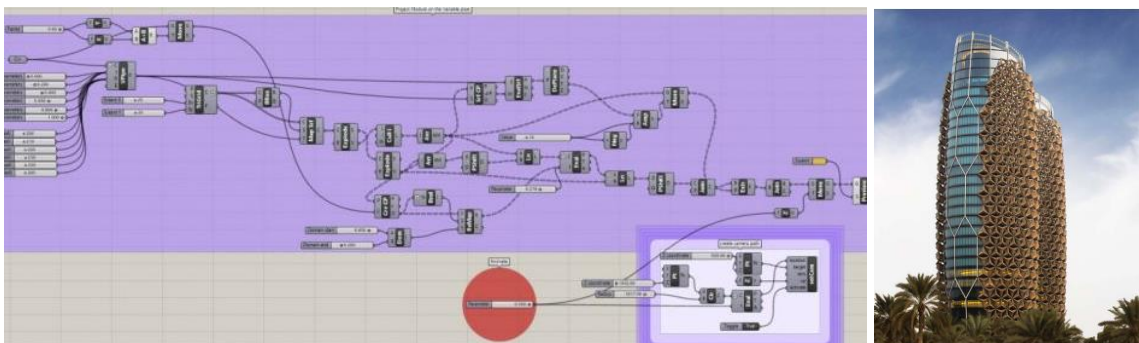


Figure II. 11 : la conception paramétrique appliquée aux tours El Bahr . Source : (Karanouh & Kerber, 2015b)

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

Par ailleurs, le design paramétrique peut être considéré comme un processus itératif et interactif, dans lequel les concepteurs manipulent différents paramètres afin de générer, analyser et améliorer les solutions architecturales. Dans ce contexte, l'application de l'approche paramétrique en architecture peut être généralement structurée autour de trois principaux axes : la modélisation paramétrique, la simulation et l'optimisation:

II.7.3.1 La modélisation paramétrique

La modélisation paramétrique est définie comme une structure reliant deux ensembles d'éléments distincts mais liés à un même contenu (Agbodan, 2002). Le premier ensemble correspond à une représentation explicite, matérialisée par la géométrie visible de l'objet, tandis que le second constitue une représentation symbolique et abstraite, associée à des algorithmes propres aux outils de modélisation. Ces algorithmes permettent le recalcul automatique de la représentation explicite lorsqu'une modification est apportée à l'une ou l'autre des représentations (De Boissieu, 2013)

Dans un modèle paramétrique, toute transformation locale sur la représentation explicite ou symbolique entraîne une mise à jour globale du modèle, illustrant le principe de dépendance et de cohérence caractéristique de cette approche (Agbodan, 2002)

La modélisation paramétrique permet de créer des formes définies par des paramètres et des relations variables, contrairement à la modélisation traditionnelle où les éléments restent fixes. Ces paramètres peuvent être numériques (dimensions, angles), fonctionnels (contrôle de la lumière ou de la ventilation) ou comportementaux (réponse aux conditions environnementales). Cette approche offre un cadre flexible, capable de générer rapidement plusieurs variantes de conception tout en intégrant différentes dimensions du processus architectural (Alassaf, 2025)

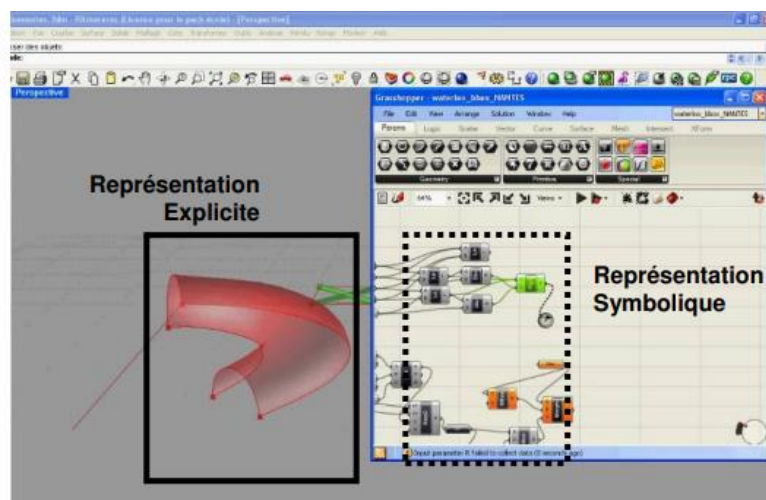


Figure II. 12 : Exemple de représentations « explicites » et « symboliques » sur Grasshopper (plugin de Rhinocéros) :Source : (Barbisan, 2013.)

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

D'un point de vue formel, la modélisation paramétrique s'inspire souvent de la nature, générant des formes et des structures qui reproduisent des processus biologiques ou naturels. Cette approche, appelée biomorphisme, utilise des algorithmes génétiques pour créer des formes structurelles imitant le comportement des éléments naturels .(Bande et al., 2022)

II.7.3.1.1 Principaux outils de modélisation paramétrique

La modélisation paramétrique repose sur des outils puissants permettant de générer des formes complexes et précises. Rhinoceros 3D, développé par Robert McNeel & Associates, utilise la modélisation mathématique NURBS pour créer des courbes et surfaces libres avec une grande précision, contrairement aux logiciels basés sur des maillages polygonaux (Alkhayyat, 2013). Grasshopper, plug-in de Rhino développé par David Rutten, étend ces capacités en offrant une modélisation paramétrique visuelle. Il se distingue par une interface interactive, un retour graphique immédiat et la possibilité de modifier les paramètres d'entrée en temps réel, entraînant des transformations instantanées de la forme générée (Rajaa, 2020). Grasshopper bénéficie également d'un vaste écosystème de plug-ins communautaires, permettant d'intégrer des analyses variées telles que la thermique, l'acoustique, la simulation énergétique ou l'optimisation structurelle (Davis, 2013).

Ces fonctionnalités font de Grasshopper un outil privilégié pour la génération de formes complexes et l'intégration de multiples analyses dans le processus de conception architecturale (ElAhmar, 2015).

II.7.3.2 La simulation paramétrique des performances environnementales

Les outils paramétriques peuvent simuler tous les changements climatiques et environnementaux tels que le mouvement du soleil, la localisation, l'intensité, l'humidité, l'illumination, le rayonnement, la vitesse du vent, les gains thermiques, les ombres et les zones ombragées, et les contrôler paramétriquement. De plus, ils permettent des simulations dans la quatrième dimension, en prenant en compte l'aspect temporel et son influence sur le bâtiment en temps réel, ainsi que sur la performance du bâtiment paramétriquement. Cela permet d'anticiper et de résoudre de nombreux problèmes de conception dès les premières phases du projet . (Eltaweel & Su, 2017; Henriques et al., 2012; Wagdy & Fathy, 2015)

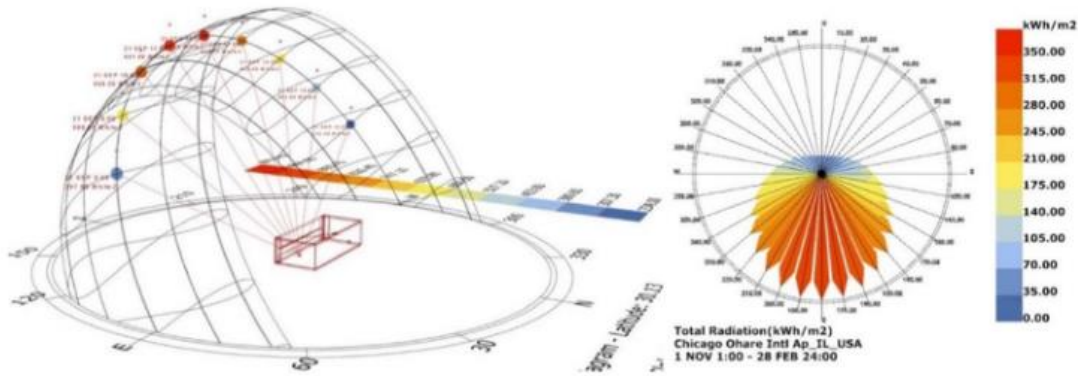


Figure II. 13 : Exemples d'analyse de la trajectoire solaire et de la lumière naturelle. . Source : (Eltaweel & Su, 2017)

II.7.3.2.1 Principaux plug-ins de la simulation environnementale

Les applications Ladybug, Honeybee, Geco et HeliotropeSolar, intégrées à l'environnement Grasshopper 3D, peuvent être étendues afin de générer une architecture réactive et cinétique dans laquelle les enveloppes du bâtiment s'adaptent aux systèmes naturels, tels que le mouvement dynamique du soleil. Ces plug-ins d'analyse environnementale permettent aux architectes de concevoir des structures plus équilibrées, écologiques et durables, en proposant diverses innovations architecturales visant à exploiter au maximum les conditions climatiques extérieures.

le plugin **Ladybug** pour Grasshopper permet de générer des informations complètes sur l'état environnemental d'un site spécifique en important le fichier météo standard EnergyPlus (.epw), Ces données environnementales peuvent être connectées paramétriquement aux informations du projet afin de comprendre l'influence du climat et de l'emplacement sur le projet étudié.

Un autre exemple est le plugin **Honeybee**, également pour Grasshopper, qui sert de moteur pour OpenStudio, Daysim, Radiance et EnergyPlus. Ces programmes sont des outils de simulation bien connus, utilisés pour l'analyse de la lumière naturelle, le rayonnement solaire, le ray tracing, la vitesse du vent, l'humidité, ainsi que la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation

Tous ces plugins peuvent être connectés simultanément et interagir entre eux, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus précis et optimisés. (Sadeghipour, 2013).

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

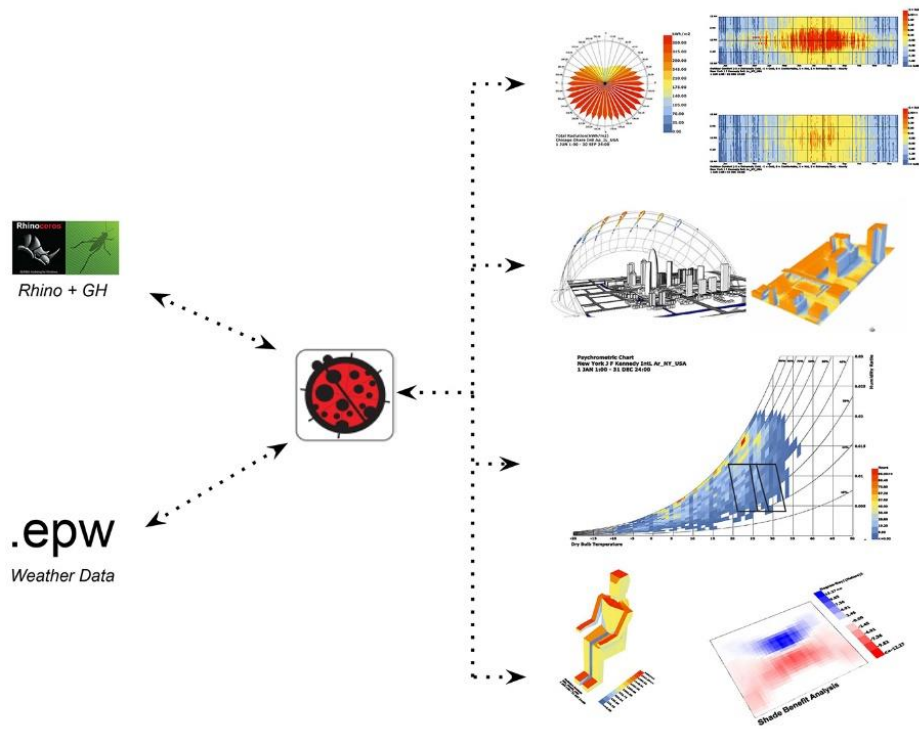


Figure II. 14 : les divers utilisations du plugging Ladybug . Source : (Wintour, 2023)

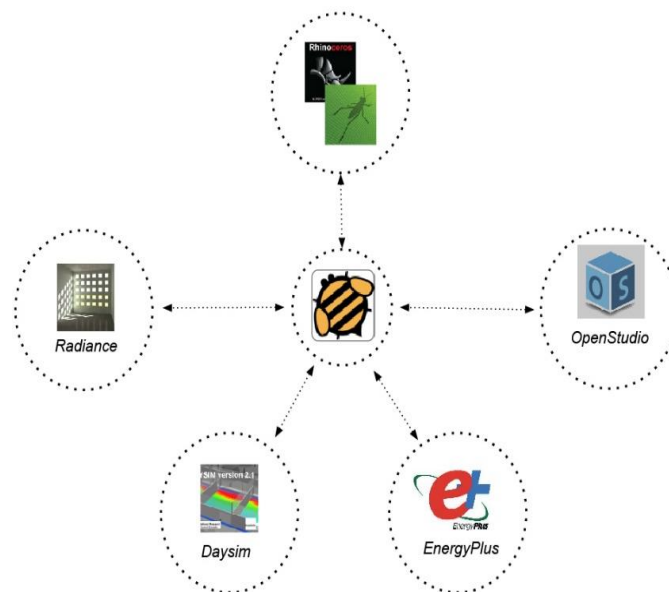


Figure II. 15 : les divers utilisations du plugging Honeybee. Source : (Wintour, 2023)

II.7.3.3 L'optimisation paramétrique

Les techniques d'optimisation sont devenues essentielles dans la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique, car elles permettent aux architectes et aux ingénieurs d'ajuster finement les paramètres de conception afin de réduire la consommation d'énergie. En

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

combinant des outils de simulation avec des algorithmes d'optimisation, les chercheurs peuvent évaluer différentes alternatives de conception et identifier les solutions les plus performantes(Ahmad et al., 2025)

Parmi ces méthodes, les algorithmes évolutionnaires, tels que les algorithmes génétiques), se sont révélés particulièrement efficaces pour résoudre des problèmes de conception complexes. Ils sont notamment utilisés pour améliorer les systèmes de protection solaire, le positionnement des fenêtres ou encore la performance des façades, dans le but de réduire les besoins en refroidissement des bâtiments. Inspirés du principe de sélection naturelle, ces algorithmes explorent un grand nombre de possibilités de conception, ce qui les rend particulièrement adaptés à l'architecture éco énergétique(Ahmad et al., 2025) ..

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 (Medjeldi, 2025) . Cependant il y a deux types d'optimisation :

II.7.3.4 L'optimisation mon -objectif

l'optimisation mono-objectif vise à déterminer la solution optimale pour une seule fonction de performance. L'optimisation mono-objective est un processus mathématique visant à déterminer la meilleure solution possible en maximisant ou en minimisant une seule fonction objectif, sous un ensemble donné de contraintes. Elle consiste à rechercher, dans l'espace des solutions admissibles, la valeur des variables de décision qui optimise un critère unique (par exemple : minimiser la consommation énergétique ou maximiser la performance thermique). (Ardiani et al., 2025) .

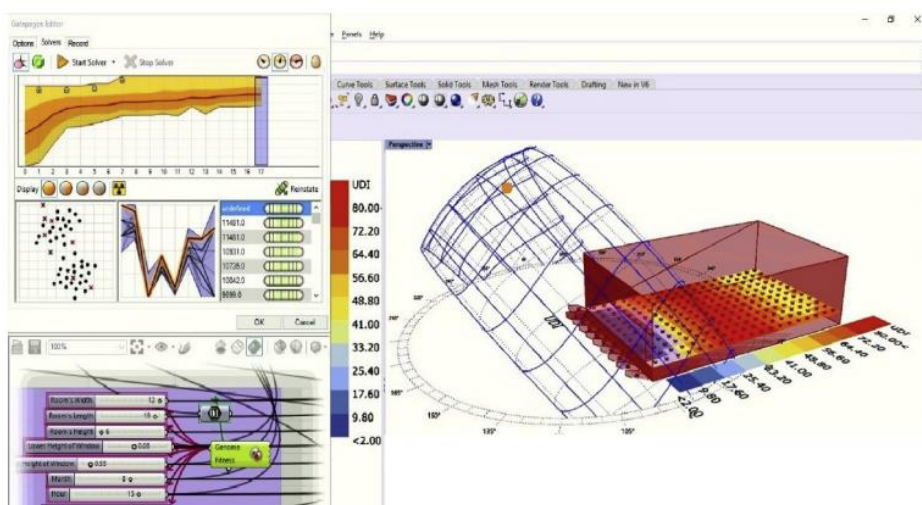


Figure II. 16 : Optimisation du modèle basée sur l'UDI à l'aide du composant d'optimisation « Galápagos ».Source : (Samadi ,2020)

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

Grasshopper propose un ensemble intégré de composants de résolution de problèmes, notamment Galápagos. Ce plug-in fonctionne comme un solveur évolutif, exploitant des algorithmes génétiques pour optimiser les conceptions paramétriques. S’inspirant de la théorie de la sélection naturelle de Darwin, il permet aux concepteurs de définir des variables de conception, des contraintes et des objectifs. (Eltaweel & Su, 2017)

II.7.3.5 L’optimisation multi objectifs

L’optimisation multi-objectifs (MOO), également appelée optimisation multicritère, traite des problèmes caractérisés par la présence de plusieurs objectifs, souvent contradictoires (Ardiani et al., 2025) L’optimisation multi-objectifs appliquées à la conception des bâtiments combinent des modèles de simulation énergétique et des algorithmes d’optimisation afin d’identifier les solutions les plus performantes selon plusieurs critères (énergie, environnement, coût).(Ahmad et al., 2025)

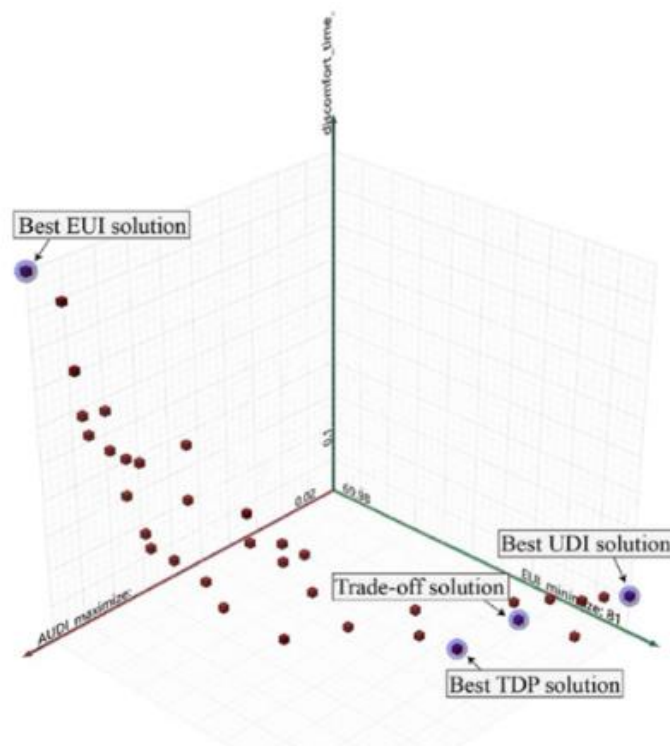


Figure II. 17 : Front de Pareto illustrant les compromis optimaux entre l’EUI, l’UDI et la TDP.
Source : (Alsukkar et al., 2026)

les algorithmes d’optimisation NSGA-II et aNSGA-II sont principalement mobilisés pour l’optimisation énergétique, tandis que MOPSO et MOGA sont davantage associés aux performances environnementales (confort, émissions). Le couplage EnergyPlus–MATLAB apparaît comme le plus répandu et efficace. Plus récemment, Rhino Grasshopper s’est imposé

Chapitre II : Du biomimétisme à la conception paramétrique : fondements théoriques

grâce à sa flexibilité paramétrique, et des outils comme jEplus+EA facilitent l'intégration de NSGA-II sans programmation complexe. (Harshalatha et al., 2024)

Octopus est un plug-in dédié à l'optimisation multi-objectifs au sein de Grasshopper. Il offre aux concepteurs la possibilité d'analyser et d'optimiser des conceptions paramétriques intégrant plusieurs objectifs parfois contradictoires. En s'appuyant sur des algorithmes avancés tels que NSGA-II et MOEA/D Octopus permet d'identifier des solutions établissant un compromis équilibré entre différents critères de conception, considérés simultanément. (Besbas, 2023)

Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements théoriques reliant biomimétisme et conception paramétrique, en mettant en évidence la nécessité d'un changement de paradigme dans les modes de pensée architecturaux. Il a montré que la compréhension des mécanismes d'adaptation du vivant constitue une ressource fertile pour enrichir les méthodologies de conception, tandis que l'intégration des outils computationnels permet une transposition plus rigoureuse et performante de ces principes dans l'architecture. La nature y apparaît ainsi non seulement comme source d'inspiration formelle, mais également comme cadre méthodologique guidant le développement de stratégies innovantes, adaptatives et durables. Par ailleurs, l'analyse du design paramétrique a souligné l'importance pour les concepteurs de maîtriser les logiques computationnelles, condition essentielle à l'élaboration de systèmes de conception intégrés et adaptatifs. Sur cette base, le chapitre a conduit à la formulation d'une définition opérationnelle de l'optimisation de la performance du bâtiment, envisagée comme la convergence entre principes biomimétiques et potentialités paramétriques.

**CHAPITRE III : Performances thermiques et
énergétiques des systèmes de contrôle solaire
biomimétiques : état de l'art**

III Introduction

Les enveloppes architecturales constituent l'interface essentielle entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur, jouant un rôle déterminant dans la régulation des flux thermiques, lumineux et énergétiques. Dans un contexte marqué par l'urgence climatique et la nécessité de réduire la consommation énergétique du secteur du bâtiment, les enveloppes biomimétiques adaptatives se présentent comme une voie innovante, capable d'allier efficacité environnementale et conception architecturale durable. Inspirées des stratégies d'adaptation du vivant, elles intègrent des principes morphologiques, comportementaux et physiologiques issus de la nature, transposés dans des dispositifs architecturaux réactifs et intelligents. Ce chapitre propose un état de l'art structuré autour d'une analyse bibliométrique, d'une revue critique de la littérature et d'études de cas représentatives. L'objectif est double : d'une part, mettre en évidence les tendances scientifiques et technologiques qui structurent le champ des façades biomimétiques adaptatives ; d'autre part, identifier les avancées, limites et opportunités offertes par ces approches, afin de poser les fondements conceptuels et méthodologiques nécessaires à l'élaboration d'un modèle bio-adaptatif applicable à l'habitat contemporain

III.1 Analyse bibliométrique

L'analyse bibliométrique constitue une étape essentielle pour comprendre l'évolution des recherches dans le domaine du biomimétisme appliqué à l'architecture et aux enveloppes adaptatives. Elle permet non seulement d'identifier les thématiques dominantes et émergentes, mais aussi de mettre en évidence les tendances méthodologiques et les orientations scientifiques qui structurent le champ. En utilisant le logiciel VOSviewer, chaque carte générée est constituée de nœuds (ou bulles) reliés par des lignes. La taille des nœuds reflète leur fréquence d'occurrence ou de citation, tandis que les lignes traduisent les relations entre les nœuds, créant ainsi un réseau visuel

III.1.1 Thèmes et terminologies

Le graphe de cooccurrence des mots-clés met en évidence une cartographie détaillée des thématiques interconnectées au sein du champ d'étude, comme illustré dans la Figure III. 1 . Le terme « biomimétisme » se positionne au centre du réseau en tant que nœud dominant, ce qui traduit à la fois sa fréquence élevée et son rôle structurant dans l'ensemble des travaux analysés. Autour de ce noyau central s'organisent plusieurs regroupements de mots-clés distincts, identifiés sous forme de clusters colorés, qui reflètent des sous-thématiques fortement corrélées.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

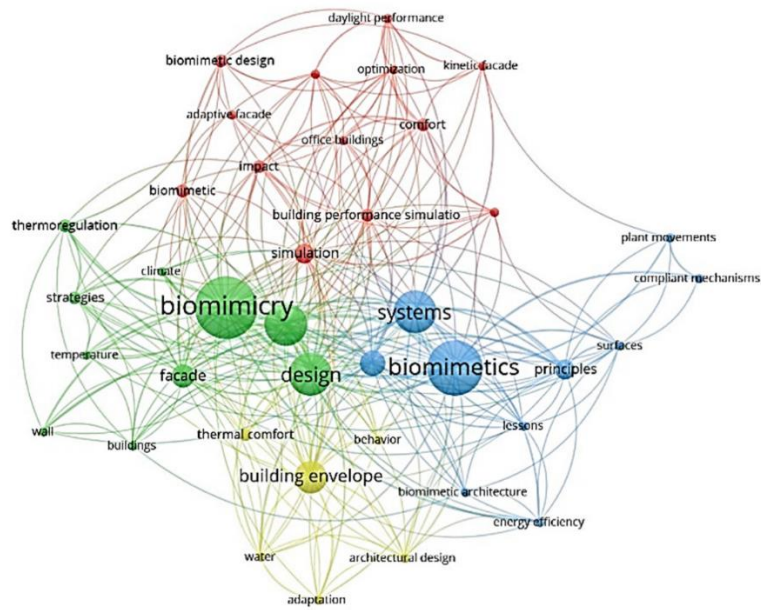


Figure III. 2 : Carte de cooccurrence des mots-clés relatifs au thème « biomimétisme » appliqué aux enveloppes adaptatives. Source : auteur (2024)

D'après cette carte, les différentes thématiques peuvent être regroupées en quatre clusters principaux, comme le montre Figure III. 3. Ces clusters correspondent à différents axes de recherche structurant le domaine étudié.

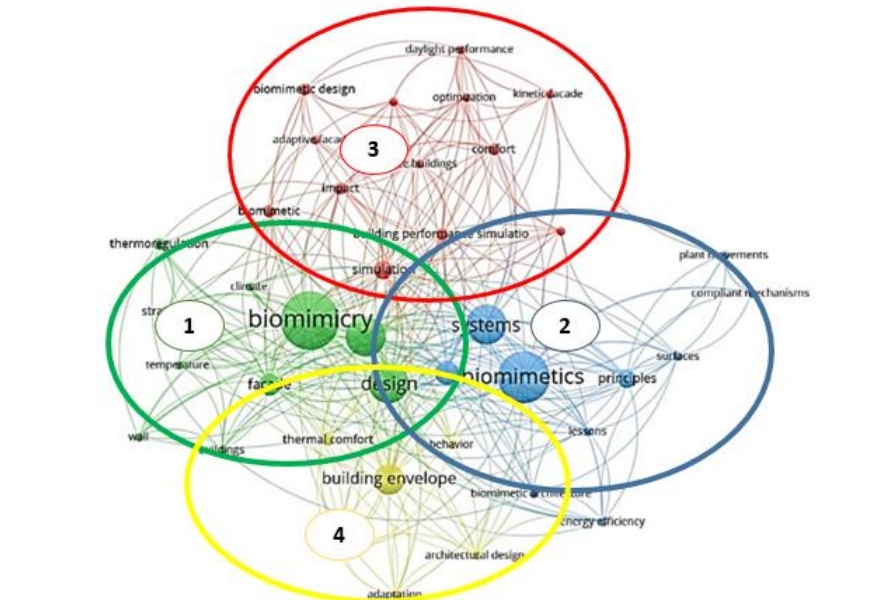


Figure III. 4 : les clusters principaux du terme « biomimétisme » appliqué aux enveloppes adaptatives, Source : auteur (2024)

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

L'analyse de la carte de cooccurrence des mots-clés permet d'identifier quatre clusters thématiques principaux, chacun représentant un axe de recherche spécifique dans le domaine étudié.

- **Cluster 1** : met en évidence le biomimétisme comme approche de conception des systèmes de contrôle solaire adaptatifs. Les travaux regroupés dans ce cluster explorent la manière dont les principes biologiques et les stratégies d'adaptation observées dans la nature peuvent être transposés dans la conception architecturale afin de développer des systèmes capables de réguler le rayonnement solaire de manière dynamique.
- **Cluster 2** : se concentre sur les mouvements adaptatifs des plantes en tant que référence de conception des systèmes biomimétiques. Il souligne l'intérêt croissant porté aux mécanismes naturels de mouvement et de régulation présents dans certaines espèces végétales, qui inspirent le développement de façades et de dispositifs architecturaux capables de s'adapter aux variations environnementales.
- **Cluster 3** : regroupe les recherches portant sur la simulation et l'optimisation de la performance du bâtiment à travers l'intégration de systèmes biomimétiques. Les études associées s'appuient généralement sur des outils de simulation numérique et de modélisation paramétrique afin d'évaluer l'impact de ces systèmes sur les performances énergétiques et environnementales des bâtiments.
- **Cluster 4** : cluster concerne la performance énergétique et le confort thermique des bâtiments. Les recherches associées s'intéressent particulièrement à l'évaluation de l'efficacité des stratégies biomimétiques dans l'amélioration du confort thermique intérieur et dans la réduction de la consommation énergétique.

III.2 Évolution des thématiques au fil des années

Une analyse a été réalisée afin d'observer la transformation des thématiques de recherche entre 2008 et 2024, comme le montre la figure ci-dessous. Cette étude met en évidence plusieurs tendances structurées en cinq phases :

Première phase : Innovations technologiques et matérielles

Ce cluster établit un lien entre des thématiques fondatrices et de nouvelles orientations de recherche. Les mots-clés traditionnels comme nanotechnologie, lumière, bio-inspiré, diffusion lumineuse et auto-assemblage renvoient aux acquis scientifiques qui ont structuré la discipline. Toutefois, de nouveaux termes tels que processus biomimétique, matériaux biomimétiques,

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

architecture et design indiquent un élargissement de la perspective, traduisant l'application de principes biologiques à la résolution de défis architecturaux et de conception.

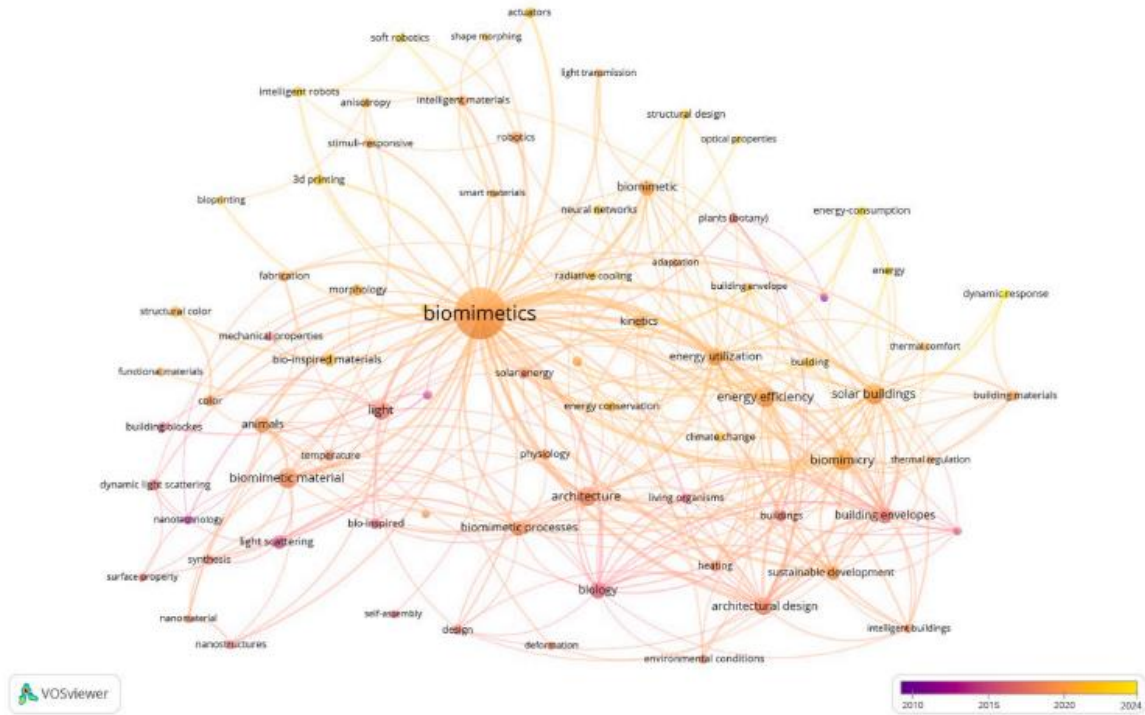


Figure III. 5 : Cooccurrence des mots-clés et évolution des thématiques de recherche dans le temps.
Source : auteur (2024).

Deuxième phase : intégration du biomimétisme dans les matériaux et les processus de conception

Les termes représentés en orange correspondent à une phase de développement intermédiaire où le biomimétisme commence à être intégré dans les matériaux et les processus de conception. On observe des mots-clés tels que bio-inspired materials, biomimetic materials, biomimetic processes, architecture, design, fabrication et solar energy. Durant cette période, les recherches ont progressivement évolué vers l'application des principes biomimétiques dans l'architecture et l'ingénierie, notamment à travers la conception de matériaux inspirés de la nature et leur intégration dans les systèmes constructifs. Cette phase marque donc la transition entre la recherche fondamentale et les applications architecturales.

Troisième phase : performance énergétique et bâtiments adaptatifs

Les termes apparaissant en jaune représentent les tendances de recherche les plus récentes. Parmi eux figurent energy efficiency, energy consumption, thermal comfort, solar buildings,

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

dynamic response, building envelope et energy utilization. Cette évolution montre que les recherches actuelles s'orientent vers l'application du biomimétisme pour améliorer la performance énergétique des bâtiments, en particulier à travers le développement d'enveloppes de bâtiments adaptatives capables de répondre aux conditions environnementales. L'accent est désormais mis sur l'optimisation énergétique, le confort thermique et les stratégies de conception durable.

Quatrième phase : Nouvelles avancées en matériaux bio-inspirés

Le quatrième cluster est associé aux recherches les plus récentes. Il se caractérise par des mots-clés tels que couleur structurelle, matériaux fonctionnels, matériaux bio-inspirés et couleur. Ces thématiques révèlent un intérêt croissant pour le développement de matériaux innovants imitant les propriétés des systèmes biologiques, capables de combiner des fonctions techniques avec une dimension esthétique.

Cinquième phase : Matériaux intelligents et systèmes réactifs

Enfin, cette phase illustre l'émergence récente d'un champ de recherche centré sur les matériaux intelligents et dispositifs réactifs. Depuis 2020, le terme biomimétique s'impose comme mot-clé dominant, tandis que des notions telles que robotique déformation morphologique (shape morphing), actionneurs et impression 3D apparaissent de plus en plus dans les travaux. Ces évolutions traduisent l'intégration progressive de technologies avancées et de méthodes de fabrication innovantes, marquant une orientation vers des approches de conception dynamiques et évolutives. L'essor de ce cluster témoigne du rôle déterminant des innovations technologiques dans le développement de solutions architecturales bio-inspirées.

III.3 Sélection des études antérieures

Cette recherche s'inscrit dans une démarche de revue critique, visant à analyser en profondeur la littérature scientifique existante et à examiner des études de cas pertinentes. L'objectif est d'extraire des éléments essentiels permettant d'évaluer l'état de l'art, tout en posant les bases d'une approche méthodologique renouvelée : le modèle bio-adaptatif, destiné à être appliqué à la conception architecturale et plus particulièrement aux enveloppes bâties adaptatives. Le cadre méthodologique adopté repose sur quatre étapes principales : collecte des données, sélection, analyse et synthèse – intégrant de manière conjointe les caractéristiques propres au domaine architectural et celles issues du monde naturel. La Figure ci-dessous en présente la structuration générale.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

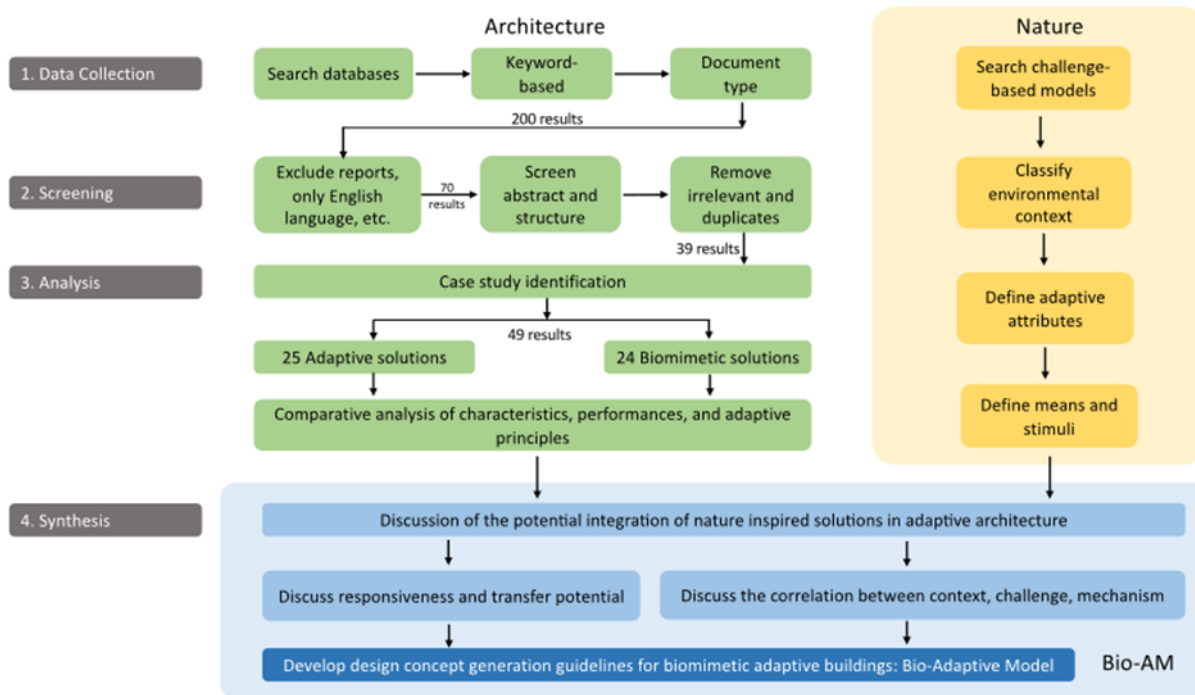


Figure III. 6 : les étapes de sélection des études antérieures.

III.4 Phase 1 : Collecte des données

La première étape a consisté à réunir un corpus documentaire à partir de bibliothèques scientifiques et de bases de données en ligne telles que Scopus et Google Scholar,. Le corpus rassemblé inclut des ouvrages spécialisés, des articles scientifiques internationaux, des actes de conférences ainsi que des rapports officiels, tous centrés sur la thématique des enveloppes de bâtiments adaptatives et biomimétiques. Pour affiner cette recherche, une série de mots-clés a été utilisée, parmi lesquels : adaptive building envelope, adaptive facade, biomimetic envelope, biomimetic adaptive building envelope, building skins, innovative facade et advanced facade. Afin d'assurer une vision élargie, les projets analysés proviennent de différents contextes géographiques et climatiques. L'étude couvre principalement la période 2018 à aujourd'hui, tout en incluant certaines références plus anciennes, reconnues pour leur caractère novateur. Cette phase exploratoire a permis d'identifier environ 120 documents jugés pertinents.

III.5 Phase 2 : Sélection des données

La deuxième étape a porté sur le filtrage des documents collectés. Les rapports institutionnels ont été écartés et seuls les travaux rédigés en langue anglaise ont été retenus, ramenant le corpus initial à 70 documents. Chaque source a ensuite fait l'objet d'une analyse de pertinence, portant sur le titre, le résumé, la structure et le contenu, afin de vérifier leur alignement avec les thématiques ciblées : conception des enveloppes adaptatives, fonctions, performance, impacts

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

environnementaux et caractéristiques physiques. Après suppression des doublons et des références non directement liées à la problématique, le corpus final a été réduit à 49 publications

III.6 Phase 3 : Analyse des données

un total de 49 études de cas a été extrait, réparties entre 25 projets d'enveloppes adaptatives et 24 projets d'enveloppes biomimétiques. L'analyse s'appuie sur des cadres de classification déjà mobilisés par des chercheurs tels que (Soliman & Bo, 2023), (Kuru et al., 2021), et (Sheikh & Asghar, 2019), intégrant notamment : le type du bâtiment, le type du climat selon de Köppen-Geiger, la source biologique adoptée pour le système de contrôle solaire proposé, le type de son mouvement, ses performances thermique et énergétique, et les outils de simulation utilisés pour évaluer ces performances. Cette grille de lecture a permis de comparer systématiquement les projets, en cartographiant leurs attributs et en identifiant les convergences et divergences. L'objectif était de mettre en lumière les tendances dominantes, les limites rencontrées et les opportunités pour une meilleure intégration de solutions bio-inspirées dans le domaine architectural.

III.7 Phase 4 : Synthèse

La dernière phase consiste à regrouper les résultats afin de dégager les principaux défis, limites et potentialités liés au développement de systèmes de contrôle solaire biomimétique. Elle aboutit à la proposition du modèle bio-adaptatif, visant à transférer les stratégies issues de la nature vers la conception architecturale. Cette étape discute notamment les relations entre fonctions, mécanismes adaptatifs et contextes environnementaux, en mettant en évidence les attributs réactifs susceptibles d'être transposés du vivant vers l'architecture. Les formes d'adaptation observées dans la nature – morphologiques, comportementales et physiologiques – sont particulièrement explorées. Les plantes, en raison de leur capacité à réagir de manière dynamique et réversible aux variations environnementales à court et long terme, constituent la principale source d'inspiration, ouvrant des perspectives pour le développement de technologies architecturales innovantes et résilientes. (Jalali et al., 2025b)

III.8 Revue des travaux antérieurs

Dans une recherche intitulée « **Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study** », Yazdi Bahri et al., (2025), se sont inspirés des mouvements adaptatifs de l'oxalis triangulaire, une plante connue par l'ouverture et la fermeture réversible de ses feuilles en fonction de la lumière, afin de concevoir un système d'ombrage cinétique appliqué aux façades d'un bâtiment éducatif situé à Barcelone qui se caractérise par un climat méditerranéen,

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

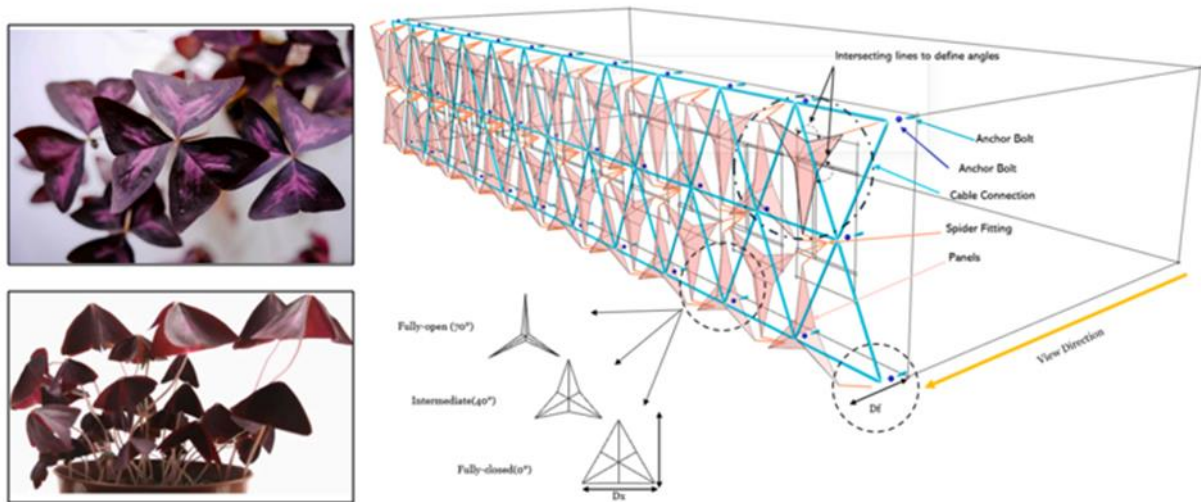


Figure III. 7 : la façade biomimétique proposée par Yazdi Bahri et al, (2025)

L'étude, fondée sur des simulations paramétriques et une optimisation multi-objectifs, a testé plus de 3000 configurations de façades à l'aide des logiciels EnergyPlus et Radiance, en évaluant simultanément plusieurs indicateurs de performance : l'intensité de la consommation énergétique (EUI), le confort thermique (PMV), le confort visuel (sGA) et la qualité des vues vers l'extérieur. Les résultats ont montré que des angles intermédiaires (20° – 30°) et un espacement de 30 à 40 cm entre les éléments de façade assurent une performance optimale, réduisant la consommation énergétique tout en maximisant les heures de confort (1800–2000 h). La recherche a également souligné le rôle prépondérant de la géométrie de la façade et des algorithmes de contrôle dans la régulation adaptative du rayonnement solaire et de la lumière naturelle, confirmant ainsi le potentiel des façades cinétiques inspirées du vivant pour concilier durabilité énergétique et confort des usagers.

(Ashraf & Abdin, 2024) proposent dans leur recherche « **Biomimetic design synthesis and digital optimization of building shading skin: A novel conceptual framework for enhanced energy efficiency** » une enveloppe biomimétique inspirée du cactus Saguaro, Un système d'évaluation complet évalue 1 384 simulations, en utilisant les modules d'extension Octopus et Grasshopper pour Rhino, afin d'améliorer la consommation d'énergie dans un immeuble de bureau .

Les critères d'évaluation comprennent l'intensité de l'utilisation de l'énergie (EUI), les charges thermiques, et l'autonomie spatiale en lumière du jour (sDA).

Les résultats montrent que la peau d'ombrage biomimétique multi-angles a réduit la consommation d'énergie de 20 %, une réduction de 36,5 % de la charge de refroidissement par

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

rapport au modèle de référence. L'évaluation de l'éclairage démontre que jusqu'à 97 % des espaces intérieurs bénéficient d'un éclairage naturel adéquat.

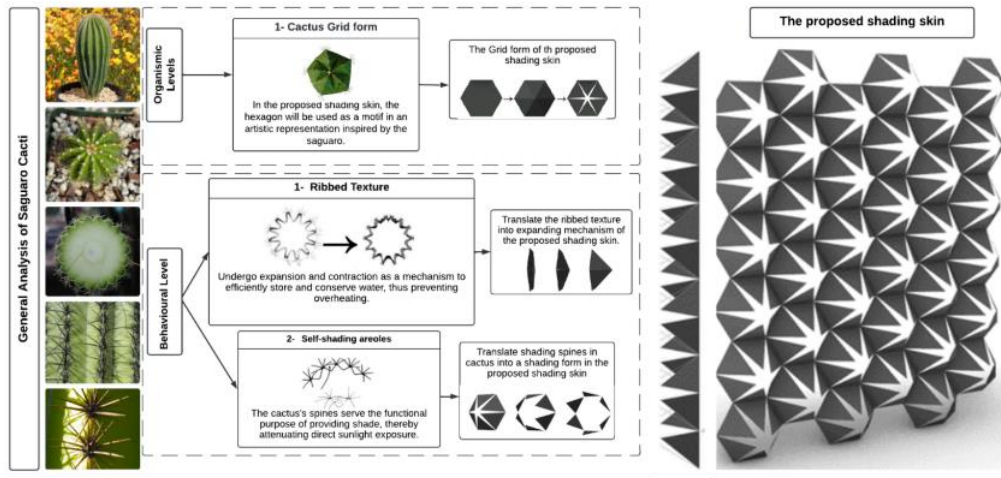


Figure III. 8 : l'enveloppe biomimétique suggéré par Ashraf & Abdin, 2024,. Source : (Ashraf & Abdin, 2024)

. Ces résultats soulignent la supériorité de la peau d'ombrage biomimétique dans l'amélioration de la charge de refroidissement et de la consommation d'énergie, ainsi que la performance de la lumière du jour et le confort visuel

Dans le contexte du climat chaud du Caire , (Shahin et al., 2023) explorent l'application de peaux adaptatives bio inspirées à base de matériaux intelligents pour réduire la consommation énergétique des bâtiments administratifs. Leur recherche intitulée «**Bio-based Adaptive Skins: Investigating the Impact of Using Shape morphing Skins on the Energy Consumption of Administrative Buildings**» s'inscrit dans la logique du design bio-inspiré, en prenant pour modèle biologique les feuilles de Rhododendron, connues pour leurs mouvements thermo-nastiques. Ces dernières se roulent et se déploient de manière réversible en fonction des variations de température, ce qui leur permet de résister aux conditions climatiques rigoureuses. L'inspiration tirée de ce mécanisme naturel a conduit à la conception de panneaux de peau morphologique adaptative, traduisant deux niveaux de biomimétisme. Au niveau organisme, la morphologie du module est dérivée de l'abstraction de la forme des feuilles de rhododendron. Au niveau comportement, le module reproduit la capacité de détection de la température extérieure ainsi que le mouvement d'enroulement et de déroulement des feuilles en fonction des variations thermiques.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

Sur cette base, les auteurs ont développé une enveloppe légère composée de fils de Nitinol à mémoire de forme, caractérisés par une température de transition de 30 °C, jouant le rôle d'actionneurs thermosensibles

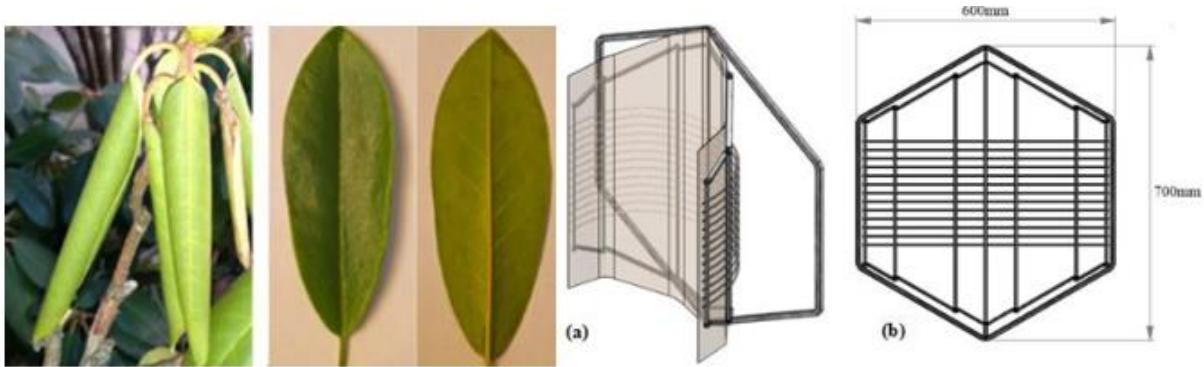


Figure III. 9 : système d'ombrage biomimétique développé par (Shahin *et al.*, 2023) Source : Shahin *et al.*, (2023)

. Ce système biomimétique présente l'avantage d'éviter le recours à des mécanismes motorisés complexes et énergivores, puisqu'il s'active automatiquement en réponse aux fluctuations thermiques. Testée sur une salle de réunion d'un immeuble de bureaux au Caire, l'enveloppe biomimétique a démontré une réduction de 43 % de la consommation énergétique annuelle ainsi qu'une diminution de 37 % des charges de refroidissement. Ces résultats mettent en évidence le potentiel élevé de ce type de systèmes d'enveloppe adaptative pour l'optimisation énergétique des bâtiments exposés à de fortes charges thermiques, tout en illustrant la pertinence du biomimétisme comme stratégie de conception durable.

Dans une optique de dépassement des limites des enveloppes adaptatives monofonctionnelles, (Soliman & Bo, 2023) propose dans son article « **An innovative multifunctional biomimetic adaptive building envelope based on a novel integrated methodology of merging biological mechanisms** » un modèle innovant d'enveloppe biomimétique multifonctionnelle, conçu pour un bâtiment tertiaire en climat chaud égyptien. Cette enveloppe s'inspire de trois organismes : *Mimosa pudica*, *Echinocactus grusonii* (cactus), et *Lithops salicola* (plante pierre) en combinant leurs mécanismes biologiques dans un système unique intégrant pliage, ouverture/fermeture, et respiration passive.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

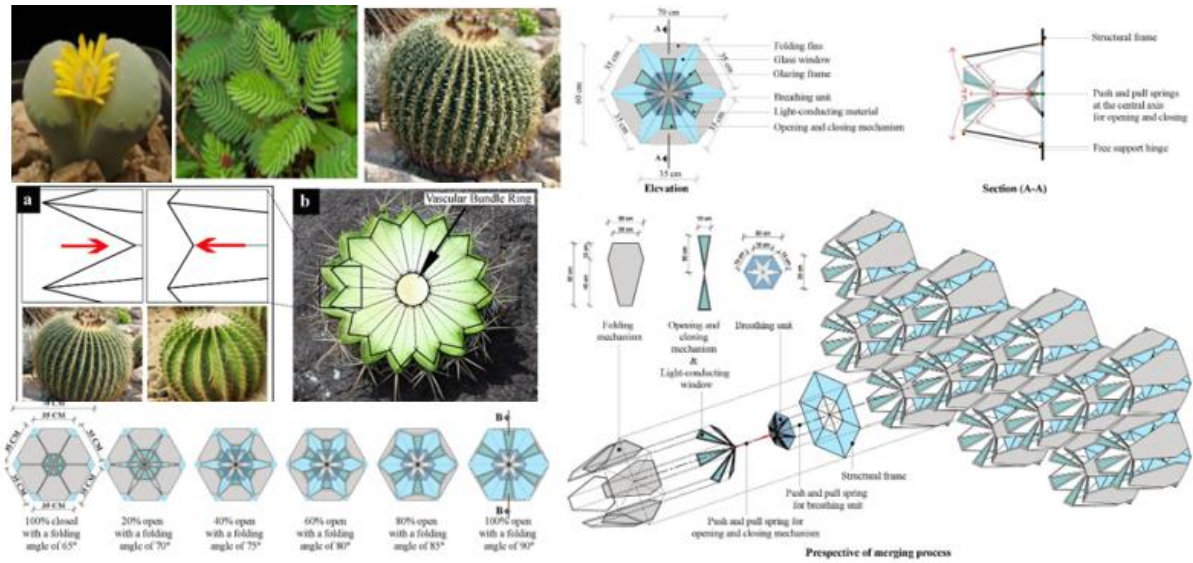


Figure III. 10 : le système de contrôle solaire bio inspiré de Soliman & Bo, (2023). Source : (Soliman & Bo, 2023))

Grâce à une méthodologie intégrée basée sur la fusion de fonctions biologiques statiques et dynamiques, le MBio-ABE permet une interaction autonome avec l'environnement, simulée et optimisée par algorithme Python. Les résultats montrent une réduction de 3 °C de la température intérieure en été par ventilation naturelle, ainsi qu'une amélioration du confort thermique annuel de 11,3 %, passant de 45,74 % à 57,04 % d'heures de confort. Cette approche démontre que la multifonctionnalité issue du modèle biologique fusionné constitue une avancée significative dans la conception d'enveloppes durables, réactives et adaptées aux conditions climatiques extrêmes.

Dans le cadre d'un climat chaud et aride tel que celui de Biskra, (Khelil, 2021) dans sa thèse de doctorat intitulée « **Advanced building's skin design towards the optimization of the energy consumption in hot and arid regions** », s'est inspiré du mécanisme d'ouverture et de fermeture de la fleur *Ipomoea purpurea* n (morning glory). . Cette fleur, dotée de plusieurs récepteurs et capteurs lumineux, réagit aux variations d'intensité lumineuse et de température par l'action coordonnée d'organes moteurs et de gènes, responsables de son mouvement nyctinastique. Transposée au domaine architectural, cette stratégie biologique a conduit au développement d'une morphologie cinétique basée sur l'origami rigide plié, permettant un auto-ombrage paramétrique des façades.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art



Figure III. 11 : : le système d'ombrage biomimétique proposé par Khelil, Source : (Khelil, 2021)

Les simulations appliquées à un bureau type à l'aide de logiciel Rhino et grasshopper ont montré des résultats significatifs en termes de performance thermique et énergétique. Le dispositif biomimétique a permis de réduire la consommation énergétique de 13 % pendant la période chaude et de 9 % pendant la période froide. Par ailleurs, une amélioration notable des températures intérieures a été observée, avec une diminution de 4 °C pour la journée type chaude (DD1) et de 2 °C pour la journée type froide (DD2). Ces résultats confirment le potentiel des systèmes cinétiques biomimétiques, inspirés de mécanismes végétaux, comme solution d'optimisation de l'efficacité énergétique et de l'amélioration du confort thermique dans des climats extrêmes.

Dans la recherche « **Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration** » menée par (Abdel-Rahman, 2021) en Égypte, l'inspiration est tirée du cactus tonnelet (*Ferocactus wislizeni*), dont les épines forment un dispositif naturel d'auto-ombrage. L'étude transpose cette stratégie biologique à la conception de l'enveloppe d'un bâtiment de bureaux, en s'appuyant sur les surfaces plissées du cactus pour générer des zones de microclimat sous les parties ombragées. Ce dispositif permet de réfléchir le rayonnement solaire direct et indirect, limitant ainsi les gains thermiques.

L'analyse montre que l'application de cette approche biomimétique contribue de manière significative à l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe. En effet, les charges thermiques totales d'une unité de bureau représentative sont réduites de 366,36 kWh à 319,98 kWh, soit une diminution d'environ 12,65 % par rapport à l'état de référence, démontrant l'efficacité de l'optimisation inspirée du modèle naturel

(Mohamed Abd El-Rahman et al., 2020) ont proposé dans leur recherche « **Biomimicry inspired Adaptive Building Envelope in hot climate** », un modèle théorique d'enveloppe adaptative inspirée de la Giant White Impomoea, Le système d'ombrage dynamique proposé

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

est un écran composé d'unités rectangulaires fonctionnant comme des dispositifs d'ombrage individuels, qui pivotent à différents angles en réponse au mouvement du soleil afin de bloquer le rayonnement solaire direct. Les auteurs ont utilisé un logiciel de modélisation paramétrique appelé Grasshopper dans Rhino, avec les plugins Honeybee et Ladybug, et la simulation a été réalisée à l'aide du logiciel EnergyPlus.

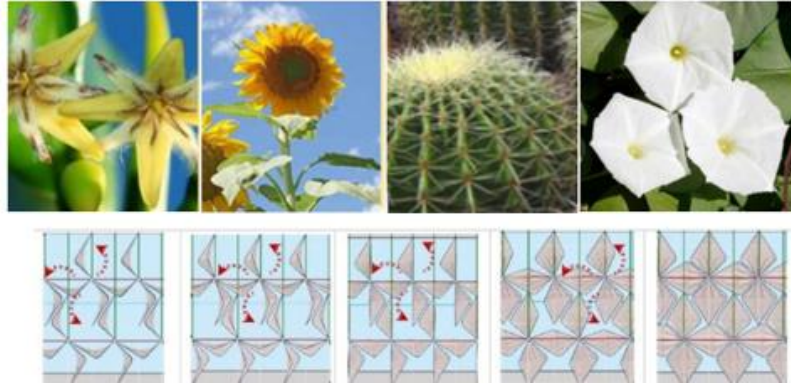


Figure III. 12 : les différentes configurations du système adaptatif en suivant le mouvement de la fleur Giant White Impomoea .Source : (Mohamed Abd El-Rahman et al., 2020)

Les simulations montrent une réduction de 39 % de la consommation annuelle de refroidissement (16 080,4 kWh/an contre 26 448,3 kWh/an pour le cas de référence). Cette baisse s'explique par la diminution significative des gains thermiques et des zones de surchauffe, notamment en période estivale. En conséquence, le confort thermique intérieur est nettement amélioré, en réduisant la température de 4,5 °C avec une augmentation de 2 873 heures de confort par an.

(Sheikh & Asghar, 2019b) ont proposé dans leur recherche « **Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings** » un système pliant comme façade biomimétique adaptative, inspirée des propriétés physiologiques, physiques et adaptatives d'une feuille d'Oxalis oregana, Le module de base de la façade se compose de quatre volets pliants pouvant se plier le long des axes horizontal et vertical. La conception permet un ombrage efficace aux angles solaires élevés et bas, tout en maintenant la visibilité vers l'environnement extérieur.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

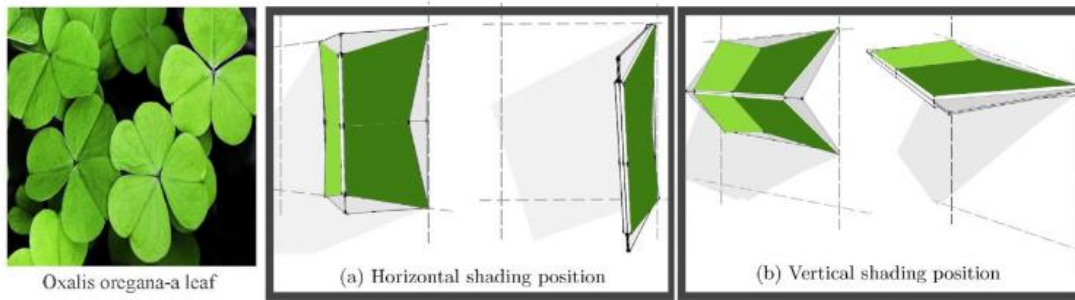


Figure III. 13 : l'enveloppe biomimétique adaptative suggérée par Wajiha Sheikh et al. (2019), Source : (Sheikh & Asghar, 2019b).

La simulation a été réalisée à l'aide de logiciels d'analyse énergétique, notamment Revit 2016, Inside 360 et Ecotect 2011. L'un des bâtiments de bureaux existants de 20 étages situé dans un climat chaud et humide du Pakistan a été utilisé comme étude de cas pour le système de façade proposé. Les résultats numériques montrent que le système pliant de la façade biomimétique réduit la consommation énergétique avec une réduction minimale du confort visuel, en diminuant la charge énergétique du bâtiment de 32 %

LIFT Architects ont également présenté un prototype interactif appelé The Air Flow (ER), inspiré de la fleur de crocus jaune. Il s'agit d'un dispositif de ventilation thermiquement actif et autonome en énergie, qui se comporte comme une fleur, dont les « pétales » s'ouvrent largement lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées, comme illustré dans la figure ci-dessous

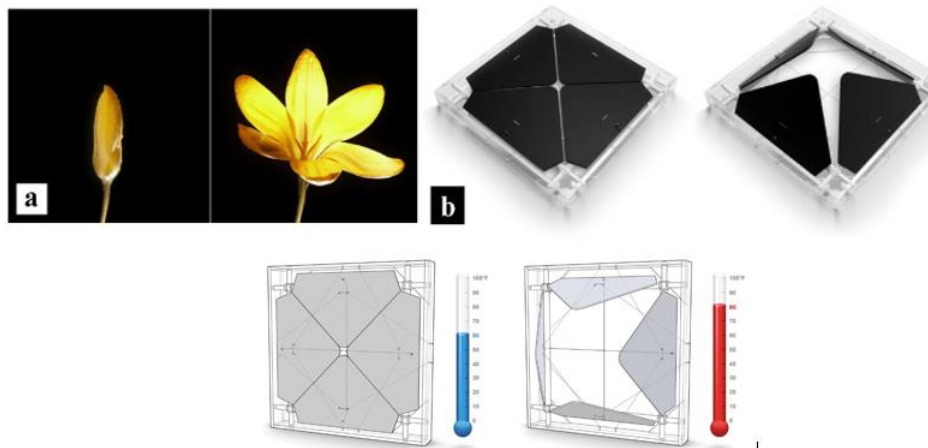


Figure III. 14

Figure 1 : a) la source d'inspiration :crocus jaune. (b) Le prototype interactif de The Air Flow (ER).Source : LIFT Architects <https://www.liftarchitects.com/#/air-flower>

Le composant actif de l'appareil The Air Flow (ER) est un fil d'alliage à mémoire de forme (AMF) fabriqué sur mesure, généralement considéré comme un matériau intelligent en raison de sa réponse unique aux changements de température. L'avantage principal de cette enveloppe adaptative réside dans un contrôle accru des échanges thermiques et aérauliques entre la zone

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

intérieure et l'environnement extérieur. En été, la cavité entre les peaux intérieure et extérieure peut être ventilée vers l'extérieur grâce à la réponse automatique de The Air Flow (EF) à l'élévation des températures, ce qui permet d'atténuer les gains solaires et de réduire la charge de refroidissement sur les équipements mécaniques du bâtiment. En hiver, la façade peut agir comme un capteur solaire passif en scellant la cavité et en utilisant le rayonnement absorbé pour minimiser les pertes thermiques à travers la façade.

Des expériences sur le modèle physique ont prouvé que ce système peut réduire la température de 26,67 °C à 16 °C grâce à l'entrée d'air dans le bâtiment, et maintenir une température régulée à des niveaux confortables

Selon la thèse « **Pratique du biomimétisme dans l'architecture bioclimatique : Essai sur la performance énergétique des enveloppes architecturales autonomes responsives dans un climat aride** » de (Hadbaoui, 2018), l'application d'un système de protection solaire inspiré du mouvement thermonastique des fleurs, sur un immeuble de bureaux situé à Bousaâda, caractérisée par un climat semi-aride chaud (BSh), a démontré une capacité significative à réduire les gains de chaleur en période estivale, entraînant une diminution de la consommation énergétique comprise entre 8,86 % et 11,29 %.

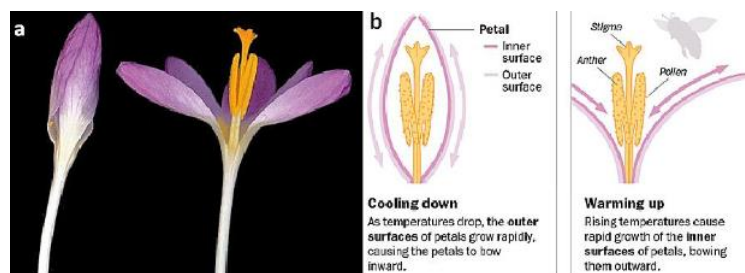


Figure III. 15 : : (a) Fleurs de Crocus s'ouvrent lorsque la température augmente (b) schéma de principe de mécanisme de mouvement thermonastique des Crocus/ Source : (Hadbaoui, 2018)

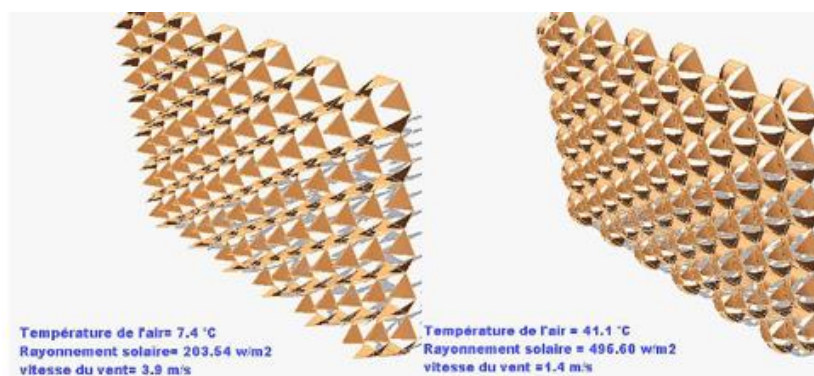


Figure III. 16 : le système d'ombrage proposé par Hadbaoui(2018) , à droite en état semi ouvert , à gauche, semi fermé . Source : (Hadbaoui, 2018)

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

Néanmoins, des améliorations du modèle restent nécessaires afin d'optimiser davantage les performances et maximiser les gains énergétiques. Ce dispositif biomimétique permet ainsi une réduction notable des charges de refroidissement en été. En revanche, durant la saison hivernale, une augmentation de la consommation énergétique est constatée, en particulier pour l'orientation sud, qui bénéficie des apports solaires les plus importants. Pour la journée estivale sélectionnée, l'économie d'énergie en refroidissement atteint 0,8 %, tandis qu'elle s'élève à 2 % lors de la journée hivernale ensoleillée. Les résultats confirment cependant l'efficacité optimale du système pour l'orientation ouest. Dans le cas de l'immeuble de bureaux étudié à Bousaâda, les économies d'énergie estivales varient entre 8,89 % pour l'orientation sud et 11,28 % pour l'orientation ouest.

Dans la recherche «**Multi-functional biomimetic adaptive façades: A case study** » menée par (Kuru et al., 2021), les auteurs ont proposé une enveloppe adaptative biomimétique fondée sur un cadre méthodologique visant la multifonctionnalité des façades, à travers l'application de principes naturels de conception en prenant le cactus tonnelet (*Echinocactus grusonii*), comme modèle d'inspiration appliqué à sur un bâtiment éducatif situé à Western Sydney, Australie . Le modèle développé se présente sous la forme d'un module pliant, capable d'expansion et de contraction en fonction de la température grâce à l'utilisation d'alliages à mémoire de forme (AMF), jouant le rôle de matériaux intelligents sensibles au rayonnement solaire

L'évaluation de ce système a été réalisée par des simulations énergétiques sur un bâtiment éducatif situé à Sydney, en utilisant DesignBuilder couplé à EnergyPlus. Les résultats montrent une diminution de la température intérieure de 3,28 °C en mode de ventilation naturelle, ainsi qu'une réduction des heures d'inconfort de 23,18 %. Une analyse environnementale menée sur une année type a confirmé ces résultats, révélant une amélioration substantielle du confort thermique. En effet, selon le modèle de confort thermique adaptatif de la norme ASHRAE 55-2010, le nombre d'heures d'inconfort a chuté de 1 112,5 à 540,5 heures (-51,5 %) pour un seuil d'acceptabilité de 90 %, et de 865,5 à 282 heures (-67,5 %) pour un seuil de 80 %.

Cependant, si la consommation énergétique globale reste relativement stable, avec une légère hausse de 3,4 %, la demande en chauffage a plus que doublé, passant de 2,77 à 7,05 kWh/m² (soit +60,8 %). Cette configuration démontre ainsi une nette réduction des inconforts estivaux, mais au prix d'une augmentation des besoins de chauffage en hiver.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

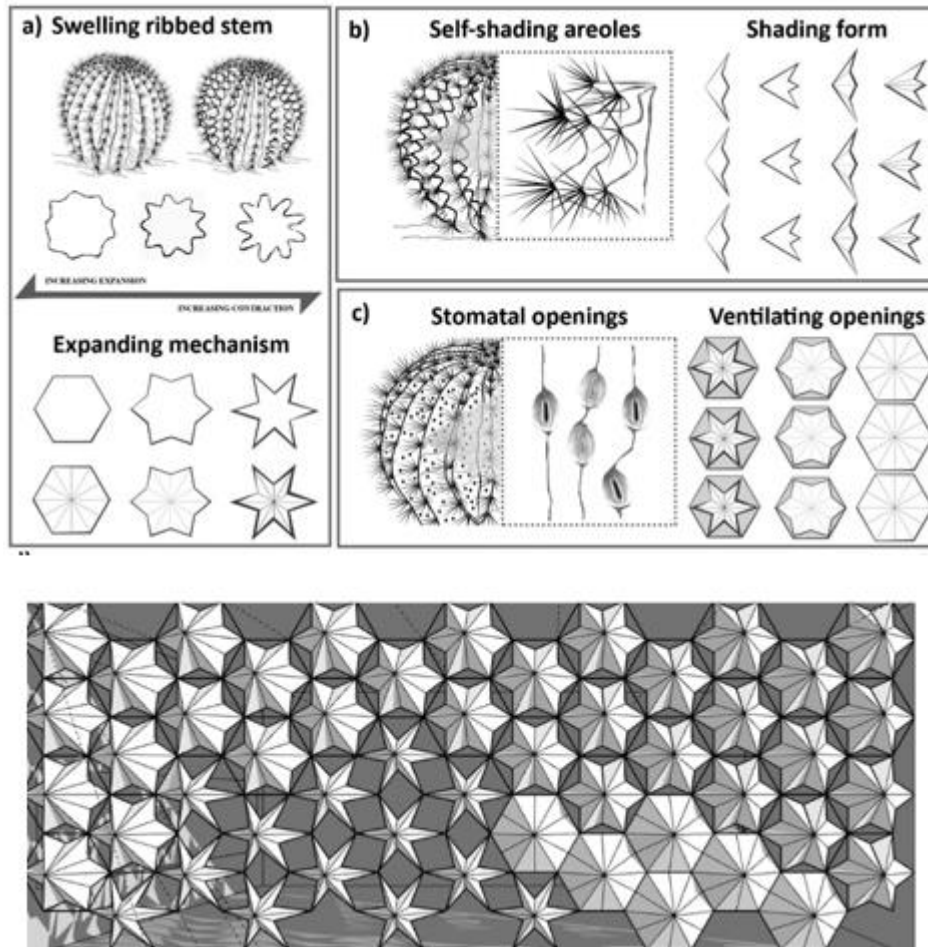


Figure III. 17 : le système d'ombrage biomimétique proposé par Aysu Kuru et al. (2018). Source : (Kuru et al. 2018).

Dans le cadre de l'amélioration des performances environnementales des bâtiments existants, (Öztürk et al., 2024) proposent dans l'étude « **Enhancing energy efficiency in glass facades through biomimetic design strategies** » une approche biomimétique appliquée au bain historique de Süleyman Pacha, situé à Izmit, en Turquie, dans un climat aux contrastes thermiques saisonniers marqués. L'étude porte sur un espace café à vocation socio-culturelle, intégré au bâtiment et caractérisé par une façade vitrée générant des problèmes de surchauffe estivale et de déperditions thermiques hivernales. Afin d'y remédier, les auteurs développent une façade biomimétique dynamique inspirée de mécanismes naturels de thermorégulation, notamment ceux de *Fenestraria aurantiaca*, capable de filtrer le rayonnement solaire, et du giant ground grass, dont les mouvements d'ouverture et de fermeture assurent une protection thermique adaptative.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

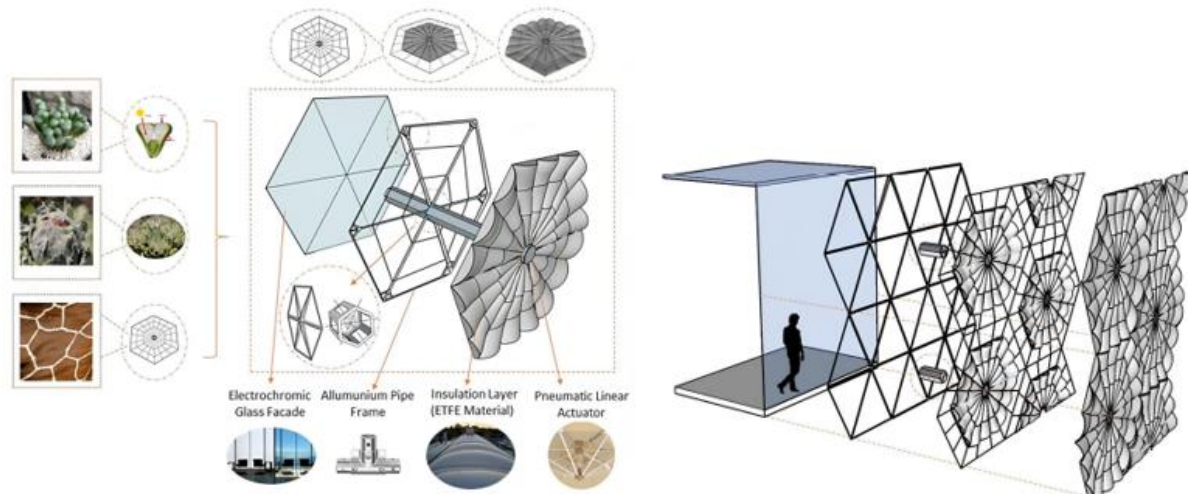


Figure III. 18 : système d'ombrage biomimétique proposé par(Öztürk et al., 2024) Source : (Öztürk et al., 2024)

Ces principes sont traduits architecturalement par une façade double peau combinant verre électrochrome et système pneumatique en ETFE sensible à la température, permettant une adaptation continue aux conditions climatiques. Les performances énergétiques, évaluées par simulation sous DesignBuilder à travers trois scénarios (façade existante, verre électrochrome simple et double), révèlent une réduction de la consommation énergétique annuelle de 16 % pour le verre électrochrome simple et jusqu'à 32 % pour la façade biomimétique double, démontrant l'efficacité des enveloppes adaptatives bio-inspirées dans l'amélioration du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments patrimoniaux réhabilités.

Dans l'étude « **Reduction of Thermal Loads by Biomimetic Responsive Skins** » de (Shama et al., 2022) une peau réactive biomimétique est proposée pour la rénovation thermique d'un bâtiment de bureaux situé à ,Gizeh, en Égypte, caractérisée par un climat chaud désertique La conception de la façade s'inspire du Mimosa pudica, une plante capable de mouvements rapides et vigoureux de ses feuilles pour économiser de l'énergie et répondre aux stimuli environnementaux. La peau intègre un motif hexagonal reproduisant la cellule du mimosa, divisé en lames mobiles, dont le mouvement est contrôlé par des capteurs de lumière et de température pour suivre le parcours du soleil et s'adapter aux conditions solaires tout au long de la journée.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

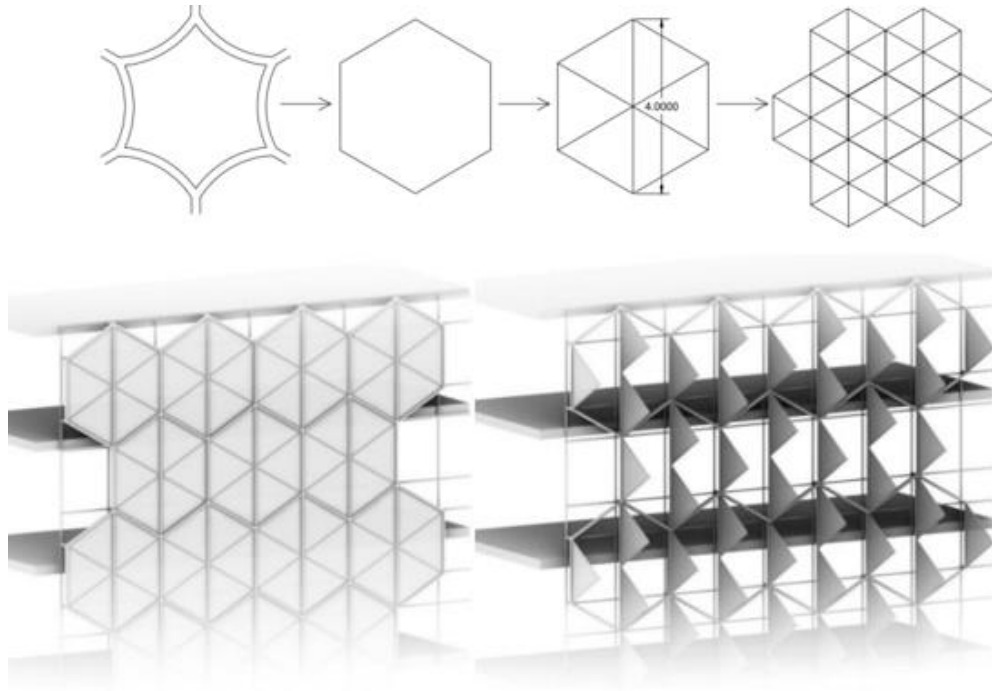


Figure III. 19 : le système biomimétique proposé par :(Shama et al., 2022) . Source :(Shama et al., 2022)

Les résultats de simulation ont montré que l'installation de cette façade réduit la température opérative de 2,8 à 3 °C dans les zones exposées au soleil et de 0,5 à 0,6 °C en moyenne dans tout l'espace à 15 h le 21 juin, moment le plus chaud de la journée. Sur l'ensemble de l'année, les charges de refroidissement ont été réduites de 8 %, tandis que les charges de chauffage sont restées quasiment constantes.

L'étude « **Simulation-based performance evaluation of kinetic Mashrabiya for thermal comfort and energy efficiency in arid climates: A case study in Biskra, Algeria** » de (Ben Bacha & Bourbia, 2025)(évalue, par simulation paramétrique, la performance thermique et énergétique d'une Mashrabiya cinétique appliquée à un bâtiment de bureaux situé à Biskra (Algérie), caractérisée par un climat aride chaud (BWh). Inspiré des façades dynamiques (Al Bahar Towers), : Le système de façade des Al Bahar Towers repose sur une Mashrabiya cinétique composée d'éléments triangulaires motorisés qui s'ouvrent et se ferment en fonction de la position du soleil. Ce fonctionnement évoque les mécanismes d'ouverture et de fermeture de la fleur « gloire du matin ».

Les résultats montrent une réduction de 35 % du rayonnement solaire direct et une diminution des gains solaires directs de 19,4 %, entraînant une amélioration significative du confort thermique. La température intérieure maximale est réduite de 4,0 à 4,8 °C, tandis que les heures de confort thermique augmentent de 21,3 % à 38 %, avec une baisse des heures de surchauffe de 56,5 % à 34,2 %. Sur le plan énergétique, la Mashrabiya dynamique permet des économies

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

annuelles de 37 à 43 %, principalement grâce à la réduction des charges de refroidissement, avec une efficacité particulièrement marquée sur la façade ouest. L

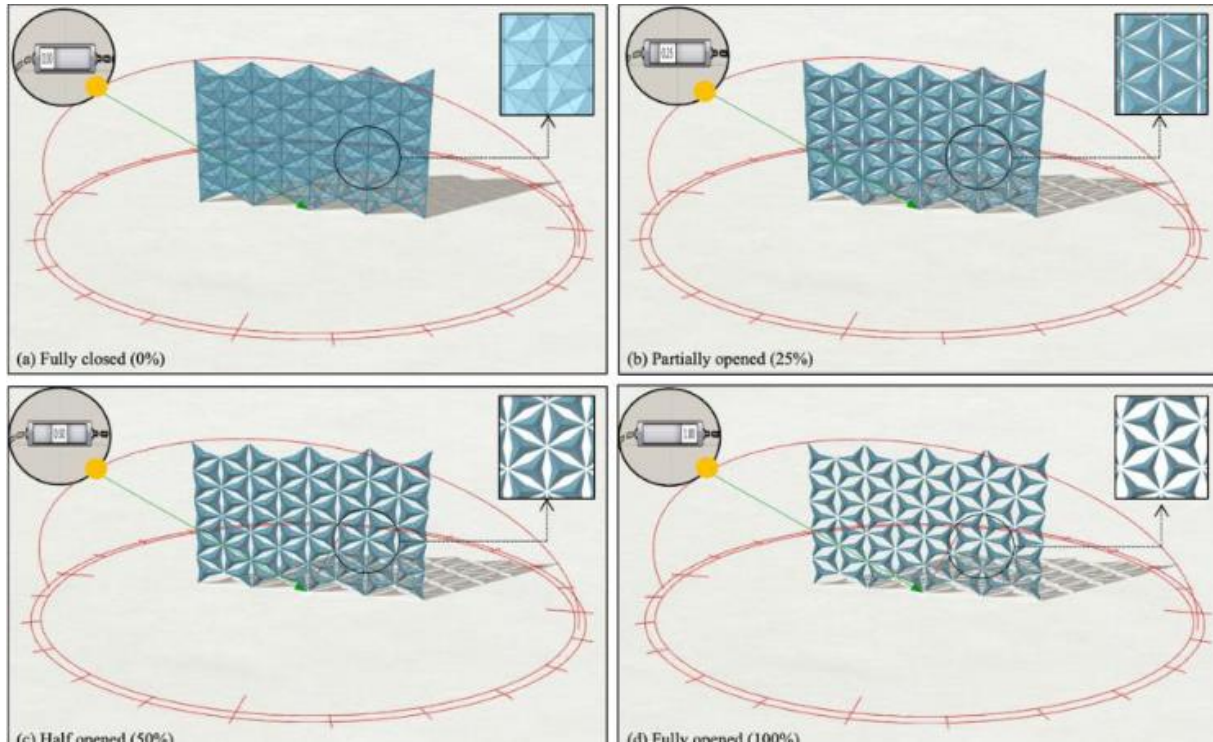


Figure III. 20 : le système de contrôle solaire proposé par (Ben Bacha & Bourbia, 2025) . Source : (Ben Bacha & Bourbia, 2025)

l'étude confirme ainsi le fort potentiel des systèmes d'ombrage dynamiques bio-inspirés pour améliorer le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments tertiaires en climats arides

Dans leur article « **Cactus-inspired multifunctional Bio-kinetic façade for energy performance improvement assessed by a novel energy simulation framework** », (Fattah et al., 2025) proposent une façade biomimétique cinétique multifonctionnelle (Bio-KF) destinée à améliorer la performance énergétique de bâtiments de bureaux à mur rideau. Le système s'inspire des mécanismes de thermorégulation des cactus, en particulier du réseau d'épines et du fonctionnement stomatique du *Pilosocereus chrysostele*, et est appliqué à trois typologies de bâtiments (linéaire, centrale et à cour) implantés à Sulaimani (climat tempéré) et à Bagdad (climat désertique).

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

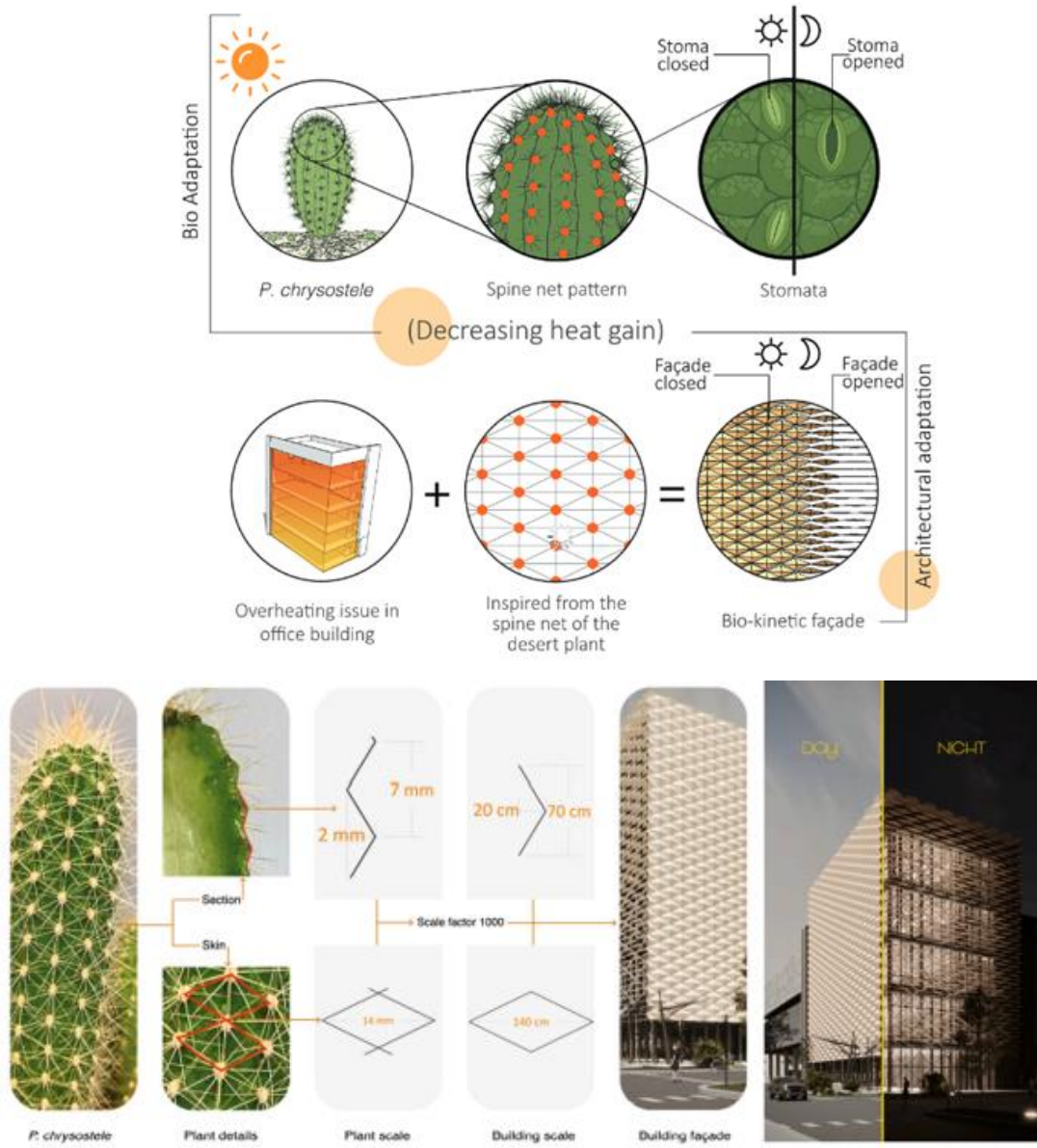


Figure III. 21 : système d'ombrage biomimétique proposé par (Fattah et al., 2025) .Source : (Fattah et al., 2025)

Évaluée à l'aide d'un cadre de simulation énergétique innovant (ASI) couplé au logiciel IDA ICE, la façade dynamique à géométrie origami et à angles d'ouverture variables (0° à 125°) montre une amélioration significative de l'efficacité énergétique du refroidissement, une réduction des émissions de CO₂ et des coûts d'exploitation comprises entre 25 % et 67 % selon la typologie et le climat. En termes absolus, les émissions de CO₂ sont réduites de 22,6 à 146,1 tonnes par an pour un bâtiment de bureaux de cinq étages.

Les résultats indiquent que l'angle d'ouverture de 125° constitue la configuration la plus performante, permettant une diminution de la charge annuelle de refroidissement de 52 % à 67 % en climat tempéré et de 38 % à 55 % en climat désertique, confirmant ainsi le fort potentiel

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

des façades biomimétiques dynamiques pour l'amélioration du confort thermique et de l'efficacité énergétique en contextes climatiques chauds.

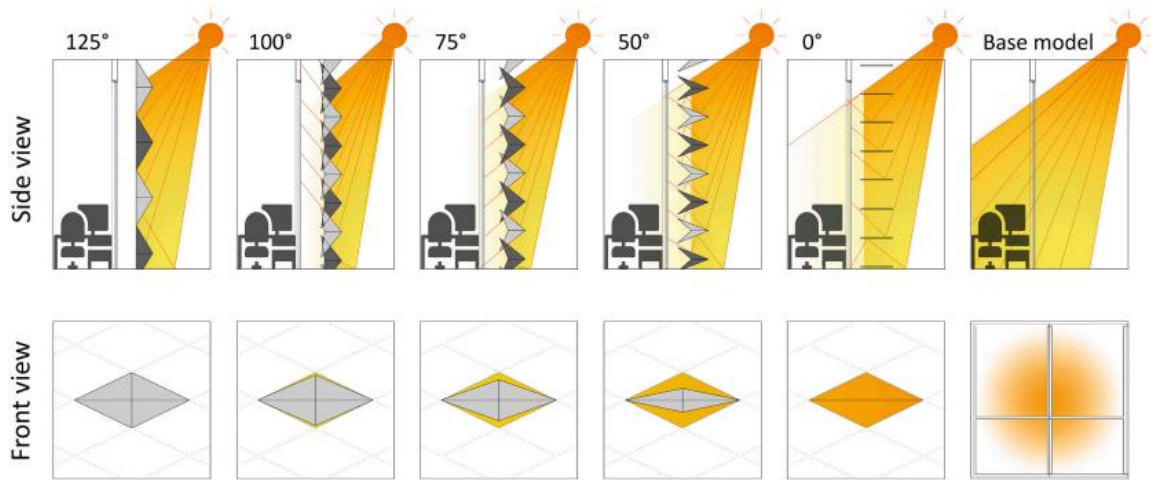


Figure III. 22 les différentes angles d'ouverture du système de contrôle solaire proposé par (Fattah et al., 2025) . Source : (Fattah et al., 2025)

III.9 Résultats d'analyse des études antérieures

Les systèmes de contrôle solaire biomimétiques ont été analysés selon les critères suivant :

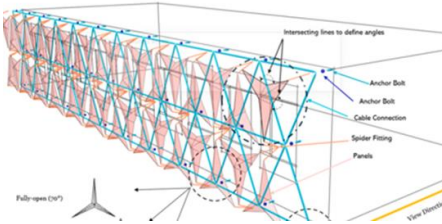

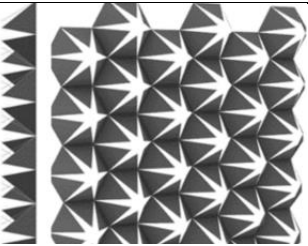

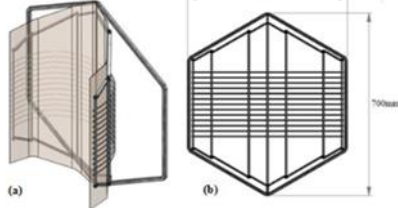

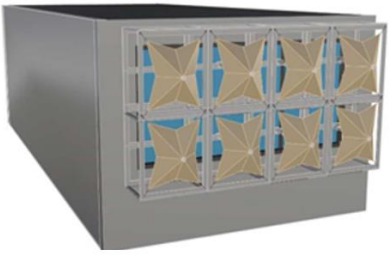

- **Le type de bâtiment**

L'analyse des études recensées montre que les façades adaptatives biomimétiques sont majoritairement conçues et testées dans le cadre de bâtiments du secteur tertiaire, tels que les immeubles de bureaux et les établissements éducatifs. Ces contextes offrent en effet des environnements expérimentaux privilégiés pour l'évaluation de différents critères et paramètres environnementaux (éclairage naturel, confort thermique performance énergétique, etc.).

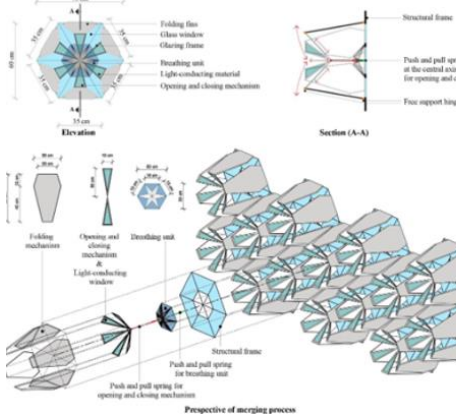

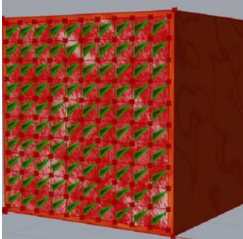

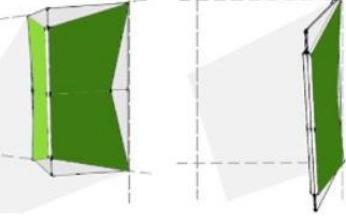

En revanche, leur application au secteur résidentiel demeure encore très limitée, malgré le fait que ce dernier soit reconnu comme l'un des secteurs les plus énergivores et présentant donc un potentiel considérable d'optimisation. Cette disparité souligne un déséquilibre dans les orientations de recherche et d'expérimentation, concentrées sur le tertiaire, alors que le secteur l'habitat constitue un champ d'application prioritaire en matière d'efficacité énergétique et de confort thermique.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

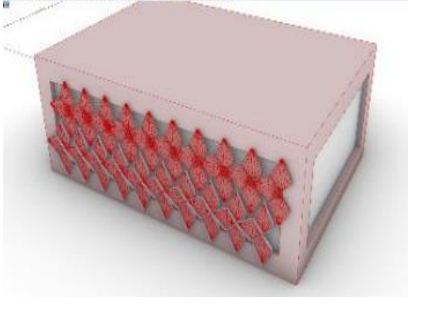

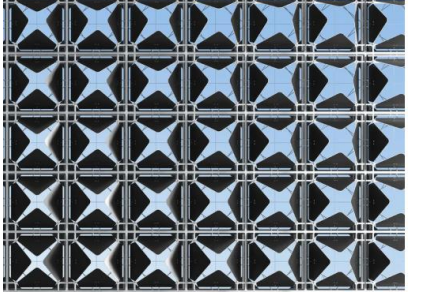

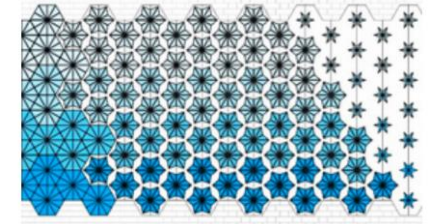

Tableau III. 1 : Synthèse des travaux scientifiques recensés dans la revue de littérature. Source : Auteur (2025).

Auteur	Type du bâtiment	Climat	Façade design	Source d'inspiration	Mouvement	Matériau	Performance	Outils
Yazdi Bahri et al., (2025)	bâtiment éducatif.	Barcelone Csa		 l'Oxalis	Pliage	NM	EUI PMV sGA HC	EnergyPlus, Radiance
(Ashraf & Abdin, 2024)	Bâtiment administratif	Egypt. BWh		 Cactus Saguaro	Pliage	NM	EUI CT sGA	Rhino– Grasshopper, Octopus
(Shahin et al., 2023)	bâtiments administratif (salle de réunion)	Caire (Egypt) BWh		 les feuilles de Rhododendron	Enroulement/ roulement	Fils en Nitinol (AMF)	CR	
(Khelil, 2021)	Bâtiment administratif	Biskra, (Algérie) BWh		 Ipomoea purpurea, (morning glory).	Pliage	NM	- CR - CR -GS	Rhino– Grasshopper,



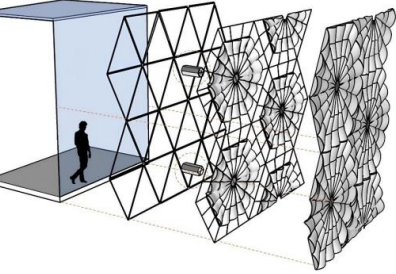

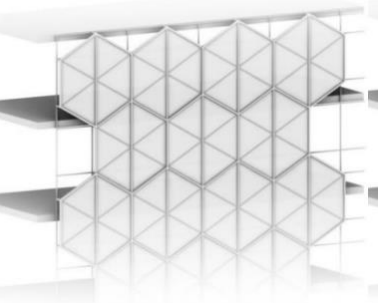
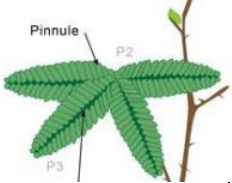
CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

<p>(Soliman & Bo, 2023)</p>	<p>bâtiment administratif</p>	<p>(Egypt). BWh</p>		 <p>Lithops Mimosa pudica, Echinocactus grusonii</p>	<p>Pliage Rotation,</p>	<p>NM</p>	<p>T HC</p>	<p>Python</p>
<p>(Abdel-Rahman, 2021)</p>	<p>Bâtiment administratif</p>	<p>Egypt. BWh</p>		 <p>Cactus tonnelet (Ferocactus wislizeni)</p>	<p>Statique</p>	<p>NM</p>	<p>CT</p>	
<p>(Sheikh & Asghar, 2019)</p>	<p>Bâtiment administratif</p>	<p>Lahore (Pakistan) Cwa</p>		 <p>d'Oxalis oregana</p>	<p>Pliage</p>	<p>NM</p>	<p>EE</p>	<p>Revit, Ecotect, Insight 360</p>

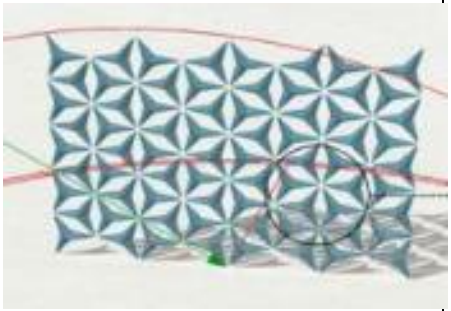

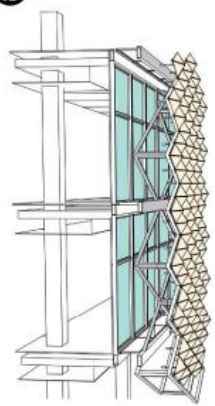

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

(Mohamed Abd El-Rahman et al., 2020)	Bâtiment administratif	Caire (Egypt) BWh		 <p>la Giant White Impomoea,</p>	Rotation, folding	PTFE Polytétrafluoroéthylène)	TO HC CR	Rhino–Grasshopper, EnergyPlus
LIFT Architects 2019		NM		 <p>la fleur de crocus jaune</p>	Pliage	Alliage à mémoire de forme (AMF)	T	Tests expérimentaux
(Kuru et al., 2021),	bâtiment éducatif	Sydney, (Australie) Cfa		 <p>le cactus tonnelet</p>	Expansion / contraction	alliages à mémoire de forme (AMF)	T HC	Design Builder, EnergyPlus

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

(Hadbaoui , 2018)	Bâtiment administratif	Boussaâda (ALgeria) BSk	 <p>• l'air = 41.1 °C solaire = 496.60 w/m2</p>	 <p>Fleurs de Crocus</p>		Bimetales	<ul style="list-style-type: none"> - CR - CR -GS 	
(Öztürk et al., 2024)	Bâtiment touristique	Izmir (La Turquie) CSA		 <p>Fenestraria aurantiaca giant ground grass</p>		un verre électrochrome système en ETFE,	CCR CC EE	DesignBuilder
(Shama et al., 2022)	Batiment administratif	Gizeh (Egypt) BWh		 <p>Mimosa pudica,</p>		NM	TO CT	DesignBuilder,

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

(Ben Bacha & Bourbia, 2025)	Bâtiment administratif	Biskra ,(Algérie) BWh		 Fleur du gloir de matin	Pliage	NM	GS T EE	Rhino– Grasshopper, EnergyPlus
(Fattah et al., 2025)	Bâtiment administratif	Sulaimani Baghdad (Irak) Csa & BWh.		 cactus, Ogonchu (Pilosocereus chrysosteale)	Pliage	NM	CR GS, E Em	IDA ICE, ASI

Légende :

Le climat : **BWh.** : Climat désertique chaud. **Csa** : climat méditerranéen chaud. , **BSk** : Climat semi-aride froid. **Cfa** : Climat subtropical humide. Cwa : Climat subtropical humide à hiver sec

Mouvement : **P** : Pliage. **R** : Rotation. **G** : Glissement. **M** : Mise à l'échelle (dilatation / contraction) : **C** : Courbure (flexion) :

Performance : **CT** : Charges thermique, **HC** (heures de confort), **TO** : température opérative, **PMV** : Predicted Mean Vote , **CC**: charges de chauffage , **CR** : charges de refroidissement . **EE** : Efficacité énergétique, **GS** : gains t solaire. **EUI** : Energy use intensity (Intensité d'utilisation de l'énergie) , **E** : éblouissement , **sGA** : Spatial Glare Autonomy . **Em** : emission du C

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

- **le type de Climat**

La plupart des recherches recensées dans la littérature se concentrent sur des contextes climatiques extrêmes, en particulier les régions désertiques arides (classification Köppen-Geiger Bwh), où la forte intensité du rayonnement solaire, les températures élevées et l'amplitude thermique diurne imposent des solutions architecturales spécifiques.

En revanche, beaucoup moins d'études ont été menées dans les climats méditerranéens chauds (Csa), qui présentent pourtant un intérêt scientifique et pratique considérable. Ce climat se distingue par un contraste saisonnier marqué : des étés chauds et secs caractérisés par un fort ensoleillement et un risque élevé de surchauffe intérieure, opposés à des hivers relativement froids et humides, durant lesquels les besoins en chauffage deviennent significatifs. Cette dualité impose aux bâtiments une double exigence : d'une part, limiter les gains solaires et favoriser la ventilation naturelle durant la période estivale ; d'autre part, maximiser les apports solaires passifs et conserver la chaleur durant l'hiver.

Dans ce contexte, l'application de façades biomimétiques et cinétiques revêt un potentiel particulier, car elles permettent une adaptation dynamique aux variations saisonnières. Or, le manque de travaux centrés sur le climat méditerranéen chaud crée une lacune scientifique, laissant sous-explore un domaine où la capacité des systèmes adaptatifs à concilier confort thermique et performance énergétique pourrait être pleinement mise en valeur.

- **La source d'inspiration**

L'analyse de la littérature révèle que la majorité des travaux examinés s'appuient sur une seule source biologique comme point de départ conceptuel. Toutefois, certaines recherches se distinguent par une approche plus holistique, mobilisant plusieurs organismes naturels afin de combiner des stratégies adaptatives complémentaires et d'augmenter le potentiel d'innovation architectural.

Dans les contextes chauds et arides, la plante la plus fréquemment citée est le cactus barrel dont la morphologie et les mécanismes d'adaptation (stockage de l'eau, épines agissant comme dispositifs de protection solaire, géométrie favorisant la dissipation thermique) en font un modèle biomimétique pertinent. Ce choix est justifié par la capacité de cette espèce à survivre dans des environnements extrêmes, où la gestion de la chaleur et de l'humidité est cruciale.

Cependant, lorsque l'on considère un climat méditerranéen chaud, caractérisé par une forte variabilité saisonnière (étés secs et chauds, hivers humides et relativement froids), le recours exclusif à un modèle biologique issu des milieux arides apparaît insuffisant. Dans ce cas, l'inspiration doit s'élargir à des organismes végétaux capables de s'adapter à des fluctuations

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

thermiques marquées, comme certaines fleurs héliotropes dont les mouvements thermiques optimisent la capture ou la protection vis-à-vis du rayonnement solaire.

- **Le mouvement cinétique du système de contrôle solaire proposé**

Les études récentes soulignent que l'intégration de mouvements cinétiques dans les enveloppes bâties offre la possibilité d'opérer différentes transformations géométriques telles que le pliage, la courbure, l'expansion, la contraction ou la translation. Grâce à ces ajustements dynamiques, la façade acquiert une capacité d'adaptation immédiate face aux variations de l'environnement. Le mouvement de pliage est, par ailleurs, le plus utilisé dans les études antérieures, tandis que le mouvement de rotation reste très peu abordé, ce qui constitue une lacune de recherche importante.

- **Les matériaux utilisés**

Les matériaux constituent un facteur déterminant dans la performance et l'efficacité environnementale des systèmes biomimétiques. Alors que certaines études ne détaillent pas la nature des matériaux employés, la majorité repose encore sur des composants traditionnels tels que le verre, le métal ou le plastique. Cependant, une nouvelle orientation de la recherche explore l'usage de matériaux dits intelligents, capables d'adapter leurs propriétés en fonction des sollicitations externes.

Parmi ces innovations, le verre photochromique occupe une place centrale. Sensible à l'intensité lumineuse, il est en mesure de modifier son degré de transparence ou sa teinte sous l'effet du rayonnement solaire, contribuant ainsi à réguler l'éclairage naturel et les apports solaires indésirables. Les alliages à mémoire de forme offrent un autre exemple de matériaux avancés : en réagissant à la chaleur, ils retrouvent automatiquement leur configuration initiale, jouant le rôle d'actionneurs dans les systèmes d'ombrage et de ventilation.

Cette approche a notamment été mise en œuvre par Kuru et al. (2018) dans la conception du système multi-fonctionnel Bio-ABS, qui associe un vitrage photovolta-chromique pour le contrôle solaire à des ouvertures activées par Les alliages à mémoire de forme, démontrant ainsi la possibilité de combiner plusieurs fonctions adaptatives au sein d'une même enveloppe. De manière générale, les matériaux intelligents ouvrent de nouvelles perspectives pour l'architecture biomimétique. Leur réversibilité face à des stimuli tels que la lumière ou la température leur permet d'intégrer des mécanismes de détection et d'actionnement directement dans les parois, conférant aux façades adaptatives une capacité d'autorégulation et une autonomie fonctionnelle accrues.

- **Performances du bâtiment**

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

Les recherches antérieures consacrées aux façades adaptatives biomimétiques ont évalué leurs performances selon trois axes principaux.

Premièrement, la gestion des radiations solaires constitue un critère central. Les études mettent en évidence la capacité des enveloppes dynamiques à moduler l'apport solaire en fonction des saisons : maximisation du rayonnement en période hivernale pour favoriser les gains solaires passifs, et réduction de l'ensoleillement direct en période estivale afin de limiter la surchauffe. Cette régulation sélective permet d'optimiser l'équilibre entre éclairage naturel, apports thermiques et besoins en protection solaire.

Deuxièmement, le confort thermique représente un indicateur essentiel, souvent mesuré à travers la température opérative, les heures de confort, les modèles de confort adaptatif et les indices prédictifs tels que le PMV (Predicted Mean Vote). Les façades cinétiques adaptatives, en modulant leur géométrie et leur degré d'ouverture, offrent une meilleure stabilité thermique des espaces intérieurs, réduisant les écarts entre conditions ambiantes et zone de confort recommandée par les normes internationales (telles que l'ASHRAE 55).

Enfin, la performance énergétique constitue un troisième axe d'évaluation majeur. Elle est généralement appréhendée à travers l'analyse des charges de chauffage et de refroidissement, ainsi que de l'Energy Use Intensity (EUI). Les résultats démontrent que l'intégration de systèmes cinétiques bio-inspirés peut significativement diminuer les besoins énergétiques annuels en optimisant la gestion des flux thermiques et lumineux, tout en améliorant la résilience énergétique des bâtiments.

Ainsi, l'évaluation de la performance des façades adaptatives ne se limite pas à un seul indicateur, mais repose sur une approche multidimensionnelle où le rayonnement solaire, le confort thermique et l'efficacité énergétique sont intimement liés. Cette vision intégrée confirme le rôle stratégique de ces systèmes dans la conception durable et dans l'atteinte des objectifs de transition énergétique.

- **Outils de simulation**

La majorité des études sélectionnées montrent que les outils computationnels constituent un levier fondamental pour transposer les mécanismes adaptatifs des plantes vers les enveloppes architecturales. En effet, les environnements de modélisation paramétrique, les algorithmes évolutifs et les logiciels de simulation (tels que Grasshopper, Ladybug ou EnergyPlus) offrent la possibilité de reproduire virtuellement des comportements dynamiques comme l'orientation des feuilles, l'ouverture et la fermeture des stomates ou les mouvements thermonastiques, afin d'en tester la pertinence dans des systèmes architecturaux. Ces approches ne se limitent pas à

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

une simple modélisation formelle, mais permettent une optimisation multi-objectifs en explorant différentes configurations géométriques et matérielles pour maximiser simultanément le confort thermique, la performance énergétique et la qualité lumineuse.

Ainsi, le recours aux outils computationnels établit un véritable pont entre biologie et architecture, en transformant les principes adaptatifs des organismes vivants en solutions constructives mesurables et reproductibles. Cette démarche ouvre la voie à la conception d'enveloppes réactives capables de s'ajuster aux variations environnementales, renforçant le potentiel de l'architecture biomimétique dans la transition vers des bâtiments plus performants et résilients.

III.10 Positionnement épistémologique

L'analyse critique des études antérieures sur les façades biomimétiques adaptatives met en évidence plusieurs lacunes scientifiques et méthodologiques qu'il est nécessaire d'aborder afin d'élargir le champ de la recherche et de renforcer la pertinence des résultats.

III.11 Identification des lacunes

Premièrement, la majorité des recherches recensées se concentrent sur les climats extrêmes arides (Bwh), laissant en grande partie de côté les climats méditerranéens chauds (Csa). Or, ce dernier se caractérise par une forte variabilité saisonnière, conjuguant étés chauds et secs, propices à la surchauffe, et hivers froids et humides, générant des besoins en chauffage. Cette dualité impose des exigences contradictoires auxquelles peu d'études biomimétiques se sont intéressées, ce qui constitue une lacune majeure.

Deuxièmement, les applications recensées concernent essentiellement le secteur tertiaire (immeubles de bureaux, établissements éducatifs), alors que le secteur résidentiel demeure sous-exploré. Ce constat est paradoxal, puisque le logement représente l'un des secteurs les plus énergivores, et donc un champ d'application prioritaire pour l'optimisation énergétique et le confort thermique.

Troisièmement, la plupart des études s'inspirent d'une seule source biologique, souvent issue de milieux arides comme le cactus Barrel. Or, dans le cas d'un climat méditerranéen chaud, ce modèle s'avère limité. Il devient alors essentiel d'élargir la palette des sources d'inspiration à des espèces capables de s'adapter à des variations saisonnières marquées. C'est le cas, par exemple, de la fleur *Volubilis Blue*, dont les mouvements thermonastiques offrent un modèle pertinent pour réguler l'ensoleillement et améliorer la résilience architecturale face aux contrastes climatiques.

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

Enfin, une quatrième lacune concerne le type de mouvement des systèmes adaptatifs : les études privilégient largement le pliage et l'étirement, alors que les mouvements de rotation restent très peu explorés, limitant ainsi le potentiel d'adaptation des façades biomimétiques.

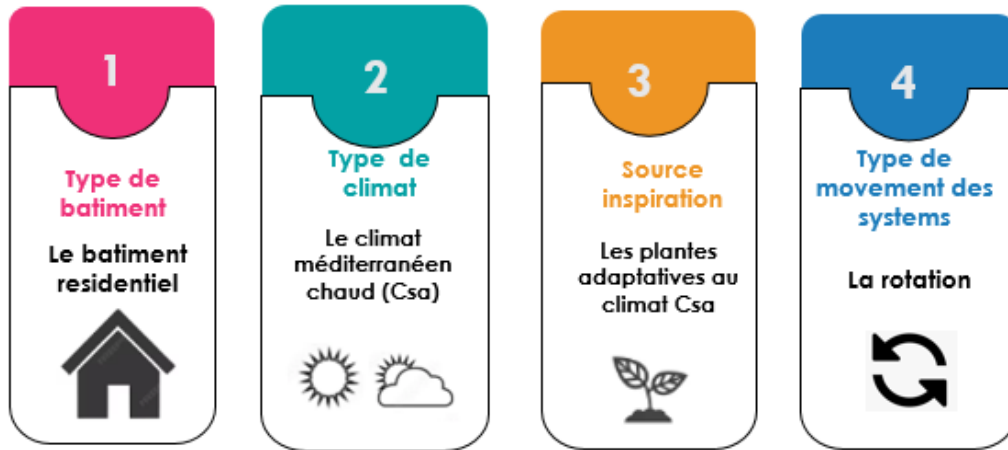


Figure III. 23. : Principales lacunes de la recherche identifiées à partir de l'analyse des études antérieures. Sucre : auteur (2025)

III.12 Nouveaux apports de la recherche

La présente recherche ambitionne de contribuer à ce champ en comblant ces lacunes. Elle propose :

- d'analyser le potentiel d'un système de contrôle solaire biomimétique appliqué au secteur résidentiel, dans le contexte spécifique d'un climat méditerranéen chaud.
- d'explorer une source d'inspiration alternative issue du monde végétal mieux adaptée aux variations saisonnières de ce climat que les espèces désertiques.
- de mettre en œuvre une méthodologie intégrée, combinant des approches qualitatives s'inspirant de la morphologie et le comportement de l'organisme choisis et quantitatives (simulations énergétiques et thermiques), afin de renforcer la robustesse des résultats
- de s'appuyer sur les outils computationnels avancés (Grasshopper, Ladybug, EnergyPlus), permettant de reproduire virtuellement les mouvements adaptatifs du modèle biologique sélectionné et de les transposer dans des enveloppes architecturales performantes ;
- d'évaluer les performances de la façade adaptative à travers une approche multi-critères incluant la gestion du rayonnement solaire, le confort thermique (température opérative, modèle adaptatif) et l'efficacité énergétique (charges de chauffage et refroidissement,).

III.13 Cadre méthodologique retenu

Le choix d'une approche combinée (qualitative et quantitative) se justifie par la complexité intrinsèque du biomimétisme, qui nécessite à la fois une compréhension fine des mécanismes biologiques et une validation numérique de leur transposition architecturale. L'intégration des outils computationnels ne se limite pas à une étape de modélisation, mais constitue un véritable pont entre biologie et architecture, permettant d'optimiser et de mesurer les performances des solutions proposées. De plus, le recours à des matériaux intelligents sera exploré afin de renforcer le caractère réactif et autonome des enveloppes biomimétiques.

Ainsi, cette recherche se positionne dans un cadre épistémologique inédit, en élargissant l'application des façades biomimétiques adaptatives à un climat peu étudié (méditerranéen chaud), à un secteur encore marginalisé (résidentiel), et à une source d'inspiration plus contextualisée. Elle mobilise une méthodologie interdisciplinaire où biologie, architecture et ingénierie se croisent, tout en intégrant les dernières avancées en matière de simulation numérique et de matériaux intelligents. En ce sens, elle contribue à dépasser les limites identifiées dans les études antérieures et ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de bâtiments durables, capables de conjuguer performance énergétique, confort thermique et intégration contextuelle.

Conclusion

L'analyse menée dans ce chapitre met en évidence le dynamisme et la diversité des recherches consacrées aux systèmes de contrôle solaire biomimétique. Les approches recensées témoignent d'une convergence entre biologie, ingénierie, architecture et sciences des matériaux, traduisant un élargissement progressif du champ d'étude vers des solutions de plus en plus performantes et intégrées.

Les études antérieures révèlent plusieurs tendances fortes : l'essor des matériaux intelligents, l'intégration croissante de la simulation computationnelle dans les processus de conception, ainsi que la recherche d'un équilibre entre performance énergétique, confort des usagers et durabilité environnementale. Cependant, malgré des résultats prometteurs, des défis subsistent, notamment en matière de multifonctionnalité, de fiabilité à long terme et d'adaptation aux différents contextes climatiques. Ces constats confirment la nécessité de développer de nouveaux cadres méthodologiques, tels que le modèle bio-adaptatif, permettant de dépasser les limites actuelles en intégrant plus systématiquement les logiques d'adaptation du vivant dans la conception architecturale. Ainsi, l'état de l'art présenté dans ce chapitre fournit non

CHAPITRE III : Performances thermiques et énergétiques des systèmes de contrôle solaire biomimétiques : état de l'art

seulement une base critique pour la recherche, mais constitue également une étape incontournable pour orienter la conception et l'expérimentation de solutions innovantes en matière d'enveloppes architecturales durables et réactives.

IV CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

Introduction

Ce chapitre propose une caractérisation approfondie de l'environnement de la ville de Guelma, qui constitue le socle contextuel de la présente recherche. L'analyse s'articule autour de plusieurs dimensions et sera organisée en sections hiérarchisées, de manière à assurer un enchaînement logique et méthodique des informations.

Dans un premier temps, la genèse historique de Guelma sera présentée afin de mettre en lumière l'évolution de son tissu urbain ainsi que les différentes formes d'habitat qui s'y sont développées au fil du temps. Par la suite, la ville fera l'objet d'une analyse climatique et bioclimatique approfondie, visant à identifier ses spécificités climatiques et à dégager les paramètres déterminants pour la performance énergétique des bâtiments. L'étude mettra également en évidence les stratégies passives nécessaires pour garantir un confort thermique adapté au climat de Guelma.

En outre, une classification des différents types d'habitats individuels de la ville sera réalisée. Cette démarche permettra d'examiner leurs caractéristiques architecturales tout en soulignant leurs potentialités et leurs limites face aux contraintes climatiques locales.

Enfin, sur la base d'une analyse typologique, un cas d'étude représentatif sera sélectionné. Celui-ci constituera le support des investigations énergétiques et thermiques menées dans les chapitres suivants, notamment pour la simulation et l'optimisation.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

IV.1 Présentation de la ville de Guelma

La ville de Guelma, héritière d'un passé plurimillénaire, recèle un patrimoine archéologique et historique de grande valeur, illustré par l'ancienne cité romaine de Calama et ses monuments tels que le théâtre et les vestiges urbains. Cette richesse confère à la ville un potentiel touristique majeur, renforcé par la présence de stations thermales renommées comme Hammam Debagh et Hammam Ouled Ali, qui en font un pôle de tourisme curatif. Sur le plan naturel, Guelma est entourée de massifs montagneux (Maouna, Dbegh, Houara) et insérée au cœur d'une vaste plaine agricole fertile, irriguée par l'oued Seybouse et son barrage. L'articulation de ces richesses positionne Guelma comme stratégique dans la région nord-est algérienne.

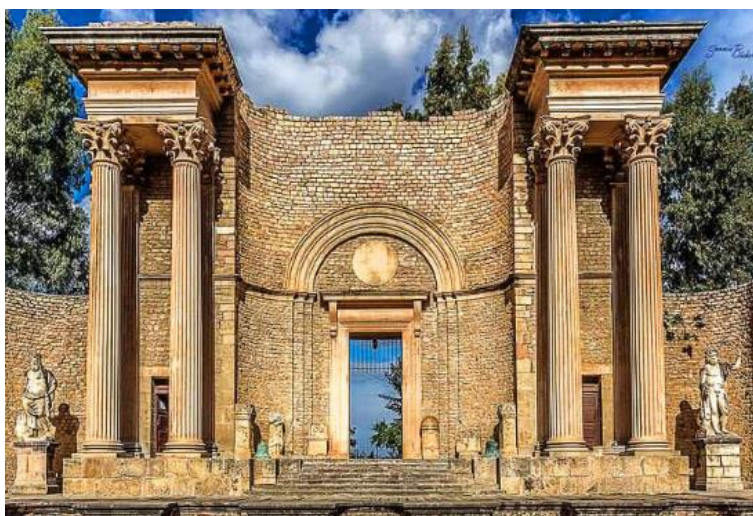


Figure IV. 1 : Théâtre romain à Guelma, Source : guelma.mta.gov.dz

La ville de Guelma se trouve dans le nord-est de l'Algérie, à une altitude de 288 mètres au-dessus du niveau de la mer, avec 36,4° de latitude nord et 7,4° de longitude est. Elle s'étend sur une superficie de 44 Km².

La wilaya de Guelma constitue un axe stratégique de par sa situation géographique. Elle est limitrophe des wilayate suivantes : au nord par la wilaya d'Annaba, au nord-ouest par Skikda, à l'ouest par Constantine, au sud par Oum El Bouaghi, à l'est par Souk Ahras et au nord-est par El Tarf, formant ainsi un carrefour entre les pôles industriels du Nord (Annaba – Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum-El-Bouaghi et Tébessa), outre la proximité du territoire Tunisien à l'Est. (Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021).

À l'échelle de sa propre wilaya, la commune de Guelma est délimitée par plusieurs localités voisines : elle est bordée au nord par les communes de Héliopolis et El Fedjoudj, également présente au nord-ouest ; à l'est et au sud-est par Belkheir ; à l'ouest par Mjez Amar ; et au sud par Bendjerrah, formant ainsi un noyau urbain central au sein de la structure territoriale de la wilaya.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE



Figure IV. 2 Situation de l'Algérie à l'échelle internationale, wilaya de Guelma à l'échelle nationale, la commune de Guelma au niveau régional, **Source** : guelma.mta.gov.dz, traité par Auteur (2024)

IV.1.1 La ville de Guelma : Genèse historique

La ville de Guelma, en raison de ses potentialités naturelles, de sa proximité avec la Méditerranée et de sa position stratégique en tant que nœud de communication entre le nord et les hauts plateaux algériens, a constitué un point d'attraction majeur pour les différentes civilisations qui se sont succédé dans la région. Si sa structure urbaine actuelle a été formalisée à l'époque coloniale française, son enracinement historique remonte à des civilisations antiques. Appelée Malaka chez les phéniciens, Calama chez les Romains et Guelma après l'avènement de l'islam jusqu'à nos jours reflétant ainsi une évolution historique marquée par une superposition de strates culturelles (Meddour, 2024)

IV.1.1.1 La période avant 1850

Avant 1858, l'implantation française à Guelma s'appuya sur les remparts romains dotés de cinq portes. Un camp militaire fut établi en 1836, suivi de la ville coloniale en 1846, organisée autour d'un quartier autochtone et d'un quartier européen (Les colons mirent en place des infrastructures modernes : pont, route, éclairage, réseau d'eau, assainissement et chemin de fer. La ville se dota rapidement d'équipements institutionnels (église, mairie, tribunal, caserne) et d'espaces de commerce mixte.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

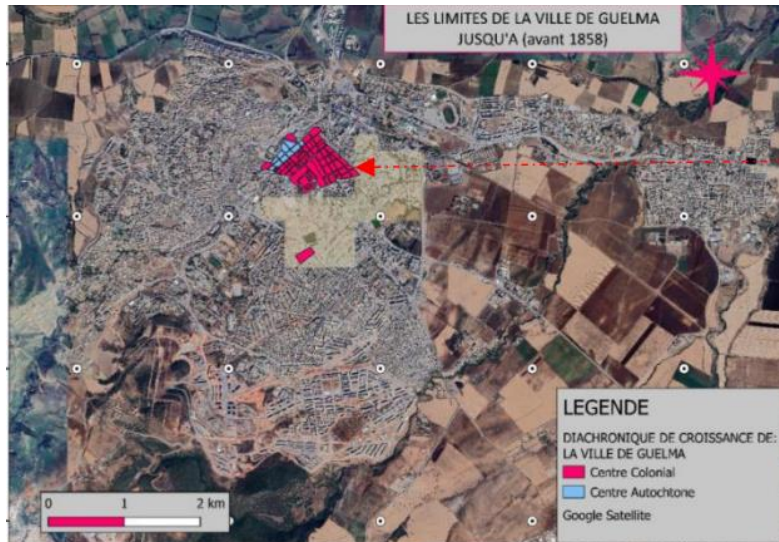


Figure IV. 3 : les limites de la ville de Guelma avant 1858, Source : (Meddour, 2024)

IV.1.1.2 La période entre 1858 et 1962

Entre 1858 et 1962, Guelma s'est développée selon une logique urbaine de type européen, se structurait autour d'un noyau central regroupant équipements civils (square, jardin public, théâtre romain)) et de quartiers européens édifiés vers 1912 (cité de la Gare, Bon Accueil 01 et 02). À la fin de la période coloniale, l'exode rural massif, lié aux zones interdites et à la guerre de libération, engendra la formation de quartiers spontanés au sud et sud-ouest sur les berges de l'oued Skhoun, tels que Bencheghieb et Bourara, devenus une « néo-médina » regroupant près de 40 % de la population (Côte, 1999) .

Le Plan de Constantine introduisit quelques ensembles collectifs (Elaassel, cité Beaumarché), logements de fonction et recasement, parallèlement à la création d'équipements (école d'agriculture, stade Ali Abda, établissements scolaires). Enfin, l'extension nord intégra la gare ferroviaire et ses faubourgs ouvriers (Commune de Guelma., 1962) .

IV.1.1.3 La période entre 1962- 1977

Au cours de cette période, l'urbanisation de Guelma s'est largement structurée sous l'effet de l'exode rural et de l'implantation de la zone industrielle en bordure de la RN20, près de la gare ferroviaire.(Côte, 1999.). Parallèlement, l'État a lancé les premiers programmes de logements collectifs (cité Agabi, cité Guahdour Tahar) et des lotissements planifiés (cité agricole), tout en dotant la ville d'équipements structurants : hôpital Okbi, siège de la wilaya, établissements scolaires et de formation, infrastructures de sécurité.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

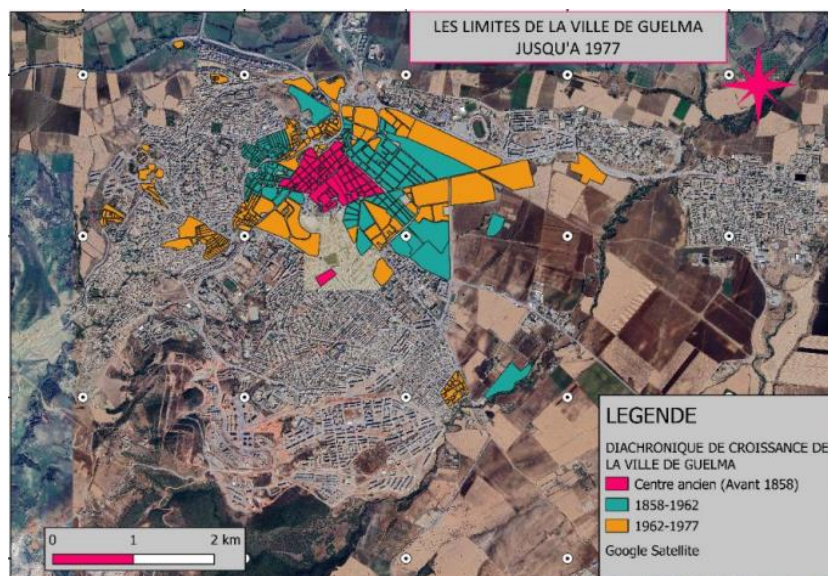


Figure IV. 4: Carte de la ville de Guelma jusqu'à 1977, Source : (Meddour, 2024)

Cependant, cette croissance s'est accompagnée de l'émergence de quartiers spontanés en périphérie sud-ouest, tels que Merabet Mesoud, Hmlaoui 01, Meghmouli et Sediki, traduisant les limites de la planification urbaine face à la pression démographique. Ainsi, l cette période marque un tournant majeur : l'industrialisation et les grands équipements publics ont redéfini la morphologie de la ville, mais dans un contexte d'urbanisation partiellement contrôlée.

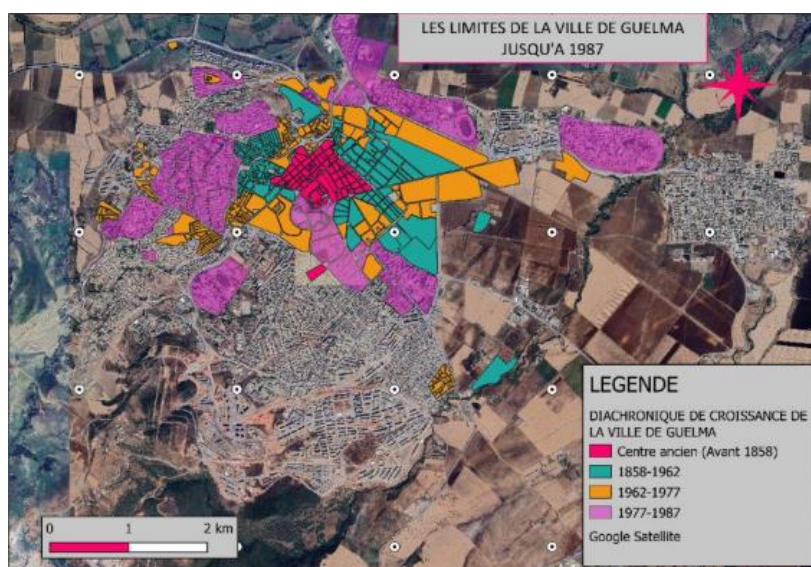


Figure IV. 5 : Carte de la ville de Guelma jusqu'à 1987, Source : (Meddour, 2024)

IV.1.1.4 La période entre 1977 et 1987

Durant cette période, l'urbanisation de Guelma s'est caractérisée par la prolifération d'un habitat spontané dans la vallée, facilitée par la propriété privée des terrains. Ces quartiers, souvent dépourvus d'assainissement et exposés à des risques sanitaires, ont été officiellement

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

reconnus par l'ordonnance du 13 août 1985, puis soumis à un programme de restructuration en 1986 (Kerdoud, 2005)

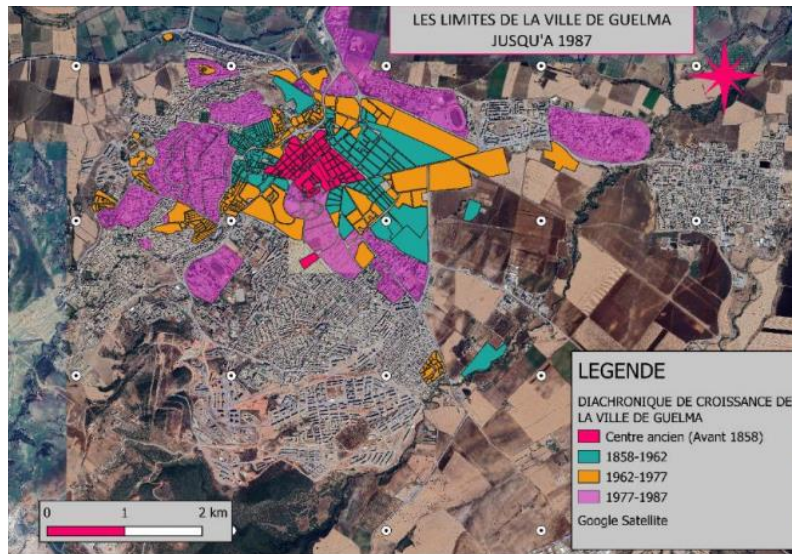


Figure IV. 6 : : Carte de la ville de Guelma jusqu'en 1987 . Source : (Meddour, 2024)

Parallèlement, la décennie est marquée par une politique massive de construction de logements collectifs : ZHUN Ain Defla 1, 2 et 3, cité Frères Rehabi, cité Khalla, cité Bara Lakhdar, cité Champs Manœuvre et cité Guahdour Tahar, qui contribuent à la structuration périphérique de la ville (DUAC Guelma, 2013). Ces opérations ont été complétées par des lotissements (El-Hafsi, Ain Defla 01, DNC, 19 Juin 01) et par la création d'équipements structurants (complexe omnisport, abattoir, marché, gare routière, caserne militaire).

IV.1.1.5 La période entre 1987 et 1997

Cette période marque une étape clé dans l'évolution urbaine de Guelma, caractérisée par le renforcement de son rôle régional et universitaire. Déjà dotée d'une fonction industrielle dans les années 1970 et promue chef-lieu de wilaya en 1974, la ville consolide dans les années 1980 une vocation de centre universitaire (Côte, 1999.)

Durant les années 1990, la croissance urbaine est structurée par l'adoption d'outils de planification tels que le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU, 1997) et plusieurs Plans d'Occupation du Sol (POS), dont ceux d'Oued Lamaaiz et d'El-Sanoubar, témoignant d'une volonté de maîtrise de l'expansion urbaine et de régulation des formes d'habitat..

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

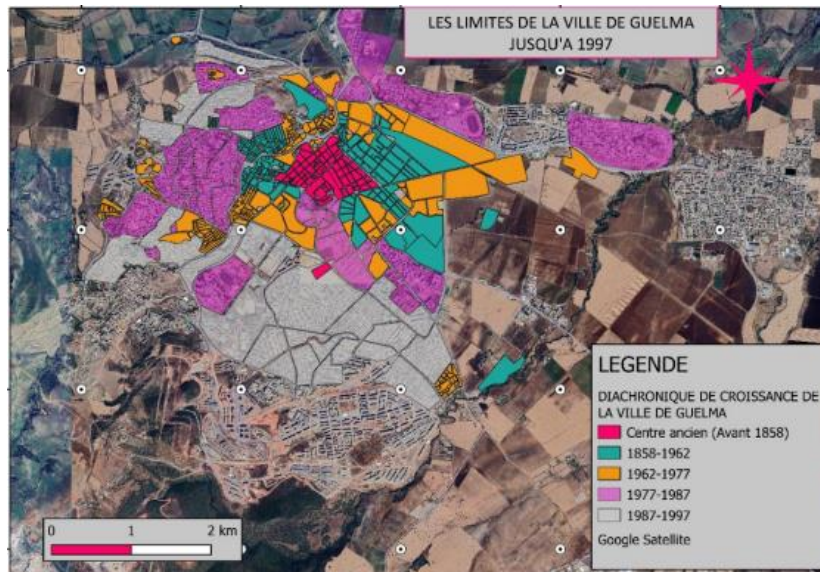


Figure IV. 7 : Carte de la ville de Guelma jusqu'à 1997, Source : (Meddour, 2024)

IV.1.1.6 La période entre 1997-2014

Entre 1997 et 2014, le secteur de l'habitat devient l'axe central des politiques urbaines en Algérie. À l'échelle nationale, le ministère en charge du logement déploie divers programmes (sociaux, évolutifs, participatifs, promotionnels) destinés à résorber l'habitat précaire, améliorer l'image des villes, et répondre aux besoins croissants en logement tout en garantissant la dignité et le bien-être des populations (Chraitia, 2021)

Dans ce contexte, Guelma bénéficie de projets résidentiels variés, tels que l'achèvement des logements du POS El-Sanoubar, la réalisation de logements promotionnels dans le POS Sud, ainsi que le développement de la cité Émir Abdelkader. L'urbanisation est également encadrée par l'adoption d'un PDAU intercommunal et de plusieurs POS de grande envergure, témoignant d'une planification élargie et intégrée. Enfin, la création du nouveau campus universitaire Souidani Boujemâa renforce le rôle académique et régional de la ville, confirmant son dynamisme urbanistique et institutionnel.

IV.1.1.7 La période jusqu'à 2022

L'évolution urbaine récente de Guelma se caractérise par une orientation constante de l'extension vers le sud à cause des limites naturelles (Oued Seybouse) et les terrains à grandes potentialités agricoles, situés au Nord. En contre part, les terrains du sud de la ville ; à reliefs, accidentés et à caractéristiques rocheuses sont plus favorables à l'urbanisation. (Meddour, 2024) , La planification urbaine est encadrée par un PDAU intercommunal, orientant la croissance de la ville vers le sud à travers de vastes POS : POS Sud et son extension (259 ha),

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

POS 31 (159 ha), et POS Oued Maiz (120 ha). Ces projets visent à redistribuer l'expansion urbaine et à structurer une dynamique de satellisation autour de Guelma (DUAC, 2013).

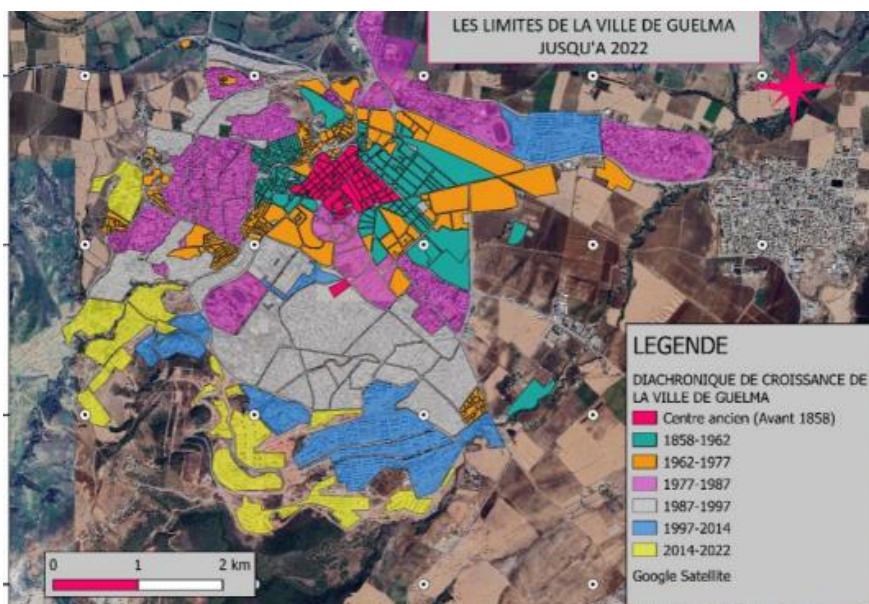


Figure IV. 8 : Carte de la ville de Guelma jusqu'à 2022, Source : (Meddour, 2024)

L'évolution urbaine de la ville de Guelma révèle un tissu diversifié, produit d'une superposition historique et fonctionnelle. Cette stratification a façonné une mosaïque résidentielle hétérogène, reflet des dynamiques politiques, sociales et économiques qui ont marqué la ville. On y distingue :

- Un noyau en damier, hérité de la période coloniale, constituant la trame fondatrice du centre-ville.
- Une urbanisation spontanée, représentée par les constructions illicites et les bidonvilles, conséquence directe de la pression démographique et du déficit en logement
- Une urbanisation planifiée collectif, type ZUHN et les programmes de logements sociaux, socio-participatifs et promotionnels.
- Une urbanisation planifiée individuelle représentée par les lotissements.

IV.2 Analyse climatique de la ville de Guelma

L'analyse climatique constitue une étape fondamentale pour comprendre les particularités du contexte local et orienter les choix de conception bioclimatique. Elle permet d'identifier les principaux paramètres influençant le confort thermique et d'évaluer leur variabilité saisonnière. Cette lecture préalable du climat fournit ainsi une base indispensable pour la sélection des stratégies architecturales adaptées.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

Dans ce cadre, le fichier de données météorologiques de la ville de Guelma a été extrait du site Climate One Building (format EPW). Le fichier horaire (2009–2023), compatible avec EnergyPlus, a servi de référence pour l'analyse et la visualisation des facteurs climatiques à l'aide du plugin Ladybug 0.0.69 sous Grasshopper.

IV.2.1 Classification climatique de Guelma

Selon la classification de Köppen-Geiger, la ville de Guelma appartient à la catégorie Csa, correspondant au climat méditerranéen chaud. Ce type de climat se définit par des étés longs, chauds et secs, associés à une forte intensité de rayonnement solaire, et par des hivers relativement froids et humides, marqués par des précipitations concentrées principalement entre novembre et mars (figure 11).

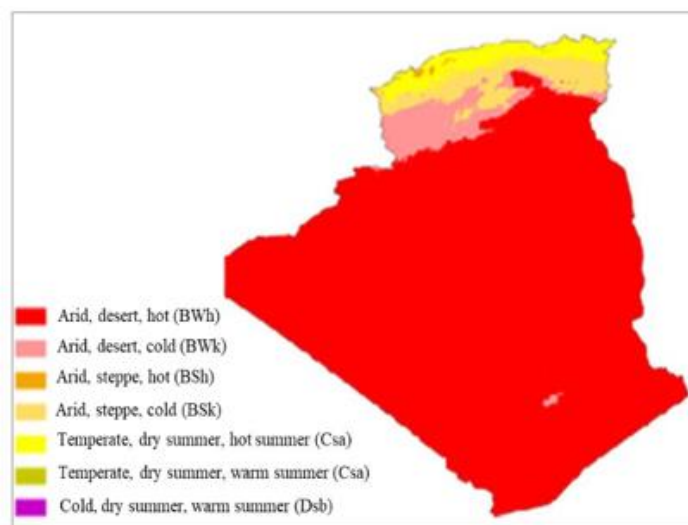


Figure IV. 9 : : Carte de classification climatique de Köppen-Geiger pour l'Algérie 1980-2016) .Source: Beck et al. (2018)

IV.2.2 Température de l'air

Selon les températures sèches représentées dans la Figure IV. 10 , le climat de la ville de Guelma se caractérise par deux grandes périodes climatiques distinctes.

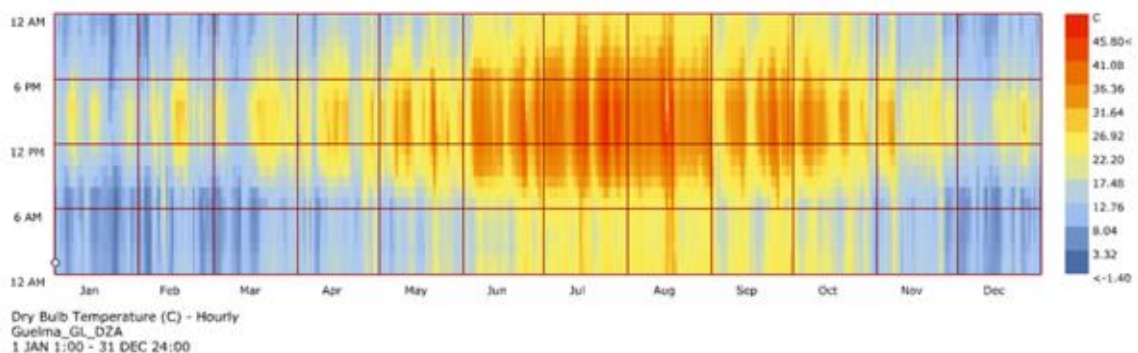


Figure IV. 11 : : Distribution horaire de la température sèche de l'air ambiant à Guelma, Source : Auteur (2024)

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

La saison chaude, qui s'étend de mai à octobre, se manifeste par des températures variant entre 27 °C et 41 °C, avec des pics supérieurs à 45 °C en juillet, le mois le plus chaud de l'année. À l'inverse, la saison froide s'étale d'octobre à mai, avec des températures comprises entre 3 °C et 18 °C, et une température minimale inférieure à 1,4 °C enregistrée en janvier, considéré comme le mois le plus froid

IV.2.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue un facteur clé de la performance énergétique et du confort thermique des bâtiments. Son analyse se décline en trois axes : variabilité horaire et saisonnière, comportement directionnel et distribution hémisphérique.

IV.2.3.1 Rayonnement solaire horizontal global

La radiation solaire annuelle moyenne dans cette région atteint 613 W/m²W/m², confirmant un potentiel énergétique significatif. Comme l'illustre la figure 13, le rayonnement global horizontal présente une variabilité horaire et saisonnière marquée. Son intensité s'accroît entre mars et octobre, avec un maximum durant l'été (juin à août), où les valeurs avoisinent 977 Wh/m².

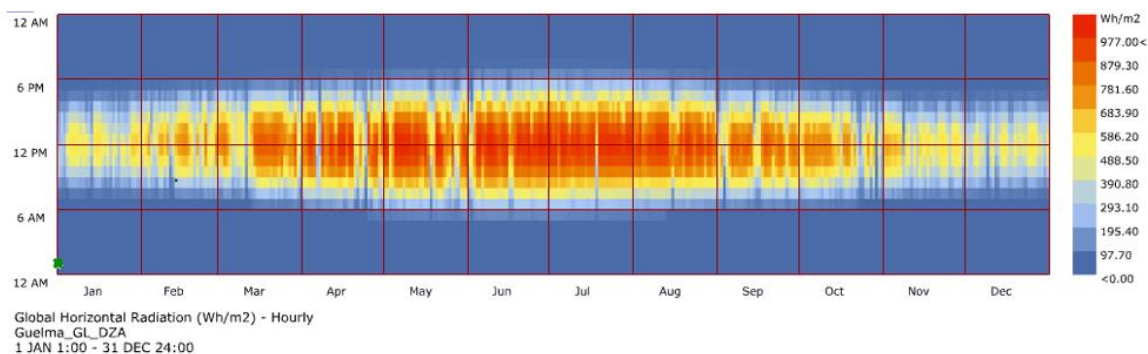


Figure IV. 12 : Répartition horaire et mensuelle du rayonnement solaire horizontal globale à Guelma, source : Auteur (2024)

Au cours de la journée, les heures les plus irradiées se situent entre 10h et 16h, soit l'intervalle critique à considérer pour le dimensionnement des dispositifs d'ombrage, essentiels afin de limiter les surchauffes estivales. En hiver, bien que l'intensité du rayonnement soit réduite (inférieure à 98 W/m²), une irradiation modérée persiste autour du milieu de journée, offrant un potentiel intéressant pour la captation solaire passive.

IV.2.3.2 Comportement directionnel du rayonnement solaire

L'analyse du rayonnement solaire à Guelma, basée sur les roses de radiation, met en évidence une forte variabilité saisonnière et directionnelle.

Durant la période estivale (du 21 mai au 21 octobre), la distribution de l'énergie solaire montre une concentration marquée sur les orientations allant du sud-est (135°) au sud-ouest (225°),

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

avec une intensité maximale atteignant environ 523,04 kWh/m² pour les directions proches du sud (≈180°). À l'inverse, les orientations nord à nord-ouest (≈300° à 60°) présentent les valeurs les plus faibles, inférieures à 52,30 kWh/m².

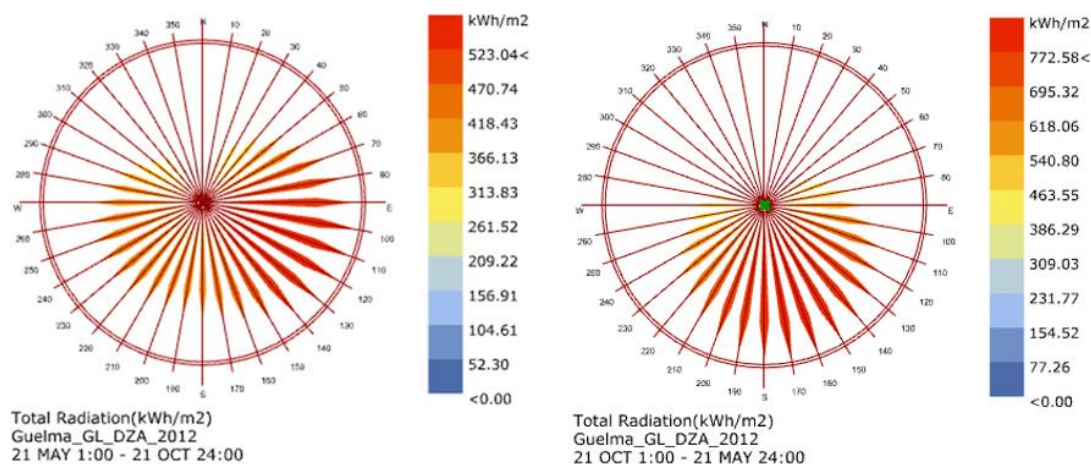


Figure IV. 13 : Roses des radiations solaires totales à Guelma : été et hiver. Source : Auteur (2024)

En période hivernale (du 21 octobre au 21 mai), la répartition du rayonnement est plus focalisée sur le sud (150° à 210°), où les apports solaires sont encore plus importants, atteignant une valeur maximale supérieure à 772,58 kWh/m². Cette intensité accrue en hiver s'explique par la position plus basse du soleil dans le ciel, ce qui favorise les apports directs sur les façades orientées au sud. Les orientations nord conservent une faible exposition, avec des valeurs inférieures à 77,26 kWh/m². Ces observations soulignent l'importance stratégique de l'orientation sud dans la conception architecturale à Guelma, aussi bien pour maximiser les gains solaires en hiver que pour anticiper les besoins en protection solaire pendant l'été.

IV.2.3.3 Distribution hémisphérique du rayonnement solaire

La figure ci-dessus représente la répartition angulaire du rayonnement solaire directe sur l'hémisphère céleste à Guelma, en distinguant la période estivale (à gauche, du 21 mai au 21 octobre) et la période hivernale (à droite, du 21 octobre au 21 mai), Ces diagrammes révèlent la position du soleil dans le ciel et l'intensité du rayonnement solaire reçu selon la direction et l'altitude solaire.

En été, le rayonnement solaire est fortement concentré dans les zones proches du zénith et du sud, notamment entre 120° et 240° en azimut, ce qui correspond aux orientations sud-est, sud, et sud-ouest. Les valeurs maximales atteignent 50,99 kWh/m², localisées dans les zones centrales du diagramme, traduisant une haute élévation solaire typique des mois estivaux. À l'inverse, les secteurs proches de l'horizon nord (0° à 60° et 300° à 360°) présentent de faibles

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

apports, avec des valeurs inférieures à 5 kWh/m², en raison de la position du soleil qui reste essentiellement dans l'hémisphère sud du ciel.

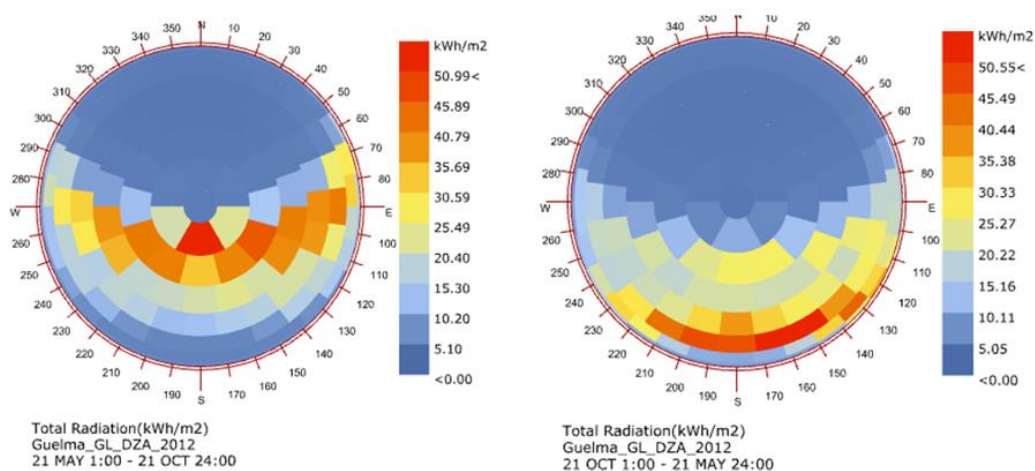


Figure IV. 14 : Distribution angulaire du rayonnement solaire directe en hémisphère céleste, Source : Auteur (2024)

En hiver, la position apparente du soleil est plus basse, et la distribution du rayonnement est concentrée plus près de l'horizon sud ($\approx 150^\circ$ à 210°), ce qui se manifeste par des bandes d'intensité bien marquées dans les parties inférieures du diagramme. Les valeurs maximales dépassent 50,55 kWh/m², bien que les zones fortement irradiées soient plus restreintes qu'en été. Cela confirme la faible hauteur solaire hivernale, mais aussi le rôle central des orientations sud pour capter un maximum de rayonnement en saison froide. Les portions nord du ciel restent quasiment inactives durant cette période, avec des valeurs très faibles (<5 kWh/m²), ce qui corrobore l'intérêt limité d'orienter des baies vers le nord pour le captage solaire passif.

IV.2.4 Vents dominants

L'analyse des roses des vents de la ville de Guelma, permet d'identifier les orientations principales et les vitesses caractéristiques des vents selon deux périodes distinctes : hivernale et estivale.

Durant la période comprise entre le 21 octobre et le 21 mai, les vents prédominants soufflent principalement des directions nord-ouest et sud. Les vitesses enregistrées varient généralement entre 3,6 m/s et 9 m/s, avec certains pics dépassant 18 m/s. Un calme relatif est observé pendant 22,14 % du temps, soit environ 1132 heures, traduisant une occurrence modérée des vents forts durant cette saison.

À l'inverse, la période s'étendant du 21 mai au 21 octobre se caractérise par une intensité de vent globalement plus élevée, avec une nette diminution des phases calmes qui ne représentent plus que 10,69 % du temps (soit environ 395 heures). Les vents dominants proviennent alors majoritairement du sud (S), accompagnés de courants moins fréquents en provenance du nord-

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

est et du nord-ouest. Les vitesses maximales observées restent inférieures à celles de la saison froide, avec un pic atteignant 12,9 m/s.

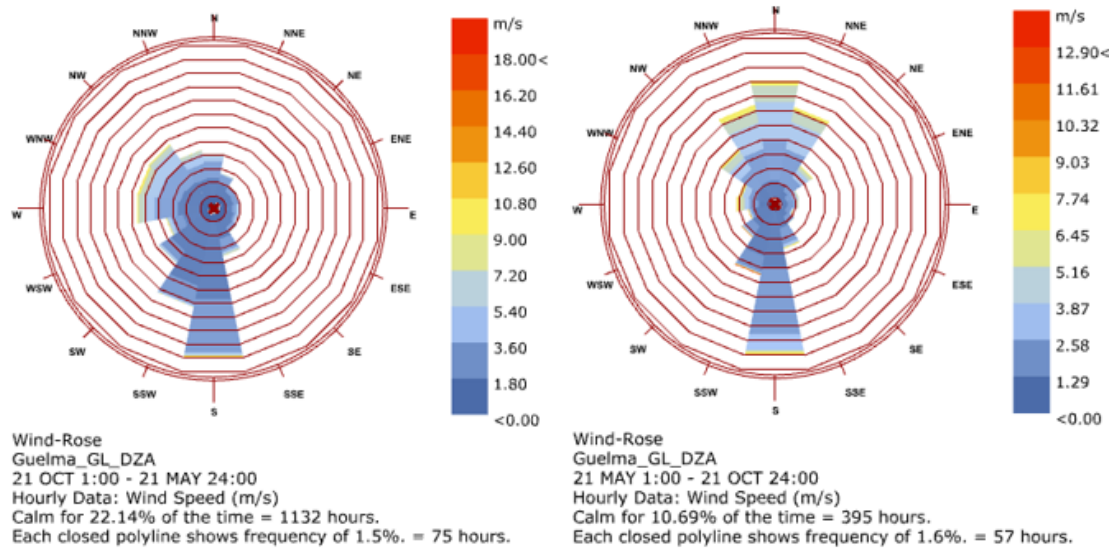


Figure IV. 15 : Roses des vents saisonnières de la ville de Guelma, Source : Auteur (2024)

Ces résultats mettent en évidence une ventilation naturelle plus efficace durant la saison chaude, constituant un paramètre déterminant pour le dimensionnement bioclimatique des ouvertures et l'optimisation des stratégies de rafraîchissement passif dans le bâtiment.

IV.2.5 Humidité relative

La valeur moyenne annuelle de l'humidité relative à Guelma est de 67,5 %. Elle atteint ses niveaux les plus élevés en hiver (de novembre à mars) et demeure plus faible en été (de juin à août), avec des valeurs généralement plus basses en matinée puis en hausse progressive en fin d'après-midi. En période estivale, l'humidité relative maximale enregistrée est de 53,13 % au mois de juillet. Cela reflète le climat méditerranéen de la région, où les températures plus basses en hiver augmentent l'humidité relative et les températures plus élevées en été la réduisent

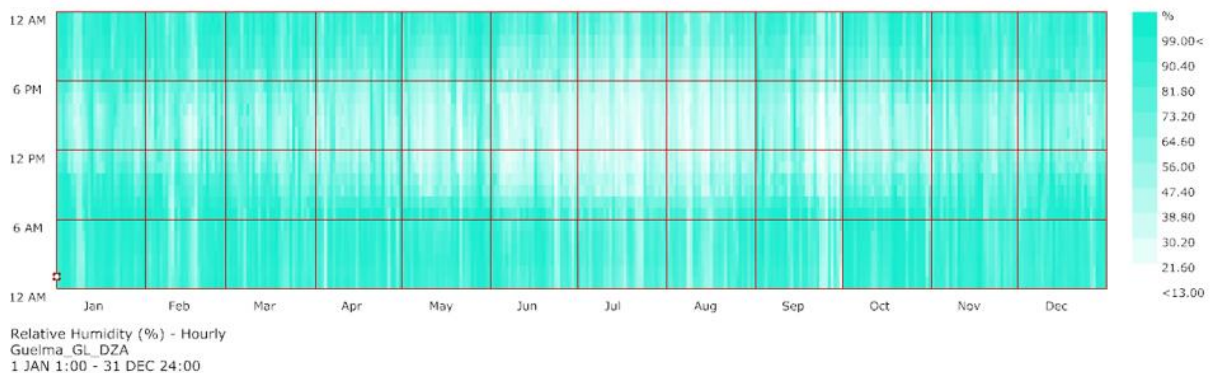


Figure IV. 16 : l'humidité relative de Guelma, généré par Grasshopper. Source : Auteur (2024)

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

Guelma connaît des variations saisonnières considérables en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles.

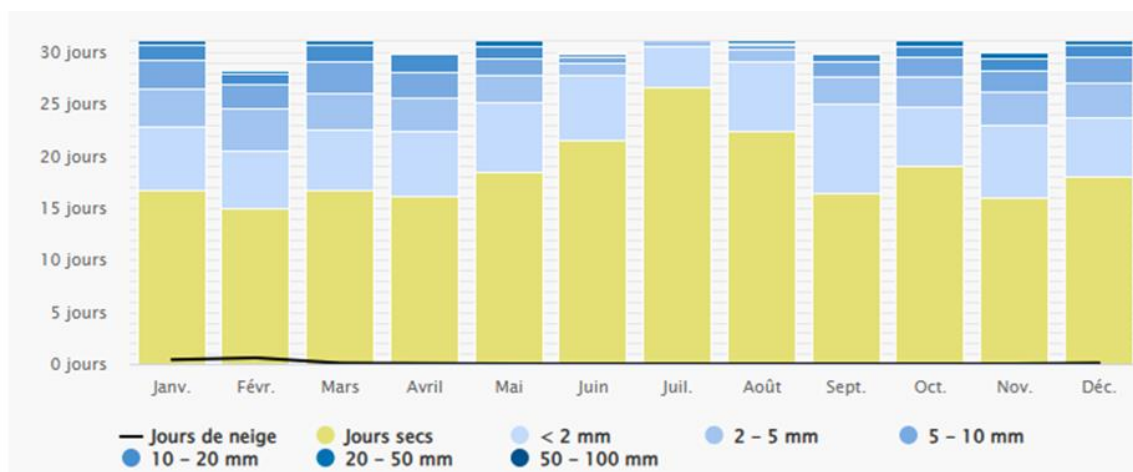


Figure IV. 17 : Précipitations à Guelma, Source : meteoblue.com

La période pluvieuse s'étend sur environ 8 mois, avec une pluviométrie mensuelle supérieure à 13 mm. Le mois le plus pluvieux est janvier, avec une moyenne de 78 mm. En revanche, la période sèche dure environ 4 mois, principalement en juillet et au début du mois d'août. Le mois le moins arrosé est juillet, avec une moyenne de seulement 7 mm de précipitations.

IV.2.6 Digramme ombrethrmique

D'après le diagramme ombrothermique, établi à partir des températures et précipitations mensuelles sur la période 1993–2022, deux saisons se distinguent à Guelma, une période sèche s'étendant de mai à septembre et une période humide couvrant les autres mois de l'année.

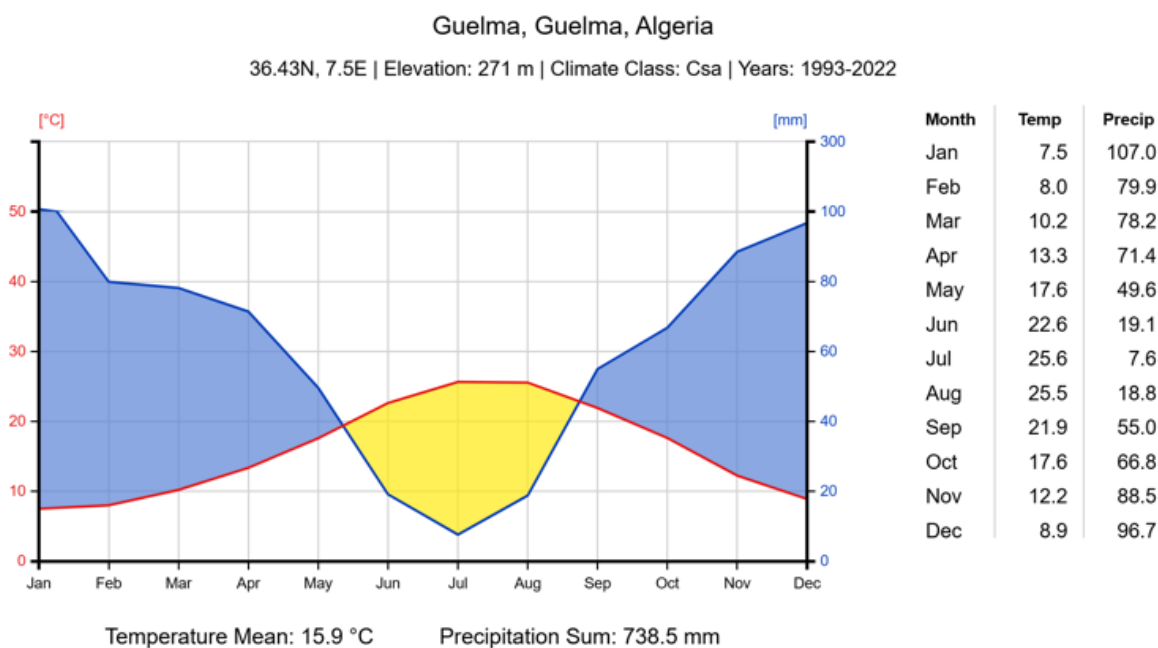


Figure IV. 18 : Diagramme ombrethrmique de Guelma, Source : Climatecharts.net

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

En fonction des précipitations et des températures annuelles on peut calculer l'indice d'aridité avec la formule de Martonne : $I = P/T + 10$. Avec : P : Précipitation moyenne annuelle (mm) et T : Température moyenne annuelle (C°)

Pour Guelma, on obtient : $I = P/T = 10.2$, soit $10 < I < 20$, ce qui correspond à une classe semi-aride. Donc Le climat de Guelma peut être qualifié de méditerranéen chaud (Csa) à influence semi-aride qui se caractérise par une saison sèche estivale et une saison hivernale humide.

IV.3 Analyse bioclimatique de la Ville de Guelma

L'analyse bioclimatique de la ville de Guelma repose sur l'exploitation des données climatiques couvrant la période 2007-2023 et sur l'utilisation d'outils spécialisés permettant d'évaluer l'influence des paramètres climatiques sur le confort thermique. Contrairement à une simple lecture des données météorologiques, cette approche fournit des orientations stratégiques pour une conception architecturale adaptée et optimisée au contexte local.

Le potentiel bioclimatique a été évalué à l'aide du logiciel Climate Consultant 6.0, développé par le groupe UCLA Energy Design Tools. Cet outil permet de convertir les fichiers climatiques au format EPW en représentations graphiques 2D et 3D (cadrans solaires, tables d'ombrage, diagrammes psychrométriques), et d'appliquer différents modèles de confort thermique : California Energy Code 2013, ASHRAE Standard 55 – Handbook of Fundamentals, ASHRAE Handbook (jusqu'en 2005) et le modèle adaptatif ASHRAE Standard 55-2010 (Sahnoune, 2022) . Les résultats de l'analyse permettent de générer automatiquement une liste de recommandations de conception, en fonction des caractéristiques climatiques locales. Cela aide les concepteurs à créer des bâtiments durables et éco énergétiques, adaptés au climat étudié.

Dans cette étude, le diagramme psychrométrique et la table d'ombrage de Guelma ont été établis selon le modèle de confort du California Energy Code 2013. Ce modèle, largement utilisé dans Climate Consultant, se distingue par son approche adaptative, sa large zone de confort et sa pertinence pour identifier les périodes favorables aux stratégies passives, ce qui le rend particulièrement adapté aux contextes méditerranéens chaud comme Guelma

IV.3.1 Le diagramme psychrométrique

La table psychrométrique considère uniquement les stratégies de conception passive, telles que l'ombrage des fenêtres, la masse thermique, les gains solaires passifs avec forte inertie, la ventilation naturelle (Sahnoune, 2022) , (*Figure IV. 19*). Les résultats de l'analyse montrent que la ville de Guelma se situe en dehors de la zone de confort thermique pendant la majeure partie de l'année, avec seulement 11,6 % (1014 heures) de l'année considérée comme naturellement confortable.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

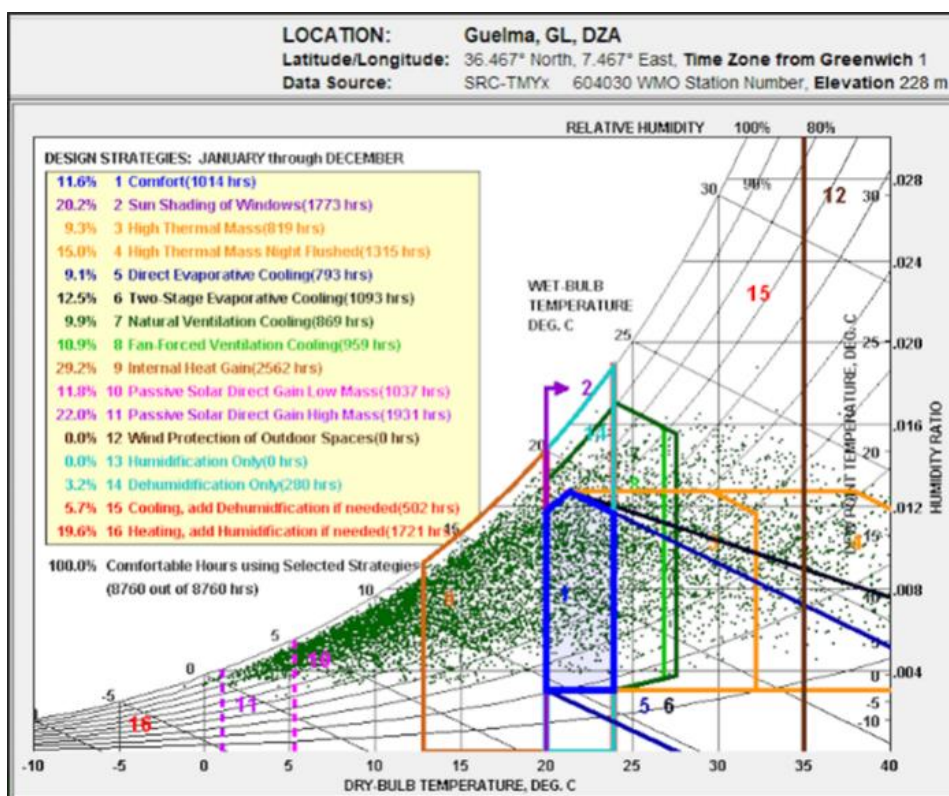


Figure IV. 20 : Diagramme psychrométrique de Guelma généré par Climat consultant. Source Auteur (2024)

Afin d'améliorer le confort thermique et de réduire la consommation énergétique des bâtiments résidentiels de cette région, des stratégies de protection solaire sont nécessaires pendant 1773 heures en été (20,2 %), tandis que des gains solaires passifs directs, associés à une forte inertie thermique, sont requis pendant 1931 heures en hiver (22 %), Soit deux stratégies couvrent une proportion similaire, mais durant deux périodes opposées (été/hiver.). Ce contraste saisonnier illustre le défi majeur de la conception architecturale : atteindre un compromis entre un ombrage efficace en été et une valorisation de l'ensoleillement en hiver.

IV.3.2 Le diagramme solaire

La carte d'ombrage solaire de Guelma, générée pour différents angles d'inclinaison, a été croisée avec les plages horaires correspondant aux besoins thermiques. En été, 1096 heures nécessitent un ombrage lorsque la température dépasse 27 °C afin d'assurer le confort intérieur (Figure IV. 21).

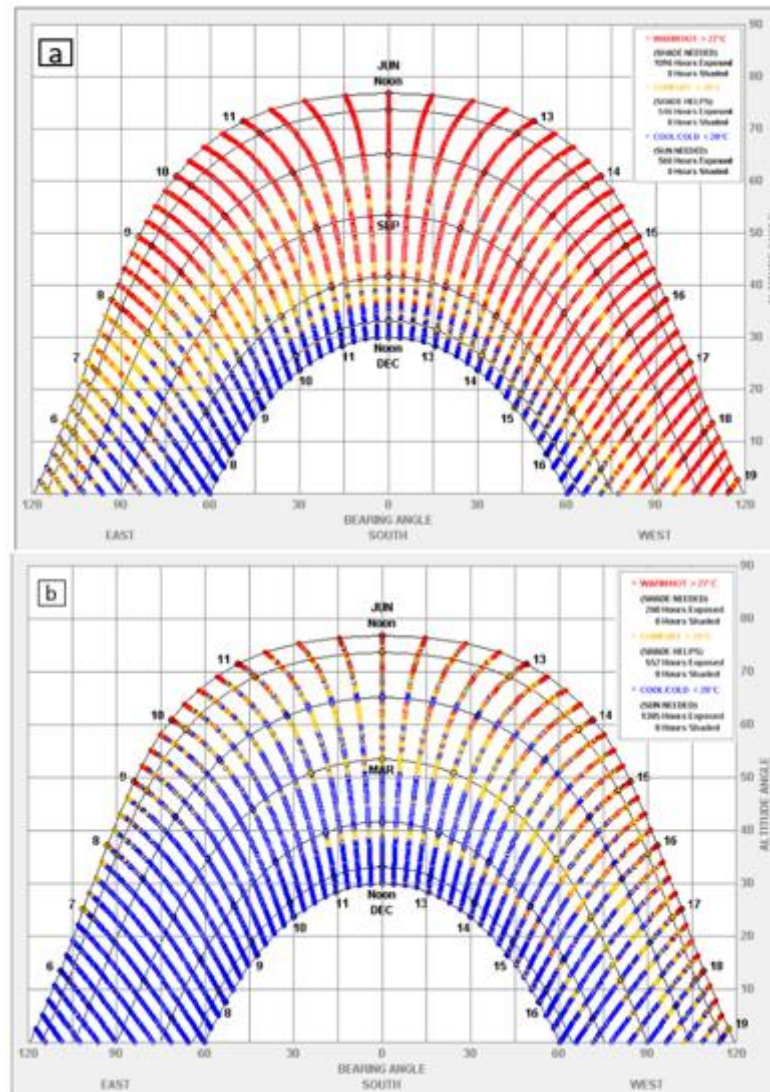


Figure IV. 22 : Diagrammes solaires de la ville de Guelma durant la période estivale (a) et la période hivernale (b) source : Auteur (2025)

En hiver, la tendance s'inverse : 1395 heures requièrent un ensoleillement lorsque la température est inférieure à 20 °C (Figure 15.b). Ces résultats soulignent la nécessité de concevoir des dispositifs capables de garantir simultanément une protection efficace contre le rayonnement estival et une valorisation optimale des apports solaires hivernaux.

IV.4 L'habitat individuel à Guelma

L'habitat individuel constitue une composante essentielle du tissu urbain de Guelma, Sa diversité typologique se manifeste à travers plusieurs formes, notamment l'habitat pavillonnaire, l'habitat autoproduit, qu'il soit planifié ou spontané, ainsi l'habitat précaire. Ces différentes configurations reflètent des réponses variées aux besoins en logement, aux contraintes foncières, ainsi qu'aux dynamiques socio-économiques et urbaines qui ont orienté l'évolution de la ville.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

IV.4.1 L'habitat pavillonnaire

L'habitat pavillonnaire à Guelma, hérité de l'urbanisme de la période française, se distingue par une implantation au centre-ville colonial, suivant une trame viaire orthogonale et des îlots réguliers. Ceux-ci reflètent une planification urbaine rationnelle visant à loger la population européenne dans un cadre hygiéniste, aéré et hiérarchisé. Chaque unité résidentielle est implantée sur une parcelle individuelle, généralement dotée d'un jardin privatif situé à l'avant ou à l'arrière, et délimitée par des clôtures basses ou des haies.



Figure IV. 23 : Vue aérienne de la cité Bon Accueil à Guelma .Source, :Google earth , traité par auteur (2024)

Les constructions sont généralement de plain-pied ou en R+1, avec des volumes compacts, des toitures à deux pentes en tuiles, et des façades symétriques percées de baies régulières. la distribution spatiale intérieure suit un plan fonctionnel avec un couloir central desservant les pièces, (Latreche, 2019) séparant nettement les espaces de jour (salon, salle à manger, cuisine) des espaces de nuit (chambres), Le système constructif repose sur des murs porteurs en maçonnerie massive et des planchers en bois .



Figure IV. 24 : façades des habitations pavillonnaires - Bon Accueil- . Source :(Benzrari, 2013)

IV.4.2 L'habitat auto produit

Au cours des années 1970, l'Algérie a été confrontée à une crise aiguë du logement, marquée par l'incapacité de l'état à satisfaire une demande croissante en habitat. Cette défaillance est

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

devenue manifeste à l'issue du premier plan quadriennal, alors que la prolifération de l'habitat précaire et des bidonvilles accentuait l'urgence d'une réponse structurelle. Face à cette pression, les autorités ont procédé à la municipalisation du foncier et initié les programmes ZHUN (Zones d'Habitat Urbain Nouvelle), mis en œuvre à la faveur du décret de 1974 et du programme de 1977, favorisant ainsi l'émergence de formes d'habitat auto-construit (Alkama, 1995) . Selon Bensehla (2021) , On distingue deux catégories d'habitat auto-construit, l'habitat planifié et l'habitat informel.

IV.4.2.1 L'habitat individuel informel

Selon (Alkama, 1995) , la crise de logement en Algérie, la croissance démographique et le retard de réalisation de logements ont contribué à l'apparition de ce type d'habitat, construit par les propriétaires selon leurs besoins, leurs aspirations et leurs ressources financières (Latreche, 2019).



Figure IV. 25 : Vue aérienne du quartier Hadj Embarek à Guelma, Source : Google earth, traité par auteur (2024) :

A Guelma, L'habitat informel résulte d'un processus d'urbanisation spontanée, souvent développé en marge des mécanismes de régulation urbaine et des instruments de planification. On le retrouve dans plusieurs quartiers tels que Bourara, Benchehib, Hadj Embarek, Benbarkane, . etc.

Ces quartiers se caractérisent par une trame viaire irrégulière, issue d'un découpage parcellaire informel, avec des ruelles étroites, parfois inaccessibles aux véhicules, et une densification progressive sans logique d'hierarchisation des voies ni d'intégration aux réseaux d'infrastructure planifiés. Une partie de cet habitat, bien qu'informel, intègre ponctuellement certains éléments de l'architecture traditionnelle tels que l'entrée en chicane et la cour intérieure, intégrés dans une logique d'appropriation fonctionnelle et d'intimité plutôt que dans une perspective symbolique ou patrimoniale (Sriti, 2013)

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE



Figure IV. 26 : Vue d'ensemble de l'habitat individuel spontané, à gauche, les habitations non planifiées du boulevard du Volontariat. Source : (Benzrari, 2013)

Suite à l'institution des programmes nationaux de ZHUN par l'état, les lotissements planifiés appaurent dans les années 1970, avec pour objectif principal, de mettre fin à des transactions et des occupations illicites du foncier. (Latreche, 2021).



Figure IV. 27 : vue aérienne de lotissement 19 juin à Guelma, source : Google earth, traité par auteur
Guelma s'inscrit dans cette dynamique dont plusieurs lotissement ont vu le jour à partir de 1980 tels que les lotissements de 19 juin 1 et 2 , 1000 lots aidés, Maghmouli, Ain Defla 1et 2 et les lotissements des Coopératives au nord de la ville. (Mokhneache, 2023)

Ces lotissements se caractérisent par une trame viaire orthogonale ou semi-orthogonale, une hiérarchisation claire des voies, et une répartition fonctionnelle des équipements collectifs (écoles, mosquées, espaces verts). Les parcelles sont généralement de taille moyenne (150 à 300 m²) et délimitées de manière régulière, facilitant l'accessibilité et les raccordements aux réseaux. (Latreche, 2019)

Au sein de ces lotissements, les habitations présentent une grande diversité morphologique, allant de la simple villa unifamiliale à des constructions volumineuses, souvent en dépassement des trois niveaux réglementaires (BENSAKHRIA, 2024). Cette tendance à l'extension verticale conduit fréquemment à la transformation de ces habitations en véritables immeubles

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

d'habitation, qualifiés d'« immeubles-villas » (BENSAKHRIA, 2024), (Benside, 2013). Les façades, quant à elles, se caractérisent par un éclectisme stylistique mêlant des éléments d'architecture mauresque, moderne et classique, traduisant une hybridation formelle propre au contexte local (Latreche, 2019)



Figure IV. 28 : Façades des immeubles-villas du lotissement 19 Juin, Guelma .Source : (auteur, 2023).

L'habitat précaire se manifeste par des abris temporaires aux formes irrégulières et hétérogènes, construits majoritairement à partir de matériaux de récupération. Ce type d'habitat se distingue par son insalubrité, sa forte dégradation, et la persistance de marqueurs de ruralité tels que l'autoconsommation, l'élevage domestique et l'absence de voirie structurée (Khelfa, 2024)



Figure IV. 29 : : bidonvilles d'Oued El Maiz, Guelma, Source : Google earth, traité par auteur (2024)

Il constitue un lieu de concentration des populations défavorisées (Mokhneache, 2023) comme en témoignent les exemples du bidonvilles d'Oued Skhoun et de celui d'Oued El Maiz.

L'habitat individuel à Guelma, bien que marqué par une grande diversité typologique, présente une enveloppe architecturale souvent inadéquate face aux exigences du climat local.. La conception des enveloppes bâties, marquée par un manque de prise en compte des conditions environnementales (orientation, ventilation, protection solaire), engendre un inconfort

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

thermique généralisé et contribue à une forte dépendance aux moyens mécanique de régulation, accentuant ainsi la consommation énergétique

IV.5 Sélection des cas d'étude

La sélection du cas d'étude repose sur des critères morpho-architecturaux visant à garantir sa représentativité pour l'intégration d'un système de contrôle solaire biomimétique adaptatif, ainsi que la fiabilité des simulations énergétiques et thermiques. L'attention est portée sur les fenêtres, considérées comme des interfaces stratégiques entre l'enveloppe bâtie et le climat extérieur, en raison de leur rôle déterminant dans la régulation des apports solaires et des transferts thermiques. Dans ce contexte, l'analyse typologique s'impose comme une démarche scientifique appropriée, offrant une lecture rationnelle et systématique des variations morphologiques observées.

IV.5.1 L'analyse typologique : fondements théorique

La forme architecturale peut être étudiée à travers une lecture a posteriori de l'objet bâti, fondée sur l'observation, le classement et la comparaison. Cette démarche vise à structurer et interpréter la diversité des configurations architecturales. L'approche du Laboratoire d'Analyse des Formes (LAF) s'inscrit dans ce cadre. Elle repose sur une méthode comparative issue de la typologie, centrée sur la classification morphologique afin de définir et mesurer les caractéristiques formelles des objets architecturaux, constituant leur morphose. Toutefois, elle se limite aux attributs observables et mesurables, sans prendre en compte les dimensions contextuelles, historiques ou fonctionnelles.

À l'inverse, l'analyse typologique propose une lecture élargie et contextualisée, regroupant les objets bâtis selon des régularités formelles mais aussi des logiques fonctionnelles ou historiques. Elle permet d'interpréter l'organisation, l'évolution et la transformation des formes, constituant ainsi un outil pertinent pour l'étude du patrimoine, la conception contemporaine et la modélisation architectural (PANERAI et al., 1989)

IV.5.2 Les niveaux d'analyse typologique

Selon Panerai (1980), l'analyse typologique peut se décliner à plusieurs échelles d'intervention. Ces niveaux permettent une lecture multiniveau du bâti, chacun offrant un cadre analytique pertinent selon l'objet d'étude :

- Les parties d'un bâtiment : telles que la façade, les ouvertures, les éléments de modénature....etc.
- Le bâtiment dans son intégralité.
- La parcelle bâtie : en tant qu'unité foncière structurante

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

- Le groupement de parcelles : comme l'îlot urbain ou les entités morphologiques collectives.

Cette stratification des niveaux d'analyse favorise une compréhension transversale de l'architecture, depuis l'élément architectural jusqu'à l'organisation urbaine.

IV.5.3 Le processus de l'analyse typologique

L'approche adoptée est structurée en quatre étapes principales :

IV.5.3.1 Définition du corpus

Cette phase consiste à définir l'objet et le niveau d'étude (bâtiment, parcelle, îlot), en fonction des objectifs de recherche. Elle implique également la délimitation d'une zone représentative, homogène sur le plan spatial, temporel ou socio-culturel

Dans le cadre de cette recherche, le corpus est constitué d'un ensemble d'habitations individuelles sélectionnées selon ces critères :

- **l'objet de l'analyse** : L'étude porte sur de 105 habitations individuelles planifiées, issues de lotissements réglementés, présentant une homogénéité d'ensemble mais une variabilité morphologique au niveau des façades
- **Cadre spatial** : le choix se porte sur le lotissement du 19 Juin, au sud-est de Guelma ensemble résidentiel structuré et pertinent au regard de la problématique posée.
- **Le niveau d'analyse** sera spécifiquement centré sur les ouvertures architecturales, en particulier les fenêtres, envisagées comme des éléments morphologiques et matériels caractéristiques des façades.

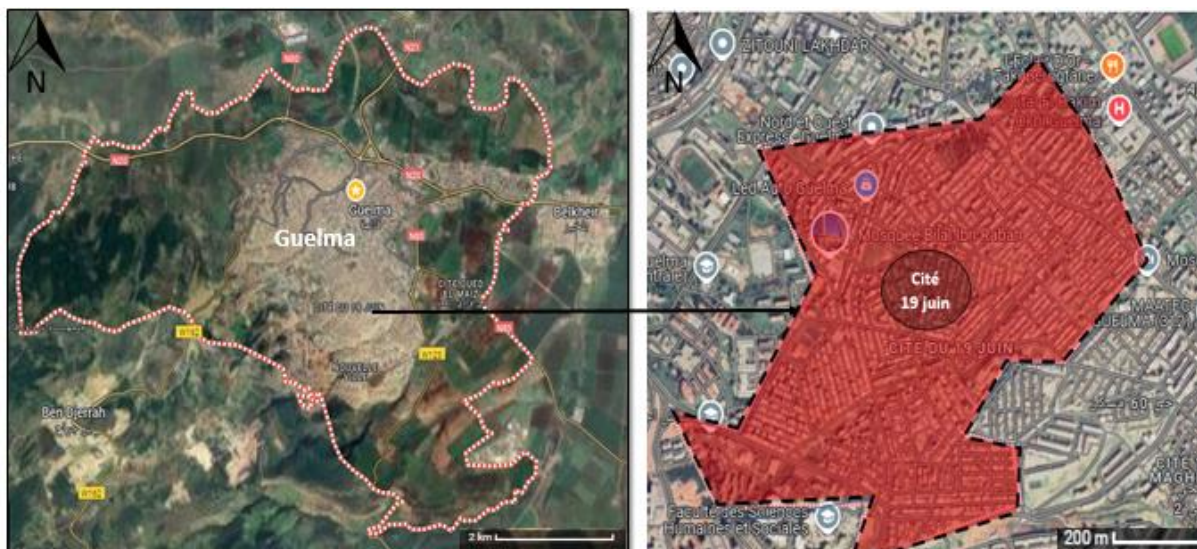


Figure IV. 30 : 2 : la zone d'étude lotissement 19 juin, Guelma .Source : Auteur ,2024

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE
















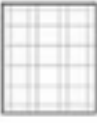



Le pré-classement consiste à regrouper les objets en fonction de leurs propriétés observables, établissant ainsi une organisation provisoire en groupes avant la définition rigoureuse des types. Divers outils méthodologiques (relevés architecturaux, photographies, notations descriptives) permettent d'identifier les traits distinctifs des objets et d'en faciliter la comparaison. L'élaboration préalable d'une grille de critères constitue un support structurant, garantissant l'homogénéité de l'analyse et conduisant à un premier classement cohérent des objets.

Dans cette recherche, cette étape se concrétise par la constitution d'un corpus structuré à partir d'une grille d'analyse (Tableau IV. 1) intégrant à la fois des paramètres relatifs au bâtiment et des variables propres aux fenêtres. La collecte des données repose sur une enquête de terrain comprenant des visites in situ, des prises de vues photographiques des façades et, lorsque disponibles, la consultation de documents architecturaux (plans de façades, coupes, permis de construire). L'ensemble des informations est ensuite intégré dans une grille numérique, permettant une lecture croisée et systématique des cas étudiés.

Pour le bâtiment, les critères retenus concernent notamment le nombre de niveaux et la mitoyenneté. Pour les fenêtres, l'analyse s'appuie sur un ensemble de caractéristiques fines : forme, position sur la façade, ratio ouverture/façade, orientation, type de vitrage et système d'ombrage. Ce dernier est distingué en deux grandes catégories : dispositifs fixes : casquettes horizontales, brise-soleil verticaux ou mixtes ; et dispositifs mobiles : stores, rideaux, persiennes, volets. Ces paramètres sont retenus en raison de leur influence directe sur la transmission des gains solaires et, par conséquent, sur la performance thermique globale du bâtiment.

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

Tableau IV. 2 : Grille d'analyse typologique des fenêtres d'habitation nivelles à Guelma, Source : Auteur, 2025

Paramètre	Modalités possibles			
Batiment				
Nombre de niveaux	RDC 	RDC+1 	RDC+2 	Autres
Mitoyenneté	sans 	Unique 	Double 	Triple 
Fenêtre				
Position	Vertical			
	 Central	 Bas	 Haut	
	Horizontal			
	 A gauche	 Centrale	 A droite	
Type du vitrage	Simple claire	Simple teinté	Double	Autre
Degré d'ouverture	Introvertie : <10%	Moderée 10%>O>25%	Extravertie >25%	
Orientation	Nord-sud	Est-ouest	Sud est-nord-ouest	Sud ouest-nord est
Protection solaire	Protection solaire fixe			
	 Horizontal	 Vertical	 Mixt	Autres Sans
	Protection solaire mobile			
	 Rideaux	 stores	 Persiennes	Autres

IV.5.3.2 Classement et élaboration des types

Le type est un construit théorique issu de traits communs partagés par une famille d'objets. Il ne correspond pas toujours à un cas réel, contrairement à l'exemple-type, qui illustre concrètement ce modèle théorique et sert de référence comparative.

Les données collectées permettront de réaliser un classement préalable des habitations selon les critères choisis, afin d'identifier des configurations récurrentes. Ce classement sera suivi par une élaboration des types, c'est-à-dire la construction de catégories typologiques basées sur les combinaisons des paramètres suivants :

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

Paramètres liés au bâtiment

- **Nombre de niveaux**

La majorité des habitations individuelles étudiées présentent une hauteur comprise entre R+2 et R+3, tandis que les configurations en R+1 demeurent marginales. L'augmentation du nombre d'étages entraîne une multiplication des ouvertures, influençant à la fois l'apport en lumière naturelle et les échanges thermiques.

Dans ce cas d'étude les constructions se caractérisent par une extension en hauteur, aboutissent souvent à des maisons ressemblant à des immeubles (immeuble-villa), combinant commerces ou activités au rez-de-chaussée et logements superposés aux étages.



Figure IV. 31 : différentes hauteurs des habitations individuelles de lotissement 19 juin, Source : Auteur (2023)

- **Mitoyenneté**

La majorité des habitations étudiées présentent une mitoyenneté sur deux à trois côtés, ce qui réduit la surface de façades disponibles, limite l'éclairage transversal et accroît la dépendance à l'éclairage artificiel. À l'inverse, les maisons d'angle, caractérisées par une mitoyenneté réduite à un seul côté, disposent d'un plus grand potentiel en matière d'éclairage naturel et de ventilation, mais elles sont également plus exposées au risque de surchauffe estivale..

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE



Figure IV. 32 : types de mitoyenneté des habitations individuelles du lotissement 19 juin , à droite une mitoyenneté sur un seul côté , à gauche , une mitoyenneté sur deux cotés s , Source : Auteur (2023)

Paramètres liés aux fenêtres

- **Position des fenêtres**

La majorité des ouvertures présentent une position verticale centrale, avec une hauteur variant entre 1,70 m et 2,00 m, favorisant un éclairage homogène mais générant également des pertes thermiques importantes. Certaines habitations adoptent des fenêtres cintrées, qui privilégient l'aspect esthétique sans effet notable sur la performance thermique.



Figure IV. 33 : différentes positions des fenêtrse dans les façades des habitations individuelles de lotissement 19 juin, Source : Auteur (2023)

D'autres recourent à des fenêtres en bandeau large, améliorant l'accès à la lumière naturelle et aux vues, mais augmentant simultanément les risques de surchauffe estivale et de déperditions hivernales.

- **Orientation**

L'orientation des fenêtres dans les habitations individuelles n'est généralement pas le fruit d'une démarche de conception réfléchie, mais plutôt la conséquence de la forme et de l'implantation de la parcelle. Cette contrainte engendre fréquemment une mauvaise orientation des pièces, où les ouvertures sont distribuées sans cohérence bioclimatique, uniquement selon les besoins immédiats en aération ou en éclairage. Ainsi, les pièces peuvent s'ouvrir

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

indifféremment sur les quatre directions cardinales (Est, Ouest, Nord, Sud) et leurs variantes intermédiaires. la mauvaise orientation des pièces accentue les déséquilibres thermiques et accroît la dépendance aux systèmes artificiels de chauffage, de refroidissement et d'éclairage.

- **Degré d'ouverture**

Suivant leurs dimensions et le ratio Fenêtres/Murs (F/W), les fenêtres observées peuvent être classées en trois catégories. La première correspond aux habitations présentant un ratio inférieur à 10 %, caractérisant des ouvertures réduites et un rapport introverti avec l'extérieur. La deuxième regroupe les habitations dont le ratio se situe entre 10 % et 20 %, représentant une configuration intermédiaire et modérée. Enfin, la troisième catégorie concerne les cas où le ratio dépasse 20 %, pouvant atteindre 35 %, traduisant une tendance extravertie avec de larges ouvertures. Par contre, dans la période post indépendance, On constate que, dans la période contemporaine, la majorité des habitations se situent dans la deuxième catégorie, avec des ratios avoisinant 20 %.,



Figure IV. 34 : *différents ratios des fenêtres/mur des habitations individuelles du lotissement 19 juin ,*
Source : Auteur (2023)

- **Type de vitrage**

Le vitrage simple clair constitue le type le plus répandu dans les habitations individuelles étudiées, en raison de son coût réduit et de sa disponibilité sur le marché local. Cependant, ce type de vitrage présente une faible performance thermique, se traduisant par des pertes de chaleur importantes en hiver et des apports solaires excessifs en été. À côté de cela, certains logements recourent à l'utilisation de verre teinté ou de verre réfléchissant, principalement pour des raisons esthétiques ou de contrôle de l'éblouissement. Néanmoins, ces solutions restent marginales et n'offrent qu'une efficacité limitée en matière d'isolation thermique

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE



Figure IV. 35 : différents types de vitrage utilisée dans les fenêtres des habitations individuelles de lotissement 19 juin , Source : Auteur (2023)

- **Protection solaire**

Les fenêtres sont généralement équipées de dispositifs de protection solaire manuels, tels que les volets et les persiennes, fabriqués en bois ou aluminium. En complément, les usagers recourent souvent à des solutions internes comme les rideaux, afin de limiter l'éblouissement et de se protéger des apports solaires indésirables. En revanche, les protections fixes (brise-soleil, auvents, claustras, etc.) demeurent peu répandues et sont le plus souvent mises en œuvre pour des raisons esthétiques plutôt que pour leur efficacité énergétique.



Figure IV. 36 : différents systèmes d'ombrage utilisés dans les habitations individuelles de lotissement 19 juin, Source : Auteur (2023)

Les systèmes d'ombrage fixes, bien que simples et peu coûteux, présentent plusieurs limitations majeures en matière d'adaptabilité environnementale. Leur configuration statique ne permet pas de répondre efficacement aux variations dynamiques de l'ensoleillement au cours de la journée ni aux changements saisonniers. Une mauvaise configuration peut entraîner un sur-ombrage en hiver, réduisant les apports solaires passifs nécessaires au chauffage, ou un sous-ombrage en été, augmentant les risques de surchauffe intérieure

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

À l'opposé, Les protections mobiles manuelles offrent davantage de flexibilité, mais leur efficacité dépend largement du comportement des occupants, souvent irrégulier et peu optimal. Cette dépendance à l'action humaine compromet la performance énergétique et le confort intérieur. Ces constats soulignent la nécessité de solutions d'ombrage plus autonomes et intelligentes, capables de s'ajuster automatiquement aux conditions climatiques pour garantir un confort et une efficacité énergétique durables.

IV.5.3.3 Constitution de la typologie

La dernière phase vise à construire une typologie complète, soit un système structuré et cohérent où les types sont articulés les uns aux autres. Cette étape permet de dégager les lois de transformation, les croisements entre types, les modifications et les variations. Ce système constitue alors un outil d'analyse globale du corpus étudié (PANERAI et al., 1989) .

Dans le cadre de cette recherche, l'analyse des fenêtres de l'habitat planifié à Guelma a permis de dégager Le modèle de référence dans cette étude. Il correspond à un bâtiment mitoyen sur deux côtés et comptant généralement entre R+2 et R+3. Le ratio fenêtre/mur varie entre 20 % (modéré) et 30 % (extraverti), traduisant une ouverture significative des façades. Les baies vitrées, orientées principalement sur les façades est et ouest, ce qui accentue la vulnérabilité thermique face aux surchauffes estivales et aux pertes hivernales. Le vitrage est le plus souvent simple et clair, tandis que les protections solaires se limitent, lorsqu'elles existent, à de simples volets extérieurs, sans dispositifs de régulation performants.

Conclusion

L'exploration du contexte de la ville de Guelma a mis en lumière un ensemble d'enjeux déterminants dans la perspective d'une optimisation énergétique par des moyens passifs et innovants. D'un point de vue urbain, l'évolution de la ville s'est traduite par une forte croissance de l'habitat individuel, qui domine aujourd'hui le tissu bâti prédominant, qu'il soit issu de l'héritage colonial, de la planification postindépendance ou de l'urbanisation spontanée, cet habitat présente une grande hétérogénéité formelle, mais aussi de fortes lacunes en matière de performance thermique.

L'analyse climatique confirme la sévérité des écarts thermiques saisonniers dans la région, avec des besoins simultanés en protection solaire estivale et en captation des apports solaires hivernaux. Cette double contrainte met en évidence la nécessité de concevoir des enveloppes bâties réactives et adaptées. Or, l'analyse typologique menée sur les fenêtres des habitations planifiées révèle une diversité importante de formes et de dimensions, mais aussi une absence

CHAPITRE IV : CONTEXTE ET CAS D'ÉTUDE

manifeste de logique bioclimatique : orientation aléatoire, vitrage inadapté, dispositifs d'ombrage rudimentaires ou inefficaces.

Ces constats soulignent l'urgence d'introduire de nouveaux principes de conception fondés sur une lecture fine du contexte et une intégration des dynamiques environnementales. Le biomimétisme, en tant qu'approche transdisciplinaire inspirée du vivant, offre une voie prometteuse pour développer des systèmes de régulation solaire intelligents et adaptatifs. Le chapitre suivant s'attachera ainsi à présenter la méthodologie de recherche retenue pour tester l'application de solutions biomimétiques sur un cas réel sélectionné à Guelma, dans une optique de réduction de la consommation énergétique et d'amélioration du confort thermique.

V CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

Introduction

Dans le cadre de cette recherche, la construction du chemin méthodologique constitue une étape déterminante, puisqu'elle assure la cohérence entre les fondements théoriques présentés dans l'état de l'art et les investigations pratiques développées dans la suite du travail. Ce chapitre propose ainsi une présentation détaillée des méthodes adoptées et des outils mobilisés.

La démarche s'articule autour de trois volets complémentaires. Le premier volet de la démarche méthodologique est consacré à l'étude de cas et aux mesures expérimentales. Il s'agit de caractériser le bâtiment de référence dans son contexte réel, en collectant des données relatives à sa géométrie, à ses matériaux constitutifs, à son système constructif ainsi qu'aux conditions climatiques locales. Ces informations constituent la base nécessaire à la modélisation numérique et garantissent la fiabilité des simulations énergétiques et thermiques.

Le second volet concerne la conception biomimétique du dispositif d'ombrage. Inspirée des stratégies adaptatives observées chez certains organismes naturels, cette étape transpose des principes morphologiques et fonctionnels issus du vivant dans une solution architecturale innovante. L'objectif est de développer un système d'ombrage dynamique, capable de moduler l'apport solaire en fonction des variations environnementales, tout en répondant à des critères de performance énergétique et de confort thermique.

Enfin, le troisième volet repose sur la réalisation de simulations paramétriques et sur l'application d'une optimisation multi-objective. Cette phase permet de tester différentes configurations du dispositif biomimétique, en variant notamment l'orientation, et les angles d'ouverture du système biomimétique. Les performances énergétiques et thermiques du bâtiment sont évaluées grâce à des modèles numériques avancés, et les résultats sont ensuite analysés afin d'identifier les scénarios les plus pertinents, offrant un équilibre optimal entre efficacité énergétique et confort des occupants.

V.1 Présentation de cas d'étude

Le bâtiment étudié est une villa multifamiliale située à la latitude $36^{\circ}45'18.67''$ N et à la longitude $7^{\circ}42'74.09''$ E. Il est implanté dans le lotissement d'habitat individuel planifié du 19 Juin 02, au sud-est de la ville de Guelma (voir Figure 1).

Ce bâtiment s'élève sur quatre niveaux, auxquels s'ajoute une terrasse accessible. Il abrite un total de trois logements : Le premier appartement s'étend sur les deux premiers étages, formant une unité résidentielle en duplex. Les deux autres appartements occupent respectivement le troisième et le quatrième étage, chacun bénéficiant d'un niveau indépendant. Chaque appartement bénéficie d'une double orientation Est-ouest, favorisant une ventilation naturelle traversante ainsi qu'un bon ensoleillement tout au long de la journée.

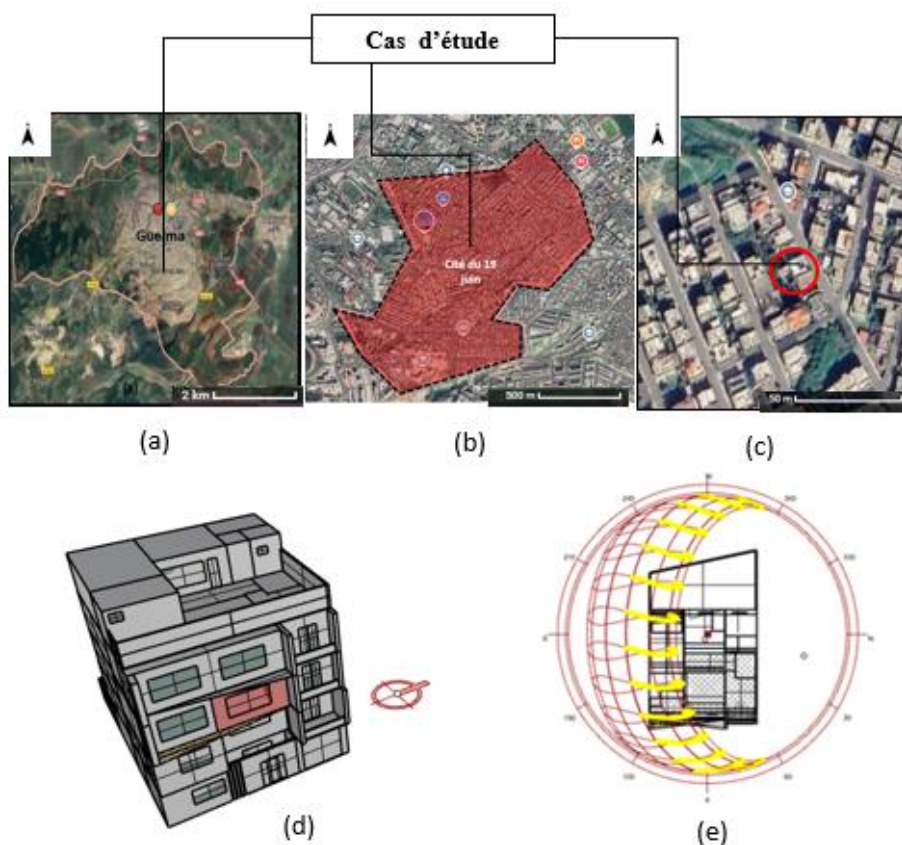


Figure V. 1 : localisation du cas d'étude (a, b, c), modèle 3D du bâtiment analysé (d) et diagramme annuel de la trajectoire solaire illustrant son orientation et son exposition au soleil (e). Source : Auteur,2024

Le système de construction utilisé pour le cas d'étude sélectionné est une structure poteau-poutre en béton armé. Les caractéristiques des matériaux de construction mentionnée dans le tableau ci-dessous ont été assignés conformément à la réglementation thermique algérienne applicable aux bâtiments résidentiels (D.T.R C3-2, 1997), sur la base de leurs caractéristiques thermiques telles que présentées dans le Tableau 1

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

Tableau V. 1 : les caractéristiques thermo physique des matériaux déconstruction utilisée pour le bâtiment cas d'étude, source : (D.T.R C3-2, 1997)

	Composants	Epaisseur E (m)	Conductivité (λ) (W/m-k)	Densité D (Kg/m3)	Chaleur spécifique S (J/kg-k)	(W/m².k)
Mur extérieur	Enduit de ciment	0.02	1.2	1300	1080	1.14
	Brique creuse	0.15	0.48	900	1080	
	lame d'air	0.05	0,047	1	1000	
	Brique creuse	0.1	0.48	900	1080	
	Enduit de ciment	0.02	1.2	1300	1000	
Mur intérieur	Enduit de plâtre	0.01	1.4	2200	1080	2.49
	Brique creuse	0.10	0.48	900	1080	
	Enduit de plâtre	0.01	1.4	2200	1080	
Sol	Revêtement de sol	0.03	1.3	2300	240	2.25
	Mortier	0.04	1.4	1800	1080	
	Dalle de béton	0.04	1.75	1800	2500	
	Hourdi	0.16	1.2	1300	1000	
	Mortier	0.04	1.4	1800	1080	
Plancher intermédiaire	Revêtement de sol	0.02	1.4	2200	1080	2.42
	Mortier	0.04	1.4	1800	1080	
	Dalle de béton	0.04	1.75	1800	2500	
	Hourdi	0.16	1.2	1300	1000	
	Placoplatre	0.02	1.2	1300	1000	
Toiture	Etanchéité / bitumen	0.04	0.5	1010	2700	1.58
	Isolation	0.07	0.04	120	1600	
	Dalle de compression	0.04	1.75	1800	2500	
	Hourdi	0.16	1.2	1300	1000	
	Placoplatre	0.01	1.4	2200	1080	

La fenêtre est constituée de verre à simple vitrage les caractéristiques de ce dernier sont mentionnées dans le tableau ci-dessous . La Transmittance Thermale U mesure la quantité de chaleur traversant un matériau donné par mètre carré et par heure. Elle indique donc l'efficacité d'un matériau en tant qu'isolant thermique. Le Coefficient de gain de chaleur solaire SHGC mesure la part de chaleur issue du rayonnement solaire direct qui traverse un matériau transparent

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

Tableau V. 2 : caractéristiques du vitrage utilisé dans le cas d'étude

Type de vitrage	Épaisseur (M)	Transmittance Thermale (U-values)	Coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)	Transmittance visible(VT)
Vitrage simple	0.006	5.70	0.74	0.86

Afin de simplifier le processus de simulation un échantillon de pièce mono-zone a été sélectionné comme représentatif du cas étudié. Dans ce cadre, l'espace retenu est un séjour situé au troisième niveau, considéré comme un étage intermédiaire. Ce positionnement a été volontairement choisi afin de réduire les influences thermiques directes : d'une part, l'impact du rayonnement solaire estival sur la toiture, et d'autre part, les pertes thermiques par le sol caractéristiques du rez-de-chaussée. Le troisième niveau, d'une superficie totale de 191,13 m², se compose d'un séjour, d'un hall, d'une cuisine, d'une salle d'eau et de trois chambres.



Figure V. 2 : : la pièce cs d'étude : façade (a) , plan, échelle 1/50 (b) et 3D (c) , Source : Auteur (2024)

De forme rectangulaire, cette pièce mesure 5,20 m de largeur sur 6.05 m de profondeur, pour une hauteur sous plafond de 3,06 m. avec une surface totale de 31.46m². Ce salon dispose d'une fenêtre orientée vers l'est, de dimensions 3,00 m × 1,60 m, soit une surface vitrée de 4,80 m². Le taux de surface vitrée par rapport à la surface de mur (WWR) est estimé à 30 %. . Ce ratio, qualifié extraverti selon la grille d'analyse établie dans le chapitre précédent consacré à la typologie de l'habitat individuel planifié, dépasse le seuil de 25 % fixé comme référence.

Le choix de se concentrer sur un seul bâtiment se justifie par la volonté d'optimiser le temps de simulation et d'éviter la lourdeur computationnelle qu'impliquerait l'analyse de plusieurs modèles. Ainsi , ce cas d'étude caractérisé par un ratio d'ouverture de 30 %, représente une

situation critique et pertinente pour évaluer l'efficacité du système d'ombrage biomimétique, tout en garantissant la disponibilité et l'accessibilité nécessaires aux mesures in situ.

V.2 Mesures expérimentales in situ

Cette phase consiste en des mesures sur site permettant d'établir une référence du comportement thermique du bâtiment en l'absence du système d'ombrage. Cette étape est essentielle pour un étalonnage précis des modèles de simulation et pour évaluer l'impact du système cinétique dans des conditions climatiques réelles.

Après avoir sélectionné le séjour comme cas d'étude représentatif, celui-ci a été retenu pour la mise en œuvre du modèle de simulation, dans le cadre de l'analyse énergétique et thermique visant à répondre aux objectifs de cette recherche. Dans cette étude, la validation du modèle énergétique a été réalisée à l'aide de mesures de température in situ, combinés à des simulations thermiques, une méthode déjà adoptée par Chaturvedi et al.(2024) et Lakhdari et al(2021) . Cette approche s'impose en raison de la nature peu détaillée des données disponibles : en effet, la facture de consommation d'électricité fournie par la Société Nationale de l'Électricité et du Gaz (Sonelgaz) ne fournit que la consommation totale du logement, sans distinction ni entre les différentes pièces, ni entre les usages spécifiques tels que la climatisation, l'éclairage ou les la consommation énergétique des appareils électroménagers. L'approche retenue permet ainsi de considérer le séjour comme une unité d'analyse autonome, facilitant la définition rigoureuse de scénarios d'usage (horaires d'occupation, consignes de température, apports internes de chaleur, etc.) et contribuant à une évaluation plus précise du comportement thermique intérieur.

V.2.1 Instrument de mesures

Dans le cadre de cette étude, les mesures de température intérieure ont été réalisées à l'aide d'un thermo-hygromètre de HANNA (modèle HI-9565), conçu pour mesurer simultanément la température et l'humidité relative de l'air ambiant.

Tableau V. 3 : les caractéristiques de l'instrument utilisé pour la prise des mesures , Source : Auteur ,2024

Instrument	Paramètres	Type	Intervalle de mesures	Précision
Thermo-hygromètre	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Humidité 	HANNA	-10,0 °C - +60,0 °C,	±0,4 °C



Cet appareil est équipé d'une sonde HR/°C avec connecteur Quick DIN, permettant une acquisition rapide et fiable des paramètres climatiques internes. Il offre une gamme de mesure de température comprise entre -10,0 °C et +60,0 °C, avec une résolution de 0,1 °C et une exactitude de ±0,4 °C, assurant une précision compatible avec les exigences expérimentales des environnements résidentiels.

Le dispositif intègre également une fonction Hold, une alerte de niveau de batterie, ainsi qu'une extinction automatique programmable. Ces caractéristiques techniques garantissent la fiabilité des données nécessaires à la calibration et à la validation du modèle thermique simulé. Conformément aux recommandations de la norme ASHRAE 55 (2010), l'instrument a été positionné au centre de la pièce, à une hauteur d'un mètre du sol, afin de représenter au mieux les conditions perçues par un occupant.

V.2.2 Choix de la période de prise de mesure

Afin d'évaluer le comportement thermique du bâtiment, les mesures ont été effectuées durant les périodes les plus critiques de l'année : la période la plus chaude et la plus froide. Ces périodes ont été déterminées à partir des données météorologiques de la ville de Guelma, extraites de la base de données « Climate. One Building » sur une période de 15 ans (2009–2023). Ces données ont été exportées au format EPW vers Grasshopper. à travers le composant « ladybug open EPW and « stat weather file ».

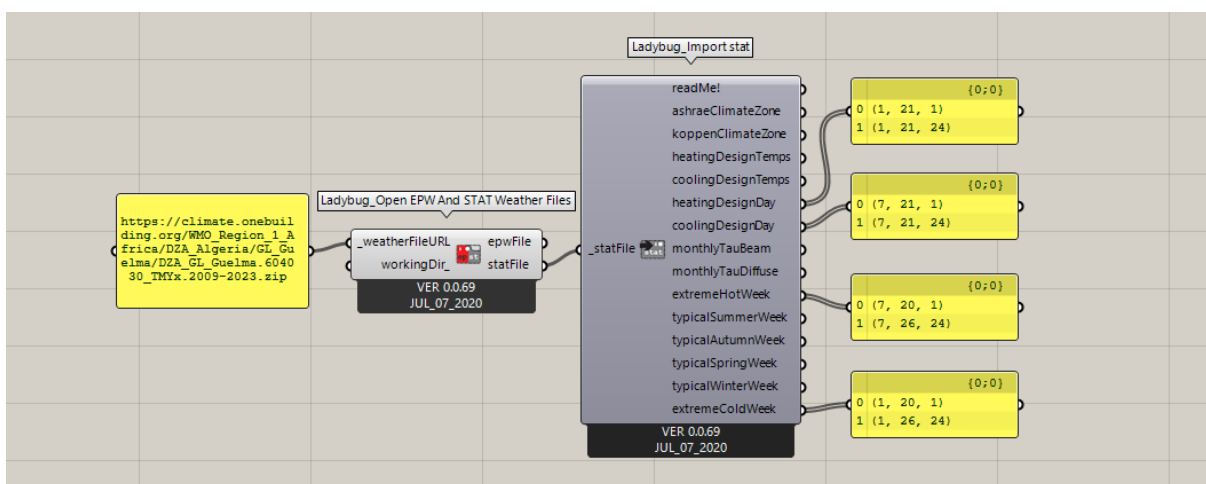


Figure V. 3 : Identification des semaines et des journées types de l'année à Guelma, Source : Auteur (2024)

À l'aide de composants « ladybug import stat », la semaine la plus chaude (typical summer week » a été identifiée, s'étendant du 20 au 26 juillet, avec le 21 juillet désigné comme la journée représentative de la saison estivale (cooling design day). De même, la semaine la plus

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

froide (typical winter week) a été déterminée du 20 au 26 janvier, et le 21 janvier représentant la journée caractéristique de la saison hivernale (heating design day)

La température intérieure a été mesurée le 23 juillet et le 26 janvier, représentant respectivement des journées caractéristiques des saisons estivale et hivernale. Les relevés ont été effectués de 8h00 à 18h00, période durant laquelle le rayonnement solaire est présent et susceptible d'influencer l'environnement thermique intérieure. Les mesures ont été réalisées à intervalles réguliers de deux heures, afin de suivre l'évolution de la température en fonction de la variation de l'ensoleillement au cours de la journée.

V.2.3 Déroulement de la campagne de mesure

Afin de garantir la fiabilité et la représentativité des données collectées, la campagne de mesure a été conduite dans un environnement strictement contrôlé, conformément aux protocoles expérimentaux couramment utilisés en simulation thermique dynamique. L'objectif était d'évaluer le comportement thermique intérieur de la pièce, en éliminant toute source de perturbation interne ou externe.

À cet effet, les conditions naturelles ont été préservées : le système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) ainsi que l'ensemble des appareils électroménagers et sources de chaleur internes (éclairage, équipements électroniques, etc.) ont été désactivés ; les ouvertures extérieures (portes, fenêtres et porte-fenêtre) ont été maintenues fermées afin de limiter les échanges thermiques avec l'extérieur. Par ailleurs, la pièce est demeurée inoccupée pendant toute la durée de la mesure, afin d'éviter toute influence des gains internes. Il est à noter que tous les dispositifs d'ombrage internes (Rideaux) et externes (les persiennes) existants ont été entièrement ouverts pendant la collecte des données, afin de neutraliser leur influence sur le comportement thermique. Les données recueillies au cours de cette campagne feront l'objet d'une analyse détaillée et seront discutées dans le chapitre suivant.

V.3 Le dispositif de contrôle solaire biomimétique proposé

Dans un contexte marqué par la nécessité de réduire les besoins énergétiques tout en améliorant le confort thermique, la conception biomimétique apparaît comme une démarche innovante. Elle vise à s'inspirer des mécanismes d'adaptation développés par le vivant pour répondre à des contraintes environnementales similaires à celles rencontrées dans l'architecture.

Pour ce faire, cette recherche adopte une approche biomimétique descendante (Top-Down), basée sur le cadre méthodologique en trois étapes proposé par Sommese et al., (2024) : la formulation du problème, la recherche biologique et la mise en œuvre. Ce processus structuré permet de traduire un défi architectural spécifique au contexte en une solution technique

inspirée de la nature, par le biais d'une abstraction systématique et d'une transposition fonctionnelle

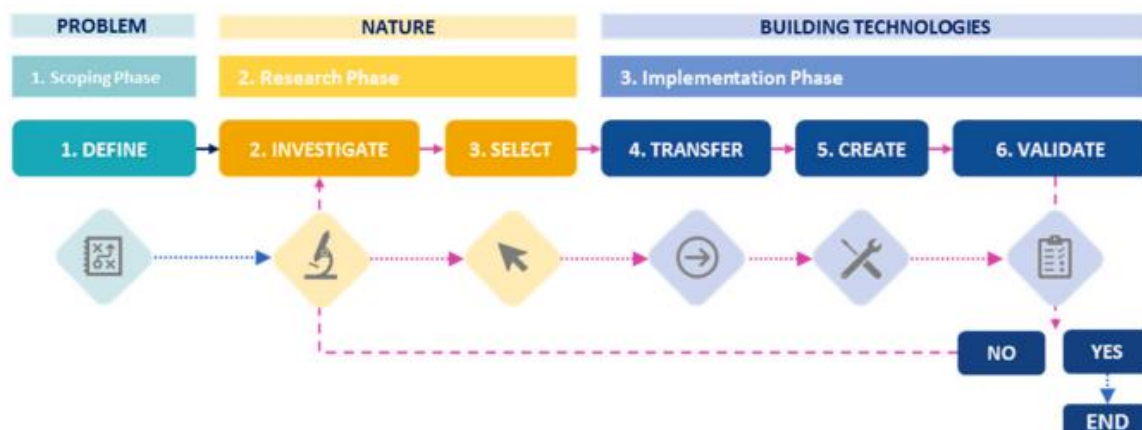


Figure V. 4 : Processus méthodologique de la conception d'un système d'ombrage biomimétique ,
Source : (Sommese et al., 2024b)

V.3.1 Phase de cadrage : définition du problème

La première étape consiste à identifier le principal enjeu environnemental en lien avec le climat local de Guelma (Csa), caractérisé par des variations marquées de l'ensoleillement et des températures journalière et saisonnière. Ce contexte climatique génère deux défis contradictoire liés au rayonnement solaire : la surchauffe estivale, qui exige la mise en place de stratégies de protection solaire afin de limiter les apports thermiques indésirables ; et le besoin d'optimiser la captation de chaleur solaire en hiver, pour compenser les pertes thermiques et réduire les besoins en chauffage.

V.3.2 Phase de recherche biologique : investigation et sélection

Après avoir identifié les défis, la phase suivante consiste à sélectionner des espèces végétales susceptibles d'y apporter des réponses. L'analyse porte en particulier sur leur réaction à la lumière et la température en tant que stimulus externe. Parmi les références retenues, la Volubilis bleu céleste (*Ipomoea tricolor*), s'est révélées la plus pertinente pour inspirer la conception d'une façade cinétique réactive.

Volubilis (Fig. 13) présente un rythme circadien caractérisé par l'ouverture des fleurs le matin et leur fermeture en fin de journée, selon un cycle d'environ 24 heures. Ce phénomène est principalement régulé par la lumière, Ainsi, sous l'effet de l'ensoleillement ou d'une source lumineuse artificielle, les pétales s'ouvrent rapidement, tandis qu'ils se referment en soirée ou lors de conditions nuageuses. Par ailleurs, d'autres paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité participent également à cette dynamique. En cas de conditions

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

extrêmes, ces facteurs peuvent perturber la régularité du cycle et influencer sur la durée ou le moment précis de l'ouverture et de la fermeture florale (Fonseka & Romanov, 2024)



Figure V. 5 : Interactions de la Volubilis bleu céleste (*Ipomoea tricolor*) avec la lumière et la température. Source : <https://www.youtube.com/watch?v=5O7LkKdQejs>

Morphologiquement, Cette fleur présente des pétales disposés en spirale autour d'un axe central, formant à l'état fermé une structure conique compacte, tandis qu'à l'état ouvert, elle adopte une géométrie polygonale déployée, optimisant l'exposition à la lumière.

Au niveau comportemental, ses pétales réagissent de manière réversible aux stimuli lumineux et thermiques : ils s'ouvrent en journée sous l'effet de l'ensoleillement et la température, puis se referment la nuit ou en présence de conditions nuageuses ou de températures basses. Ce processus d'ouverture/fermeture suit une cinétique de rotation progressive (mouvement hélicoïdal), directement corrélée à la croissance différentielle des cellules situées sur les faces adaxiale (interne) et abaxiale (externe) des pétales.



Figure V. 6 : Processus d'ouverture de la Volubilis bleu céleste (*Ipomoea tricolor*) en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Source : <https://www.youtube.com/watch?v=5O7LkKdQejs>

L'analyse de séquences vidéo en time-lapse, a permis d'identifier deux mécanismes adaptatifs majeurs : Le déroulement hélicoïdal des pétales autour de l'axe central, qui génère une ouverture radiale, et une torsion longitudinale subtile de la surface pétalaire, induite par l'asymétrie de croissance cellulaire, accentuant la modulation de la surface exposée au rayonnement.

V.3.3 Phase de mise en Œuvre : traduction des stratégies naturelles en système technique

Suite à l'extraction des principes fonctionnels observés, la phase de mise en œuvre consiste à transposer ces stratégies adaptatives en un système de contrôle solaire cinétique. Le processus d'abstraction a débuté par la simplification géométrique d'un pétale unique, lequel, à l'état fermé, adopte une forme spiralée enroulée autour d'un axe central. Lors de l'activation thermique, ce pétale se déploie progressivement, prenant une forme allongée et légèrement torsadée, générant ainsi une ouverture radiale et graduelle. (figure 7a).

Morphologiquement, cette transformation a été schématisée par un module abstrait en losange élancé, représentant la surface active du pétale. Ce module conserve son extension selon l'axe longitudinal, tandis que son ouverture est traduite par une rotation contrôlée autour de cet axe, reproduisant le mécanisme hélicoïdal naturel. L'asymétrie entre les faces adaxiale et abaxiale a été modélisée par une torsion angulaire variable, permettant de régler le degré d'ouverture du module sur une amplitude de -30° (état fermé) à $+30^\circ$ (état complètement ouvert).

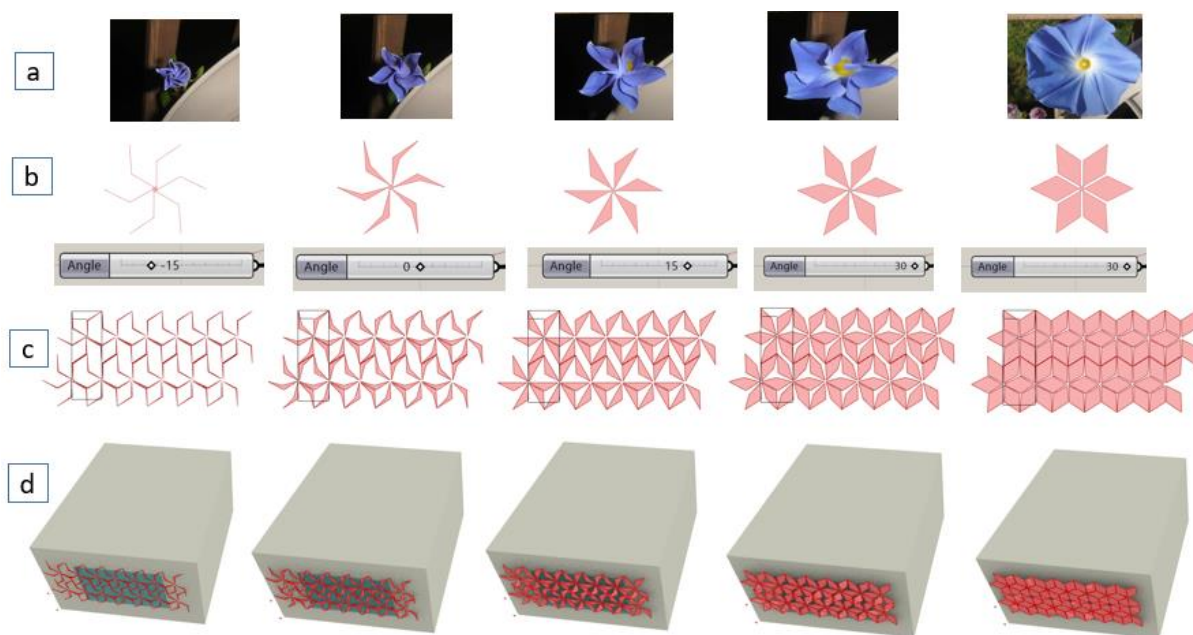


Figure V. 7 : Processus de conception du système de contrôle solaire biomimétique Source : Auteur (2024)

Chaque unité du système proposé, constitué de six modules avec des surfaces losangiques élancées, qui sont disposées en structure radiale autour d'un axe central fixe, formant une cellule dynamique capable de reproduire les séquences d'ouverture/fermeture de la fleur. (Figure 7 b) Ce dispositif a été paramétré pour réagir aux variations thermiques et solaires en temps réel, assurant une réponse adaptative aux scénarios climatiques saisonniers : En période estivale, le

système s'ouvre progressivement afin de réduire la pénétration du rayonnement solaire,, réduisant ainsi la charge de refroidissement. En hiver, à l'inverse, les éléments se referment afin de maximiser les éléments se referment pour maximiser les apports solaires passifs, améliorant ainsi les performances thermiques du bâtiment.

Cette adaptabilité est rendue possible grâce à l'utilisation d'un polymère à mémoire de forme, (Shape Memory Polymers – SMPs (Brzezicki, 2024c), un matériau intelligent capable de modifier leur configuration géométrique sous l'effet d'un stimulus thermique. Ces polymères, caractérisés par leur capacité à retrouver leur forme initiale lorsqu'ils sont soumis à une température spécifique, présentent des propriétés mécaniques remarquables : forte durabilité, flexibilité, précision d'actionnement et faible consommation énergétique. Leur comportement réversible, associé à leur activation thermique autonome, en fait des candidats idéaux pour le développement de systèmes cinétiques dans l'enveloppe architecturale (Chayaamor-Heil & Laracuate, 2020, Naeem et al., 2024) .

V.4 La simulation paramétrique

Dans cette recherche, la simulation paramétrique est adoptée comme méthode d'analyse afin d'évaluer l'impact du dispositif de contrôle solaire biomimétique sur les performances énergétiques et thermiques du système de contrôle solaire biomimétique proposé.

Cette approche se distingue par sa capacité à générer des modèles architecturaux flexibles, permettant une exploration approfondie des interactions entre la géométrie, les conditions climatiques locales et les performances environnementales (énergie, confort, lumière). Intégrée aux moteurs de simulation énergétique, elle offre la possibilité d'évaluer simultanément les impacts thermiques et énergétiques dès les premières phases de la conception.

L'automatisation des calculs, rendue possible par l'usage de scripts et de ressources de calcul intensif, garantit une gestion efficace des variantes complexes et des ensembles de données volumineux. Un autre avantage majeur réside dans son association avec des algorithmes d'optimisation multi-objectifs, permettant d'identifier les configurations les plus performantes selon des critères précis tels que l'efficacité énergétique et le confort thermique. Ainsi, la simulation paramétrique constitue un outil stratégique pour orienter la conception vers des solutions adaptées et optimisées.

V.4.1 Objectifs de la simulation paramétrique dans cette étude

L'approche paramétrique appliquée dans cette recherche vise à évaluer la performance du système de contrôle solaire biomimétique selon trois axes principaux :

- l'estimation des apports solaires (gains thermiques directs),

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

- l'évaluation de la consommation énergétique liée aux besoins de chauffage et de refroidissement,
- l'analyse du confort thermique, en s'appuyant sur la température opérative et le modèle du confort adaptatif.

Les simulations seront menées sur deux journées représentatives des conditions climatiques extrêmes, identifiées précédemment :

- le 21 janvier, pour la période de chauffage (hiver),
- le 21 juillet, pour la période de refroidissement (été).

Enfin, une comparaison sera établie entre le cas de référence (sans ombrage) et les scénarios intégrant le dispositif biomimétique, afin de quantifier l'impact réel du système sur les performances thermiques et énergétiques du bâtiment..

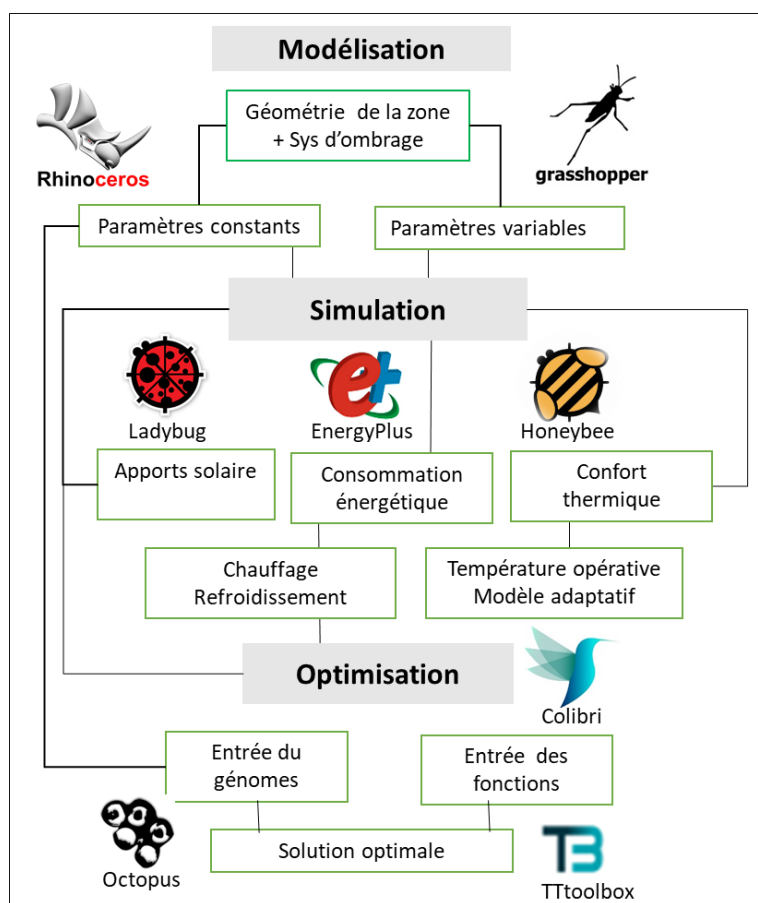


Figure V. 8 : Processus de la simulation paramétrique. Source : Auteur (2025)

V.4.2 Outils de la simulation paramétrique






Le développement récent de plateformes logicielles dédiées à la simulation paramétrique a considérablement enrichi les capacités d'analyse des concepteurs, en facilitant l'exploration de

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

combinaisons complexes de paramètres géométriques, climatiques et matériels. L'un des principaux atouts de ces outils réside dans l'intégration, au sein d'une interface unique, de multiples moteurs de simulation permettant une évaluation simultanée des performances environnementale

Dans le cadre de cette recherche, Grasshopper, intégré à Rhinocéros 3D, a été adopté comme environnement principal de modélisation paramétrique. Rhinoceros 7 a servi à la modélisation 3D, tandis que Grasshopper a assuré la gestion paramétrique des scénarios et des données d'entrée pour les analyses thermiques et énergétiques.

Tableau V. 4 : Principales fonctionnalités des logiciels et plug-ins utilisés pour la simulation paramétrique. Source : Auteur

Outil / Plug-in	Fonction principale
Outils	
 Rhinoceros 3D	Modélisation 3D précise des géométries architecturales
 Grasshopper	Plateforme de modélisation paramétrique algorithmique, gestion des données d'entrée
Plug-ins	
 Ladybug	Analyse climatique, visualisation des données météorologiques, étude du rayonnement solaire et ombrage
 Honeybee	Interface de connexion avec les moteurs de simulation énergétique et lumineuse
 EnergyPlus	Simulation thermique et énergétique du bâtiment (chauffage, refroidissement, consommation d'énergie)

Les plug-ins Honeybee et Ladybug 0.0.69 ont été intégrés pour assurer la visualisation des données climatiques (fichiers .EPW) et la simulation des performances environnementales. Les simulations thermiques et énergétiques ont été réalisées à l'aide du moteur validé EnergyPlus,

garantissant une estimation précise des apports solaires et de la consommation énergétique liées au chauffage et au refroidissement du bâtiment.

Ainsi, l'intégration de Grasshopper, Ladybug, Honeybee et EnergyPlus constitue un cadre méthodologique cohérent et performant pour la modélisation et l'analyse environnementale des systèmes biomimétiques de contrôle solaire (Sadeghipour Roudsari et al., 2013).

V.4.3 Paramètres de la simulation paramétrique

Dans l'environnement Rhinoceros 3D associé à son plug-in Grasshopper, ces paramètres sont catégorisés en paramètres constants (ou fixes) et paramètres variables, selon leur rôle dans la construction du modèle et leur impact sur les scénarios de simulation.

Dans le cadre de cette recherche, les paramètres de simulation correspondent à l'ensemble des valeurs d'entrée qui conditionnent le comportement du modèle paramétrique et influencent directement la fiabilité des résultats obtenus. Dans l'environnement Rhinoceros 3D associé à son plug-in Grasshopper, ces paramètres sont classés en deux catégories :

- Paramètres constants (ou fixes), qui définissent les conditions de base du modèle et demeurent inchangés tout au long des simulations ;
- Paramètres variables, qui sont modifiés selon différents scénarios afin d'explorer et d'évaluer leur impact sur les performances énergétiques et thermiques du système étudié.

V.4.3.1 Paramètres constants

Les paramètres constants regroupent les caractéristiques invariables du modèle de simulation, maintenues identiques dans toutes les variantes étudiées. Ils concernent les aspects géométriques, constructifs, fonctionnels et techniques du bâtiment.

a- Géométrie (modélisation)

l'espace-test (le séjour) ainsi que le dispositif biomimétique de contrôle solaire ont été modélisés dans Rhinoceros 3D, puis intégrés dans Grasshopper pour la simulation paramétrique. Cette approche permet d'ajuster avec précision les configurations du système d'ombrage selon les scénarios retenus.

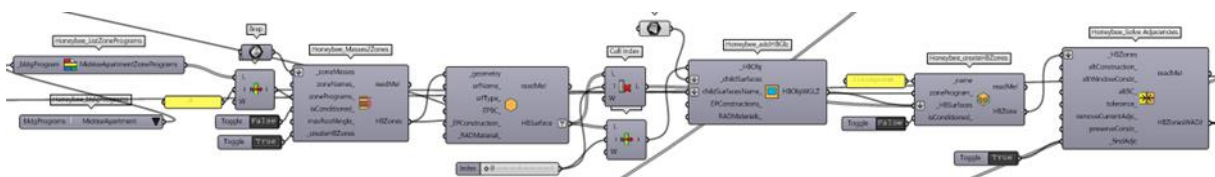


Figure V. 9 : définition paramétrique du modèle test généré par Grasshopper, Source : Auteur (2024)

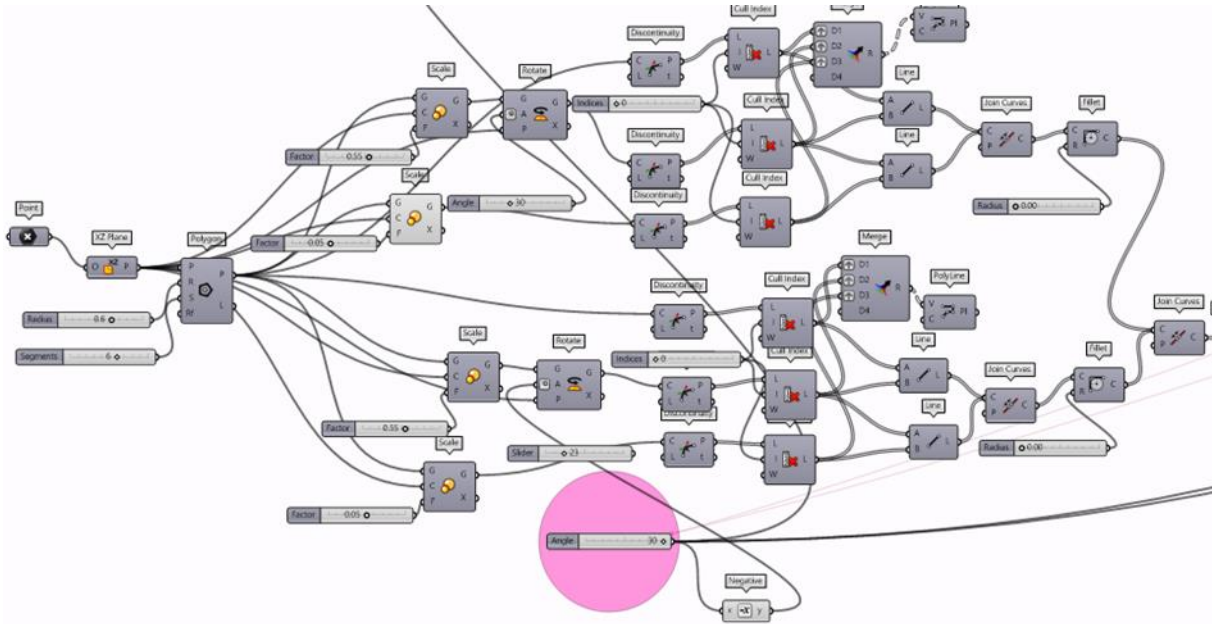


Figure V. 10 : : script algorithmique descriptif du système d’ombrage généré par Grasshopper, Source : Auteur,2025

b- Matériaux de construction

La structure porteuse du bâtiment est de type poteau-poutre en béton armé. Les matériaux constituant chaque élément du bâtiment (murs extérieurs et intérieurs, plancher intermédiaire, sol, toiture et fenêtres) ont été définis dans Grasshopper, en intégrant leurs caractéristiques thermo-physiques. Pour les parois opaques, les paramètres considérés sont la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique. Pour les parois transparentes, les indicateurs pris en compte incluent la transmittance thermique (U-value), le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC) et la transmittance visible (VT).

L’ensemble des propriétés thermo-physiques des matériaux a été défini conformément à la réglementation thermique algérienne (D.T.R C3-2, 1997), comme présenté dans le Tableau 1.

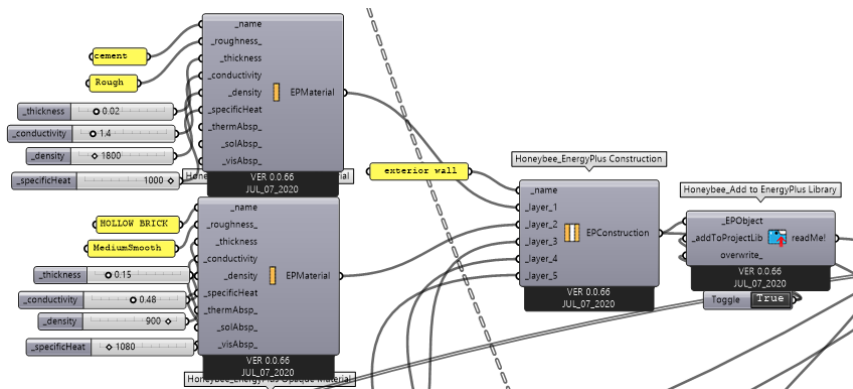


Figure V. 11: définition paramétrique des matériaux de construction du mur extérieur du cas d’étude , généré par Grasshopper , Source : Auteur (2024)

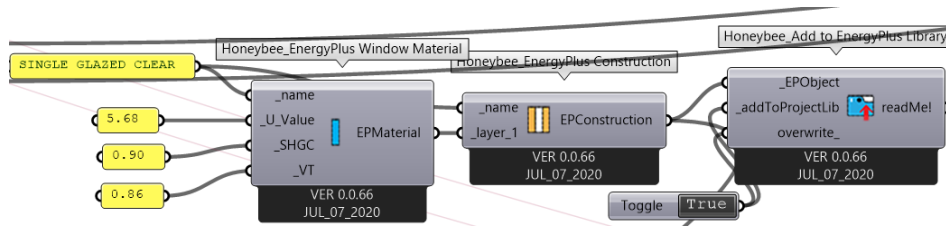


Figure V. 12 : définition paramétrique du vitrage de la fenêtre du cas d'étude , généré par Grasshopper , Source : Auteur (2024)

c- Profil d'occupation

Le séjour en tant qu'espace principal de l'appartement est utilisé principalement l'après-midi de 12h jusqu'à 24h (lahmar ,2022) avec une occupation constante de 100% (5 occupants). , après le travail ou l'école.). Ce profil d'occupation prend en compte les usages domestiques récurrents : réunions familiales, activités récréatives (regarder la télévision, lire étudier...)

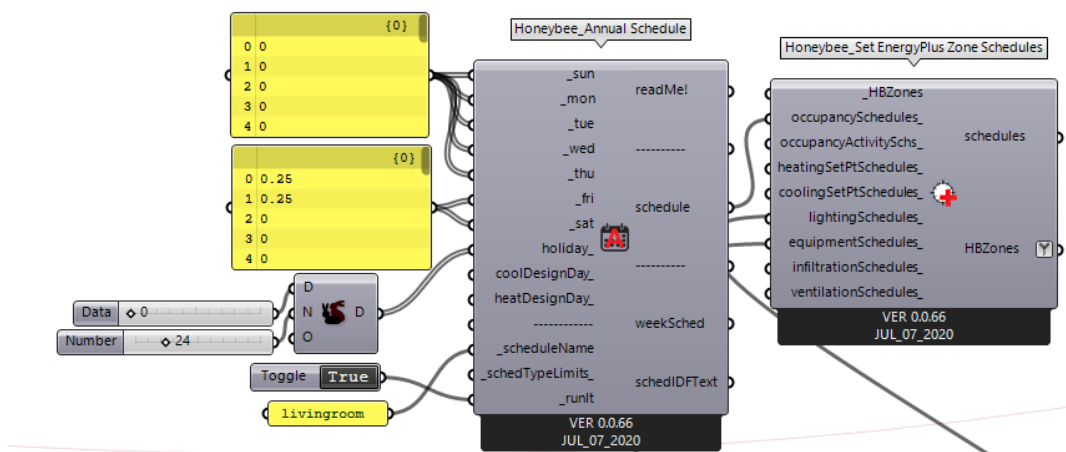


Figure V. 13 : :script de profil d'occupation généré par grasshopper , Source : Auteur (2024)

d- Consigne de température / système CVC

Les températures de consigne ont été fixées à 20 °C en hiver (chauffage) et 26 °C en été (refroidissement). Le système CVC simulé est un système d'air de charge idéale (Ideal Load Air System) avec un coefficient de performance (COP) de 2,7. Ce système ne simule pas les équipements réels de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), mais il calcule précisément les charges thermiques idéales (chauffage/refroidissement) nécessaires pour maintenir les conditions de confort thermique (températures de consigne) définies.(Approprié dans les études d'optimisation architecturale, où la performance thermique est évaluée indépendamment des systèmes CVC spécifiques)

e- Eclairage artificiel

Le niveau d'éclairage artificiel a été déterminé en fonction des dispositifs d'éclairage installés et des périodes d'occupation, avec une densité lumineuse adaptée aux besoins d'usage du séjour. Conformément aux recommandations de la norme ASHRAE, le seuil minimal

d'éclairage a été fixé à 300 lux afin de garantir un niveau de confort visuel adéquat durant les heures d'occupation.

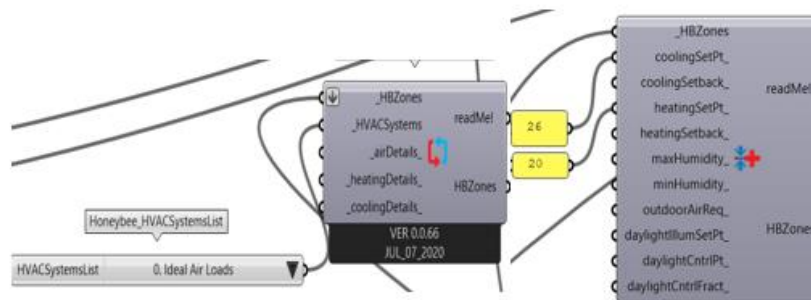


Figure V. 14 : script identifiant le type de CVC utilisé et les consignes de température généré par grasshopper , Source : Auteur (2024):

f- Charge des équipements :

Les charges internes liées aux équipements électriques ont été estimées en fonction des appareils couramment présents dans un séjour résidentiel, à savoir :

- un téléviseur,
- un récepteur ou box internet,
- des lampes de table ou lampadaires,
- des chargeurs pour dispositifs électroniques (téléphones, tablettes),

Sur la base de ces équipements, la charge électrique totale a été fixée à 5 W/m², conformément aux valeurs de référence pour les espaces de vie résidentiels

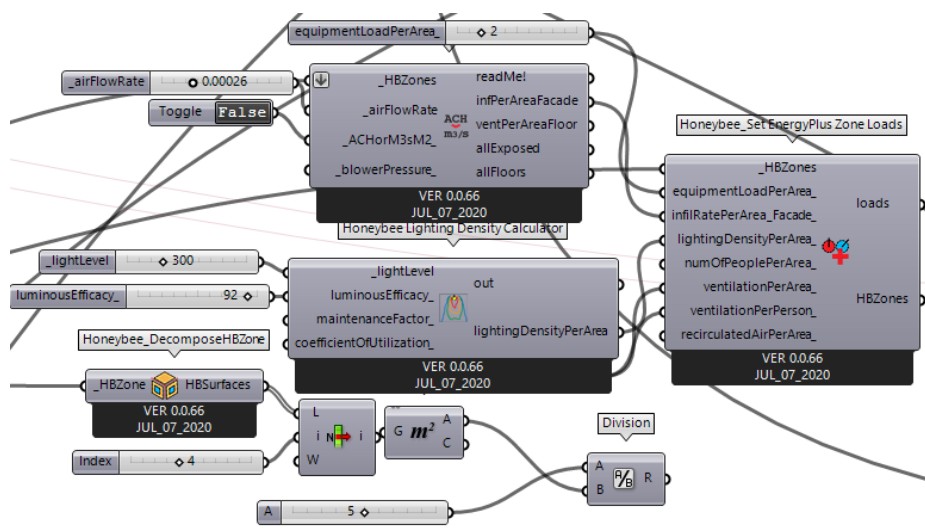


Figure V. 15 : : script des charges d'équipements généré par grasshopper , Source : Auteur (2024)

g - ventilation naturelle

La ventilation naturelle n'est pas prévue dans la conception du bâtiment. Cependant, une petite valeur d'infiltration a été prise en compte lors de la simulation, pour tenir compte des fuites résultant des problèmes de construction et de finition. Le taux d'infiltration utilisé dans la simulation était d'environ 0,000227 m³/s par m² ce qui représente une quantité minimale de fuites d'air.

Tableau V. 5 : Tableau récapitulatif des conditions générales de la simulation, Source : Auteur (2024)

Parameter	Critters	
Occupation	Nombre de personnes par m ²	0.05 ppl /m ²
	Profile occupation	12PM-12AM
Charges internes	Charges thermiques des équipements par m ²	5W/m ²
	Densité d'éclairage	3 W/m ²
	Débit de ventilation par personne	0.0075 m ³ /s
	Taux d'infiltration	0.0003 m ³ s-m ²
Temperature	empérature de consigne pour le chauffage	20°C
	Eclairage artificiel le refroidissement	26°C
Système de CVC	Limite d'éclairement	300 lux
	Type	Système de charge d'air idéale
	COP (Coefficient de performance)	2.7

V.4.3.2 Les paramètres variables

Les paramètres variables sont les facteurs modifiables dans le but d'évaluer leur impact sur la performance thermique et énergétique du bâtiment. Cette étude s'est concentrée sur deux paramètres principaux :

a- L'Orientation

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

L'orientation du bâtiment peut affecter l'exposition au soleil et les gains solaires, influençant ainsi la performance thermique et énergétique du bâtiment. L'orientation, a été analysée selon trois directions principales : 0° (sud), 90° (ouest) et 270° (est), avec des incréments de 90° . L'orientation nord (180°) a été exclue en raison de son exposition limitée au rayonnement solaire direct, ce qui réduit sa pertinence dans l'évaluation des gains passifs.

b- L'angle de rotation du système de contrôle solaire

Le comportement du dispositif biomimétique a été analysé à travers cinq configurations d'ouverture des lames, correspondant à des angles de :

- -30° (ouverture totale, 100% d'ouverture),
- -15° (75% d'ouverture),
- 0° (50% d'ouverture),
- 15° (25% d'ouverture),
- 30° (fermeture totale, 0% d'ouverture).

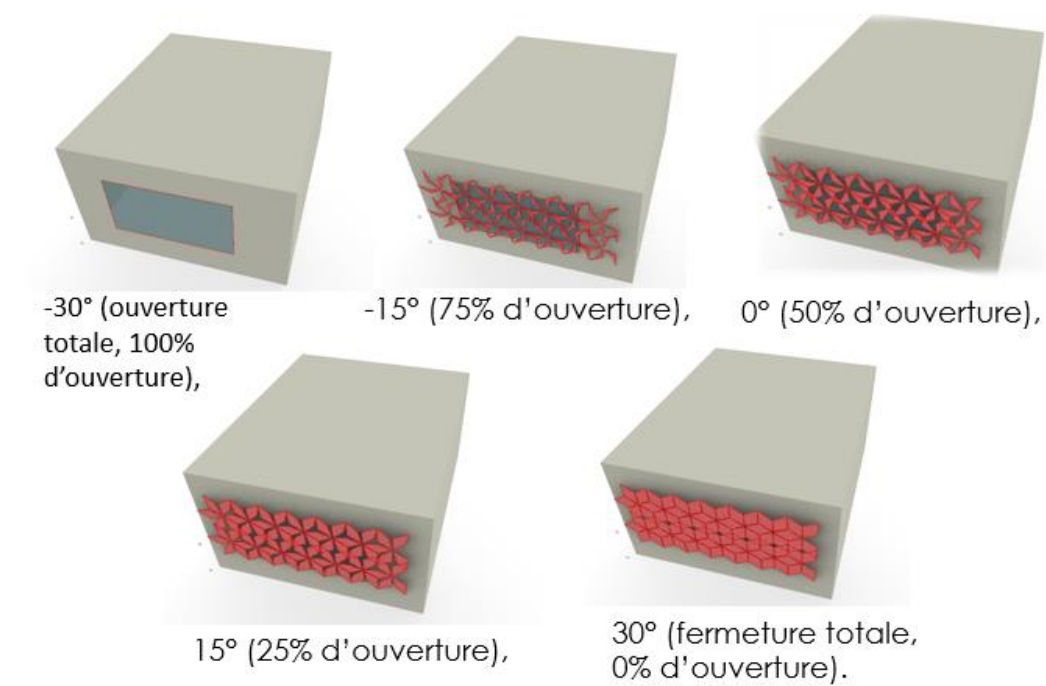


Figure 3 : schémas d'une seule unité du système d'ombrage selon plusieurs configurations selon l'angle d'orientation, source : Auteur (2024)

V.5 L'Optimisation multi objectifs

L'optimisation multi-objectifs a été menée afin d'identifier les configurations les plus performantes du système d'ombrage biomimétique proposé. L'optimisation multi-objectifs a été menée afin d'identifier les configurations les plus performantes du dispositif proposé, conciliant réduction de la consommation énergétique et amélioration du confort thermique.

V.5.1 Objectifs de L'Optimisation multi objectifs

Les fonctions objectives retenues traduisent les priorités de la recherche et reposent sur des indicateurs clés de performance énergétique et de confort thermique. Elles sont formulées comme suit :

- F1 : Minimiser les apports solaires en période estivale et les maximiser en période hivernale.
- F2 Minimiser la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation.
- F3 Maximiser Le pourcentage de confort thermique

Ces objectifs, complémentaires mais parfois conflictuels, constituent la base de l'optimisation. Ils permettent d'explorer différentes configurations du système afin d'identifier les solutions offrant le meilleur équilibre entre efficacité énergétique et confort intérieur.

V.5.2 Outils L'Optimisation multi objectifs

Lors de la dernière étape du processus méthodologique, un moteur d'itération a été intégré afin de faciliter l'optimisation des paramètres étudiés. Cet outil repose sur le plugin **Octopus**, qui permet d'explorer automatiquement un vaste espace de solutions en générant aléatoirement des combinaisons de valeurs assignées aux curseurs contrôlant les variables d'optimisation. Grâce à son algorithme évolutionnaire multi-objectifs, Octopus identifie progressivement les solutions présentant les meilleures performances en termes d'efficacité énergétique et de confort thermique, tout en mettant en évidence les compromis possibles entre ces deux indicateurs..

Pour l'enregistrement et l'analyse des résultats, l'étude a mobilisé le plugin **TTToolbox**.. Cet outil permet d'exporter facilement les résultats vers des formats exploitables, notamment Excel, facilitant ainsi le traitement, la comparaison et l'interprétation des données obtenues à travers les itérations générées. L'association de ces outils garantit une gestion rigoureuse et structurée de l'ensemble des simulations.

En complément, l'outil Design Explorer a été mobilisé afin de visualiser et d'explorer de manière interactive les multiples solutions générées. Il s'agit d'une qui permet é de filtrer, comparer et sélectionner les solutions les plus pertinentes selon plusieurs critères de performance. Grâce à sa capacité de représentation visuelle, Design Explorer joue un rôle central dans l'aide à la décision, en permettant d'identifier rapidement les tendances, les compromis et les scénarios optimaux en fonction des orientations du bâtiment et des paramètres d'ombrage testés.

V.5.3 Paramètres ajustés au cours du processus d'optimisation

Les paramètres considérés dans le processus d'optimisation ont consisté en un affinage progressif des différentes combinaisons possibles. Comme l'illustre le tableau 6, ils ont été sélectionnés avec soin en raison de leur impact significatif sur les performances simulées du bâtiment.

Tableau V. 6 : paramètres intégrés durant le processus d'optimisation de configuration du modèle . (Source : Auteur, 2025)

Elément	Paramètre	Critères
La fenêtre	Le type du vitrage	-le simple vitrage clair, l-e double vitrage clair
		-le double vitrage clair avec remplissage d'argon
	Le ratio des ouvertures (WWR)	de 10 % à 90 %.
	Orientation du bâtiment	Est Sud Ouest
Le système de contrôle solaire	Angle de rotation	[-30 +30]
	Distance du module au vitrage	[1---50cm]

Les variables ont été classées en deux catégories distinctes :

- **les paramètres fixes Paramètres liés à la fenêtre**

Les paramètres associés à la fenêtre comprennent le type de vitrage (simple clair, double clair, double clair avec remplissage d'argon), le rapport fenêtre-mur (WWR) ainsi que l'orientation du bâtiment (Est, Sud, Ouest). Ces caractéristiques influencent de manière déterminante les apports solaires, les déperditions thermiques et, par conséquent, la performance énergétique du bâtiment. Leur prise en compte permet de réguler l'équilibre entre les gains thermiques gratuits et la limitation des pertes énergétiques, ce qui constitue un levier essentiel pour optimiser le confort thermique et l'efficacité énergétique.

- **les paramètres liés au système d'ombrage**

Les paramètres relatifs au système d'ombrage concernent principalement le contrôle de l'ensoleillement direct. Ils incluent l'angle de rotation des modules et la distance entre les modules et le vitrage, ainsi que l'angle de position du soleil. L'ajustement de ces paramètres

permet d'adapter le comportement du système aux variations journalières et saisonnières, afin de limiter les surchauffes estivales et de favoriser les apports solaires en hiver. Cette flexibilité contribue directement à l'amélioration du confort thermique des occupants et à la réduction des besoins énergétiques liés au chauffage et au refroidissement.

En intégrant ces paramètres dans une approche d'optimisation multi-objectifs, l'étude a cherché à déterminer, pour chaque orientation du bâtiment, la configuration de dispositif proposé la plus performante en matière d'efficacité énergétique et de confort thermique. L'exploration des différentes combinaisons de variables a permis de mettre en évidence des solutions optimales capables de réduire la consommation énergétique tout en améliorant les conditions de confort des occupants. Ce processus constitue ainsi une étape déterminante pour orienter la conception vers des choix adaptés aux spécificités climatiques locales et favorisant une architecture durable et performante.

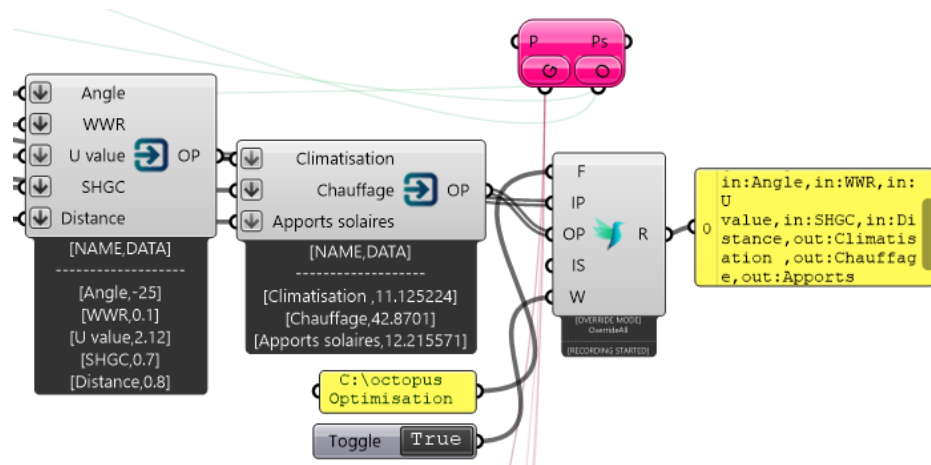


Figure V. 16 : : algorithme identifiant les objectifs de l'optimisation multi objectifs, généré par Grasshopper. Source : Auteur, 2025)

Conclusion

Ce chapitre a exposé en détail la démarche méthodologique qui structure cette recherche, en mettant en évidence la manière dont les différentes approches et outils se complètent pour répondre aux objectifs fixés. L'articulation entre l'étude de cas, la conception biomimétique et la simulation paramétrique ne constitue pas seulement une succession d'étapes, mais bien un processus intégré permettant d'assurer la rigueur scientifique et la fiabilité des analyses.

L'apport principal de cette méthodologie réside dans sa capacité à relier les données issues de l'observation et des mesures expérimentales à une phase de conception innovante inspirée du vivant, puis à une évaluation numérique avancée. Ce cheminement garantit que les solutions testées ne se limitent pas à une démarche théorique, mais trouvent leur pertinence dans des conditions proches du réel, tout en ouvrant la voie à une optimisation des performances.

CHAPITRE V : MÉTHODES ET MATÉRIELS

Ainsi, l'ensemble de la méthodologie établit une base solide pour l'analyse des résultats présentés dans le chapitre suivant, où seront discutés les apports du système biomimétique proposé sur la performance environnementale du bâtiment étudié.

Au-delà de la description technique des étapes, ce cheminement méthodologique offre une base solide pour interpréter de manière critique les résultats présentés dans le chapitre suivant. Ces résultats permettront d'apprécier l'efficacité du système d'ombrage biomimétique proposé et d'en évaluer les apports concrets en matière de performance énergétique et de confort thermique.

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Ce chapitre présente l'analyse des résultats issus des simulations énergétiques et thermiques conduites dans le cadre de cette recherche. L'objectif principal est, d'une part, de vérifier la validité du modèle numérique adopté et, d'autre part, d'évaluer l'efficacité du système d'ombrage biomimétique appliqué à l'habitat individuel à Guelma.

Dans un premier temps, le chapitre s'attache à la validation du modèle de simulation, qui consiste à confronter les données numériques aux mesures expérimentales in situ à l'aide d'indicateurs statistiques reconnus, afin de garantir la précision des résultats.

La deuxième partie concerne l'analyse des apports solaires en fonction de l'orientation et des différentes configurations du dispositif d'ombrage. Cette étape permet d'examiner la capacité du système biomimétique à réguler l'ensoleillement incident selon les saisons et à en mesurer l'impact sur l'équilibre énergétique du bâtiment.

La troisième section est dédiée à l'étude de la consommation énergétique et du confort thermique. Elle met en évidence l'influence des scénarios d'ouverture et d'orientation du système cinétique sur les besoins en chauffage et en refroidissement, ainsi que sur le confort perçu par les occupants, notamment à travers la température opérative et le modèle du confort adaptatif. Enfin, la dernière partie expose une optimisation multi-objective, visant à identifier pour chaque orientation la configuration optimale du dispositif en terme de performance environnementale.

V.6 Validation du modèle de simulation

La validation constitue une étape cruciale dans l'évaluation de la précision des résultats issus des simulations énergétiques et thermiques (Besbas et al., 2022) . Dans cette étude, le processus de validation a débuté par la modélisation numérique de la pièce test d'un bâtiment résidentiel existant à l'aide du logiciel Rhinocéros, avec une intégration fine des propriétés des matériaux via le script Grasshopper. Une fois l'ensemble des caractéristiques thermo physiques, y compris le système CVC et les charges internes , correctement paramétrées, plusieurs simulations ont été réalisées afin de garantir la cohérence et la fiabilité des résultats produits (Ahmad et al., 2024)

La validation du modèle s'est appuyée sur une approche expérimentale combinant des mesures in situ de la température intérieure dans la pièce test (le séjour), ainsi que sur les résultats issus des simulations thermiques correspondantes. Cette approche a été adoptée en raison de l'absence de données énergétiques détaillées au niveau de la pièce. En effet, la facture d'électricité fournie par la Société Nationale de l'Électricité et du Gaz (Sonelgaz) ne permet d'accéder qu'à la consommation globale du logement, sans distinction des usages spécifiques (chauffage, éclairage, électroménager) ni distinction spatiale entre les différentes pièces. Dans ce contexte, l'utilisation de données de température intérieure constitue une alternative pertinente, déjà exploitée dans les travaux de Chaturvedi et al.(2024) ,Lakhdari et al., (2021) et Medjeldi (2025).

Pour évaluer la performance du modèle, deux indicateurs statistiques couramment utilisés dans la validation des simulations thermiques ont été retenus : l'erreur moyenne de biais (MBE) et le coefficient de variation de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)). La MBE correspond à la moyenne des écarts entre les valeurs mesurées et simulées, exprimée en pourcentage, et fournit une indication sur la tendance systématique du modèle à surestimer ou sous-estimer les résultats. Elle est calculée selon l'équation suivante

$$\mathbf{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Mi - Si)}{\sum_{i=1}^n Mi} \quad (1)$$

Le CV(RMSE) permet quant à lui d'évaluer la dispersion des erreurs autour de la moyenne, en tenant compte des erreurs compensatoires, (Coakley et al., 2014) et est défini par l'équation :

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

$$CV (RMSE) = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Mi - Si)^2}{n}} \quad (2)$$

où M_i est la donnée mesurée réelle, S_i la valeur simulée, et n le nombre d'intervalles.

M_i : valeur mesurée à l'instant i

S_i : valeur simulée à l'instant i

n : nombre total de valeurs prises en compte pour le calcul

\bar{y} : moyenne des valeurs mesurées

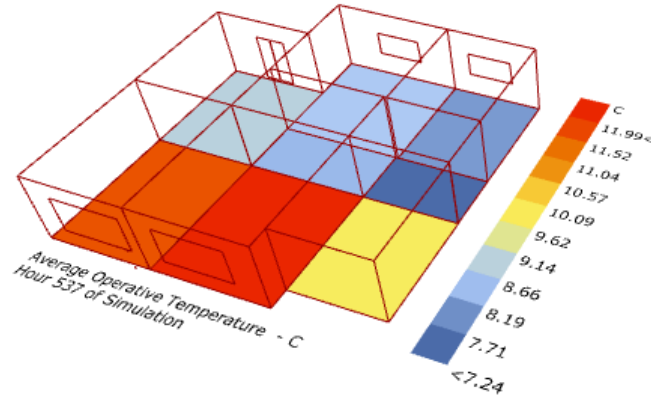


Figure VI. 1 : Modèle 3D illustrant les températures simulées dans l'ensemble du logement, y compris la pièce de référence, lors d'une journée de la période hivernale. Source : Auteur, 2025.

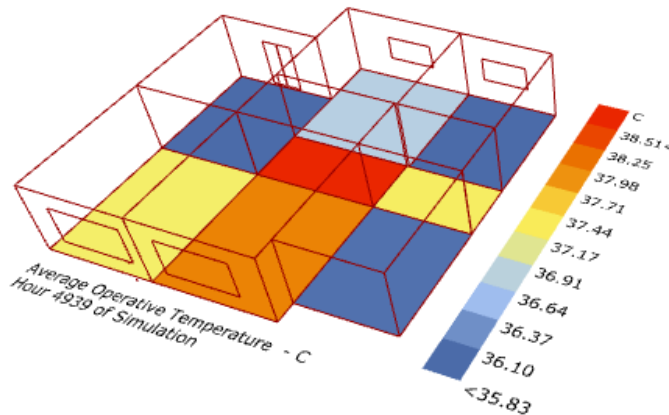


Figure VI. 2 : Modèle 3D illustrant la distribution des températures intérieures simulées dans l'ensemble du logement, incluant la pièce de référence, durant une journée estivale. Source : (Auteur, 2025)

Conformément à la directive 14 de l'ASHRAE, (Landsberg et al., 2018) un modèle de simulation est considéré comme acceptable lorsque le MBE se situe dans une plage de $\pm 10\%$ et le CV(RMSE) dans une plage de $\pm 30\%$ (ASHRAE Guideline 14-2014).

Afin de mettre en application ces indicateurs statistiques et d'évaluer concrètement la précision du modèle, l'analyse s'appuie sur la comparaison entre les températures mesurées et simulées lors de journées issues des semaines représentatives des conditions climatiques locales, identifiées dans le

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

chapitre précédent. À ce titre, les figures 3 et 4 illustrent respectivement l'évolution des températures relevées et simulées au cours d'une journée hivernale (23 janvier) et d'une journée estivale (25 juillet).

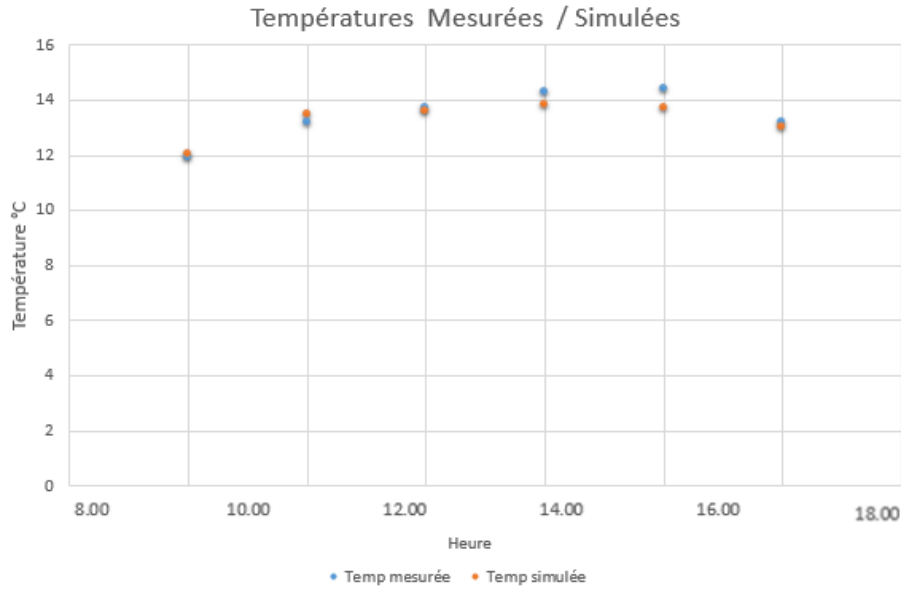


Figure VI. 3 : Comparaison des températures mesurées et simulées pendant d'une journée froide (le 23 janvier).
Source : (Auteur ,2025)

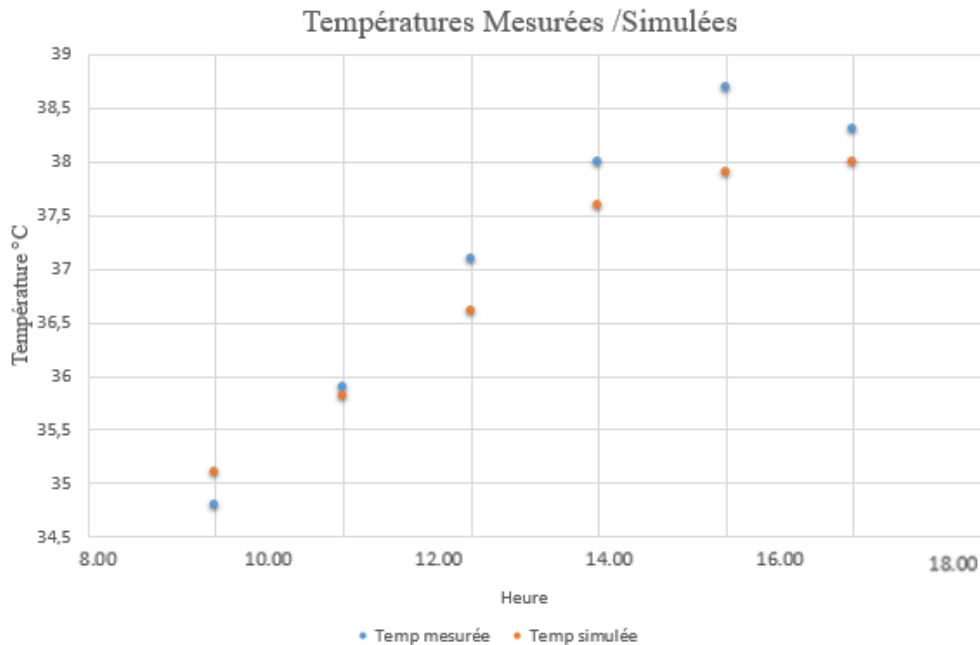


Figure VI. 4 : Evolution des températures mesurées et simulées au cours d'une journée chaude (le 25 juillet) :
Source : (Auteur ,2025)

Au cours de la journée hivernale, les températures mesurées oscillent entre 12 °C et 14,5 °C, traduisant une faible amplitude thermique journalière, caractéristique de la saison froide. L'évolution reste relativement stable, avec une légère hausse progressive en matinée, culminant vers 14h avant de décroître

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

en fin d'après-midi. Cette dynamique témoigne d'un rayonnement solaire hivernal limité et d'une inertie thermique qui atténue les variations entre matin et après-midi. Ces résultats mettent en évidence un climat modéré en hiver, où les écarts de température demeurent restreints.

En revanche, la journée estivale présente des températures nettement plus élevées, comprises entre 34,8 °C et 38,7 °C, avec une amplitude thermique journalière plus marquée (près de 4 °C). On observe une montée progressive de la température dès la matinée, suivie d'un maximum en milieu et fin d'après-midi, sous l'effet du rayonnement solaire direct et de l'accumulation de chaleur. Cette évolution met en évidence la forte influence de l'ensoleillement estival et la capacité de l'air ambiant à atteindre des valeurs extrêmes, avant d'amorcer une baisse en fin de journée.

Dans cette perspective, la comparaison entre températures mesurées et simulées permet d'évaluer la performance et la fiabilité du modèle numérique adopté. Les résultats obtenus dans cette étude démontrent la capacité du modèle à représenter fidèlement le comportement thermique réel. Durant la période estivale, l'erreur moyenne de biais (MBE) a été de 0,1 % et le CV(RMSE) de 1,1 %, tandis qu'en période hivernale, une MBE de -1,32 % et un CV(RMSE) de 2,92 % ont été enregistrés. Ces valeurs restent largement inférieures aux seuils admissibles définies par l'ASHRAE, attestant de la validité du modèle numérique et de sa capacité à simuler avec précision les conditions thermiques observées. Cette fiabilité est essentielle pour évaluer les besoins en chauffage et en refroidissement, ainsi que pour envisager des optimisations énergétiques dans les bâtiments existant.

V.7 Estimation des apports solaires

Dans cette section, les résultats de simulation relatifs aux moyennes horaires et mensuelles des charges solaires incidentes sur l'espace test, avant et après l'intégration du système bio-cinétique proposé, sont présentés. L'analyse porte sur trois orientations (est, sud et ouest) et cinq scénarios de configuration, allant de l'absence totale d'ombrage (-30°) à une fermeture complète (+30°). En période estivale, la situation de référence correspond au cas sans ombrage, tandis qu'en période hivernale, la configuration fermée (+30°) sert de base comparative. Les scénarios étudiés sont les suivants :

- Scénario 1 : référence sans panneau d'ombrage (simple vitrage, -30°)
- Scénario 2 : panneau partiellement ouvert à 25 % (-15°)
- Scénario 3 : panneau partiellement ouvert à 50 % (0°)
- Scénario 4 : panneau partiellement ouvert à 75 % (15°)
- Scénario 5 : panneau totalement fermé (30°)

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

V.7.1 Avant l'intégration du système de contrôle solaire biomimétique

Afin d'analyser les apports solaires, les figures 5, 6 et 7 illustrent leur évolution horaire moyenne et mensuelle dans le cadre de l'étude de cas en l'absence de dispositifs d'ombrage, et ce, pour les trois orientations principales : est, sud et ouest.

L'analyse débute par l'orientation est, qui se distingue par une concentration notable des apports solaires entre 6h et 12h, en lien direct avec le lever du soleil. Ces apports atteignent un pic durant les mois estivaux, dépassant les 3,4 kWh/h, exposant ainsi les espaces intérieurs à un risque élevé de surchauffe. En revanche, durant la période hivernale, la faible altitude solaire réduit considérablement les apports matinaux, ce qui engendre une augmentation des besoins en chauffage.

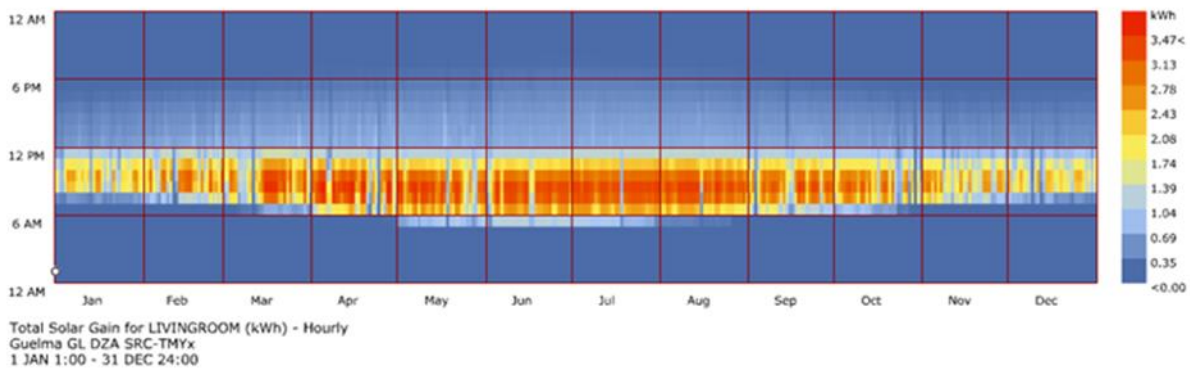


Figure VI. 5 : Apports solaires totaux incidents sur l'orientation est. Source : Auteur ,2025

En comparaison, l'orientation sud présente une répartition différente des apports, concentrés entre 10h et 16h conformément à la trajectoire solaire dans l'hémisphère nord. Un pic est observé durant les saisons intermédiaires, atteignant 3,6 kWh. Cette orientation se révèle particulièrement favorable à l'optimisation des gains solaires passifs en hiver. Toutefois, en l'absence de systèmes d'ombrage adaptés, elle peut également engendrer une surchauffe excessive durant la période estivale.

Enfin, l'orientation ouest se caractérise par des apports solaires concentrés entre 12h et 18h, avec un pic observé entre mai et septembre, atteignant jusqu'à 2,9 kWh/h. Cette accumulation thermique en fin de journée rend cette orientation particulièrement vulnérable à la surchauffe en été. En hiver, bien que plus modestes, les apports en fin de journée peuvent néanmoins contribuer au chauffage passif.

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

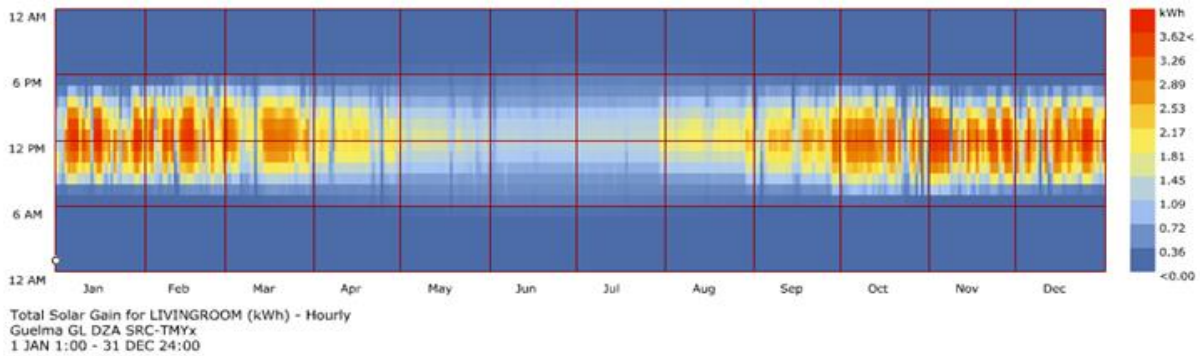


Figure VI. 6 : Apports solaires totaux incidents sur l'orientation sud. Source : Auteur ,2025

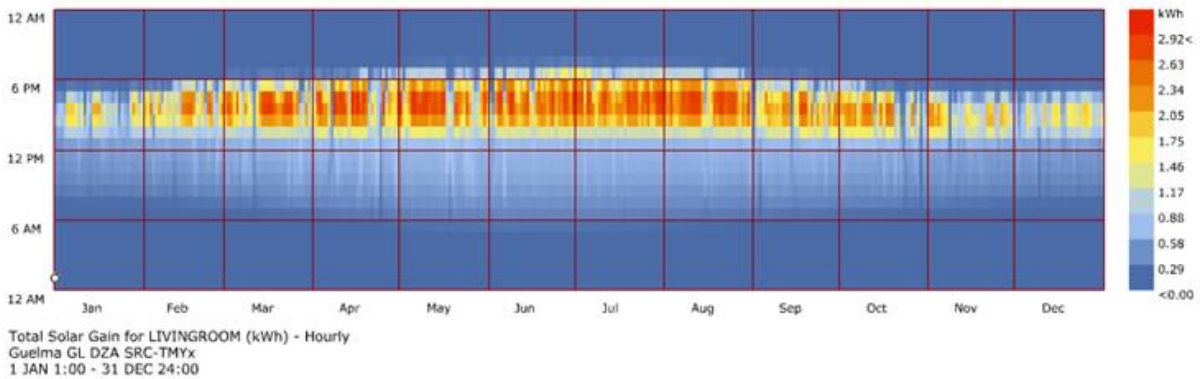


Figure VI. 7 : Apports solaires totaux incidents sur l'orientation ouest. Source : Auteur ,2025

V.7.2 Après l'intégration du système de contrôle solaire biomimétique

Les figures 8 et 9 présentent les résultats de simulation des apports solaires pour le cas de référence, en fonction des orientations considérées et des scénarios proposés. L'évaluation s'appuie sur le pic estival d'apports solaires, enregistré le 21 juillet, et sur le minimum hivernal, relevé le 21 janvier. Ces deux journées types ont été préalablement définies dans le chapitre précédent. L'introduction de systèmes d'ombrage biomimétiques cinétiques permet une réduction significative des apports solaires durant la période estivale. Par rapport à un scénario de référence constitué uniquement de vitrages, ces dispositifs montrent des performances notables. Pour l'orientation sud, un angle d'ouverture de -15° permet une réduction des apports solaires de 41 %, contre 36 % pour l'est et 40 % pour l'ouest. Lorsque le système est configuré à 0° , la réduction atteint 58,8 % pour le sud, 56,25 % pour l'est, et 50 % pour l'ouest. Enfin, avec un angle d'ouverture de 15° , les réductions maximales observées sont de 73,07 % pour le sud, 72 % pour l'est, et 71,42 % pour l'ouest

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

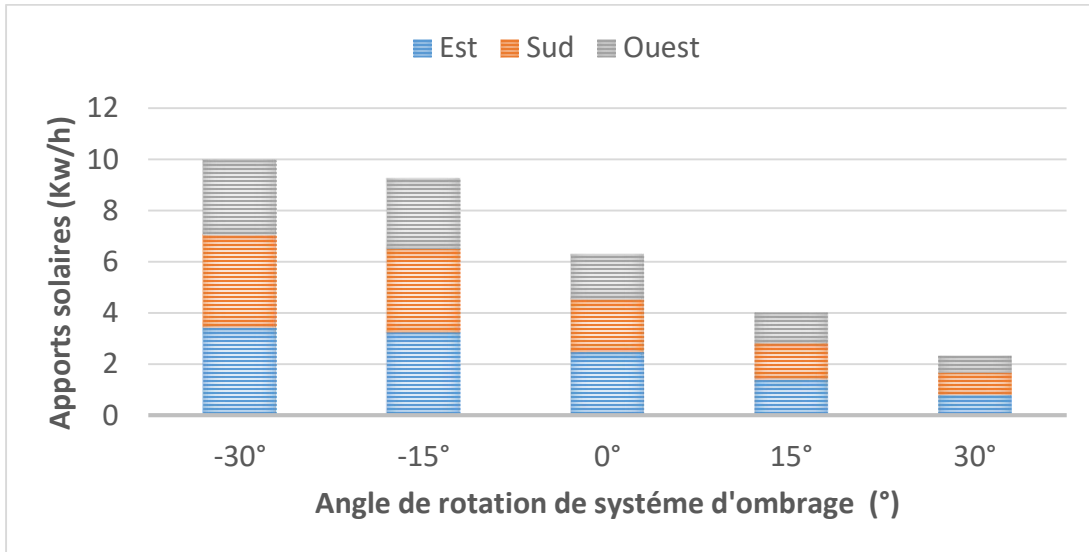


Figure VI. 8 : impacts du système d'ombrage sur les apports solaires selon l'orientation pendant la journée type estivale, Source : Auteur, 2025

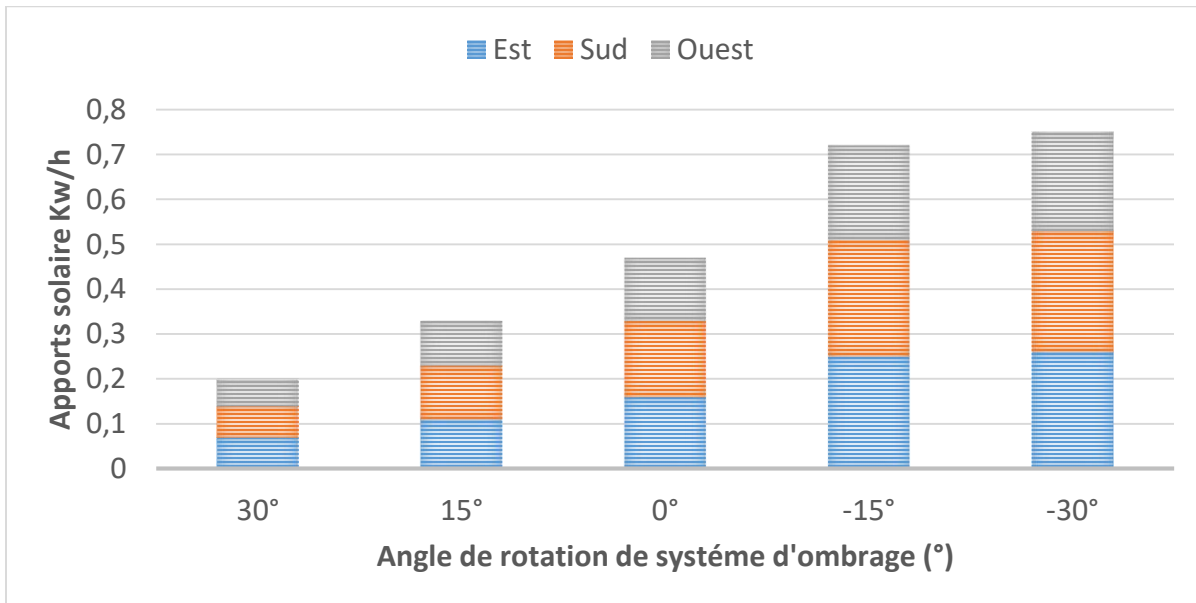


Figure VI. 9 : Variation des apports solaires selon l'orientation avec le système d'ombrage durant la journée type hivernale. Source : Auteur, 2025.

À l'inverse, durant la saison hivernale, et en comparaison avec un scénario de référence dans lequel le système de contrôle solaire reste partiellement fermé, l'activation des dispositifs cinétiques biomimétiques permet une augmentation des apports solaires. Avec un angle d'ouverture de (-15)°, les gains solaires augmentent de 5 % pour l'orientation sud, de 4 % pour l'est et également de 4 % pour l'ouest. Une configuration de (0°) amplifie davantage ces apports, avec des augmentations respectives de 10 % pour le sud, 9 % pour l'est et 8 % pour l'ouest. Enfin, une ouverture maximale de 15° engendre des hausses encore plus significatives : 16 % pour le sud, 18 % pour l'est et 15 % pour l'ouest. Ces

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

résultats mettent en évidence l'efficacité adaptative des systèmes de contrôle solaire biomimétiques, capables de limiter la surchauffe estivale tout en maximisant les apports solaires passifs en hiver. Ainsi, ils contribuent de manière significative à l'amélioration de la performance énergétique saisonnière des bâtiments. À la lumière de ces résultats, il est évident que l'orientation sud constitue la plus critique en matière d'apports solaires, en particulier en période estivale. Le quatrième scénario (ouverture à 75 %) avec un angle d'ouverture 15° se révèle être le plus optimal, en assurant la réduction la plus significative des gains solaires tout en maintenant un certain niveau d'éclairage naturel.

V.8 Evaluation de la consommation énergétique

L'analyse énergétique a été réalisée sur la base d'une simulation horaire (pas du temps de deux heures) pour chacun des quatre scénarios de peau de bâtiment modélisés, selon trois orientations : sud, est et ouest. La charge quotidienne calculée correspond à celle du séjour de référence et repose sur les journées types de conception préalablement sélectionnées. La pièce est supposée être climatisée entre 08h00 et 18h00. Les figures 12 à 17 présentent les résultats de la simulation de la consommation énergétique pour l'ensemble des scénarios étudiés.

V.8.1 le comportement énergétique du modèle de référence

Avant d'examiner l'effet des dispositifs d'ombrage bio-inspirés, il est nécessaire de caractériser le comportement énergétique du modèle de référence.

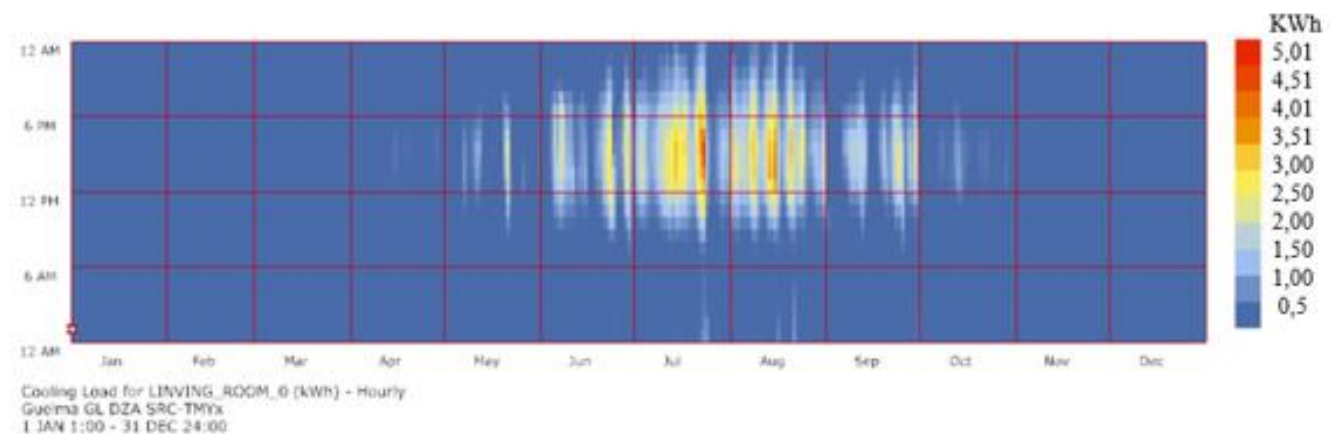


Figure VI. 10 : Consommation énergétique de refroidissement du modèle de référence, Source : Auteur (2024)
Celui-ci révèle une forte variabilité saisonnière, marquée par des périodes de consommation concentrées soit en été pour le refroidissement, soit en hiver pour le chauffage.
En période estivale, la demande de refroidissement s'étend de la fin mai au début septembre, avec un pic observé entre la fin juin et le début août. Aux heures les plus critiques, notamment entre 12 h et 18 h, la consommation atteint jusqu'à 5.01 kWh. À l'inverse, elle demeure quasi nulle de novembre à avril. La

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

majorité des valeurs se situent entre 1.5 et 2 kWh, indiquant un usage modéré à élever de la climatisation. (Figure 10).

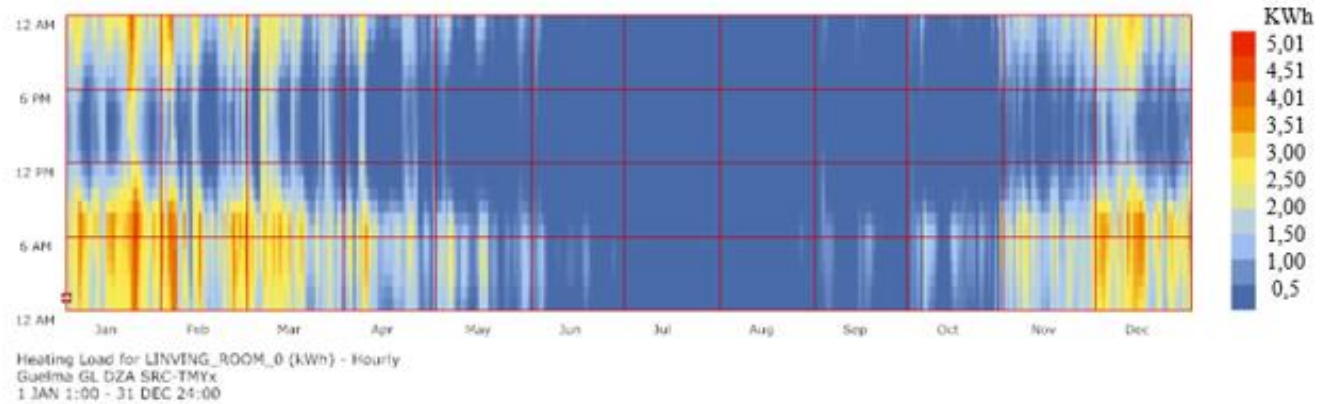


Figure VI. 11 : Consommation énergétique de chauffage du modèle de référence. Source : Auteur, 2024)

En période hivernale, la consommation de chauffage se concentre entre novembre et mai, avec des pics en janvier, février et décembre. Les charges maximales, atteignant jusqu'à 5.01 kWh, apparaissent généralement durant la nuit, lorsque les températures sont plus basses. Entre la fin mai et le début octobre, la demande reste négligeable.. (Figure 11).

V.8.2 Analyse de La consommation énergétique pour le refroidissement

Globalement, la consommation énergétique pour le refroidissement suit une tendance croissante entre 8h et le milieu de l'après-midi, avant de se stabiliser puis de décroître en fin de journée

Pour l'orientation est, une augmentation rapide de la demande en refroidissement est observée dès 8h du matin, atteignant un pic aux alentours de 17h. Cette élévation précoce des besoins en climatisation s'explique par l'exposition directe au rayonnement solaire matinal.

Le scénario de référence avec vitrage seul enregistre la consommation énergétique la plus élevée, dépassant 470 Wh en fin de journée. En revanche, les configurations intégrant des systèmes d'ombrage inclinés à 15° ou 30° permettent de limiter de manière significative les apports solaires directs entre 8h et 13h. La configuration à 15° permet notamment une réduction substantielle des charges de refroidissement, atteignant une baisse de 46,4 % par rapport à l'absence d'ombrage, ce qui souligne l'efficacité d'une stratégie d'ombrage actif dès les premières heures de la journée pour cette orientation.

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

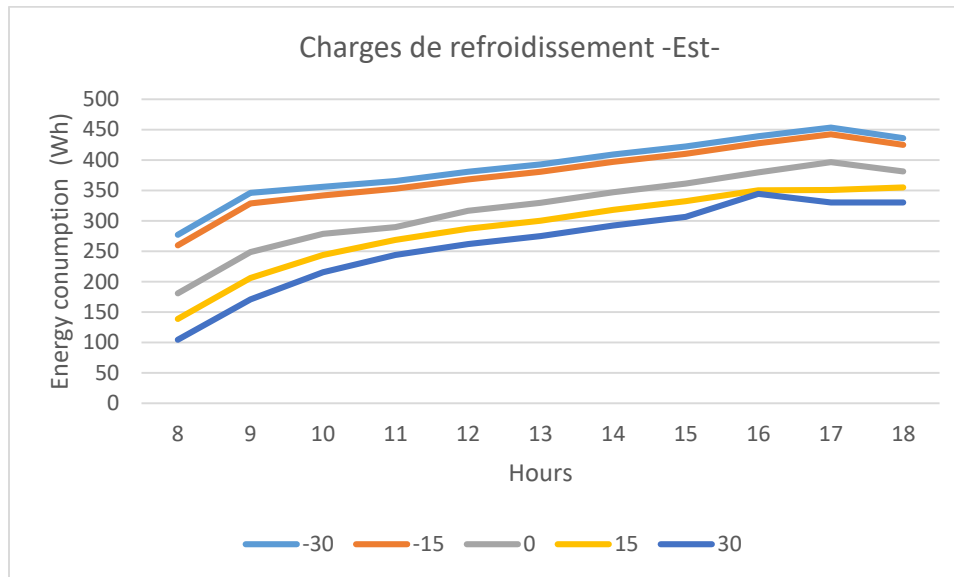


Figure VI. 12 : Évolution horaire de la consommation d'énergie de refroidissement selon l'orientation EST et les configurations des systèmes de contrôle solaire biomimétique. Source : Auteur, 2025

Concernant la façade orientée au sud, les charges de refroidissement évoluent de manière plus progressive, avec une augmentation continue entre 8h et 17h. Bien que la consommation énergétique y soit globalement plus faible que les autres orientations, l'effet de système d'ombrage dynamique devient perceptible à partir de la fin de la matinée. Le dispositif à 15° permet un gain maximal de 10,7 % dès 11h, moment où les apports solaires s'intensifient. Ainsi, bien que les écarts entre configurations soient moins marqués que pour l'orientation est,

Sur la façade ouest, les charges de refroidissement commencent à croître sensiblement autour de midi, avec un pic marqué entre 15h et 17h. L'efficacité des dispositifs d'ombrage devient particulièrement évidente après 13h, lorsque les apports solaires directs et intenses se manifestent. Le scénario avec ouverture à 15° entraîne une réduction significative des charges de refroidissement, pouvant atteindre 33 %.

En ajustant l'ouverture du système de contrôle solaire en fonction de l'orientation et de l'heure, ce système permet de limiter les apports solaires excessifs aux moments critiques tout en maintenant un bon niveau de confort intérieur. Leur efficacité est particulièrement notable pour les façades est et ouest, où les apports solaires sont les plus complexes à maîtriser. Une stratégie de contrôle adaptatif, reposant sur une ouverture partielle (notamment à 15°), apparaît ainsi comme un levier efficace pour optimiser la performance thermique estivale et réduire le recours au refroidissement actif

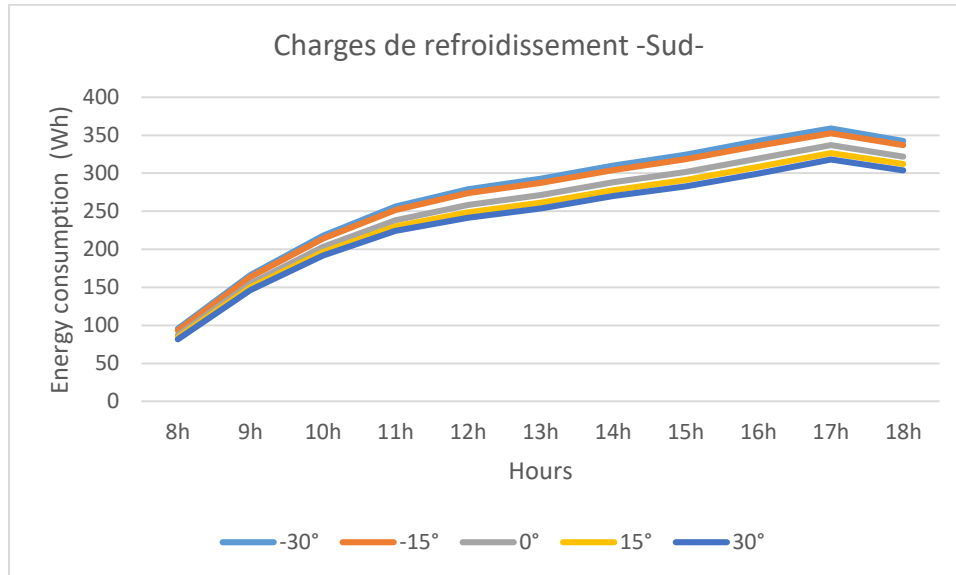


Figure 4 Évolution horaire de la consommation d'énergie de refroidissement selon l'orientation sud et les configurations des systèmes d'ombrage, .Source : Auteur, 2025.

V.8.3 La consommation énergétique de chauffage

L'évolution des charges de chauffage pour les trois orientations étudiées suit une courbe concave typique, marquée par une réduction significative entre 11h00 et 13h00. Cette baisse coïncide avec l'intensité maximale du rayonnement solaire, fournissant des apports thermiques passifs substantiels qui réduisent temporairement la dépendance aux systèmes de chauffage actifs. À l'inverse, en début de matinée et en fin d'après-midi, lorsque le rayonnement solaire est plus faible, une augmentation de la demande énergétique est observée, traduisant une vulnérabilité thermique accrue durant ces périodes.

Pour la façade orientée à l'est, un pic de la demande en chauffage est enregistré entre 8h00 et 10h00, période durant laquelle les gains solaires restent limités. Dans ce contexte, l'ouverture partielle de dispositif cinétique à -15° permet une réduction des charges de chauffage de **13 %** par rapport à une fermeture complète (30°), mettant en évidence l'efficacité des stratégies de modulation adaptative en début de journée.

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

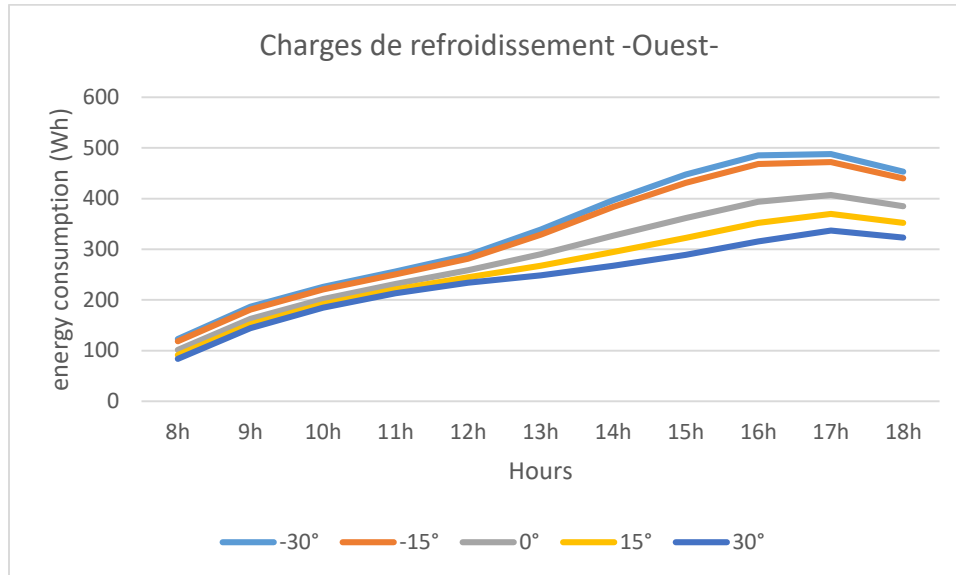


Figure VI. 13 : Évolution horaire de la consommation d'énergie de refroidissement selon les orientations et les configurations des systèmes d'ombrage. Source : Auteur ,2025

Concernant la façade sud, l'exposition directe prolongée au rayonnement solaire entre 9h00 et 13h00 se traduit par des besoins en chauffage nettement inférieurs à ceux des autres orientations. L'ouverture partielle des panneaux à **-15°** optimise la captation du rayonnement tout en limitant les pertes thermiques, rendant cette stratégie de gestion thermique particulièrement efficace. Entre 10h00 et 14h00, moment où les apports solaires sont maximaux, les charges de chauffage peuvent être réduites jusqu'à **31,9 %**, confirmant l'avantage énergétique critique de l'orientation sud en période hivernale.

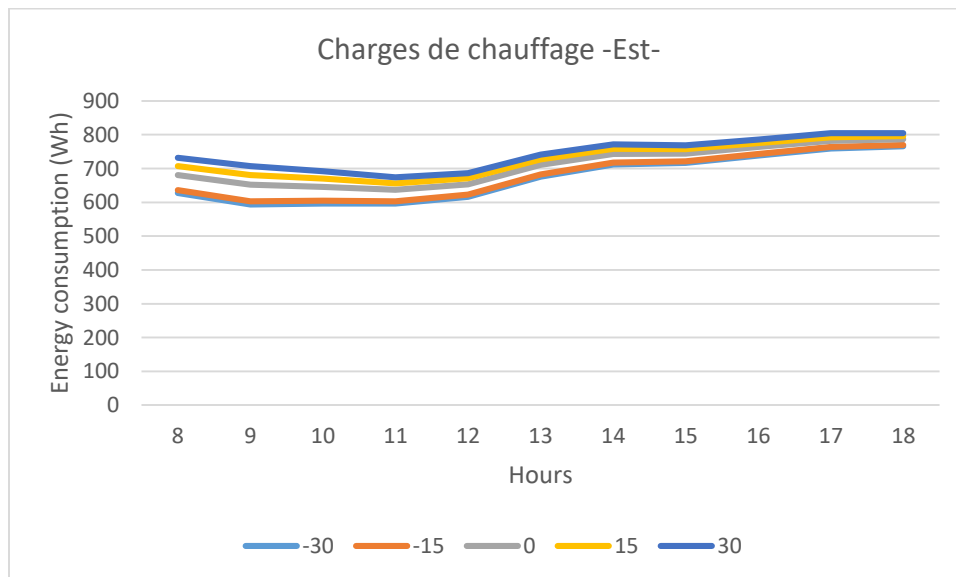


Figure VI. 14 : Évolution horaire de la consommation énergétique de chauffage selon les orientations et les configurations de système d'ombrage. Source : Auteur ,2025

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

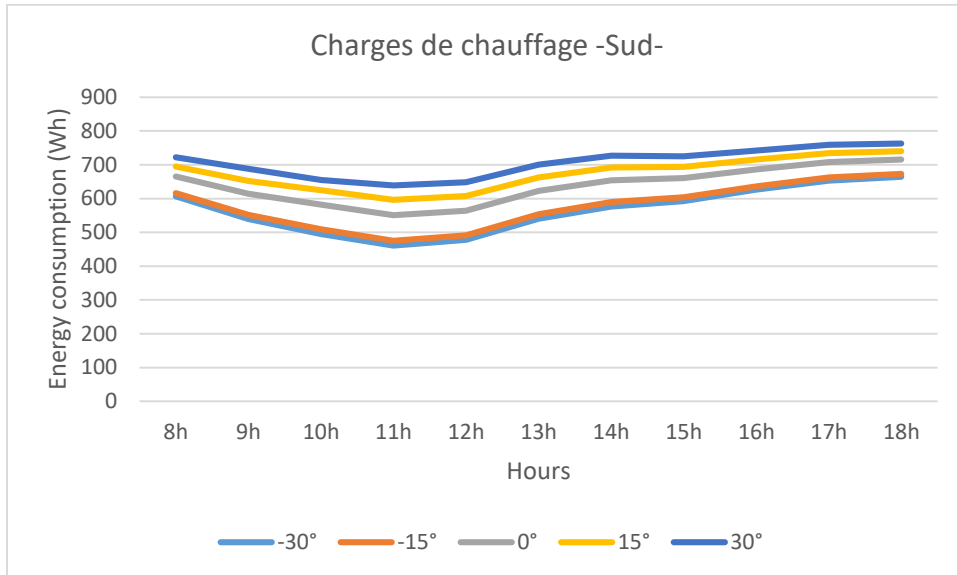


Figure VI. 15 : : Évolution horaire de la consommation énergétique de chauffage selon les orientations et les configurations des systèmes d’ombrage. Source : Auteur ,2025

Pour la façade ouest, bien que les besoins en chauffage diminuent légèrement entre 8h00 et 12h00, une hausse importante est observée en fin de journée, en raison du chemin solaire propre à cette orientation. Dans ce cas, l’ouverture partielle des dispositifs à -15° , notamment entre 11h00 et 14h00, permet une utilisation efficace des apports solaires tout en atténuant les pertes thermiques, conduisant à une réduction de 6,11 % des charges de chauffage

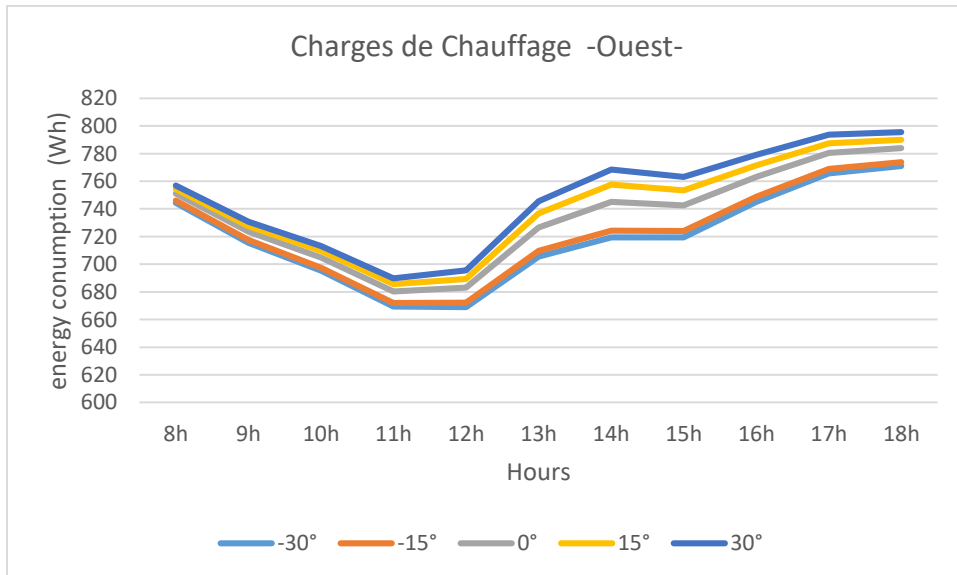


Figure VI. 16 : : Évolution horaire de la consommation énergétique de chauffage selon les orientations et les configurations des systèmes d’ombrage. Source : Auteur ,2025

V.9 La simulation thermique

La performance thermique a été évaluée selon deux critères : la température opérative intérieure et le modèle de confort adaptatif. Cette double approche permet de caractériser l'effet du système de contrôle solaire biomimétique sur l'évolution des conditions thermiques, notamment à travers la variation de la température opérative et la quantification des heures d'inconfort. Les résultats ont été ensuite comparés aux scénarios de référence propres à chaque saison, afin de mesurer l'apport réel du dispositif en matière de confort thermique.

L'analyse a porté sur trois orientations distinctes (est, sud et ouest), chacune examinée selon cinq configurations du système, allant de l'absence totale d'ombrage (angle -30°) à une fermeture complète ($+30^\circ$). En période estivale, la situation de référence correspond au cas sans ombrage, tandis qu'en période hivernale, la configuration fermée ($+30^\circ$) est considérée comme base comparative.

V.9.1 La température opérative

V.9.1.1 La température opérative avant l'intégration du système de contrôle solaire

L'analyse de la température opérative dans la pièce de référence (encadrée en noir sur les figures ci-dessous) met en évidence des conditions de confort thermique défavorables aussi bien en période hivernale qu'estivale.

En été (21 juillet), l'analyse de la pièce de référence met en évidence une surchauffe marquée et persistante (Figure 80). Dès 8h, la température opérative dépasse déjà $32,5^\circ\text{C}$, soit au-dessus de la limite supérieure de confort thermique. À midi, la pièce atteint son pic avec des valeurs comprises entre $34,0^\circ\text{C}$ et $34,5^\circ\text{C}$, soit plus de 6°C au-dessus des seuils recommandés. L'après-midi (14h–16h), les températures se maintiennent entre $34,5^\circ\text{C}$ et $35,0^\circ\text{C}$, traduisant une surchauffe sévère et continue. Même en fin de journée (18h), elles ne redescendent pas en dessous de $33,0^\circ\text{C}$, ce qui révèle une forte inertie thermique et un faible potentiel de rafraîchissement passif.

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

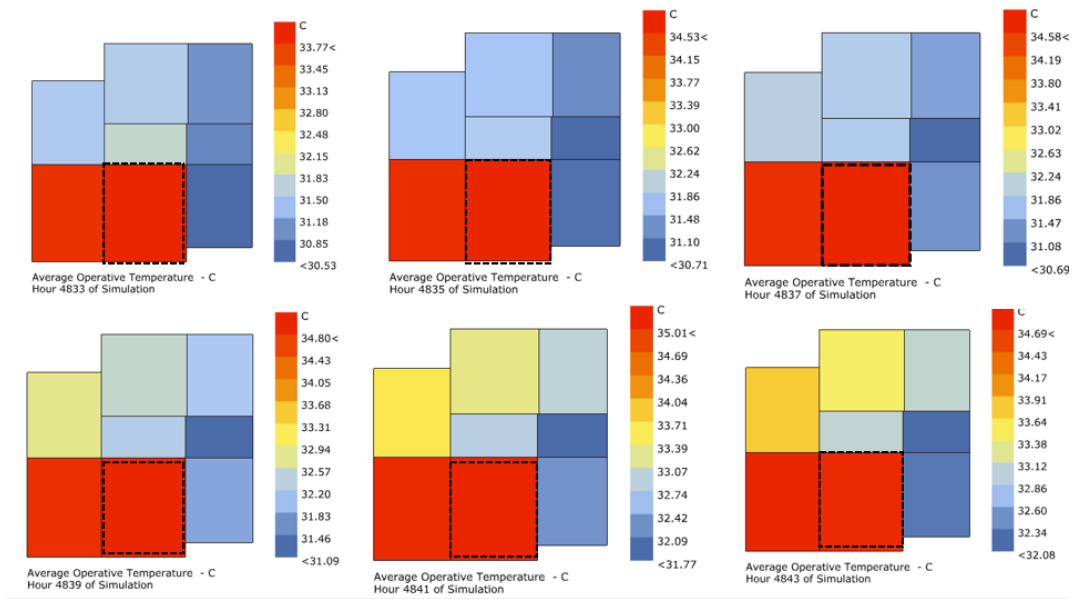


Figure VI. 17 : la température opérative estivale simulée dans la pièces avant l'intégration du système d'ombrage .source, Auteur (2025)

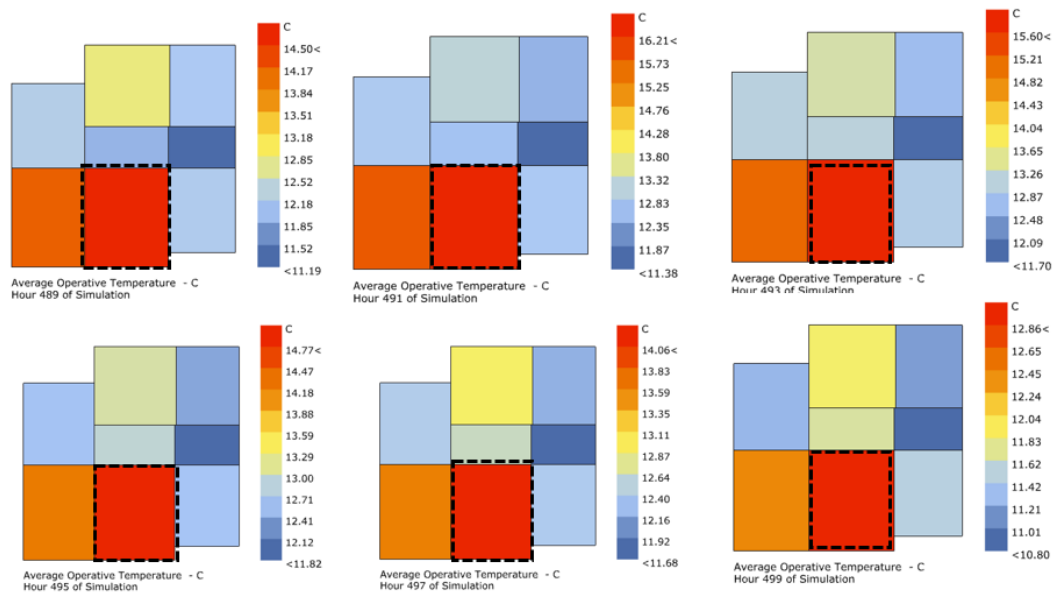


Figure VI. 18 : la température opérative hivernale simiulée dans la pièce test l'intégration du système de contrôle solaire. Source , Auteur (2025)

En hiver (21 janvier), la tendance inverse est observée avec un déficit thermique prononcé (. Dès 8h, la température opérative se situe autour de **12,0 °C à 13,5 °C**, traduisant un inconfort marqué. À midi, malgré un apport solaire modéré, elle n'atteint que **15,5 °C**, soit un gain limité de 2 à 3 °C par rapport au matin. L'après-midi (14h–16h), elle se stabilise autour de **13,5 °C – 14,0 °C** avant de redescendre en

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

soirée vers 12 °C. Ainsi, la pièce demeure en **inconfort permanent**, avec des valeurs comprises entre 12 °C et 15,5 °C, confirmant une dépendance importante à un chauffage d'appoint.

Ces résultats mettent en évidence la forte vulnérabilité de la pièce étudiée : **en été, une surchauffe quasi permanente accentue l'inconfort thermique**, tandis qu'**en hiver, un déficit thermique empêche d'atteindre des conditions acceptables de confort**. La pièce de référence constitue donc un point critique du bâtiment, ce qui justifie pleinement l'intégration d'un système de contrôle solaire biomimétique adaptatif.

V.9.1.2 La température opérative après l'intégration du système de contrôle solaire

Dans cette section, l'analyse portera sur l'évolution de la température opérative après l'intégration du dispositif, afin d'évaluer sa capacité à atténuer la surchauffe estivale et à améliorer les conditions thermiques hivernales

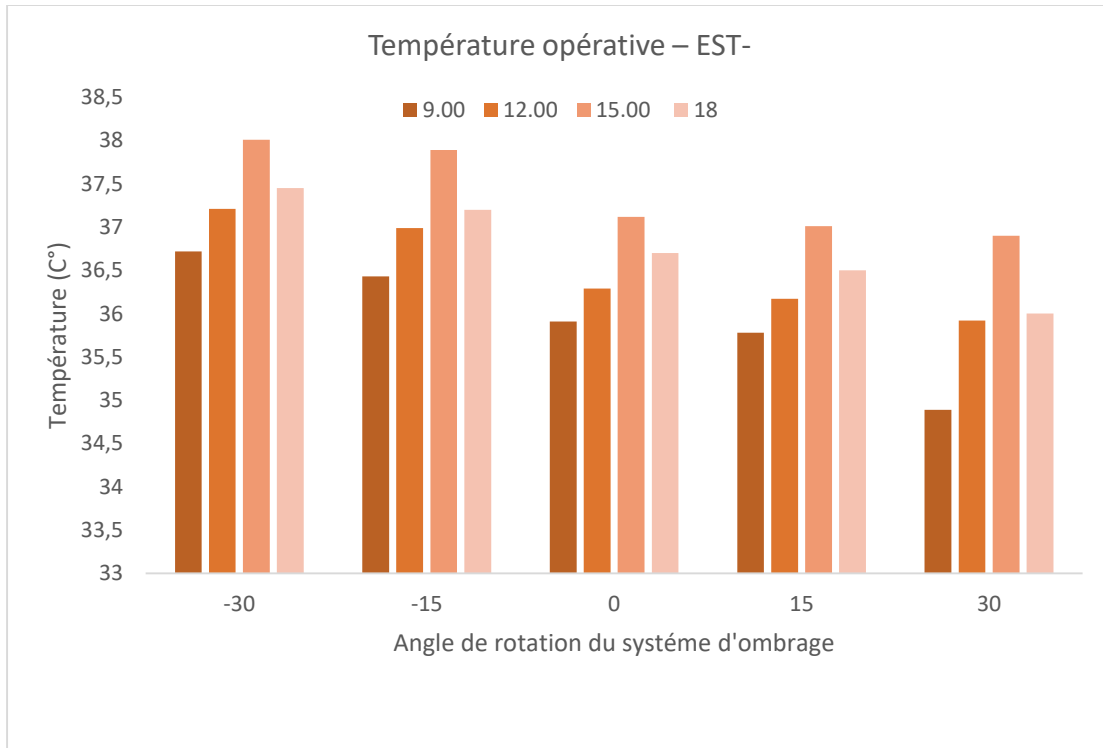


Figure VI. 19 : Impact de la configuration du système d'ombrage adaptatif sur la température opérative estivale pour l'orientation Est, Source : Auteur, 2025

L'analyse des températures opératives estivales dans la pièce orientée Est met en évidence la configuration -30° comme scénario de référence, caractérisé par les valeurs les plus élevées, atteignant 32,4 °C à 17h, traduisant ainsi une forte situation d'inconfort thermique. L'inclinaison à -15° permet une amélioration modeste, avec une baisse moyenne de 0,5 à 0,8 °C et une réduction maximale de 0,8 °C à

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

17h. la configuration (0°) montre une amélioration plus notable, avec des températures inférieures de 0,9 à 1,2 °C par rapport à -30°, atteignant 31,3 °C à 17h. Les meilleures performances sont toutefois obtenues avec l'inclinaison +15°, qui réduit les températures de 1,8 à 2,2 °C tout au long de la journée, atteignant 30,2 °C à 17h, soit une baisse de 2,2 °C ($\approx 6,8\%$). Enfin, la configuration +30° assure une amélioration intermédiaire, avec des températures réduites de 1,3 à 1,6 °C et une valeur de 30,8 °C à 17h.

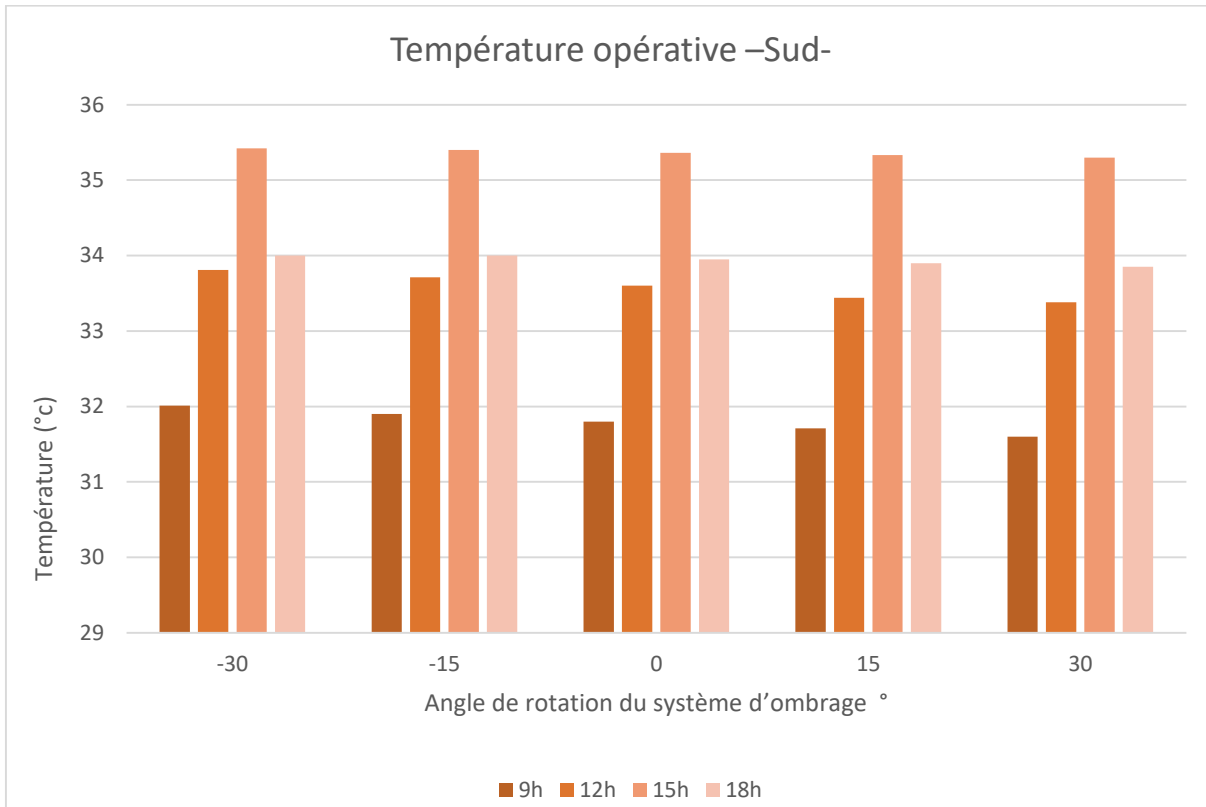


Figure VI. 20 : Impact de la configuration du système d'ombrage adaptatif sur la température opérative estivale pour l'orientation Sud, Source : Auteur, 2025

Les températures opératives montrent pour l'orientation sud une progression régulière au cours de la journée avec un pic à 15h (référence -30° : 35,42 °C). Les différences entre configurations sont faibles mais systématiques. À 9h, l'ouverture progressive réduit la température de 0,11 °C à 0,41 °C selon l'angle, le gain maximal en matinée étant observé pour +30° ($\approx 0,41$ °C). À 12h, les écarts restent modestes ($\approx 0,10$ – $0,43$ °C) ; la configuration +15° abaisse la température de 0,37 °C par rapport à la référence (33,81 → 33,44 °C). À 15h, moment du pic, les réductions sont très limitées (0,02–0,12 °C), +15° conduisant à une baisse de 0,09 °C seulement (35,42 → 35,33 °C). Les estimations à 18h montrent une descente générale des températures (-1,4 à -1,5 °C par rapport à 15h) avec des valeurs proches entre configurations, témoignant d'une dissipation thermique indépendante de l'angle d'ombrage en fin de journée.

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

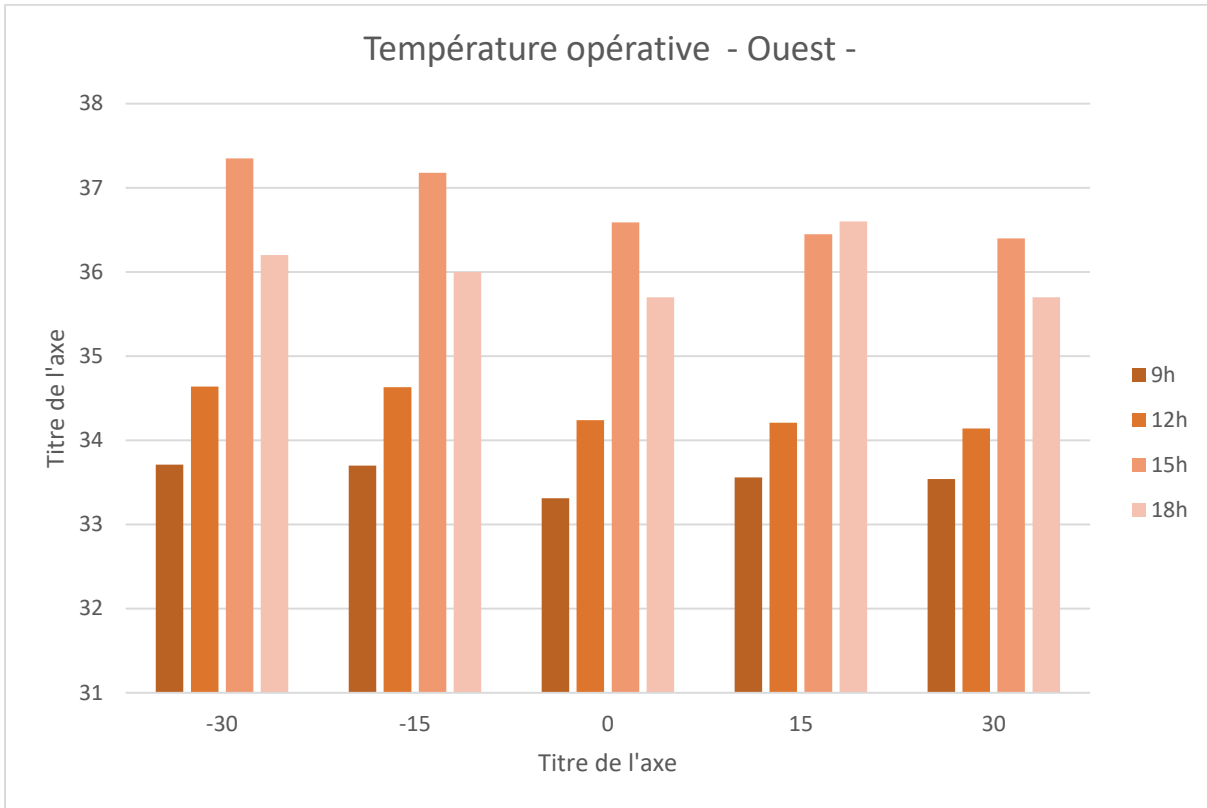


Figure VI. 21 : Impact de la coniguration du système d'ombrage adaptatif sur la température opérative estivale pour l'orientation ouest , Source : Auteur, 202

Enfin, dans une pièce orientée à l'ouest, l'évolution de la température opérative confirme une surchauffe importante en après-midi. Dès 12h, l'écart entre la configuration de référence (-30° : $34,64^\circ\text{C}$) et les dispositifs inclinés reste modéré ($\approx 0,4-0,5^\circ\text{C}$ de réduction). C'est surtout à 15h, moment critique, que l'apport solaire direct amplifie les écarts : la référence atteint $37,35^\circ\text{C}$, tandis que la configuration $+15^\circ$ descend à $36,45^\circ\text{C}$, soit une amélioration de $0,90^\circ\text{C}$ (réduction d'environ 2,4 %). La configuration $+30^\circ$ se révèle la plus performante avec un abaissement de $0,95^\circ\text{C}$ ($\approx 2,5\%$). En fin de journée (18h), les écarts se maintiennent à $0,6-0,7^\circ\text{C}$, ce qui traduit l'efficacité persistante du contrôle solaire sur la dissipation thermique.

En synthèse, l'analyse thermique estivale met en évidence des comportements différenciés selon l'orientation. La façade est enregistré les écarts les plus marqués le matin, avec un apport solaire direct qui intensifie rapidement la surchauffe, alors que l'ombrage à $+15^\circ$ permet une réduction notable de la température opérative. La façade sud présente des écarts plus modérés et progressifs, l'effet du système devenant surtout perceptible à la mi-journée. Enfin, la façade ouest concentre les apports solaires les plus critiques en après-midi, avec un pic thermique prononcé ; l'ombrage cinétique, en particulier à $+15^\circ$, y montre une efficacité remarquable en limitant la surchauffe pendant la période la plus sensible. Ainsi,

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

l'efficacité du dispositif varie selon l'orientation, chaque façade présentant une fenêtre horaire critique où le contrôle solaire optimise le confort thermique.

Durant la période hivernale, l'ouverture du dispositif conduit à une élévation progressive et significative de la température opérative, pour l'orientation Est surtout en matinée. À 9h, l'augmentation par rapport à +30° est la plus importante : +1,24 °C pour +15°, +1,28 °C pour 0°, +1,84 °C pour -15° et +2,04 °C pour -30°. À 12h, les gains sont plus modérés mais notables : +0,11 °C (+15°), +0,37 °C (0°), +0,79 °C (-15°) et +0,90 °C (-30°). À 15h, l'impact reste présent mais réduit (respectivement +0,15 °C, +0,36 °C, +0,71 °C et +0,79 °C), et à 18h les différences persistent à des niveaux comparables (\approx +0,20 à +0,80 °C selon la configuration). Ces résultats montrent que l'ouverture du système favorise significativement les apports solaires passifs en matinée (plage horaire critique pour réduire la demande de chauffage), tandis que l'effet reste utile mais moins marqué autour de midi et en après-midi.

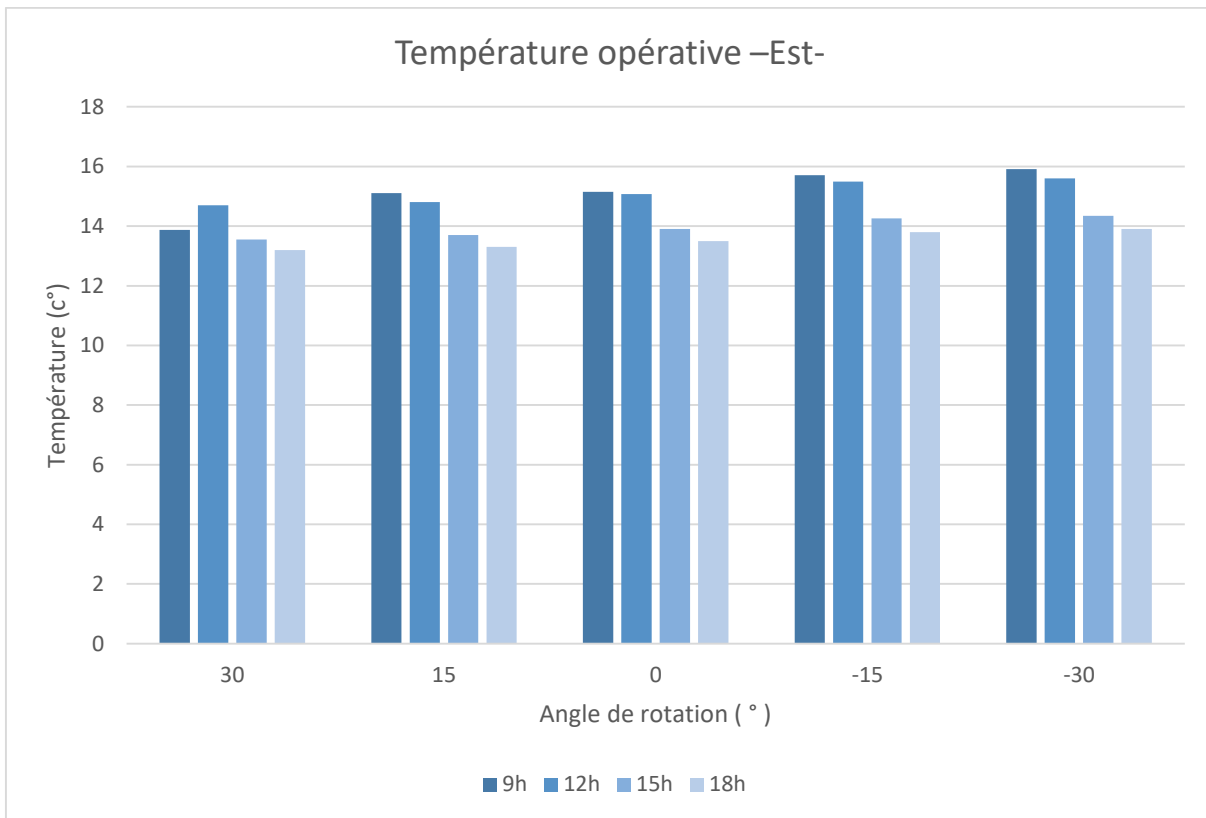


Figure VI. 22 : Impact de la configuration du système de contrôle solaire sur la température opérative hivernale pour l'orientation Est, Source : Auteur, 2025

L'analyse des températures opératives montre une progression significative par rapport au cas de référence (+30°), en particulier pour les ouvertures négatives. À 12h, l'angle de -30° enregistre un gain thermique de +1,35 °C, confirmant la capacité de cette configuration à capter efficacement les apports

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

solaires. Toutefois, c'est l'ouverture à -15° qui apparaît la plus équilibrée : elle permet d'atteindre une amélioration thermique notable ($+1,05^\circ\text{C}$ à 12h) tout en limitant les risques de surchauffe. Ces résultats confirment que l'orientation sud, combinée à une ouverture partielle des panneaux, constitue une stratégie particulièrement efficace pour exploiter les apports solaires hivernaux et optimiser le confort thermique intérieur en limitant le recours à un chauffage actif.

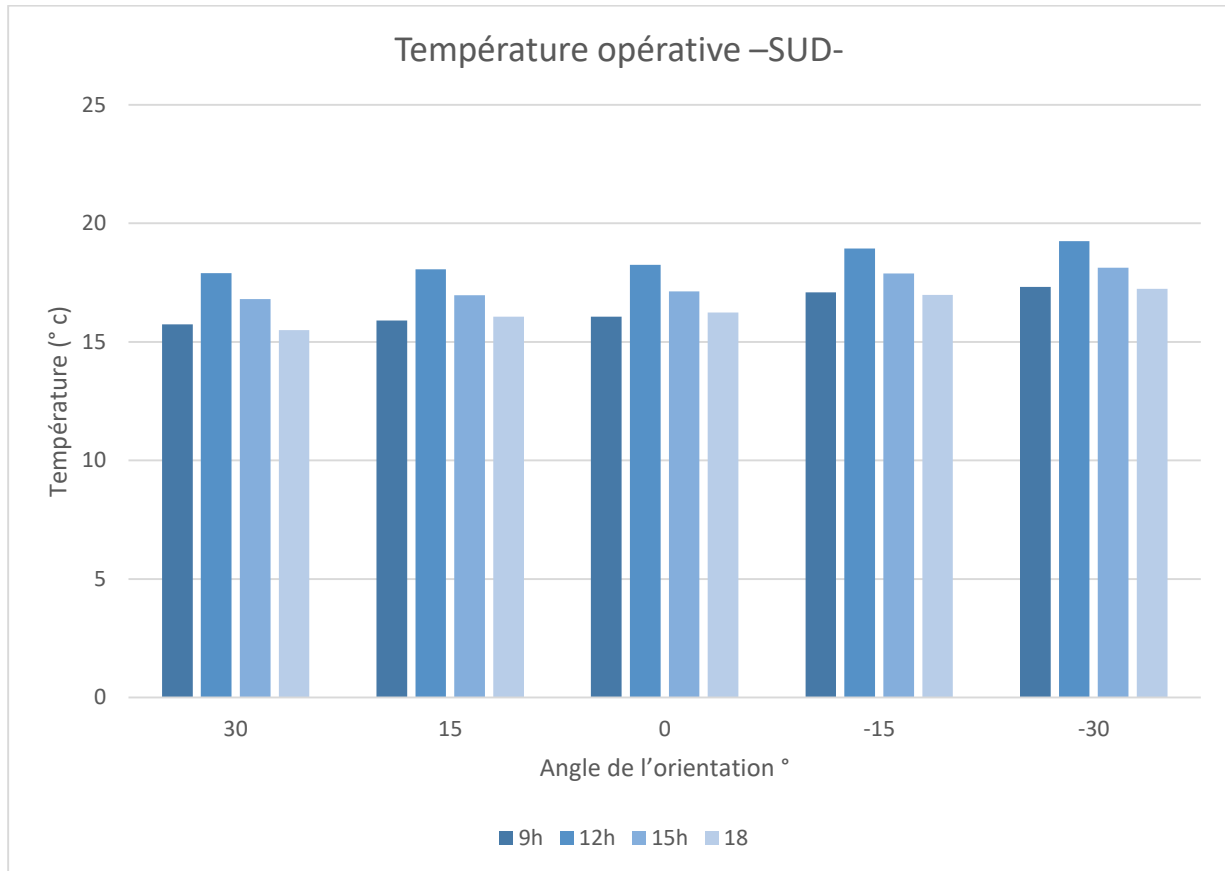


Figure VI. 23 : Impact de la configuration du système de contrôle solaire sur la température opérative hivernale pour l'orientation Sud, Source : Auteur, 2025

Pour la façade ouest, l'évolution des températures opératives reflète clairement l'influence du parcours solaire. Alors que les écarts par rapport à la configuration de référence ($+30^\circ$) restent modérés en matinée, de l'ordre de $+0,27$ à $+0,31^\circ\text{C}$ à 9h et $+0,24$ à $+0,47^\circ\text{C}$ à 12h, une élévation plus marquée est observée à partir de 15h, atteignant $+0,40^\circ\text{C}$ pour $+15^\circ$ et jusqu'à $+0,76^\circ\text{C}$ pour -30° , avant de se maintenir en fin de journée avec des écarts de $+0,30$ à $+0,60^\circ\text{C}$ à 18h. L'ouverture partielle des panneaux à -15° se révèle la plus performante : elle favorise une meilleure captation des apports solaires entre 11h et 14h, avec un gain thermique sensible d'environ $+0,47^\circ\text{C}$ à midi et $+0,68^\circ\text{C}$ à 15h, tout en limitant les pertes thermiques.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence l'efficacité de la configuration semi-ouverte (-15°) en période hivernale. En permettant une augmentation mesurée mais constante des températures

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

opératives, ce dispositif favorise les apports solaires passifs et réduit la dépendance aux systèmes de chauffage, constituant ainsi une stratégie pertinente pour améliorer la performance énergétique et le confort thermique des espaces intérieurs.

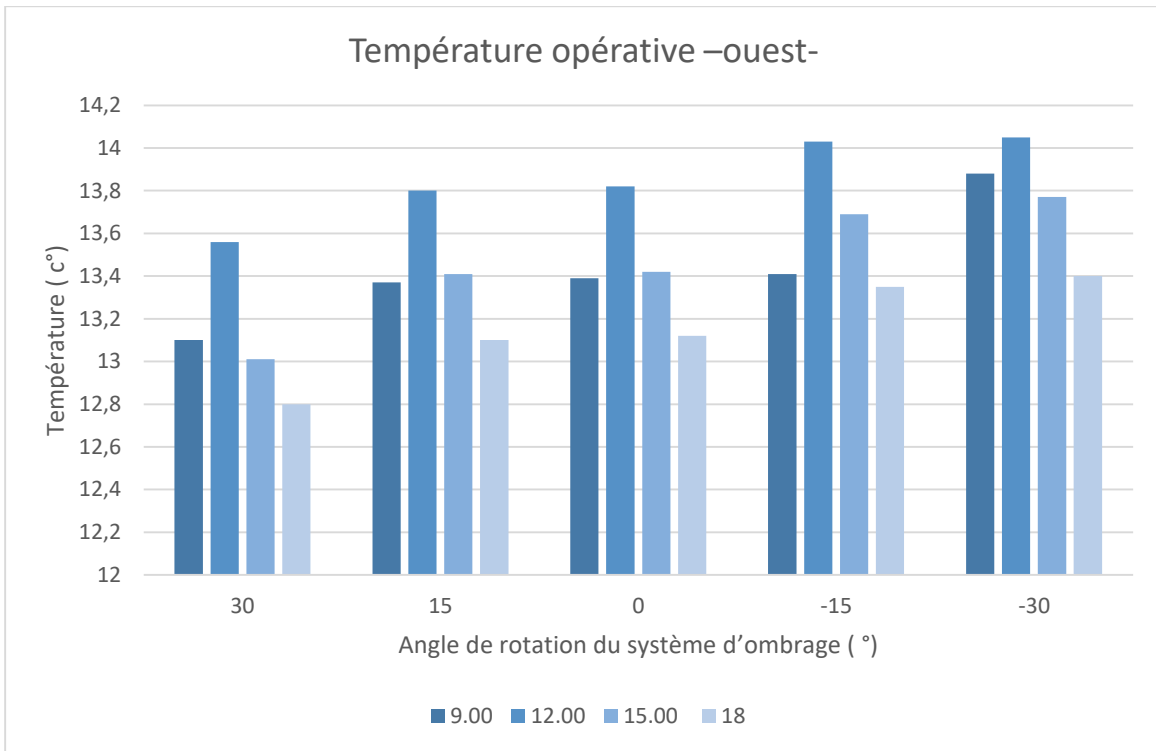


Figure VI. 24 : Impact de la configuration du système de contrôle solaire sur la température opérative hivernale pour l'orientation ouest , Source : Auteur, 2025

V.9.2 Le confort adaptatif

Le diagramme de confort adaptatif illustre les limites de la plage de confort correspondant à un seuil d'acceptabilité de 80 %, tel que défini par la norme ASHRAE 55. Cette méthode établit une corrélation entre la température opérative intérieure et la température extérieure dominante, expliquant que les occupants tolèrent des températures plus élevées lorsque la température extérieure augmente (Abdullah & Alibaba, 2018)

Le graphique est obtenu en représentant les températures horaires en fonction des températures extérieures et met en évidence la zone de confort définie par le modèle adaptatif EN 15251 Classe II, Les valeurs horaires situées à l'intérieur de cette zone sont considérées comme confortables, tandis que celles en dehors sont jugées inconfortables. Ce diagramme permet ainsi de calculer le nombre d'heures de confort annuel dans des zones spécifiques de l'unité analysée et d'identifier les combinaisons de températures intérieure/extérieure responsables de l'inconfort (Amoruso et al., 2019)

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

V.9.2.1 Avant l'intégration d'un système de solaire biomimétique

Cette section propose une évaluation du confort thermique estival en lien avec l'orientation de l'espace étudié. Elle a pour objectif de déterminer comment l'exposition au rayonnement solaire influence les conditions intérieures, en mettant en lumière les écarts d'inconfort observés selon les trois orientations. L'analyse du diagramme de confort adaptatif estivale (du 21 mai jusqu'à 21 octobre) montre que, pour l'ensemble des orientations, la majorité des heures simulées se situent en dehors de la plage de confort définie par la norme ASHRAE 55, correspondant à des températures extérieures comprises entre 18 °C et 28 °C, et à des températures opératives intérieures variant entre 18 °C et 24 °C. Cette situation met en évidence une forte prévalence d'inconfort thermique par surchauffe, notamment lorsque la température extérieure dépasse 28 °C, entraînant des températures opératives pouvant atteindre jusqu'à 38 °C, bien au-delà des seuils recommandés.

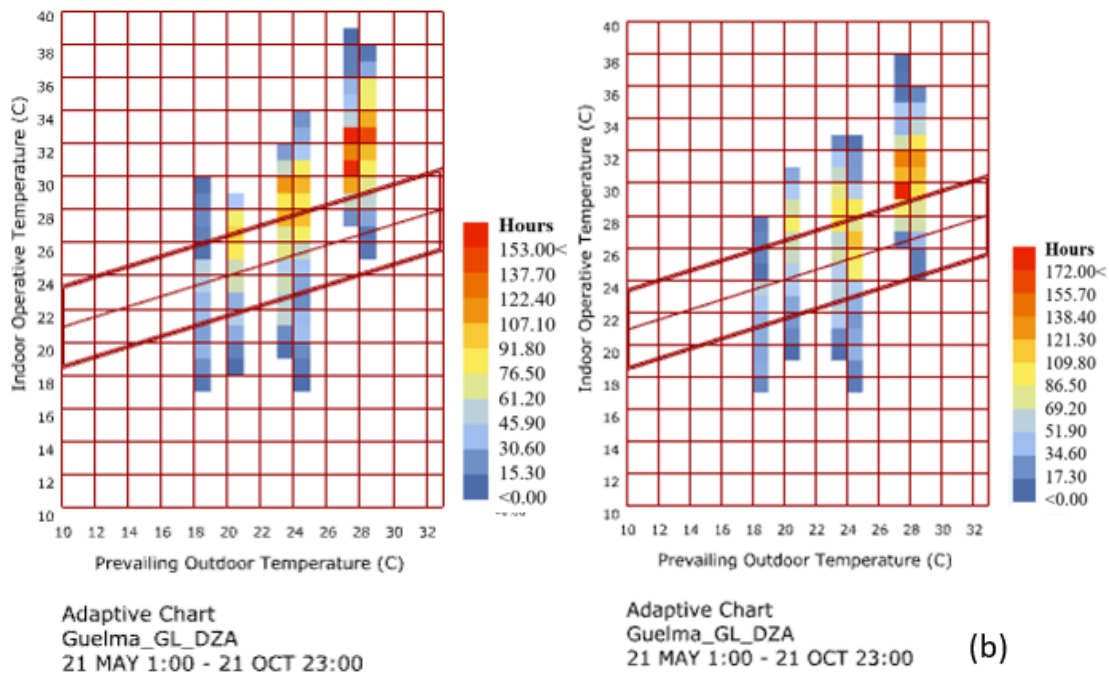


Figure VI. 25 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée à l'est (b) et au sud (a) avant l'intégration du système d'ombrage adaptatif : la période estivale. Source : Auteur (2025)

L'analyse selon les orientations révèle une progression logique de l'exposition solaire et de ses effets thermiques tout au long de la journée. Pour l'orientation Est, on observe plus de 173 heures d'inconfort, principalement liées à un ensoleillement direct en matinée. Cette exposition précoce contribue à une

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

élévation rapide des températures intérieures dès les premières heures du jour. Du côté sud, l'inconfort thermique est encore plus marqué, atteignant plus de 175 heures, en raison d'une exposition solaire prolongée tout au long de la journée, qui accentue l'accumulation de chaleur dans les espaces intérieurs.

Enfin, l'orientation Ouest enregistre plus de 162 heures d'inconfort, concentrées en fin d'après-midi, période durant laquelle l'intensité du rayonnement solaire atteint son pic, aggravant le phénomène de surchauffe en fin de cycle diurne. Ces résultats confirment un risque significatif de surchauffe estivale, notamment dans les pièces exposées à un fort rayonnement solaire direct, ce qui souligne la nécessité d'intégrer une protection solaire adaptées à chaque orientation.

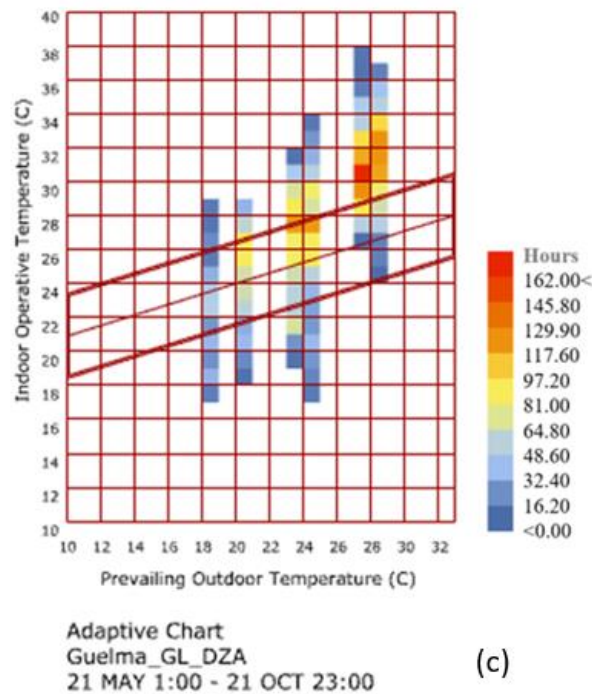


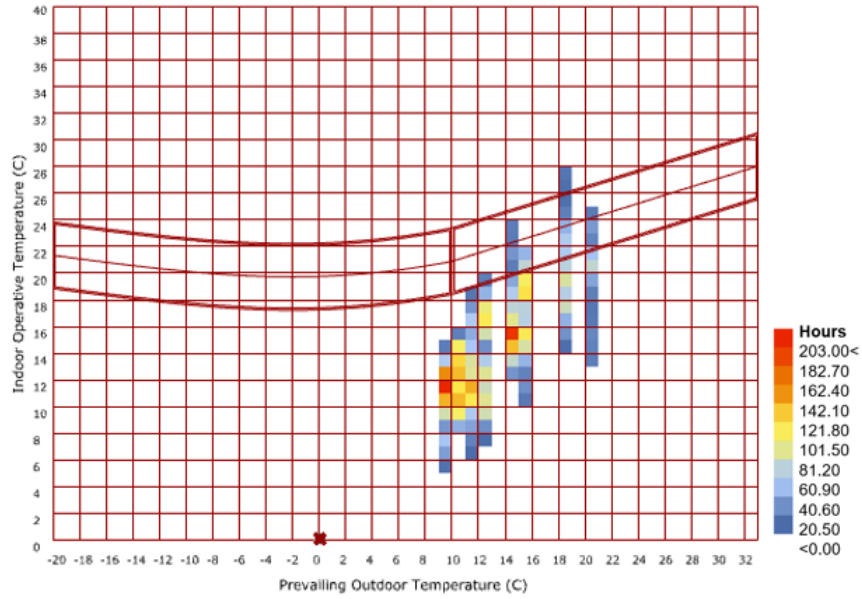
Figure VI. 26 : Confort adaptatif estival (orientation ouest) sans système d'ombrage. Source : Auteur, 2025

L'analyse du diagramme de confort adaptatif hivernal (du 21 octobre jusqu'à 21 mai) met en évidence une situation inverse à celle observée en période estivale. Contrairement à la surchauffe, ici l'inconfort thermique est majoritairement dû à des températures intérieures basses, situées sous la plage de confort définie par la norme ASHRAE 55, notamment lorsque les températures extérieures sont inférieures à 18 °C. .

Dans le cas analysé, la pièce orientée à l'Est, avec vitrage unique, enregistre jusqu'à 203 heures d'inconfort, ce qui reflète une perte thermique importante liée à un ensoleillement matinal limité et insuffisant pour compenser les pertes nocturnes. Les températures opératives intérieures simulées restent

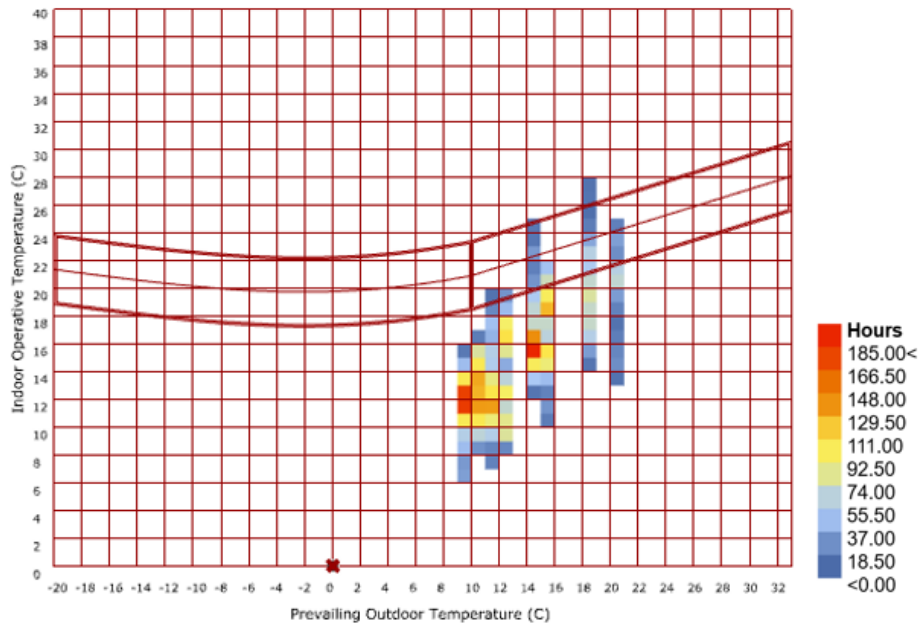
CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

majoritairement en dessous de la limite inférieure de confort, indiquant un besoin accru de chauffage ou d'amélioration de l'isolation



Adaptive Chart
Guelma_GL_DZA
21 OCT 1:00 - 21 MAY 23:00

Figure VI. 27 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée à l'est avant l'intégration du système d'ombrage adaptatif, source : Auteur,2025



Adaptive Chart
Guelma_GL_DZA
21 OCT 1:00 - 21 MAY 23:00

Figure VI. 28 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée au sud – situation initiale avant l'intégration du système d'ombrage adaptatif, source : Auteur

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Comparativement, l'orientation Sud présente 185 heures d'inconfort, ce qui peut être attribué à un meilleur apport solaire en journée, permettant un réchauffement plus efficace des espaces intérieurs. L'orientation Ouest, quant à elle, totalise 196 heures d'inconfort, ce qui reflète un apport solaire tardif, souvent insuffisant pour compenser le froid matinal, entraînant des températures intérieures restant en dehors de la zone de confort une bonne partie de la journée.

En conclusion, ces résultats soulignent la vulnérabilité des espaces mal orientés ou insuffisamment isolés face aux inconforts thermiques en période hivernale. Ils mettent en évidence la nécessité d'intégrer des stratégies passives adaptées tels que l'intégration d'un système d'ombrage adaptatif.

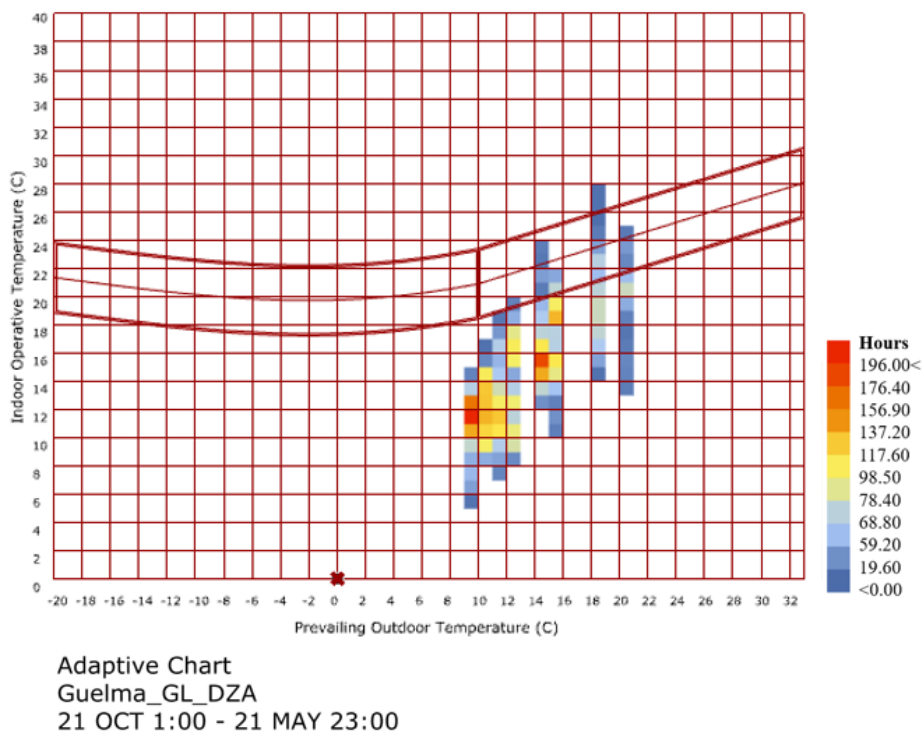


Figure VI. 29 : Diagramme de confort adaptatif de la pièce orientée à l'ouest avant l'application du système d'ombrage adaptatif, Source : Auteur, 2025

V.9.2.2 Après l'intégration du système d'ombrage

L'analyse de la façade est durant la période estivale met en évidence l'intérêt d'un réglage intermédiaire du système d'ombrage. En l'absence de tout dispositif, la pièce enregistre 175 heures d'inconfort thermique. Une fermeture légère à -15° permet une amélioration marginale de 1 % (3 heures), insuffisante pour compenser l'exposition directe aux rayonnements matinaux. À l'angle 0° , une baisse plus significative de 11,56 % (20 heures) est observée. La configuration la plus efficace est atteinte à $+15^\circ$,

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

avec une réduction de 12,71 % (22 heures), probablement grâce à une occultation bien ciblée du rayonnement en début de journée, tout en conservant un bon niveau d'éclairement naturel

En revanche, une fermeture plus importante à +30° entraîne une réduction légèrement inférieure (10,98 %, soit 19 heures), suggérant qu'un ombrage trop dense pourrait restreindre la ventilation ou provoquer une accumulation de chaleur. Ces résultats soulignent qu'en été, pour une orientation est, une occultation modérée, adaptée à la trajectoire solaire matinale, constitue une solution optimale pour améliorer le confort thermique sans compromettre la qualité lumineuse intérieure.

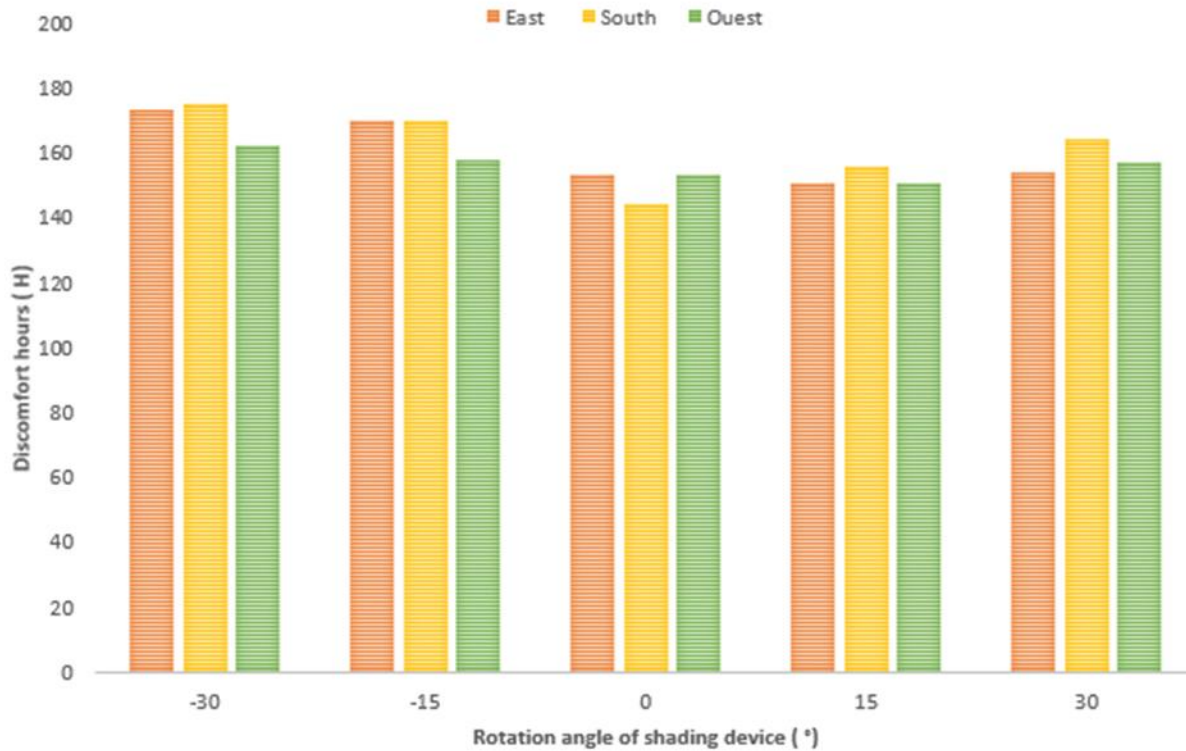


Figure VI. 30 : Impact du système ABBS sur les heures d'inconfort thermique durant la période estivale. Source :Auteur , 2025

Du côté sud, les résultats confirment également la pertinence d'un réglage intermédiaire. Sans système d'ombrage, la pièce totalise 175 heures d'inconfort. Une configuration à -15° ne permet qu'une réduction limitée de 2,85 % (5 heures), peu efficace face à l'ensoleillement. La meilleure performance est atteinte à 0°, avec une diminution de 17,71 % (31 heures), attribuable à une occultation efficace du rayonnement solaire direct à midi tout en préservant la lumière naturelle. Les configurations plus fermées, à +15° et +30°, entraînent des réductions moindres de 10,85 % (19 heures) et 6,78 % (12 heures) respectivement, ce qui suggère qu'une fermeture excessive peut altérer la ventilation naturelle ou favoriser une stagnation thermique. Ainsi, pour cette orientation, une occultation partielle bien calibrée à la hauteur solaire

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

apparaît comme le meilleur compromis entre réduction des apports solaires et maintien du confort visuel et thermique..

La façade ouest présente un comportement plus contrasté face aux différentes configurations testées. En l'absence d'ombrage, l'inconfort atteint 162 heures. Une fermeture à -15° permet une réduction modeste de 2,47 % (4 heures), essentiellement en début d'après-midi. De façon inattendue, l'angle 0° aggrave la situation, avec une augmentation de 6,79 % (+11 heures), traduisant une mauvaise réponse du système aux apports tardifs typiques de cette orientation. À l'inverse, un réglage à $+15^\circ$ s'avère le plus performant, avec une réduction équivalente de 6,79 % (11 heures), tandis que la fermeture à $+30^\circ$ ne permet qu'une amélioration limitée de 3,09 % (5 heures). Ces résultats montrent qu'un ombrage trop dense peut entraver la dissipation thermique en fin de journée. Pour la façade ouest, une fermeture modérée permet donc de mieux gérer les apports solaires sans compromettre les mécanismes de rafraîchissement naturel.

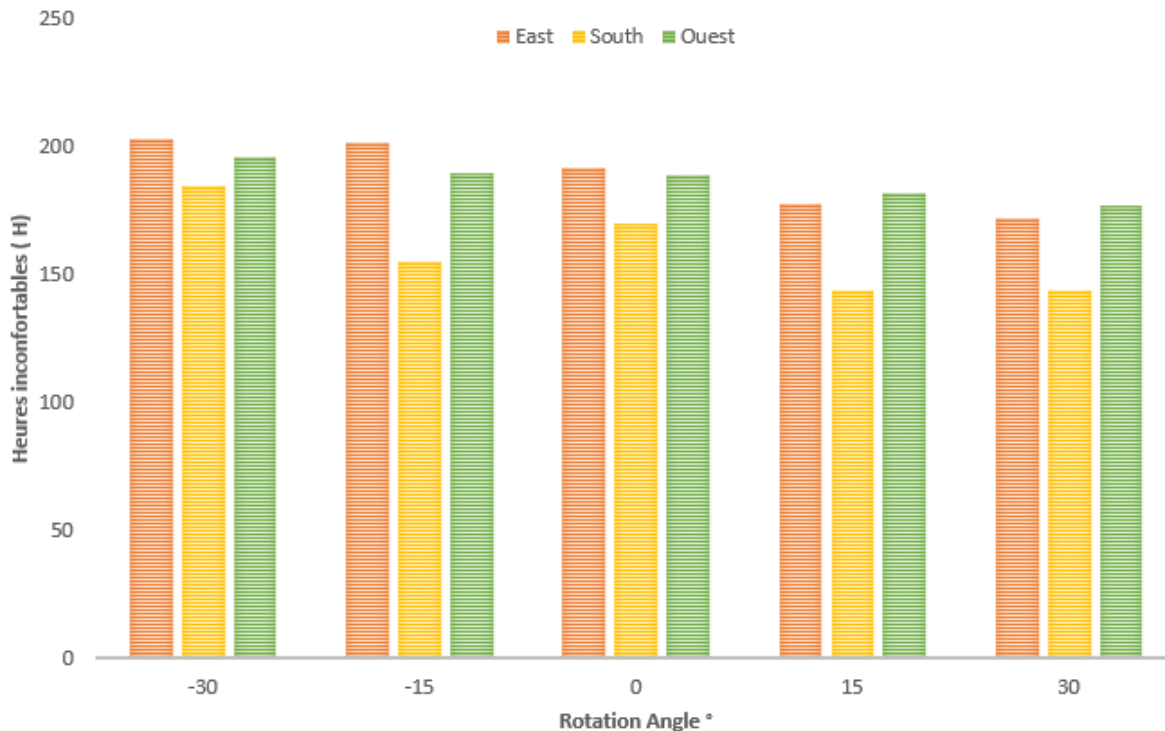


Figure VI. 31 : : Impact de l'angle de rotation du système d'ombrage adaptatif sur les heures d'inconfort thermique selon l'orientation, Source : Auteur, 2025

Toutefois, cette logique se modifie en hiver, où les besoins thermiques diffèrent et où l'enjeu principal réside davantage dans la maximisation des gains solaires passifs. C'est dans ce contexte qu'il convient d'examiner le comportement du système d'ombrage adaptatif durant la période hivernale, afin d'évaluer sa capacité à limiter l'inconfort tout en préservant les apports solaires nécessaires au chauffage passif..

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence l'influence déterminante de l'angle de rotation du système d'ombrage cinétique sur la réduction des heures d'inconfort thermique en période hivernale, notamment pour une pièce orientée à l'est. En l'absence de protection (angle -30°), 203 heures d'inconfort sont enregistrées. Une fermeture légère à -15° n'apporte qu'un gain marginal de 0,49 % (1 heure), suggérant une efficacité négligeable. À 0° , la réduction atteint 5,41 % (11 heures), traduisant un effet plus perceptible mais encore limité.

Les performances s'améliorent nettement avec les configurations plus fermées : l'angle $+15^\circ$ permet une diminution de 12,31 % (25 heures), et $+30^\circ$ atteint une réduction maximale de 15,27 % (31 heures). Cette progression confirme qu'un degré plus élevé de fermeture améliore significativement le confort thermique, en limitant les apports solaires matinaux indésirables. Ainsi, les angles $+15^\circ$ et $+30^\circ$ apparaissent comme les configurations les plus optimales pour la période hivernale, en assurant une modulation efficace du rayonnement incident.

Pour l'orientation ouest, les simulations hivernales confirment la tendance observée sur la façade est. En configuration totalement ouverte (sans ombrage, angle -30°), la pièce enregistre 196 heures d'inconfort thermique. L'introduction d'un angle de -15° permet une légère réduction à 190 heures (3,06 %), puis à 189 heures à 0° (3,57 %). Les performances s'améliorent davantage avec des fermetures plus marquées : 182 heures à $+15^\circ$ (7,14 %) et un minimum de 177 heures à $+30^\circ$ (9,69 %). Cette évolution met en évidence l'efficacité croissante du système à atténuer l'inconfort thermique en fin de journée, période particulièrement critique pour les espaces orientés à l'ouest. Contrairement aux approches traditionnelles qui privilégient une ouverture maximale en hiver pour capter les apports solaires passifs, ces résultats montrent qu'une stratégie plus modérée, voire restrictive, peut dans certains cas s'avérer plus bénéfique pour le confort intérieur.

En orientation sud, la performance du système d'ombrage cinétique se révèle particulièrement significative. En l'absence de protection, la pièce enregistre 185 heures d'inconfort thermique. Une fermeture partielle à -15° permet une réduction notable de 16,21 % (30 heures), tandis que l'angle de 0° conduit à une diminution de 13,51 % (25 heures), probablement en lien avec un ensoleillement plus direct au moment du zénith. Les configurations plus fermées, à $+15^\circ$ et $+30^\circ$, stabilisent les heures d'inconfort à 144 heures, soit une réduction de 22,16 % (41 heures), ce qui suggère qu'au-delà d'un certain seuil de fermeture, les gains supplémentaires deviennent limités. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'un contrôle dynamique adapté, même en période hivernale, notamment pour les façades fortement exposées au sud, afin d'optimiser les apports solaires tout en préservant le confort intérieur..

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans l'ensemble, les simulations confirment que le système d'ombrage biomimétique adaptatif agit comme un régulateur saisonnier efficace, capable de réduire la surchauffe estivale et d'atténuer l'inconfort hivernal. Les résultats montrent que les configurations intermédiaires (0° et $+15^\circ$) offrent le meilleur compromis entre réduction des apports solaires, maintien de la ventilation naturelle et préservation de la qualité lumineuse intérieure. L'analyse révèle également que, contrairement aux hypothèses classiques d'ouverture maximale en hiver, une fermeture partielle peut s'avérer plus avantageuse pour le confort thermique. Ces résultats soulignent le rôle central de l'orientation et de la saisonnalité dans la définition des stratégies d'ombrage dynamiques et confirment le potentiel de solutions biomimétiques pour améliorer la performance énergétique et le confort des bâtiments en climat méditerranéen chaud .

Les résultats de cette étude s'inscrivent dans la continuité des recherches antérieures portant sur l'influence des systèmes de contrôle solaire biomimétique sur la performance énergétique des bâtiments.. L'analyse des gains solaires montre que l'intégration de dispositifs cinétiques permet de réguler efficacement l'ensoleillement, réduisant ainsi les surchauffes estivales tout en valorisant les apports passifs en hiver. Ces observations rejoignent celles de Bacha, (2017) , de Hadbaoui (2018), ainsi que (Khelil, 2021) qui soulignent l'importance des protections solaires dynamiques dans l'atténuation des contraintes thermiques liées aux périodes climatiques extrêmes.

Sur le plan énergétique, la diminution des besoins en chauffage observée pour certaines configurations confirme les conclusions de Kuru et al. (2018), selon lesquelles les façades adaptatives contribuent de manière significative à la réduction des charges énergétiques en hiver. De même, la baisse des consommations de refroidissement obtenue dans cette recherche est en cohérence avec les travaux d'Abedini et al., (2025) , Shahin et al.(2023), Sheikh & Asghar,(2019) , et Mohamed Abd El-Rahman et al. (2020) Ces convergences mettent en évidence le rôle des enveloppes biomimétiques comme solution robuste pour limiter la dépendance aux systèmes mécaniques de climatisation et améliorer la résilience énergétique du bâtiment.

Au-delà de l'efficacité énergétique, l'impact sur le confort thermique apparaît comme un enjeu central. Les résultats obtenus montrent une amélioration notable des conditions intérieures grâce à la modulation de la température opérative et à la réduction des heures d'inconfort. Ces constats s'inscrivent dans la continuité de l'étude de Kuru et al (2018), qui est la seule à avoir mobilisé le modèle de confort adaptatif dans l'évaluation de façades cinétiques. En revanche, d'autres travaux tels que ceux de (Bacha, 2017) et Hadbaoui (2018)) ou de (Khelil, 2021) se sont davantage focalisés sur la maîtrise de la température intérieure, sans intégrer une approche centrée sur la perception des occupants. Ainsi, les résultats présentés dans ce chapitre contribuent à enrichir les connaissances sur le rôle des systèmes

CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET DISCUSSION

biomimétiques cinétiques dans la double perspective de l'efficacité énergétique et du confort des usagers. Ils confirment la pertinence de cette approche comme stratégie innovante et crédible en faveur d'une architecture durable, éco-efficace et adaptée aux contextes climatiques contraignants.

Conclusion

Ce chapitre a permis de confronter les résultats de simulation aux mesures expérimentales afin de valider le modèle numérique adopté, garantissant ainsi la fiabilité des analyses ultérieures. L'étude des apports solaires a mis en évidence la capacité du système d'ombrage biomimétique à moduler efficacement l'ensoleillement en fonction de l'orientation et des saisons, limitant ainsi les gains thermiques excessifs en été tout en favorisant les apports bénéfiques en hiver.

L'évaluation énergétique a montré que l'ouverture cinétique des dispositifs constitue une stratégie performante pour réduire les besoins en chauffage et en refroidissement. Ces résultats confirment l'intérêt d'un contrôle adaptatif qui ajuste le degré d'ouverture en fonction des conditions climatiques et des périodes critiques de la journée. Au-delà de la seule consommation d'énergie, l'analyse du confort thermique a souligné l'apport déterminant du système biomimétique dans l'amélioration de la qualité de l'ambiance intérieure. En modulant la température opérative et en répondant aux critères du modèle de confort adaptatif, le dispositif favorise une réduction notable des heures d'inconfort, particulièrement dans les orientations les plus exposées.

Enfin, l'optimisation multi-objective menée dans ce chapitre a permis d'identifier, pour chaque orientation, la configuration cinétique la plus efficace en termes de performance environnementale. Ces résultats confirment la pertinence du recours à une façade biomimétique adaptative pour concilier efficacité énergétique et confort des occupants dans l'habitat individuel en climat méditerranéen chaud.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

Le secteur du bâtiment représente aujourd'hui l'un des principaux consommateurs d'énergie à l'échelle mondiale, en particulier le secteur résidentiel qui se révèle être fortement énergivore. Cette forte consommation, liée notamment aux besoins de chauffage en hiver et de climatisation en été, contribue directement aux émissions de gaz à effet de serre et accentue les enjeux environnementaux liés au changement climatique et à la transition énergétique.

Dans ce contexte, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments apparaît comme une nécessité incontournable. L'enveloppe architecturale joue un rôle central dans cette dynamique puisqu'elle constitue l'interface entre l'intérieur et l'extérieur. Sa capacité à gérer les échanges thermiques lui confère un potentiel considérable pour réduire la consommation énergétique, en limitant les surchauffes estivales tout en valorisant les apports solaires gratuits durant l'hiver. Cette problématique se pose avec une intensité particulière dans les régions méditerranéennes chaudes, marquées par des étés longs et secs où la protection contre l'ensoleillement est essentielle, et par des hivers froids où l'énergie solaire représente une ressource indispensable.

Face à ces défis, les recherches récentes mettent en lumière l'intérêt des systèmes de contrôle solaire adaptatif, considérées comme une nouvelle génération d'enveloppes architecturales capables de s'ajuster en temps réel aux conditions climatiques changeantes. Grâce aux avancées de la conception computationnelle, il est désormais possible de simuler, d'optimiser et de concevoir ces systèmes dynamiques avec une précision et une efficacité accrues.

Dans ce champ d'innovation, les dispositifs de contrôle solaire biomimétiques occupent une place singulière. Issues d'une démarche d'inspiration du vivant, elles visent à transposer en architecture les stratégies adaptatives développées par les organismes naturels. Les plantes, en particulier, constituent un modèle d'intérêt : bien qu'immobiles, elles déploient une remarquable capacité d'adaptation face aux stimuli environnementaux, qu'il s'agisse de la lumière, de la température ou de l'humidité. Leurs mouvements thermonastiques offrent des principes directement transférables aux enveloppes architecturales.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente recherche, qui explore le potentiel du biomimétisme computationnel comme stratégie innovante de la conception. L'étude évalue la performance thermique et énergétique d'un dispositif de contrôle solaire biomimétique inspirée du comportement thermonastique de la fleur *Volubilis blue* (*Ipomée tricolor*,) intégrée à une habitation individuelle située à Guelma qui se caractérise par un climat méditerranéen chaud. L'objectif principal est de démontrer que

CONCLUSION GENERALE

ce type de système adaptatif peut constituer une solution efficace et durable pour réduire la consommation énergétique, améliorer le confort thermique intérieur et ouvrir de nouvelles perspectives architecturales fondées sur l'inspiration du vivant.

Pour atteindre cet objectif, la présente recherche a adopté une méthodologie intégrée articulée autour de quatre approches complémentaires, mises en œuvre de manière successive et cohérente. Dans un premier temps, l'approche conceptuelle a permis d'établir un cadre théorique solide à travers un état de l'art portant sur l'enveloppe architecturale adaptative, le confort thermique, la performance énergétique, le biomimétisme et la conception paramétrique. Ce cadre a fourni les bases nécessaires pour cerner la problématique et identifier les limites des travaux antérieurs.

Ensuite, l'approche expérimentale a été conduite in situ dans la ville de Guelma, avec une analyse typologique des habitations individuelles et la sélection d'un bâtiment représentatif comme cas d'étude. Les relevés de terrain et les mesures de température ont constitué une référence essentielle pour la validation du modèle numérique.

On outre, l'approche qualitative s'est appuyée sur les enseignements de la biologie pour développer un système de contrôle solaire biomimétique. Les stratégies d'adaptation végétale identifiées ont été traduites en un dispositif paramétrique dynamique grâce à l'usage d'outils computationnels, établissant un lien direct entre l'inspiration naturelle et la conception architecturale.

Enfin, l'approche quantitative a mobilisé les simulations paramétriques pour évaluer la performance thermique et énergétique du dispositif. Cette phase a intégré à la fois des analyses durant des journées types et une optimisation multi-objective, permettant d'identifier les configurations les plus performantes et d'asseoir la pertinence du concept proposé.

Les résultats de cette recherche ont été organisés en trois volets principaux : l'estimation des apports solaires, le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment étudié. Les simulations thermiques et énergétiques confirment la pertinence de la démarche adoptée et valident les hypothèses formulées au départ.

Premièrement, l'adoption d'un système de contrôle solaire biomimétiques paramétriques a démontré une efficacité notable tant sur le plan thermique qu'énergétique. Les résultats d'analyse indiquent que ce dispositif est capable de limiter de manière significative les apports solaires excessifs en période estivale (réduction pouvant atteindre 73 %) tout en optimisant les gains solaires hivernaux bénéfiques (augmentation jusqu'à 18 %). Cette performance se traduit par une baisse substantielle des besoins en refroidissement durant l'été (jusqu'à 46,6 %) ainsi qu'une diminution des besoins en chauffage en hiver (jusqu'à 31,9 %).

CONCLUSION GENERALE

Par ailleurs, le système agit directement sur le confort thermique intérieur, en réduisant la température opérative estivale de 2,2 °C et en l'élevant de 1,05 °C durant la saison froide. En termes de confort adaptatif, une amélioration sensible est également constatée, avec une diminution des heures d'inconfort de 31 h en été et de 41 h en hiver.

Deuxièmement, les simulations ont montré que l'orientation et la configuration du dispositif biomimétique influencent fortement ses performances énergétiques et thermiques. En période estivale, l'orientation est combinée à un angle d'ouverture de (+15) permet de bloquer efficacement le rayonnement solaire du matin, tandis que l'orientation ouest associée à une ouverture de (+15 limite les apports solaires en fin de journée, réduisant ainsi les risques de surchauffe. Pour l'orientation sud, la configuration optimale correspond à un angle de (0°) qui maximise l'ombrage durant les heures de fort ensoleillement tout en maintenant un bon niveau d'éclairage naturel. En période hivernale, l'orientation est avec un angle d'ouverture de (-15°) favorise la captation des apports solaires matinaux, tandis que l'orientation ouest avec une ouverture de (-15°) exploite efficacement les rayons solaires de l'après-midi. Enfin, pour l'orientation sud, l'ouverture optimale de (0°) permet de maximiser les gains solaires directs et de réduire les pertes thermiques, contribuant ainsi à l'amélioration du confort intérieur.

Ces résultats démontrent que la combinaison du biomimétisme et de la conception computationnelle constitue une approche pertinente pour atteindre simultanément les objectifs de réduction de la consommation énergétique et d'amélioration du confort thermique intérieur, tout en proposant une solution architecturale innovante adaptée au climat méditerranéen chaud.

Limites de la recherche

Cette recherche confirme la pertinence du biomimétisme computationnel comme outil de conception des dispositifs de contrôle solaire innovant, mais elle présente certaines limites qu'il convient de les souligner afin de mieux situer la portée des résultats.

Le travail s'est focalisé sur un cas d'étude unique, situé à Guelma. Cette restriction géographique et typologique limite la généralisation des conclusions à d'autres contextes climatiques et architecturaux.

L'approche repose principalement sur des simulations numériques. Bien que ces outils soient puissants et largement utilisés dans la recherche en énergie du bâtiment, ils ne peuvent reproduire avec une exactitude absolue la complexité du comportement thermique et énergétique en conditions réelles.

De plus, certains paramètres, tels que les propriétés thermophysiques des matériaux du dispositif d'ombrage, n'ont pas été pris en compte, ce qui réduit la portée de l'évaluation.

La mise en œuvre de la conception paramétrique et des algorithmes d'optimisation génétique exige des compétences spécialisées et des ressources computationnelles importantes. Cette exigence peut

CONCLUSION GENERALE

constituer un frein à la diffusion de la méthodologie auprès des praticiens, notamment dans les contextes où l'accès aux technologies avancées demeure limité.

Le prototype proposé n'a pas encore fait l'objet d'une validation physique à échelle réelle. L'absence d'expérimentation in situ constitue une limite notable, car seule une telle démarche permettrait de confronter les résultats de simulation aux comportements observés dans des conditions d'occupation réelles. La solution proposée soulève également des interrogations d'ordre économique, liées au coût de la mise en œuvre et de l'entretien. L'usage de matériaux avancés, souvent coûteux, peut restreindre son application à grande échelle, en particulier dans le secteur résidentiel où les contraintes budgétaires sont fortes.

Enfin, l'approche reste fortement dépendante des logiciels de calcul et des outils numériques. Des ajustements manuels ont été nécessaires pour améliorer certaines performances, ce qui met en évidence le rôle incontournable du concepteur. L'architecture computationnelle, même lorsqu'elle s'appuie sur des algorithmes évolués, ne saurait donc se substituer totalement à l'expertise et au jugement de l'architecte.

Perspectives de la recherche

Cette recherche a mis en évidence la pertinence du biomimétisme computationnel comme outil de conception des systèmes de contrôle solaire adaptatifs aux conditions climatiques changeantes. Elle propose également un cadre méthodologique original permettant aux concepteurs d'explorer de nouvelles stratégies de façades dynamiques. Néanmoins, plusieurs perspectives de recherche méritent d'être développées, tant sur le plan scientifique que pratique.

L'étude pourrait être élargie à d'autres espèces végétales afin de diversifier les sources d'inspiration et d'enrichir les stratégies d'adaptation appliquées aux enveloppes architecturales. Le biomimétisme pourrait aussi être exploré au niveau des matériaux, avec le développement de solutions innovantes dont la durabilité, le coût et les performances à long terme devraient être évalués.

La méthodologie gagnerait à être appliquée à d'autres contextes climatiques : méditerranéens, ou semi-arides, ainsi qu'à différentes typologies architecturales comme les bâtiments tertiaires, éducatifs ou sanitaires. Ces expérimentations permettraient de mieux comparer l'efficacité et l'adaptabilité du prototype dans des environnements variés. Parallèlement, la réalisation de prototypes physiques à échelle réelle et leur mise à l'épreuve dans des conditions réelles d'occupation constituerait une étape déterminante de validation expérimentale.

Les recherches futures pourraient également intégrer de nouveaux paramètres dans les simulations tels que l'éclairage naturel, l'acoustique, la qualité de l'air intérieur ou l'analyse du cycle de vie des matériaux

CONCLUSION GENERALE

employés, afin d'évaluer plus largement les performances globales et l'impact environnemental des enveloppes adaptatives.

La dimension sociale et architecturale des façades réactives mérite aussi une attention particulière. Des enquêtes, des analyses post-occupationnelles et des démarches participatives fondées sur des maquettes ou prototypes interactifs offriraient un éclairage précieux sur la perception des usagers et leur acceptabilité face à une architecture cinétique et adaptable.

Sur le plan opérationnel, il apparaît essentiel de développer des formations dédiées à l'architecture computationnelle et à la mise en œuvre des façades adaptatives biomimétiques, afin de favoriser leur intégration progressive dans la pratique professionnelle.

Enfin, une approche interdisciplinaire mobilisant architecture, ingénierie, biologie, informatique, économie et sciences sociales ouvrirait la voie à de nouvelles méthodes constructives, à des modèles économiques adaptés et à l'élaboration d'un vocabulaire architectural spécifique aux enveloppes cinétiques, contribuant ainsi à inscrire cette démarche dans une perspective de développement durable.

En définitive, cette recherche a contribué à démontrer que le biomimétisme computationnel appliqué aux enveloppes adaptatives constitue une voie prometteuse pour concilier performance énergétique, confort thermique et innovation architecturale. Elle propose une méthodologie reproductible et transposable, ouvrant la voie à une nouvelle génération de façades capables de s'inspirer du vivant pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques de l'habitat du futur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Rahman, W. S. M. (2021). Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 1133-1142.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.007>
- Abdullah, H. K., & Alibaba, H. Z. (2018). *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.*
- Abedini, M. H., Gholami, H., School of Architecture Technology, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran, Sangin, H., & Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering (DIATI), Politecnico di Torino, Turin, Italy. (2025). Multi-objective Optimization of Window and Shading Systems for Enhanced Office Building Performance : A Case Study in Qom, Iran. *Journal of Daylighting*, 12(1), 91-110. <https://doi.org/10.15627/jd.2025.6>
- Achten, H. (2011). *Degrees of Interaction : Towards a Classification.* 565-572.
<https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2011.565>
- Addington, M., & Schodek, D. (2005). *Smart Materials and Technologies for the Architecture and Design Professions.* Routledge.
- Ahmad, A., Bande, L., Ahmed, W., Tabet Aoul, K., & Jha, M. (2025). Parametric Optimization and Assessment of Modern Heritage Shading Screen for a Mid-Rise Building in Arid Climate : Modernizing Traditional Designs. *Buildings*, 15(7), 1148.
<https://doi.org/10.3390/buildings15071148>
- Ahmad, A., Bande, L., Ahmed, W., Young, K., & Jha, M. (2024). AI application in architecture in UAE : Application of an advanced optimized shading structure as a retrofit strategy of a midrise

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- residential building façade in downtown Abu Dhabi. *Energy and Buildings*, 325, 114995.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114995>
- Alassaf, N. (2025). Computational Precedent-Based Instruction (CPBI) : Integrating Precedents and BIM-Based Parametric Modeling in Architectural Design Studio. *Buildings*, 15(8), 1287.
<https://doi.org/10.3390/buildings15081287>
- 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>
- Alkama, D. (1995). *Analyse typologique de l'habitat (cas de Biskra)*.
- Al-Masrani, S. M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems : A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in Construction*, 102, 195-216.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>
- Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M., Zalin, N. A., & Aida Isma, M. I. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings : Challenges and future trends. *Solar Energy*, 170, 849-872. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047>
- Al-Obaidi, K. M., Azzam Ismail, M., Hussein, H., & Abdul Rahman, A. M. (2017). Biomimetic building skins : An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1472-1491. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028>
- Al-Obaidi, K.M., K. M., & Rahman, A. M. A. (2016). Toplighting systems for improving indoor environment : A review. *Renewable Energy and Sustainable Technologies for Building and Environmental Applications*.
- Alsukkar, M., Ibrahim, A., & Eltaweel, A. (2026). Multi-objective optimization of daylighting systems for energy efficiency and thermal-visual comfort in buildings : A review. *Building and Environment*, 288, 113921. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113921>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Tamimi, N. A., & Fadzil, S. F. S. (2011). The Potential of Shading Devices for Temperature Reduction in High-Rise Residential Buildings in the Tropics. *Procedia Engineering*, 21, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2015>
- Al-Tamimi, N. A. M. (2011). *Impact Of Building Envelope Modification On The Thermal Performance Of Glazed High-Rise Residential Buildings. In : The Tropics*. [Phd thesis]. University Sains Malaysia.
- Amoruso, F. M., Dietrich, U., & Schuetze, T. (2019). Indoor Thermal Comfort Improvement through the Integrated BIM-Parametric Workflow-Based Sustainable Renovation of an Exemplary Apartment in Seoul, Korea. *Sustainability*, 11(14), 3950. <https://doi.org/10.3390/su11143950>
- Ardiani, N. A., Mohammadpourkarbasi, H., & Sharples, S. (2025). A Systematic Review of Multi-Objective Optimisation Building Energy Retrofit, with a Focus on Hot-Humid Climate Regions. *Energies*, 19(1), 122. <https://doi.org/10.3390/en19010122>
- Ashraf, N., & Abdin, A. R. (2024). Biomimetic design synthesis and digital optimization of building shading skin : A novel conceptual framework for enhanced energy efficiency. *Energy and Buildings*, 323, 114824. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114824>
- Attia, S., Favoino, F., Loonen, R., Petrovski, A., & Monge-Barrio, A. (2015). *Adaptive Façades System Assessment : An initial review*.
- Bacha, C. B. (2017). *Les façades dynamiques; moyen de contrôle solaire pour accroître l'efficacité énergétique des équipements administratifs en climat aride—Biskra*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18817.56163/1>
- Badarnah, L. (2015). A Biophysical Framework of Heat Regulation Strategies for the Design of Biomimetic Building Envelopes. *Procedia Engineering*, 118, 1225-1235. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.474>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Badarnah, L. (2017). Form Follows Environment : Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. *Buildings*, 7(2), 40.
<https://doi.org/10.3390/buildings7020040>
- Badeche, M. (2022). Integrated Adaptive Facades for Building Energy Efficiency and User's Thermal Comfort. In M. Hatti (Éd.), *Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities* (Vol. 361, p. 882-888). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-92038-8_90
- Baker, N., & Steemers, K. (2014). *Daylight Design of Buildings*. Handbook for Architects and Engineers.
- Bande, L., Hamad, H., Alqahtani, D., Alnahdi, N., Ghunaim, A., Fikry, F., & Alkhatib, O. (2022). Design of Innovative Parametric/Dynamic Façade Integrated in the Library Extension Building on UAEU Campus. *Buildings*, 12(8), 1101. <https://doi.org/10.3390/buildings12081101>
- Barbisan, N. (2013). *L'architecture paramétrique au delà de la morphogénèse visuelle*.
- Ben Bacha, C., & Bourbia, F. (2025). Simulation-based performance evaluation of kinetic Mashrabiya for thermal comfort and energy efficiency in arid climates : A case study in Biskra, Algeria. *Budownictwo i Architektura*, 24(3), 171-193. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.7102>
- Ben zrari, S. (2013). *L'EVOLUTION DES QUARTIERS ANCIENS « QUELS ENJEUX URBAINS » CAS D'ETUDE : LA CITE – BON ACCUEIL-GUELMA* [Mémoire de Magister]. Badji Mokhtar.
- BENSAKHRIA, K. (2024). *MUTATION DES FORMES D'URBANITE DANS LES QUARTIERS RESIDENTIELS : CAS DE LA VILLE DE CONSTANTINE* [Thèse de doctorat]. Université de Constantine 3.
- BENSEHLA Sofiane. (2021). *The impact of the urban form on energy consumption and solar access, case of individual housing subdivisions in Constantine*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Benside, I. (2013). *VERS UNE NOUVELLE APPROCHE QUALITATIVE DE L'HABITAT INDIVIDUEL (CAS DE CONSTANTINE)* [Mémoire de Magister]. Université de Constantine 3.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*.
- Besbas, S. (2023). *Daylight quality and ambiances characterization in patient room. A parametric workflow and genetic algorithms approach (Case of Biskra city)*.
- Besbas, S., Nocera, F., Zemmouri, N., Khadraoui, M. A., & Besbas, A. (2022). Parametric-Based Multi-Objective Optimization Workflow : Daylight and Energy Performance Study of Hospital Building in Algeria. *Sustainability*, *14*(19), 12652. <https://doi.org/10.3390/su141912652>
- Bijari, M., Aflaki, A., & Esfandiari, M. (2025a). Plants Inspired Biomimetics Architecture in Modern Buildings : A Review of Form, Function and Energy. *Biomimetics*, *10*(2), 124. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10020124>
- Bijari, M., Aflaki, A., & Esfandiari, M. (2025b). Plants Inspired Biomimetics Architecture in Modern Buildings : A Review of Form, Function and Energy. *Biomimetics*, *10*(2), 124. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10020124>
- Borgeson, S., & Brager, G. (2008). *OCCUPANT CONTROL OF WINDOWS: ACCOUNTING FOR HUMAN BEHAVIOR IN BUILDING SIMULATION*.
- Brzezicki, M. (2024a). A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics : A Motion/Deformation Analysis. *Sustainability*, *16*(13), 5697. <https://doi.org/10.3390/su16135697>
- Brzezicki, M. (2024b). A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics : A Motion/Deformation Analysis. *Sustainability*, *16*(13), 5697. <https://doi.org/10.3390/su16135697>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Brzezicki, M. (2024c). A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics : A Motion/Deformation Analysis. *Sustainability*, 16(13), 5697. <https://doi.org/10.3390/su16135697>
- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture : Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>
- Carmody, J., Selkowitz, S., & Heschong, L. (1996). *Residential Windows : A Guide to New Technologies and Energy Performance*.
- Chaturvedi, P. K., Kumar, N., & Lamba, R. (2024). Multi-objective optimization for visual, thermal, and cooling energy performance of building envelope design in the composite climate of Jaipur (India). *Energy & Environment*, 0958305X241228513. <https://doi.org/10.1177/0958305X241228513>
- Chayaamor-Heil, N., Guéna, F., & Hannachi-Belkadi, N. (2018). Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils. *Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère*, 1. <https://doi.org/10.4000/craup.309>
- Chayaamor-Heil, N., & Laracuate, N. M. (2018). Bio-inspired Passive Kinetic Solar Shading Device for a Responsive Architectural Envelope. *Biomimetics for Energy Efficient Building Envelopes*. 13th conference on advanced building skins.
- Chen, X., Yang, H., & Lu, L. (2015). A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1425-1436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.003>
- Chraitia, M. (2021). *ELEMENTS INFLUENTS DANS LA DEMARCHE D'UN PROJET URBAIN AMBITIEUX POUR LA SOCIETE, LE PLAN D'OCCUPATION DES SOLS SUD A GUELMA* [Thèse de doctorat]. Université de Constantine 3.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Commune de Guelma. (1962). *Archives de la commune de Guelma*.
- Côte, M. (s. d.). Guelma. In *Encyclopédie berbère* (Vol. 21).
- Dankassoua, M., Madougou, S., Aboubacar, A., & Foulani, A. I. (2017). Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre). *Journal of Renewable Energies*, 20(1), 131-146. <https://doi.org/10.54966/jreen.v20i1.615>
- Datta, G. (2001). Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation. *Renewable Energy*, 23(3-4), 497-507. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00131-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00131-2)
- Davis, D. (2013). *Modelled on Software Engineering : Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. School of Architecture and Design College of Design and Social context RMIT University.
- De Boissieu, A. (2013). *Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie* [Thèse]. Ecole Nationale Supérieure d'Architectur.
- DE HERDE, A., & LIÉBARD, Alain. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*.
- Djenane, M. (2008). *Microclimatic behaviour of urban forms in hot dry regions. Towards a definition of adapted indicators*. 5th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA,.
- D.T.R C3-2. (s. d.).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DUAC, G. (2013). *DUAC Guelma. (2013). PDAU intercomunal. Guelma, Algérie. [PDAU intercomunal.]*.
- El Ahmar, S., Fioravanti, A., & Hanafi, M. (2013). *A Methodology for Computational Architectural Design Based on Biological Principles. 539-548.*
<https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2013.1.539>
- Elghamry, R., & Hassan, H. (2020). Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment. *International Journal of Ventilation, 19(4), 233-259.* <https://doi.org/10.1080/14733315.2019.1665784>
- 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>
- Fathi, A., Saleh, A., & Hegazy, M. (2016). Computational Design as an Approach to Sustainable Regional Architecture in the Arab World. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 225, 180-190.* <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.018>
- Fattah, T. R., Mohammed, D., Katona, T. J., & Baranyai, B. (2025). Cactus-inspired multifunctional Bio-kinetic façade for energy performance improvement assessed by a novel energy simulation framework. *Energy and Buildings, 346, 116188.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116188>
- Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., & Ranzi, G. (2016). Shape morphing solar shadings : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 863-884.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086>
- Fonseka, E. A. G., & Romanov, O. (2024). FLORISM : FUSING BIOMIMETIC ARCHITECTURE WITH DIVERSE FLOWER STRUCTURES. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after. V. G. Shukhov, 10(3), 68-81.* <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-10-3-68-81>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gallas, M.-A. (2013). *De l'intention à la solution architecturale, proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception* [Thèse de doctorat]. Loorraine University,.
- Giovannini, L., Verso, V. R. M. L., Karamata, B., & Andersen, M. (2015). Lighting and Energy Performance of an Adaptive Shading and Daylighting System for Arid Climates. *Energy Procedia*, 78, 370-375. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.675>
- GIVONI, B., & IZARD, J.-Louis. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. (Editions du moniteur,).
- Goharian, A., Mahdavinejad, M., , University of Tehran, Tehran, Iran. (2025). Designing Adaptability Strategy to a Novel Kinetic Adaptive Façade (NKAF); Toward a Pioneering Method in Dynamic-objects Daylight Simulation (Post-Processing). *Journal of Daylighting*, 12(1), 69-90. <https://doi.org/10.15627/jd.2025.5>
- Grosso, A. E. D., & Basso, P. (2013). *DESIGN CONCEPTS FOR ADAPTIVE MULTI-FUNCTIONAL BUILDING ENVELOPES*.
- Hadbaoui, H. (2018). *Pratique du biomimétisme dans l'architecture bioclimatique : Essai sur la performance énergétique des enveloppes architecturales autonomes responsives dans un climat aride* [Unpublished]. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.17409.97126>
- Hamed, S. A. M., Elkady, S. M. L., & Youssef, A. M. A. (2025). Design Approaches and Measuring Methods of Self-shading Buildings : Comprehensive Analyses. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2025.372396.1466>
- 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>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Henriques, G. C., Duarte, J. P., & Leal, V. (2012). Strategies to control daylight in a responsive skylight system. *Automation in Construction*, 28, 91-105.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.002>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Schröder, T., & Guerra-Santin, O. (2021). Bio-inspired interactive kinetic façade : Using dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. *Frontiers of Architectural Research*, 10(4), 821-837.
<https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.004>
- Hraska, J. (2018). Adaptive solar shading of buildings. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(2), 107-113. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.2.5>
- International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*. www.iea.org
- Jalali, S., Badarnah, L., & Nicoletti, E. (2025a). Biomimetic adaptive solar building envelopes : Trends, challenges, and opportunities for sustainable applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115586>
- Jalali, S., Badarnah, L., & Nicoletti, E. (2025b). Biomimetic adaptive solar building envelopes : Trends, challenges, and opportunities for sustainable applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115586>
- Karanouh, A., & Kerber, E. (2015a). Innovations in dynamic architecture. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), 185-221. <https://doi.org/10.3233/FDE-150040>
- Karanouh, A., & Kerber, E. (2015b). Innovations in dynamic architecture. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), 185-221. <https://doi.org/10.3233/FDE-150040>
- Kerdoud. (2005). *Bengladesh ou Medina ? Espaces urbains périphériques et représentations : Deux exemples à Annaba et à Guelma (Algérie)*.
- Khelfa, I. E. (2024). *Hybrid energy renovation of existing buildings : A case study of collective housing in Skikda* [Doctoral thesis]. Guelma.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Khelil, S. (2020). Raising the efficiency of deployable building facades with Biomimetics for hot and arid regions. *Smart Buildings*.
- Khelil, S. (2021). *Advanced building's skin design towards the optimization of the energy consumption in hot and arid regions*. Mohamed Khider.
- Kim, J.-H., Park, Y.-J., Yeo, M.-S., & Kim, K.-W. (2009). An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer. *Building and Environment*, 44(7), 1517-1527.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.006>
- Kirimtat, A. (2026). Shading devices in buildings : A systematic up-to-date review across performance evaluation-based methods. *Energy and Buildings*, 353, 116822.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116822>
- Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., & Sariyildiz, S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 23-49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>
- Kolodziej, P., & Rak, J. (2013). *RESPONSIVE BUILDING ENVELOPE AS A MATERIAL SYSTEM OF AUTONOMOUS AGENTS*.
- Konstantoglou, M., & Tsangrassoulis, A. (2016). Dynamic operation of daylighting and shading systems : A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 268-283.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.246>
- Kotnic, T. (2010). Digital architectural design as exploration of computable functions. *International journal of architectural computing*, 8(1), 1-16.
- Kuru, A., Fiorito, F., Oldfield, P., & Bonser, S. P. (2018). *Multi-functional biomimetic adaptive façades : A case study*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S., & Fiorito, F. (2021). Performance prediction of biomimetic adaptive building skins : Integrating multifunctionality through a novel simulation framework. *Solar Energy*, 224, 253-270. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.012>
- Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). *Middle School Classrooms, Case of Hot and Dry Regions*.
- Landsberg, D. R., Shonder, J. A., Barker, K. A., Hall, C. R. L., & Reindl, D. T. (s. d.). *Or trans©miAsSsiHonRAinE e(iwthwewr.parsihnrtaoer.odrigg)it.aFl oforrpmerissonnoatl upseermointtlye.dAwdidthitoiounaAl SreHpRrAoEd'uscptiroionr, dwirsitrtiebnutpioenrm, ission. ASHRAE Guideline Project Committee 1 4 Cognizant TC: TC 7.6, Building Energy Performance SPLS Liaison : Waller S. Clements*.
- Latreche, S. (2019). *Étude et amélioration des performances climatiques de l'enveloppe architecturale en milieux chauds et arides. Cas de l'architecture domestique autoproduite à Biskra* [These de doctorat]. Biskra.
- Leighton, M., & Bader, S. (2010). *Responsive Shading / Intelligent Façade Systems*. 263-270. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2010.263>
- Lima, K. M. D., Bittencourt, L. S., & Caram, M. (2013). *Ranking Configurations of Shading Devices by Its Thermal and Luminous Performance*.
- Lionar, R., Kroll, D., Soebarto, V., Sharifi, E., & Aburas, M. (2024). A review of research on self-shading façades in warm climates. *Energy and Buildings*, 314, 114203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114203>
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013a). Climate adaptive building shells : State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013b). Climate adaptive building shells : State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- MAGRI ELOUADJERI, S. (2023). *Optimisation des performances thermiques et lumineuses des systèmes de contrôle solaire dans un climat chaud et sec*. [Thèse de doctoral]. Université Mohamed Khider –.
- Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T., & Vazakas, A. (2012). Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*, 86(9), 2561-2575. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.026>
- Mazria, Edward. (1978). *Passive solar energy book*.
- Mazria, Edward. (2005). *Le guide de la maison solaire*. Parenthèses,.
- Meddour, L. (2023). *Les centres anciens des villes moyennes algériennes, entre les exigences de la préservation de l'authenticité et celles de la durabilité*. [Thèse de doctorat]. Faculté des Sciences et de la technologie.
- Medjeldi, Z. (2025). *Apport de l'approche paramétrique pour une conception environnementale intégrée. Cas des logements sociaux à Guelma*. Guelma.
- Mohamed Abd El-Rahman, S., Ibrahim Esmail, S., Bakr Khalil, H., & El-Razaz, Z. (2020). Biomimicry inspired Adaptive Building Envelope in hot climate. *Engineering Research Journal*, 166(0), 30-47. <https://doi.org/10.21608/erj.2020.135274>
- Mokhneache, N. (2023). *MPACT DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT SUR SON EFFICIENCE ENERGETIQUE – CAS DES LOTISSEMENTS- GUELMA – IMPACT OF BUILDING ENVELOPPE ON ENERGY EFFICIENCY ON THE BUILDING – CASE OF STUDY – ALLOTMENTS- GUELMA* [Thèse de doctorat]. Université 8 mai ,1945.
- Moloney, J. (2009). *A MorPHologY oF Pattern For Kinetic Facades*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Moloney, J. (2011). *Designing Kinetics for Architectural Facades :State Change*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203814703>
- Naeem, N., Abdin, A., & Saleh, A. (2024). An Approach to Using Shape Memory Alloys in Kinetic Facades to Improve the Thermal Performance of Office Building Spaces. *Civil Engineering and Architecture*, 12(1), 326-349. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120125>
- 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)
- O'Brien, W., & Gunay, H. B. (2014). The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices – A review and proposed modeling framework. *Building and Environment*, 77, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.024>
- O'Brien, W., Kapsis, K., & Athienitis, A. K. (2013). Manually-operated window shade patterns in office buildings : A critical review. *Building and Environment*, 60, 319-338.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.003>
- Ogunyemi, O. A., Fadeyi, A. A., & Alabi, S. A. (2015). *External Shading Design Strategies within the TropicalModernist Nigeria : Lessons for Nigerian Designers*. 4(6).
- 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>
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate : Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press,.
- Ossen, D. R., Ahmad, M. H., & Madros, N. H. (2005). *IMPACT OF SOLAR SHADING GEOMETRY ON BUILDING ENERGY USE IN HOT HUMID CLIMATES WITH SPECIAL REFERENCE TO MALAYSIA*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Öztürk, B., Mutlu-Avinç, G., & Arslan-Selçuk, S. (2024). Enhancing energy efficiency in glass facades through biomimetic design strategies. *Revista Hábitat Sustentable*, 34-43.
<https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.03>
- PANERAI, P., DEMORGON, M., & DEPAULE, Jean-Charles. (1989). *Analyse urbaine* (Parenthèses).
- Pawlyn, M. (2011). *Biomimicry in Architecture*. RIBA Publishing.
<https://doi.org/10.4324/9780429346774>
- Pedersen Zari, M. (2015). Can Biomimicry Be a Useful Tool for Design for Climate Change Adaptation and Mitigation? In F. Pacheco Torgal, J. A. Labrincha, M. V. Diamanti, C.-P. Yu, & H. K. Lee (Éds.), *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering* (p. 81-113). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4_4
- Perino, M., & Serra, V. (2015). Switching from static to adaptable and dynamic building envelopes : A paradigm shift for the energy efficiency in buildings. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), 143-163. <https://doi.org/10.3233/FDE-150039>
- Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26-51. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026>
- Saci Hadeif, S., Khelil, S., & Alkama, D. (2025a). Building Energy Performance Assessment Based on a Bio-Inspired Kinetic Shading Devices. *Scientific Journal of King Faisal University: Basic and Applied Sciences*, 26(2), 36-42. <https://doi.org/10.37575/b/eng/250018>
- Saci Hadeif, S., Khelil, S., & Alkama, D. (2025b). Building Energy Performance Assessment Based on a Bio-Inspired Kinetic Shading Devices. *Scientific Journal of King Faisal University: Basic and Applied Sciences*, 26(2). <https://doi.org/10.37575/b/eng/250018>
- Saci Hadeif, S., Khelil, S., & Alkama, D. (2025c). IMPACT OF ADAPTIVE BIOMIMETIC BUILDING SKINS ON INDOOR THERMAL COMFORT : A COMPUTATIONAL

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

EVALUATION. *Architecture and Engineering*, 10(4), 3-16. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2025-10-4-3-16>

Sahnoune, S. & Nassira Benhassine. (2022). *Sahnoune Thesis*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15776.97284>

Sayed, H. (2021). *Bio-Form Mimicry in Architectural Design*. Faculty of Engineering at Shoubra, Benha University.

Sayigh, A. (2019). *Sustainable Vernacular Architecture How the Past Can Enrich the Future : How the Past Can Enrich the Future*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06185-2>

Schumacher, M., Schaeffer, O., Vogt, M., & Scheuermann, A. (2010). *Move : Architecture in Motion—Dynamic Components and Elements*. Birkhauser.

SCHUMACHER, P. (2009). *Parametricism-A New Global Style for Architecture and Urban Design*. *AD Architectural Design*. Vol 79(No 4,).

Shahin, A., Nessim, A., & Steit, M. (2023). Bio-based Adaptive skins : Investigating the impact of using shape-morphing skins on the energy consumption of administrative buildings.

Engineering Research Journal (Shoubra), 52(3), 135-147.

<https://doi.org/10.21608/erjsh.2023.201094.1159>

Shama, H., Ismail, M., & Nessim, A. (2022). REDUCTION OF THERMAL LOADS BY BIOMIMETIC RESPONSIVE SKINS. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 17(65), 1376-1389. <https://doi.org/10.21608/aej.2022.266223>

Sheikh, W. T., & Asghar, Q. (2019a). Adaptive biomimetic facades : Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 8(3), 319-331.

<https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sheikh, W. T., & Asghar, Q. (2019b). Adaptive biomimetic facades : Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 8(3), 319-331.
<https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>
- Siret, D. (2011). *Les enveloppes solaires de Ralph Knowles, ou les ambivalences d'un modèle de régulation des formes urbaines*. (14), p-195.
- Siret, D. (2013). *Les sensations du soleil dans les théories architecturales et urbaines. De l'hygiénisme à la ville durable*. 105-117.
- Siret, D. (2014). Une utopie artistique solaire urbaine des années 1960 : L'hélioplastique de Mieczyslaw Twarowski – Analyse critique et propositions pour une esthétique solaire urbaine contemporaine. *Environnement urbain*, 8, 48-64. <https://doi.org/10.7202/1027737ar>
- Siret, D., & Harzallah, A. (2006). *Architecture et contrôle de l'ensoleillement*.
- Soliman, M. E., & Bo, S. (2023). An innovative multifunctional biomimetic adaptive building envelope based on a novel integrated methodology of merging biological mechanisms. *Journal of Building Engineering*, 76, 106995. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106995>
- Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022a). A critical review of biomimetic building envelopes : Towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112850. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850>
- Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022b). A critical review of biomimetic building envelopes : Towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112850. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850>
- Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., Ambrogi, V., & Ausiello, G. (2024a). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower : A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, 247, 111052.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111052>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., Ambrogi, V., & Ausiello, G. (2024b). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower : A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, *247*, 111052. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111052>
- Sriti, L. (2013). *Architecture domestique en devenir. Formes, usages et représentations* [Thèse de doctoral]. Biskra.
- Szokolay, S. V. (1996). *Solar geometry* (PLEA.).
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades : A review. *Automation in Construction*, *121*, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>
- THESE DE DOCTORAT MEDJELDI ZINEB (1).pdf*. (s. d.).
- 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>
- Twarowski, M. (1967). *Soleil et architecture*. Arkady.
- Valladares-Rendón, L. G., Schmid, G., & Lo, S.-L. (2017). Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. *Energy and Buildings*, *140*, 458-479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073>
- Vazquez, E., Correa, D., & Poppinga, S. (2024). A review of and taxonomy for elastic kinetic building envelopes. *Journal of Building Engineering*, *82*, 108227. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108227>
- velikov, kathy, & thün, geoffrey (Éds.). (2013). Responsive Building Envelopes : Characteristics and Evolving Paradigms. In *Design and Construction of High-Performance Homes* (0 éd., p. 78-95). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203721797-13>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Vincent, J. F. V. (2009). Biomimetics—A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 223(8), 919-939.
<https://doi.org/10.1243/09544119JEIM561>
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A.-K. (2006). Biomimetics : Its practice and theory. *Journal of The Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
<https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>
- Wagdy, A., & Fathy, F. (2015). A parametric approach for achieving optimum daylighting performance through solar screens in desert climates. *Journal of Building Engineering*, 3, 155-170. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.07.007>
- Wald, L. (2010). *Introduction au rayonnement solaire*. Les Presses des Mines.
- Wald, L. (2020). *Fundamentals of Solar Radiation*. MINES PARISTECH.
- Wang, J., Li, S., & Ye, P. (2025). Dynamic Skin : A Systematic Review of Energy-Saving Design for Building Facades. *Buildings*, 15(14), 2572. <https://doi.org/10.3390/buildings15142572>
- Waseef, A. A., & El-Mowafy, B. N. (2017). *TOWARDS A NEW CLASSIFICATION FOR RESPONSIVE KINETIC FACADES*.
- Weber, W. (1991). *Soleil et architecture-Guide pratique pour le projet* (Office fédéral des questions).
- Wintour, P. (2023). *Ladybug & Honeybee for Grasshopper | Parametric Monkey*.
<https://parametricmonkey.com/2016/03/13/ladybug-honeybee/>
- Xu, J., Taşkaya, S., Wu, D., Kurt, M., Liao, W., & Liao, Y. (2024). Examining the Correlation Between Building and Parcel Using Building Information Modeling (BIM) : Contributions to City-Based Planning. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 10(4). <https://doi.org/10.22399/ijcesen.459>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Xu, K., Song, S., & Xiang, C. (2025). Parametric design for combined solar facades for high-rise residential buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 74, 104167. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104167>
- Yao, J. (2014). Determining the energy performance of manually controlled solar shades : A stochastic model based co-simulation analysis. *Applied Energy*, 127, 64-80. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.046>
- Yao, J., Chow, D., & Chi, Y.-W. (2016). Impact of Manually Controlled Solar Shades on Indoor Visual Comfort. *Sustainability*, 8(8), 727. <https://doi.org/10.3390/su8080727>
- Yazdi Bahri, S., Alier Forment, M., Sanchez Riera, A., Bagheri Moghaddam, F., Casañ Guerrero, M. J., & Llorens Garcia, A. M. (2022). A literature review on thermal comfort performance of parametric façades. *Energy Reports*, 8, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.245>
- Yazdi Bahri, S., Alier Forment, M., Sanchez Riera, A., Heiranipour, M., & Hosseini, S. N. (2025). Kinetic facades as a solution for educational buildings : A multi-objective optimization simulation-based study. *Energy Reports*, 13, 3915-3928. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.03.021>
- Zainab Mohammed Ahmed & Amjad Albadry. (2025). The Dynamic Surface Technologies of Buildings. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.22399/ijcesen.1649>
- Zari, M. P. (2007). *BIOMIMETIC APPROACHES TO ARCHITECTURAL DESIGN*.
- Zari, M. P. (2012). Ecosystem services analysis for the design of regenerative built environments. *Building Research & Information*, 40(1), 54-64. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.628547>
- Ziasistani, N., Meana-Fernández, A., & Gutiérrez-Trashorras, A. J. (2025). Optimization of the Performance of Double-Skin Façades Across Six Climates : Effects of Orientation, Blinds, and

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Overhangs on Energy Efficiency and Carbon Emissions. *Thermo*, 5(4), 53.

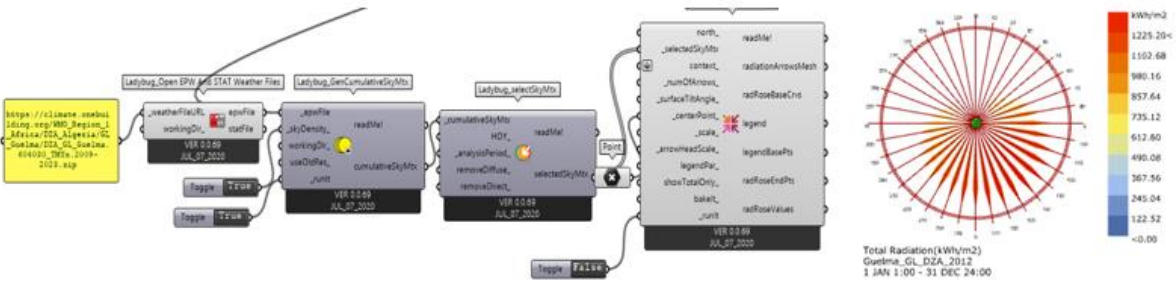
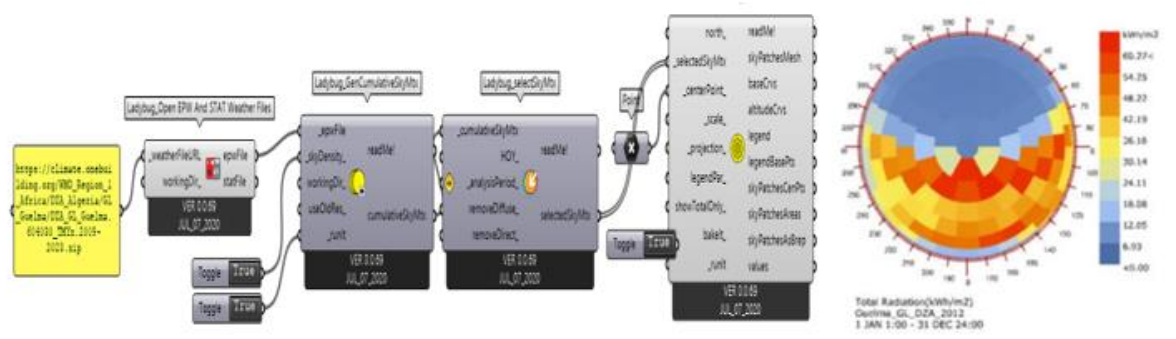
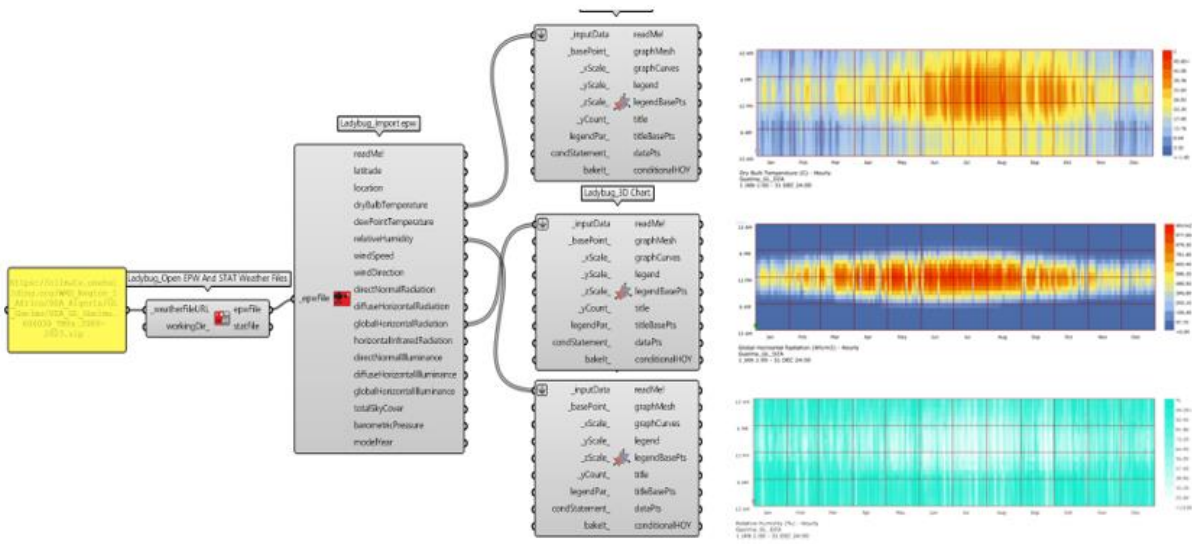
<https://doi.org/10.3390/thermo5040053>

Annexes

ANNEXES

ANNEXE A

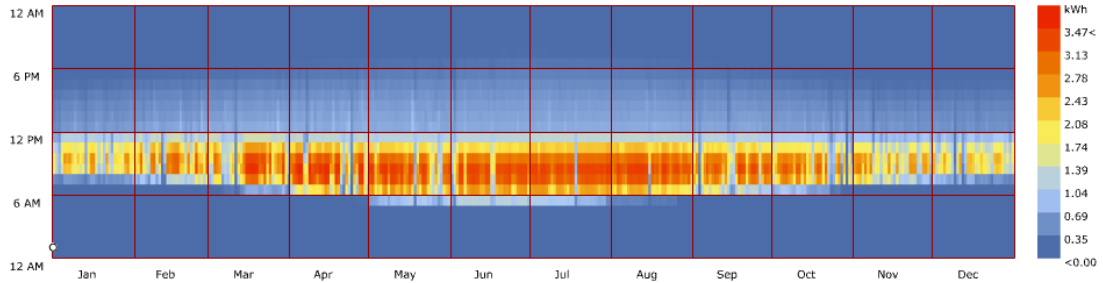
Analyse climatique de la ville de Guelma



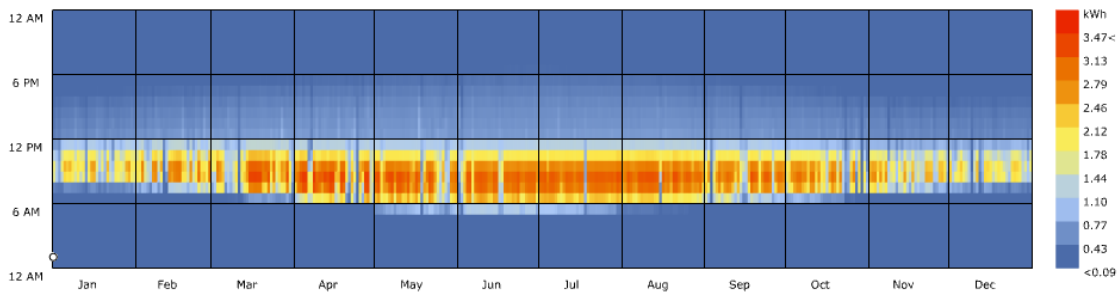
ANNEXE B

Impact du système d'ombrage biomimétique sur les apports solaires selon son orientation sa configuration (de -30° jusqu'à 30°)

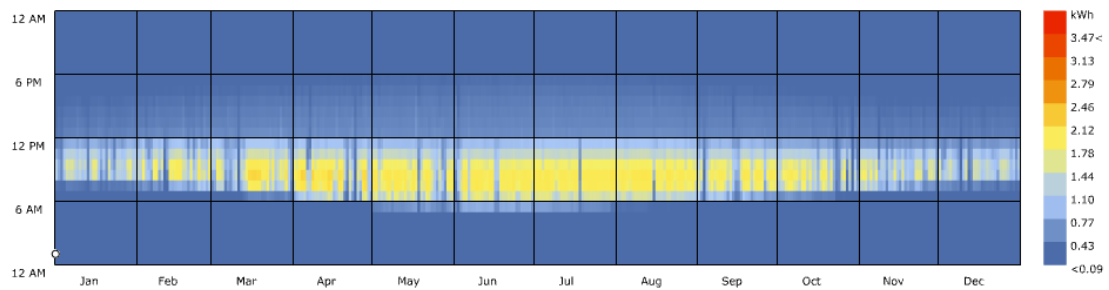
L'orientation Est -270° -



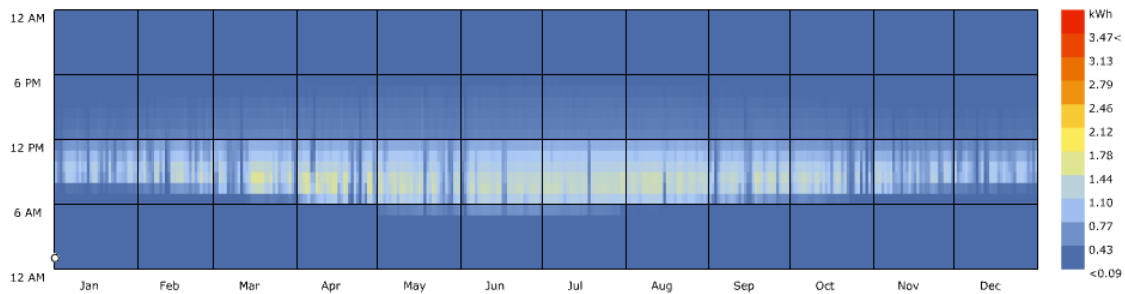
Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00



Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

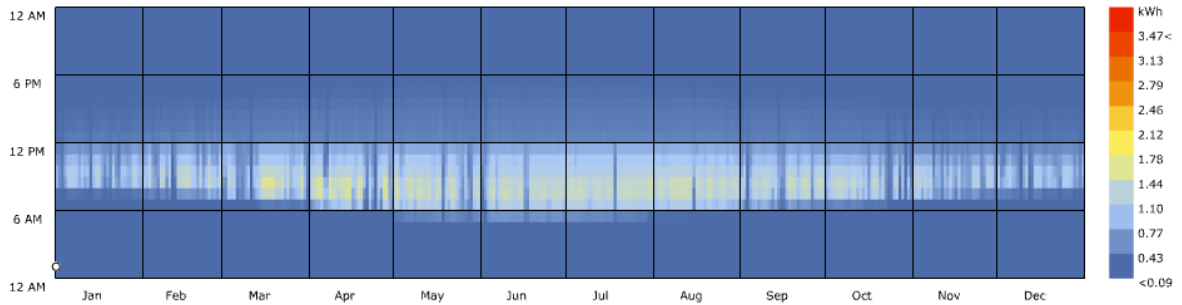


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

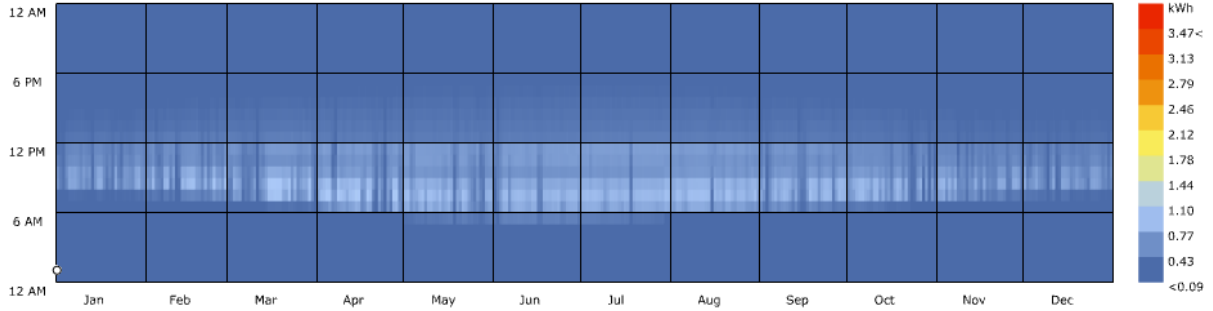


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

Annexes

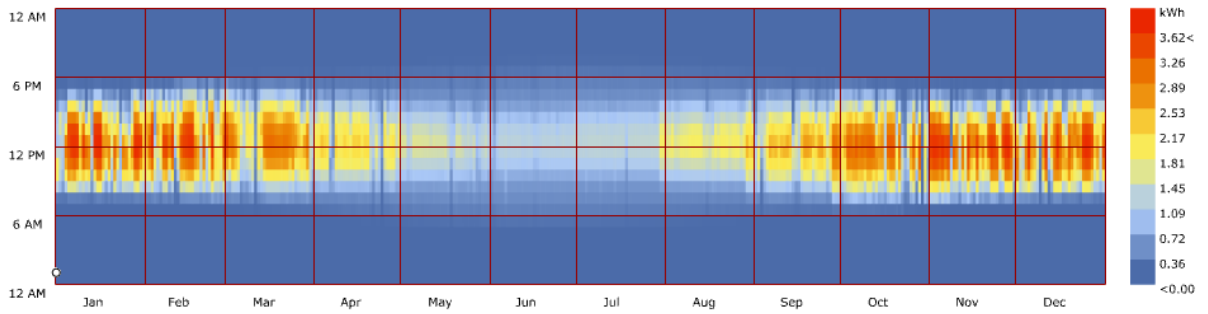


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

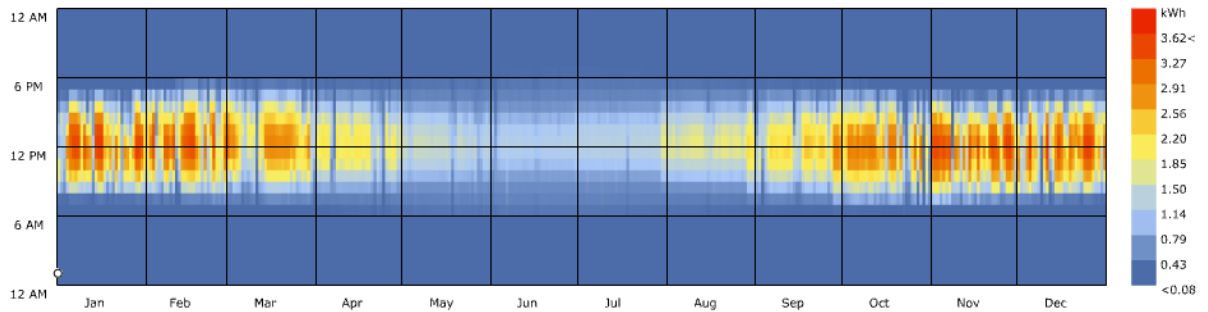


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

L'orientation sud -0°-

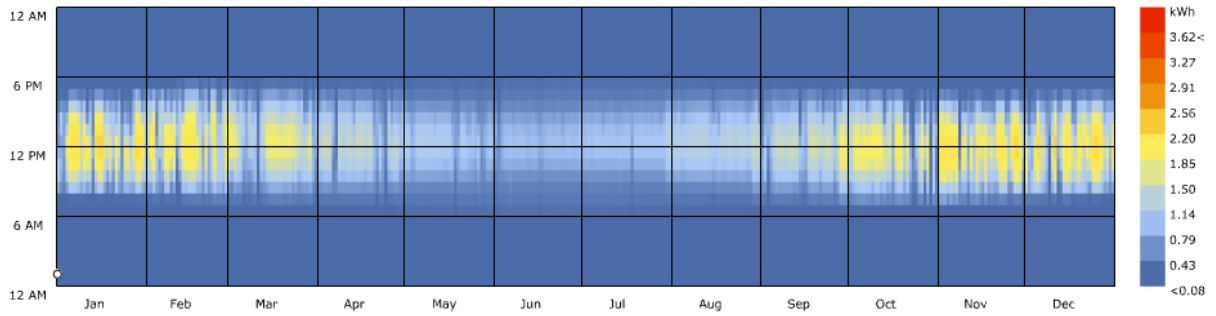


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

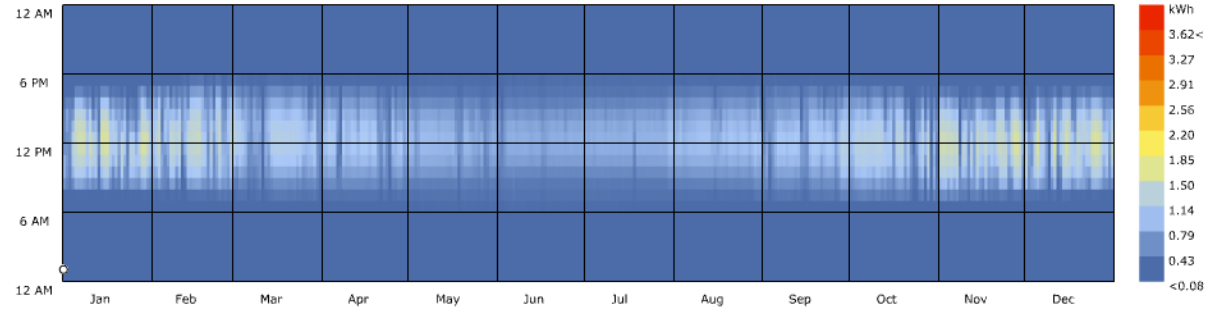


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

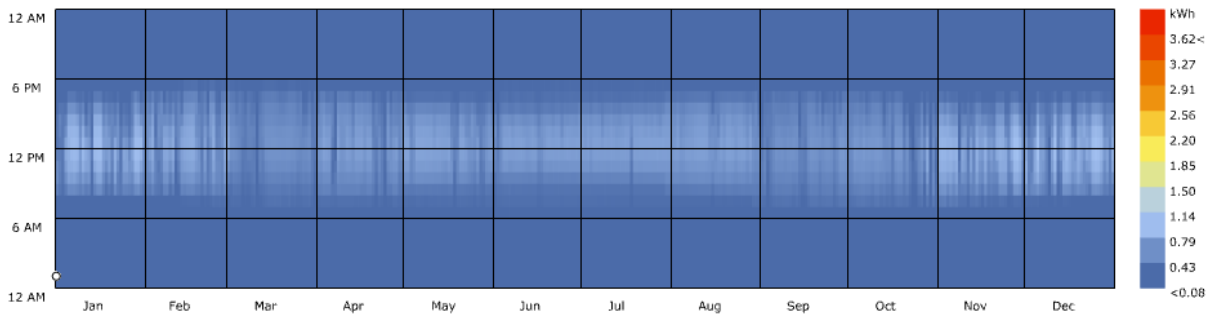
Annexes



Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

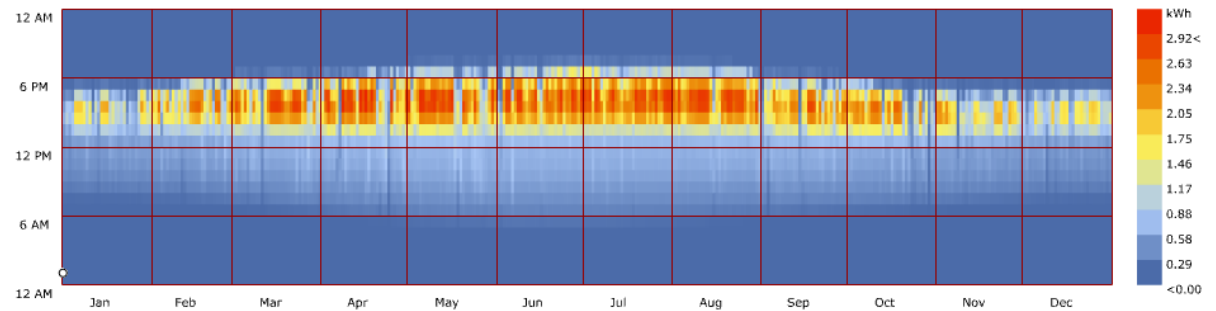


Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00



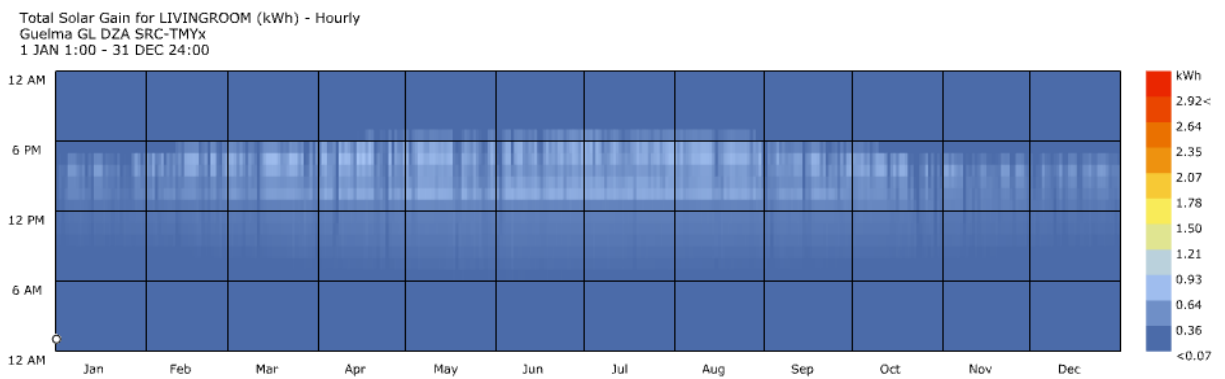
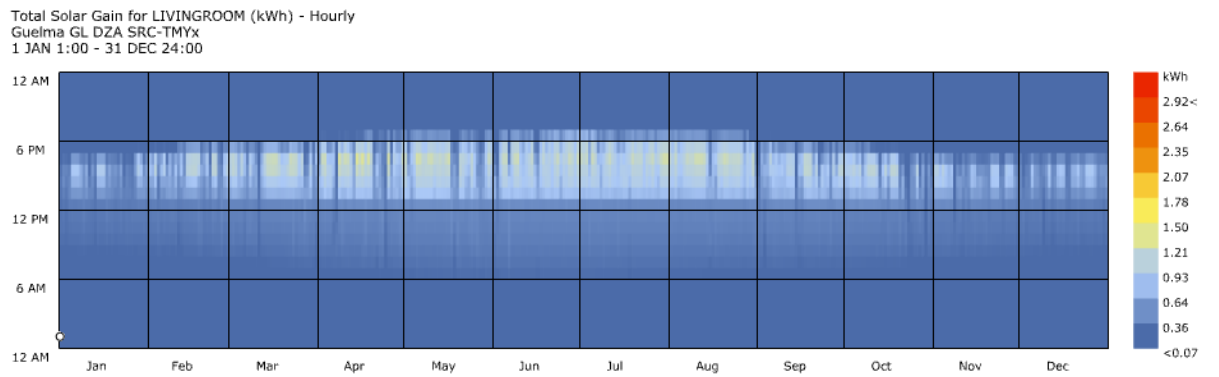
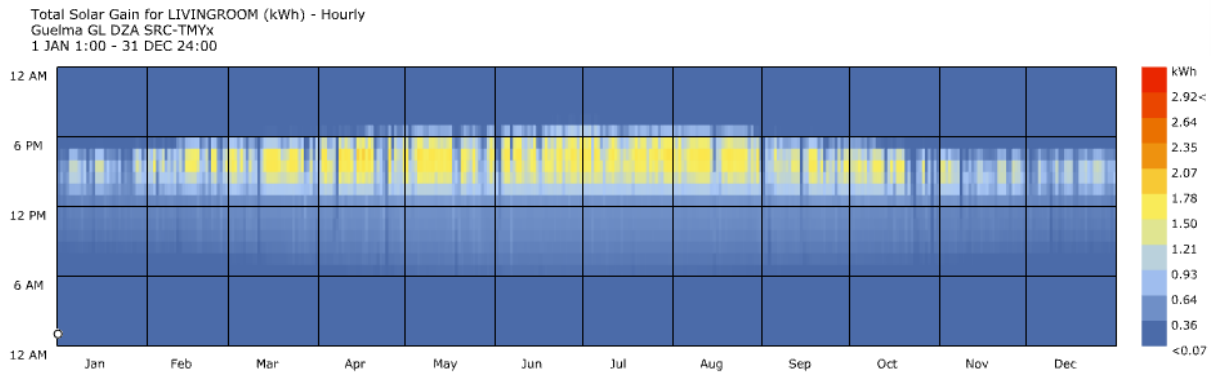
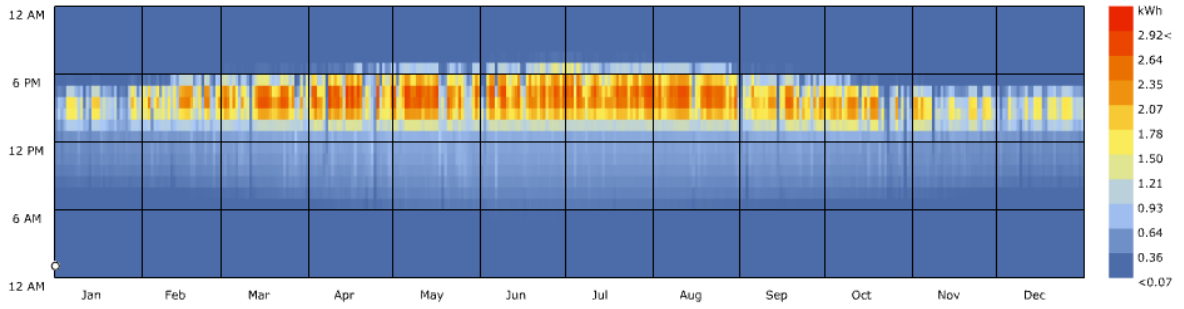
Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

L'orientation Ouest- 90°-



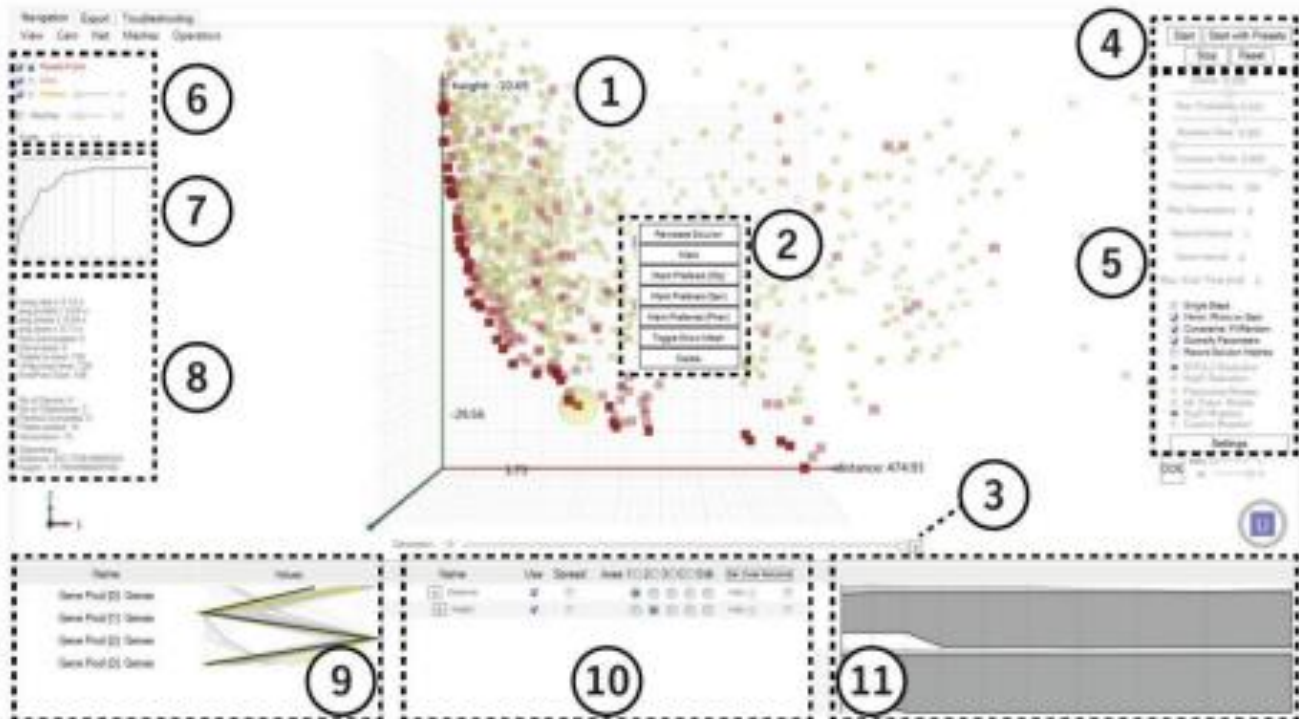
Total Solar Gain for LIVINGROOM (kWh) - Hourly
Guelma GL DZA SRC-TMYx
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00

Annexes



ANNEXE C

Interface « Octopus » : plug in d'optimisation multi objectif



1- Main viewport / viewable. Opaque cubes indicate the non-dominated Pareto-front, transparent 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.